



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ANALÝZA TEPLOTNÍHO CHOVÁNÍ PROCESU ADITIVNÍ VÝROBY MIKRO-PRUTOVÝCH STRUKTUR Z MATERIÁLU ALSI10MG

ANALYSIS OF THERMAL BEHAVIOR FOCUSED ON ADDITIVE MANUFACTURING OF LATTICE
STRUCTURES FROM ALSI10MG

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Nosek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Jakub Nosek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza teplotního chování procesu aditivní výroby mikro–prutových struktur z materiálu AISi10Mg

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Použití procesních parametrů a skenovací strategie technologie Selective Laser Melting (SLM) je výrazně závislá na geometrii vyráběného dílu. V praxi se pro výrobu většiny dílů využívají univerzální procesní parametry pro daný materiál. V případě mikro–prutových struktur však tyto parametry vedou na výrobní defekty a tvarové imperfekce. Je tedy potřeba upravit procesní parametry pro výrobu mikro–prutových struktur tak, aby umožnily eliminovat výrobní vady. To je do značné míry možné realizovat softwarovou simulací, která umožní hlubší pochopení základních principů SLM, které byly pozorovány v průběhu vyhodnocování experimentálních dat.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum, Materiály s vnitřní architekturou strukturované pro aditivní technologie (ArMadit)

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je sestavení výpočtového modelu pro simulaci aditivní výroby mikro–prutových struktur, který umožní analyzovat termálních chování v rámci procesu Selective laser melting. Na základě simulace bude možné potlačit materiálové vady a tvarové imperfekce (např. porozita materiálu, změna tvaru, drsnost).

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešerše dostupné literatury se zaměřením na výrobu mikro–prutové struktury technologií SLM,
- softwarová analýza teplotního chování prutu při jeho výrobě,
- návrh experimentů, způsobů vyhodnocení a tvorba závěrů,
- publikace výsledků v časopise nebo konferenční publikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, roč. 628, s. 188–197. ISSN 0921-5093.

VRÁNA, Radek, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK, Libor PANTĚLEJEV, Jan JAROŠ, Tomáš ZIKMUND a Jozef KAISER. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 9, s. 1763. ISSN 1996-1944.

PEI, Wei, Wei ZHENGYING, Chen ZHEN, Li JUNFENG, Zhang SHUZHE a Du JUN. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2017, roč. 123, č. 8, s. 1–15. ISSN 14320630.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Pomocí aditivních technologií je možné vyrábět složité díly, které jsou konvenčními technologiemi nevyrobitelné. Jedním z typických příkladů jsou mikro-prutové struktury. Výroba těchto struktur je poměrně náročná a odlišuje se od výroby objemových dílů. Cílem diplomové práce je popsání teplotního chování při výrobě prutů technologií SLM. Pomocí numerické simulace, která reflektuje procesní parametry stroje, bylo možné analyzovat teplotní chování kolmých i skloněných prutů a detailně analyzovat jejich proces výroby. U prutů se ukazuje závislost průměru prutu na rozšiřování návaru vlivem přehřívání materiálu od předchozího skenování laserem. Finální geometrie skloněných prutů je tvořena napříč více vrstev. V práci je dále popsán vliv začátku a konce trajektorie laseru, který může ovlivnit kvalitu povrchu prutů.

KLÍČOVÁ SLOVA

SLM, pruty, simulace, mikro-prutové struktury

ABSTRACT

Using Additive manufacturing it is possible to manufacture complicated components, that cannot be manufactured using conventional methods. The typical example is the lattice structure. Fabrication of these structures is complicated, and it is different from the fabrication of bulk parts. Using numerical simulation which can reflect process parameters it is possible to analyze the thermal behaviour of vertical and inclined struts fabrication. Results show that the diameter of struts influences weld track width. This influence is caused by preheating the powder material by previous scanning paths. The final geometry of inclined struts is made in more scanning layers. In this work influence of the start and endpoint of trajectory is described.

KEYWORDS

SLM, struts, simulation, lattice structures

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOSEK, Jakub. *Analýza teplotního chování procesu aditivní výroby mikro-prutových struktur z materiálu AlSi10Mg*. Brno, 2021, 71 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a cenné rady. Také bych chtěl poděkovat Ing. Radku Vránovi, Ph.D. za odborné konzultace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala. Za podporu vděčím i firmě Liturella z.s.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Chyby při výrobě dílů technologií SLM	14
2.2	Zkoumání jednotlivých návarů	17
2.3	Pruty a mikro-prutové struktury	20
2.4	Simulace procesu SLM	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	31
3.1	Analýza problému	31
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	31
3.3	Podstata a cíle práce	34
4	MATERIÁL A METODY	35
4.1	Postup řešení	35
4.2	Použitá zařízení a technologie	36
4.2.1	Zařízení SLM 280HL	36
4.2.2	Práškový materiál AlSi10Mg	37
4.2.3	Keyence VHX-6000	37
4.2.4	Metalografické výbrusy	37
4.2.5	Software	38
4.3	Sestavení simulace	38
4.3.1	Okrajové podmínky	39
4.3.2	Materiálový model	40
4.3.3	Geometrie	40
4.3.4	Výpočtová síť	41
4.3.5	Zjednodušení simulace	41
4.4	Návrh experimentálních testů	41
4.4.1	Začátek/konec trajektorie	41
4.4.2	Konstantní překryv návarů	42
4.5	Vyhodnocování	42
4.5.1	Simulace	42
4.5.2	Experimenty	43

5	VÝSLEDKY	44
5.1	Návary	44
5.2	Kolmé pruty	45
5.3	Skloněné pruty	48
5.4	Začátek/konec trajektorie	51
5.5	Konstantní překryv návarů	52
6	DISKUZE	54
6.1	Návary	54
6.2	Kolmé pruty	55
6.3	Skloněné pruty	56
6.4	Začátek/konec trajektorie	57
6.5	Konstantní překryv návarů	58
7	ZÁVĚR	59
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	63
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	64
11	SEZNAM TABULEK	67
12	SEZNAM PŘÍLOH	68

1 ÚVOD

Letecký průmysl vyprodukuje přes bilion tun CO₂ ročně. Toto množství představuje cca 3 % z celkové světové produkce emisí [1]. Jedná se o nezanedbatelné množství, které navíc každým rokem roste. Snížením hmotnosti letounu o 1 kg je možné snížit emise až o 25 tun CO₂ za životnost letounu [2]. Snížení hmotnosti letounů lze dosáhnout více způsoby. Stále více se využívá materiálů z uhlíkových vláken, které jsou velmi lehké. Dalším možným způsobem je využití 3D tištěných součástí [3]. Při použití součástí vyrobených kovovým 3D tiskem je možné ušetřit až 55 % hmotnosti a při výrobě ušetřit až 90 % materiálu. Navíc není nutné tyto díly skladovat, ale je možné je vyrábět podle aktuálních požadavků třeba přímo na letišti. Dalšího odlehčení 3D tištěných součástí by bylo možné dosáhnout používáním mikro-prutových struktur.

Výroba dílu s mikro-prutovými strukturami by byla konvenčními metodami nemožná. Použitím technologie Selective Laser Melting (SLM), při které je kovový prášek roztaven pomocí výkonného laseru, je možné takové struktury vyrábět. Při výrobě touto technologií se využívá přednastavených procesních parametrů, které jsou primárně navrženy pro objemové díly, nikoliv pro mikro-prutové struktury, nebo jejich kombinaci. Pouze malá změna procesních parametrů (např. výkonu laseru, skenovací rychlost, skenovací strategie...) může způsobit imperfekce ve vyráběných dílech [4]. Jednou z možných vad, které mohou při výrobě technologií SLM vzniknout, je porozita. I malá porozita může zásadně ovlivnit mechanické vlastnosti tenkých prutů ve struktuře, což může zapříčinit nežádoucí mechanické či tepelné chování struktury.

Pro lepší analyzování procesu výroby prutů v mikro-prutových strukturách bude sestavena tepelná simulace výroby prutu, díky které bude možné analyzovat teplotní chování a rozdíly při výrobě skloněných a vertikálních prutů. Na základě poznatků z této simulace bude možné nadále upravovat procesní parametry výroby pro mikro-prutové struktury tak, aby je bylo možné vyrábět s lepšími mechanickými vlastnostmi a dobrou opakovatelností.



Obr. 1-1 Mezichladič s mikro-prutovou strukturou pro studentskou formuli [5]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V přehledu současného stavu poznání jsou představeny strukturální a technologické vady, které se při výrobě technologií SLM vyskytují. Další podkapitola se zabývá návary, které jsou základem při výrobě touto technologií. Dále je v rešerši analyzována výroba prutů, ze kterých se mikro-prutové struktury skládají. V poslední řadě jsou v této práci popsány modely, které simulují proces výroby kovového 3D tisku. Modely, které se v literatuře objevují popisují pouze rovné návary. Nevyskytují se zde návary s kruhovou trajektorií, která by lépe reflektovala situaci při výrobě prutů. Právě návary s kruhovou trajektorií a popisem teplotního chování se tato práce zabývá. Materiálem, který je v této práci používán je hliníková slitina AlSi10Mg, a proto i většina vědeckých prací zařazených v rešerši se zabývají stejným materiálem.

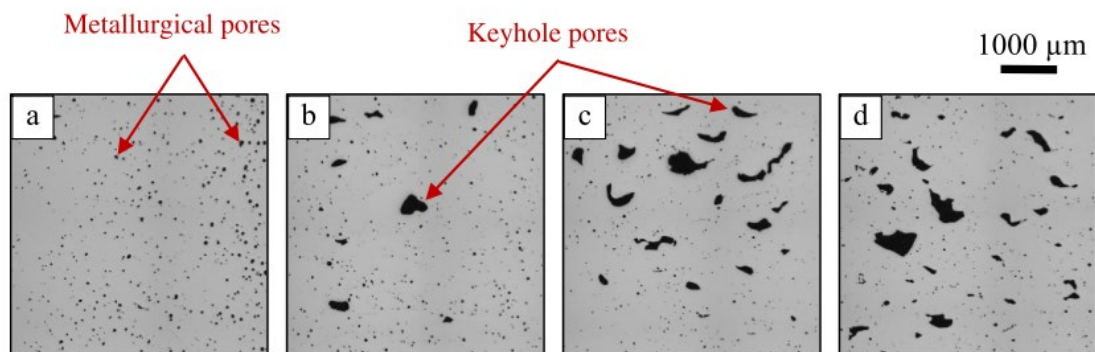
2.1 Chyby při výrobě dílů technologií SLM

Aboukhair [6] se zabýval výrobou dílů technologií SLM z hliníkové slitiny AlSi10Mg. V jejich práci byly popsány defekty, které se při výrobě z těchto slitin nejvíce projevují.

Podle Aboukhaira je nejběžnější chybou porozita. U dílů vyrobených z hliníkových slitin je tvorba pórů rozsáhlejší než u jiných materiálů. To může být podle Buchbindera et al. [7] způsobeno tím, že hliník má menší absorptivitu energie na vlnové délce laseru, což ovlivňuje efektivitu tavení při procesu SLM. Póry můžeme dělit na dva typy. Prvním typem jsou póry malé a kulaté, které vznikají kvůli vlhkosti prášku. Póry jsou tedy způsobeny vodíkem, který je během procesu tavení a tuhnutí v materiálu uvězněn.

Druhý typ póru je větší a má nepravidelný tvar. Běžně se nachází mezi více vrstvami. Tento druh póru vzniká v blízkosti neroztaveného prášku. Je možné, že jejich vznik je zapříčiněn přítomností oxidů, které se tvoří během tavení a tuhnutí materiálu.

Rozdílné typy pórů vznikají v závislosti na velikosti skenovací rychlosti při výrobě. Při vyšších skenovacích rychlostech se tvoří větší a nepravidelné póry, a při menších rychlostech malé a kulaté póry. Množství a tvar pórů je však ovlivněn i ostatními procesními parametry.

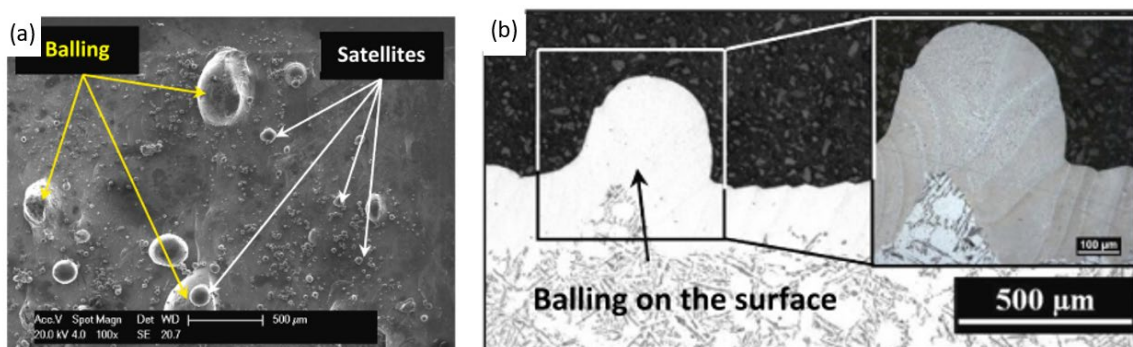


Obr. 2-1 Změna velikostí pórů v závislosti na skenovací rychlosti: (a) nejnižší skenovací rychlost; (b-d) rostoucí skenovací rychlost [6]

Dalším defektem, který Aboulkhair popsal, byly trhliny v materiálu, které jsou zapříčiněny strmou křivkou chladnutí. Trhliny vznikají mezi hranicemi zrn kvůli smršťování materiálu a napětí vzniklým od tepelných gradientů. Jejich vznik může být umocněn i přítomností pórů, které byly popsány výše. Zbytkového napětí v dílech může také zapříčiňovat vznik trhlin.

Při tavení prášku laserem může také dojít k rozstříkování taveniny. Drobné kapky materiálu během letu zoxidují, což komplikuje jejich znovu roztavení při tvorbě dalších vrstev. Tyto rozstříknuté kapky mohou dále zapříčiňovat horší povrchovou drsnost a také nárůst porozity. Velikost oblasti zasažené tímto rozstříkem je dána opět procesními parametry výroby a se zvyšující se vnesenou energií se zvětšuje.

Na povrchu dílů vyráběných technologií SLM se objevuje více defektů. Jsou to otevřené póry a povrchová drsnost, která bývá několikanásobně vyšší než u dílů obráběných konvenčními technologiemi. Tato drsnost je způsobena převážně rozstříkem materiálu, nebo natavenými částicemi prášku. Aboulkhair popisuje vady na povrchu jako „balling“ a vznik „satelitů“. „Balling“ efekt způsobuje neuniformní vrstvy. V nepravidelném zdrsněném povrchu mohou vznikat kapsy s neroztaveným práškem. Tento prášek je v materiálu uvězněn, není protaven a tím pádem vzniká v materiálu porozita. „Satelity“ představují nalepené částice prášku na povrchu.



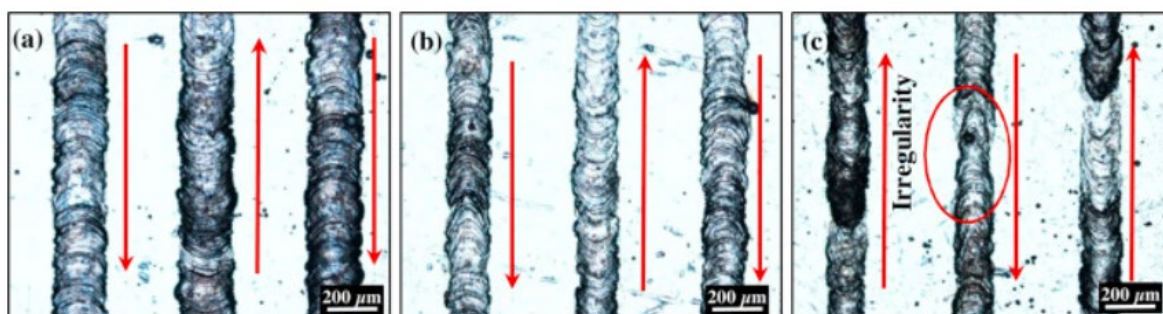
Obr. 2-2 (a) „Balling“ a „satelity“; (b) řez povrchu s výrazným „balling“ efektem [6]

Aboulkhair zmiňuje i rozměrovou nepřesnost, která vzniká vlivem zbytkového napětí, které je zapříčiněno rychlým ohříváním a ochlazováním materiálu. Tato rozměrová nepřesnost se může projevit už při výrobě, ale i po dokončení výroby při odstraňování z tiskové podložky. Výrazným a častým jevem může být oddělování krajů jednotlivých vrstev. Tyto vady jsou zapříčiněny tím, že nová vrstva není dobře spojena s předešlou. Oddělování dílu od tiskové podložky může být způsobeno použitím různých materiálů tiskové podložky a kovového prášku, ze kterého je díl vyráběn.

Defekty při výrobě se zabýval i Galy [8], který také označil porozitu jako nejzávažnější defekt při výrobě hliníkových dílů technologií SLM. Její vznik přisuzuje vlhkosti prášku, kterou je možné odstranit vysoušením před výrobou. Druhým důvodem je odpařování legujících prvků a posledním důvodem je absorpce plynů z okolní atmosféry (např. N, O, H).

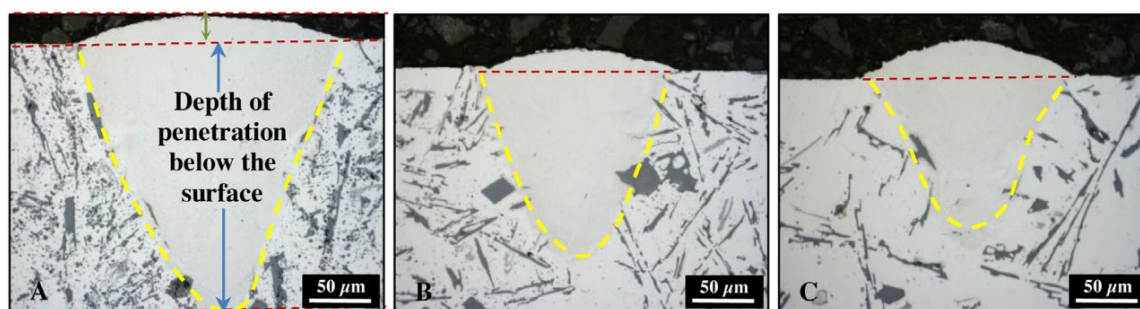
2.2 Zkoumání jednotlivých návarů

Tvorba návarů je jedním ze základních zkoušek při optimalizaci procesních parametrů. Jednotlivými návarů z materiálu AlSi10Mg se zabýval Aboulkhair v další práci [9]. Pro tyto testy se na základě předešlých prací rozhodl použít výkon laseru 100 W, skenovací rychlost v rozsahu 250–750 mm/s, kterou zvětšoval po krocích o velikosti 250 mm/s. Výšku vrstvy, při které návarů vyráběl byla 40 μm .



Obr. 2-3 Jednotlivé návarů vyráběné se skenovací rychlostí: (a) 250 mm/s; (b) 500 mm/s; (c) 750 mm/s [9]

Zjistil, že se návarů s rostoucí skenovací rychlostí zužují, což u rychlosti 750 mm/s vedlo až k nerovnoměrné šířce návaru (Obr. 2-3 (c)). Kromě šířky se mění i výška návaru. Pro lepší popis rozdělil návar na dvě části. Návar, který se nachází nad rovinou tiskové podložky a průvar, který představuje hloubku průvaru do tiskové podložky. Ukázalo se, že při zvyšování rychlosti roste výška návaru, ale na druhou stranu se snižovala hloubka průvaru. Nedostatečný průvar by mohl způsobovat nedokonalé spojení vrstev, což by mohlo zapříčinit delaminaci vrstev.

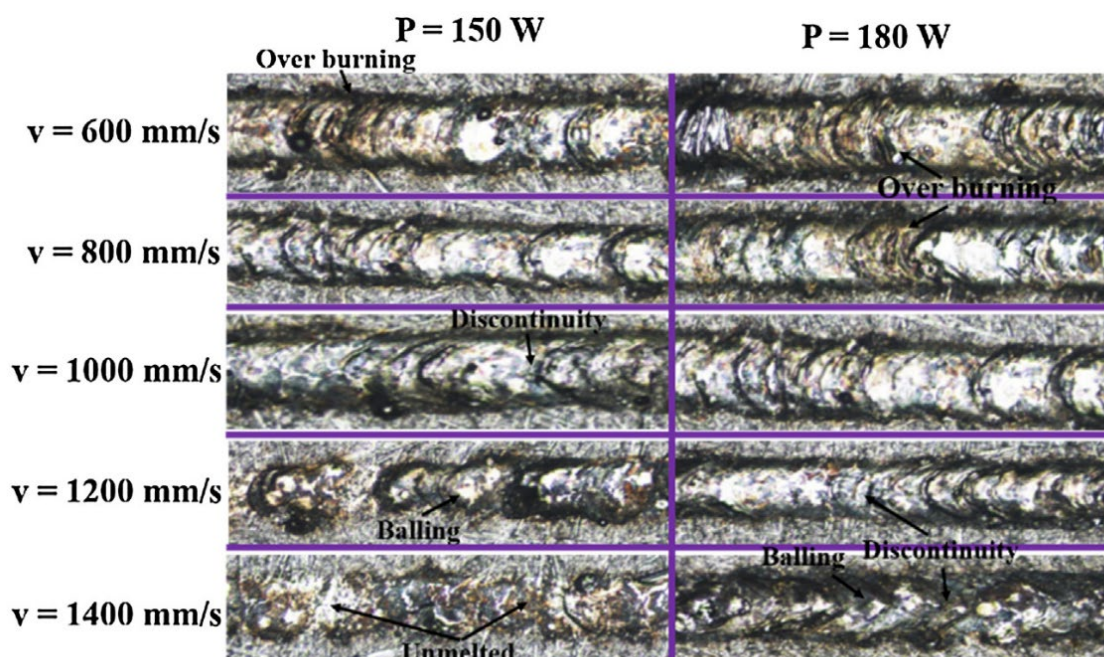


Obr. 2-4 Vyleštěný řez návarem, který ukazuje návar při skenovací rychlosti: (a) 250 mm/s a hloubkou průvaru (modře), výškou návaru (zeleně); (b) 500 mm/s; (c) 750 mm/s [9]

Na **Obr. 2-4** lze vidět, že průvar je daleko větší než návar. Podle Aboulkhaira je návar nižší díky dobré smáčivosti materiálu. To znamená, že se sníží výška, ale zvětší se šířka. Průměr laserového paprsku je přibližně 20 μm , kdežto šířka návaru je přibližně 150 μm . Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben smáčivostí materiálu a vedením tepla v materiálu. Dále k tomuto jevu přispívá rozdíl objemu materiálu v práškovém stavu, oproti tekutému a tuhém stavu. A to z důvodu uvězněného vzduchu mezi částicemi prášku, které jsou během tavení vytěsněny.

Wei [10] se také zabýval tvorbou jednotlivých návarů. Vytvořil sérii testů za účelem popsání vlivu skenovací rychlosti a výkonu laseru na povrch a morfologii návarů. Pro jejich testy použil výkon laseru 150–180 W, skenovací rychlost 600–1400 mm/s a výšku vrstvy 40 μm . Během procesu výroby byla komora zaplavena argonem, aby se předešlo reakci hliníku a hořčíku s kyslíkem.

Výsledky ukazují, že skenovací rychlost i výkon laseru mají značný vliv na stabilitu povrchu návaru. Při nízkých skenovacích rychlostech dochází k přehřívání materiálu a může dojít až k jeho odpaření. Nadměrný přísun energie vede ke zhoršení povrchu návaru. Při zvyšování skenovací rychlosti nad kritickou hodnotu, kdy energie nestačí k roztavení práškových částic, dochází k častějšímu „balling“ efektu. Prodloužení délky návaru v tekutém stavu se projevila jeho nestabilita, která vedla k jeho přerušování. Na **Obr. 2-5** lze vidět, že při zvyšování skenovací rychlosti docházelo k nestabilnímu tvoření povrchu, na kterém se nacházely neroztavené částice.



Obr. 2-5 Návary vytvářené s rozdílnými parametry [10]

Aby byl schopen popsat efekt skenovací rychlosti i výkonu laseru najednou, vytvořil veličinu *LED*, která představuje liniovou hustotu energie, která se dá vypočítat z rovnice (1).

$$LED = P/v \quad (1)$$

Kde P je výkon laseru a v je skenovací rychlost. Podle Weie lze dosáhnout návarů s dobrým povrchem při hodnotě $LED = 1,5-1,875 \text{ J/cm}$. Při dodržení těchto hodnot je možné vyrábět nepřerušované návary s relativně hladkým povrchem, což by mohlo vést ke snížení porozity.

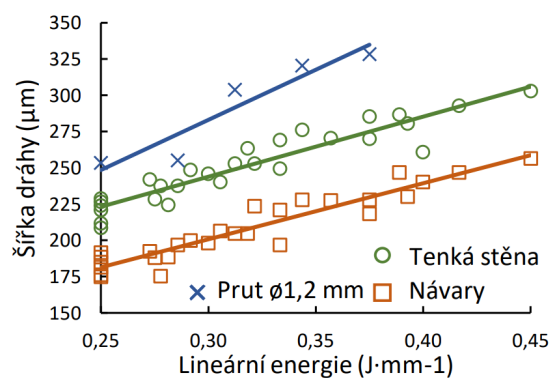
Vrána [11] také zjišťoval vliv procesních parametrů na rozměry návarů. Pro vzájemné porovnání opět použil lineární energii vypočítanou podle rovnice (1). Výsledkem jeho práce je kompletní tabulka **Tab. 2-1**, která udává průměrnou šířku návaru pro různou lineární energii.

Tab. 2-1 Průměrná šířka návarů (barevně), lineární energie (bíle) [11]

w (μm)		Laser speed (mm/s)																				
E _{lin} (J/mm)		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000		
Laser power (W)	175	354	310	261	290	246	221	214	199	223												
		0.88	0.58	0.44	0.35	0.29	0.25	0.22	0.19	0.18												
	200	401	343	303	286	317	271	240	210	201	210											
		1.00	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25	0.22	0.20	0.18											
	225	374	309	271	255	214	203	199	174	163	145											
		0.75	0.56	0.45	0.38	0.32	0.28	0.25	0.23	0.20	0.19											
	250	344	314	270	253	233	223	201	180	161	163	159										
		0.83	0.63	0.50	0.42	0.36	0.31	0.28	0.25	0.23	0.21	0.19										
	275	380	346	332	289	262	277	235	227	221	201	149										
		0.69	0.55	0.46	0.39	0.34	0.31	0.28	0.25	0.23	0.21	0.20										
	300	305	325	308	267	260	232	223	202	211	193	183	192	186								
		0.75	0.60	0.50	0.43	0.38	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.21	0.20	0.19								
	325	333	316	275	274	262	258	207	199	200	196	189	176	145								
		0.65	0.54	0.46	0.41	0.36	0.33	0.30	0.27	0.25	0.23	0.22	0.20	0.19								
	350	358	336	328	317	300	261	259	205	200	199	209	205	352								
		0.70	0.58	0.50	0.44	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.19							
375	317	308	201	372	370	272	267	250	287	230	237	239	223	217								
	0.63	0.54	0.47	0.42	0.38	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.20								
400	357	332	358	301	273	234	236	223	214	206	223	216	212	201	210							
	0.67	0.57	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.22	0.21	0.20							

Vrána dále uvádí, že hodnota lineární energie pro kontinuální návar je přibližně $0,25 \text{ J/mm}$. Návary vyráběné s nižší lineární energií byly nekontinuální.

Jaroš [12] porovnával šířku návaru vyráběného přímo na tiskové podložce, uvnitř prutu a na tenké stěně. Ukázalo se, že pro různé situace jsou rozměry návarů rozdílné, avšak zvětšování šířky návaru s rostoucí lineární energií zůstává stejné ve všech případech.



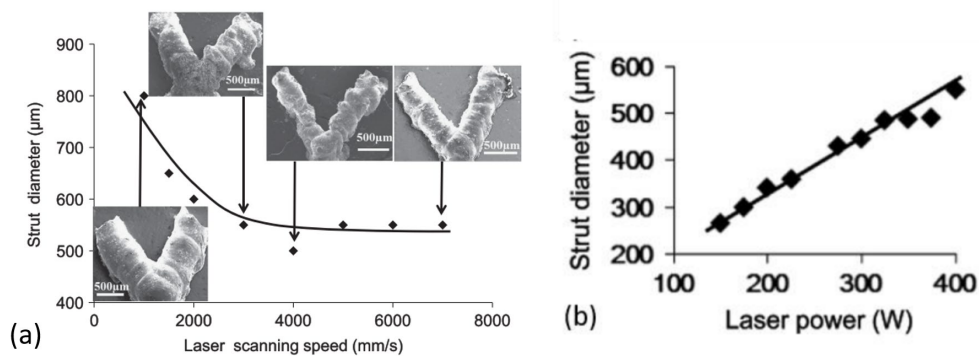
Obr. 2-6 Závislost šířky dráhy na lineární energii pro rozdílné vertikální vzorky [12]

2.3 Pruty a mikro-prutové struktury

Aby mohla být dobře vyrobena mikro-prutová struktura, je nutné vyrábět kvalitně samotné pruty. Qui [13] se zabýval vlivem procesních parametrů na průměr prutů vyráběných z AlSi10Mg. Pro svůj výzkum zvolil pruty s nominálním průměrem 300 μm. V závislosti na změně procesních parametrů se skutečný průměr prutů měnil od 260–500 μm. Nejdříve nechal skenovací rychlost nastavenou na 7000 mm/s a výkon laseru zvětšoval od 150–400 W. V testu s konstantním výkonem nastaveným na 400 W měnil skenovací rychlost od 100–7000 mm/s.

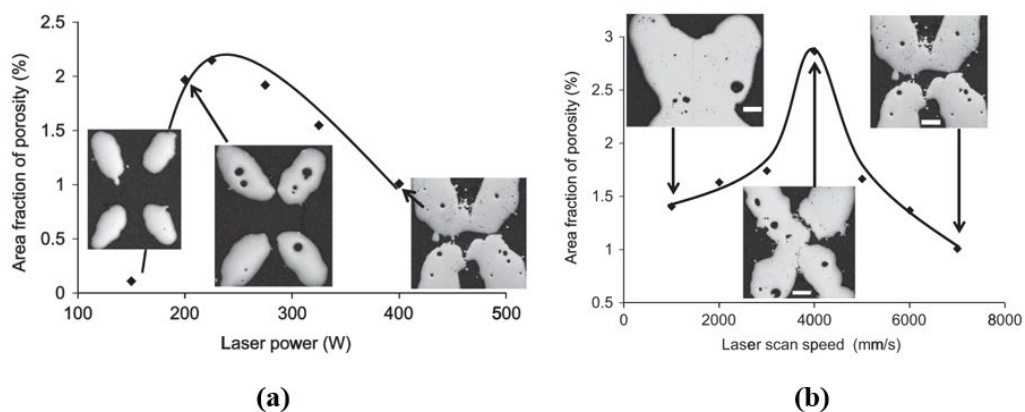
Při konstantní skenovací rychlosti zjistil, že se průměr s rostoucím výkonem výrazně zvětšoval, což bylo způsobeno vysokou energií, která byla do materiálu vnesena. Díky tomu byly nataveny okolní částice prášku, které se přilepily na tělo prutu, což zapříčinilo i nárůst drsnosti.

S konstantním výkonem byl průměr výrazně větší při nižších rychlostech. Se zvyšující se skenovací rychlostí se průměr prutu zmenšoval. Pro rychlosti vyšší jak 4000 mm/s se průměr prutu ustálil, a dále neklesal.



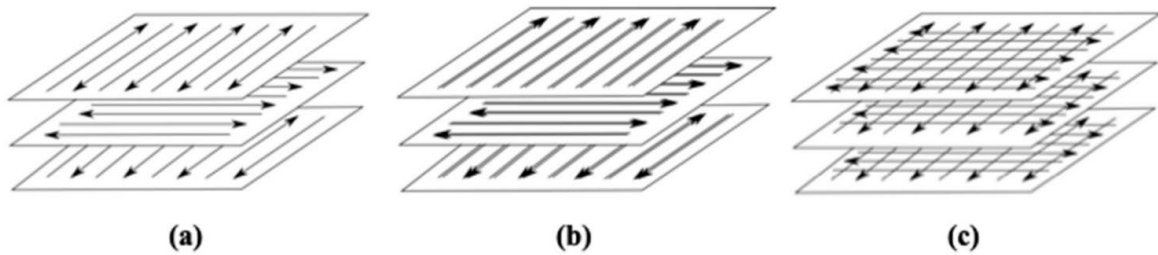
Obr. 2-7 (a) Graf závislosti průměru prutu na výkon laseru (b) průměr prutu v závislosti na výkonu laseru [13]

Kromě změny průměru prutů pozoroval Quiu i změnu porozity v mikro-prutových strukturách. Procesní parametry ponechal stejné jako při zkoumání prutů. Zjistil, že při zvyšování výkonu laseru i skenovací rychlosti porozita roste. Při hodnotě 250 W a rychlosti 4000 mm/s byla porozita maximální. S dalším zvyšováním skenovací rychlosti porozita opět klesala.



Obr. 2-8 Graf závislosti (a) porozity na výkonu laseru; (b) porozity na skenovací rychlosti [13]

Pro výrobu prutů a mikro-prutových struktur je nutné vhodně zvolit i skenovací strategii, která udává podle jakého „vzoru“ bude laser prášek spojovat. Vlivem skenovacích strategií na porozitu se zabýval i Larimian [14]. Použil nerezový materiál 316L, výkon laseru 100 W, výšku vrstvy 50 μm a vzdálenost jednotlivých drah 0,114 mm. Zkušební vzorky nebyly pruty, ale plné kvádry o rozměrech 80 mm \times 10 mm \times 6 mm. Dá se předpokládat, že pro hliníkový materiál bude chování v závislosti na skenovací strategii podobné, protože se mění množství energie v závislosti na počtu opakovaných přejetí dráhy laserem.



Obr. 2-9 Skenovací strategie: (a) střídavé přejíždění laseru, s jedním přejetím; (b) střídavé přejetí laseru, vícenásobné přejetí laseru; (c) křížené přejíždění s jedním přejetím dráhy [14]

Použil tři různé skenovací strategie, přičemž první dvě vycházely ze stejného vzoru, ale lišily se počtem přejetí jednotlivých drah. Nejmenší obsah pórů se objevil u skenovací strategie na **Obr. 2-9 (a)**, pravděpodobně díky lepšímu chladnutí. U této skenovací strategie byly pozorovány nejlepší mechanické vlastnosti, oproti ostatním skenovacím strategiím.

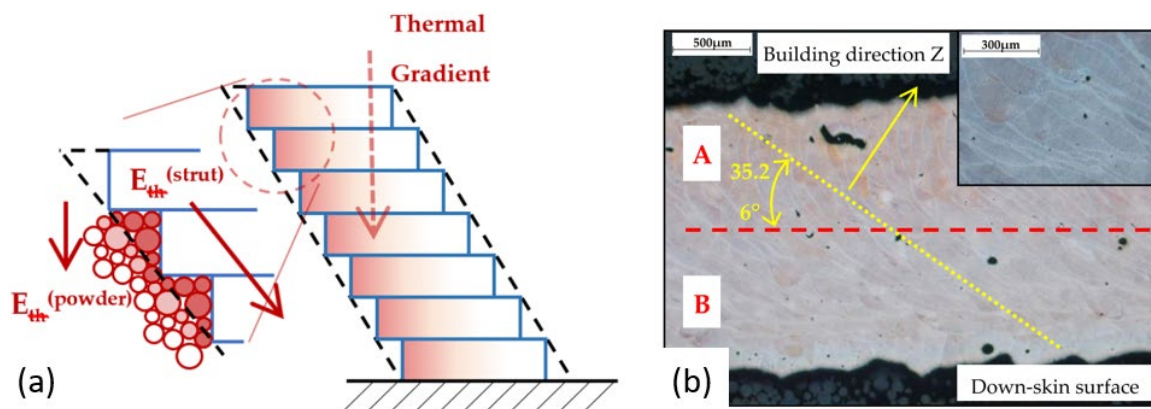
Vrána [11] udělal výzkum na použití tzv. „**contour**“ strategie pro výrobu prutů. Prut vyrábění touto skenovací strategií je vyplňován soustřednými kružnicemi, pokud je kolmý. Skloněné pruty jsou tvořeny soustřednými elipsami (**Obr. 2-10**).

Strategy/d (mm)	0.5 mm	0.6 mm	0.7 mm	0.8 mm	0.9 mm
Contour					
Standard					

Obr. 2-10 Porovnání standartní skenovací strategie s contour strategií [11]

Podle Vrány [11] je contour strategie pro výroby mikro-prutových struktur perspektivní. Při překryvu jednotlivých kontur 25 % je možné dosáhnout minimální porozity.

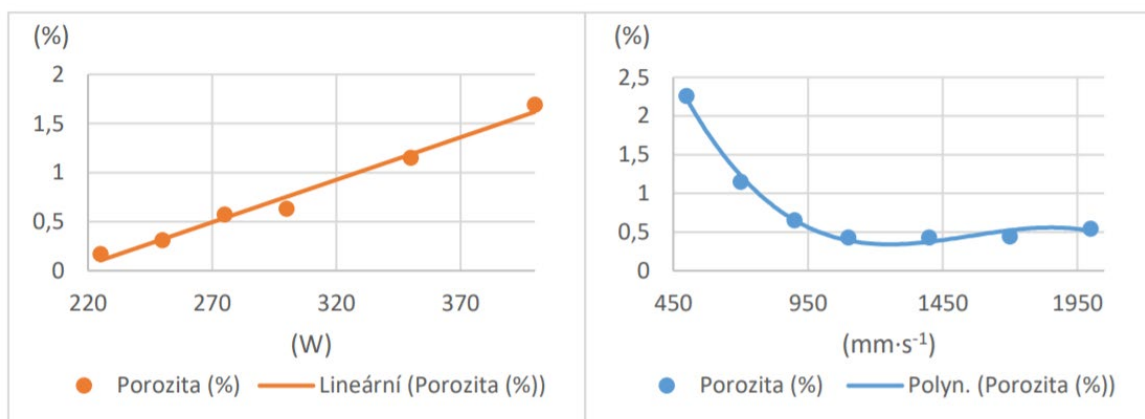
U skloněných prutů výrazně narůstá drsnost ze spodní strany prutu. To je podle Vrány způsobeno vlivem toku energie, který je zprostředkován z prutu do okolních částic prášku pouze prostřednictvím bodového kontaktu. Vlivem toho jsou částice přehřáté, natavené a spojené s prutem. Díky tomu dochází k nárůstu drsnosti a také k nárůstu průměru prutu.



Obr. 2-11 Schéma přenosu energie u skloněného prutu, rozdílná vnitřní struktura skloněného prutu [11]

U skloněných prutů dále Vrána popisuje rozdílnou vnitřní strukturu. Prut pro lepší popis rozděluje na horní a spodní stranu. V horní straně prutu jsou ostré póry, které jsou tvořeny nedostatkem energie pro kvalitní spečení prášku. Ve spodní straně se vyskytují malé kulaté póry, které vznikají v důsledku vysoké energie. Dále je na obrázku možné vidět, že i vnitřní struktura je v horní a spodní straně prutu rozdílná (Příloha 1).

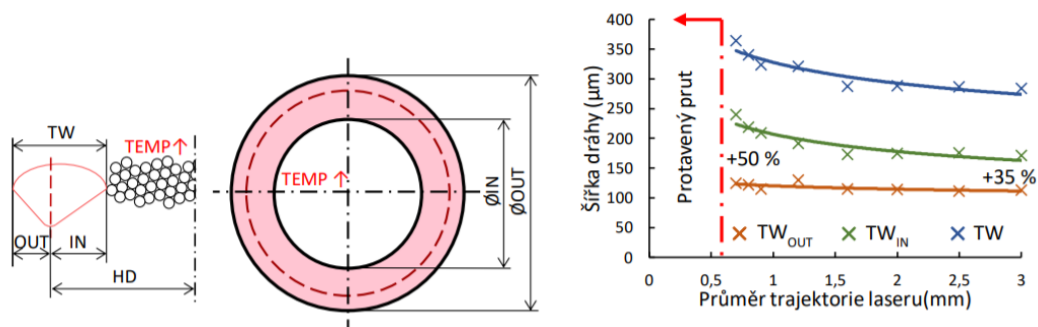
Jaroš [15] se ve své bakalářské práci zabýval optimalizací procesní parametrů pro výrobu mikro-prutových struktur z materiálu AlSi10Mg. Předmětem jeho zkoumání byly pruty vyráběné pomocí contour strategie se sklonem 90° a $35,26^\circ$. Ukázalo se, že porozita roste s rostoucím výkonem laseru a klesá s rostoucí skenovací rychlostí.



Obr. 2-12 (a) Závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 700 mm/s; (b) závislost porozity na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W [15]

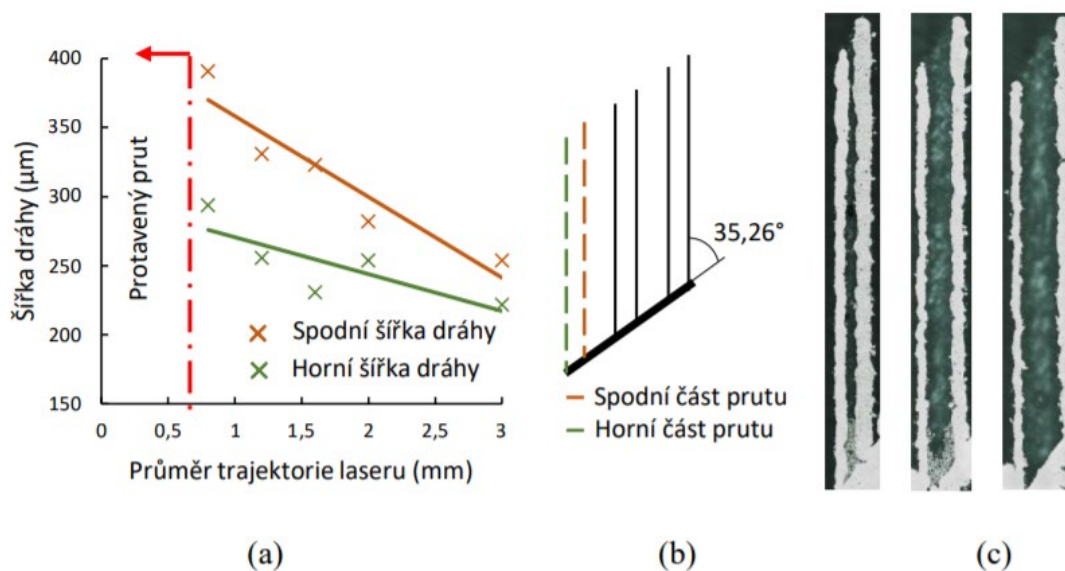
Při vyhodnocování drsnosti se ukázalo, že u skloněných prutů byla drsnost větší. Bylo zjištěno, že s rostoucím výkonem drsnost narůstá a s rostoucí skenovací rychlostí naopak klesá. Výsledkem bylo okno vhodných parametrů, které umožňovalo vyrábět pruty s relativně nízkou drsností a nízkou porozitou. Vhodné parametry byly 225 W až 275 W pro výkon laseru a 1400 mm/s až 2000 mm/s pro skenovací rychlost.

Jaroš na svou bakalářskou práci navázal v diplomové práci [12], kde dále zkoumal tvorbu prutů a vhodné parametry pro jejich výrobu. Ve své práci rozdělil návar v prutu na vnější a vnitřní z toho důvodu, že návar byl při tvorbě prutu nesymetrický. Tato nesymetrie se zvětšovala při použití prutů s menšími průměry. U dutého prutu vyráběném výkonem laseru 275 W a skenovací rychlostí 800 mm/s o průměru 0,7 mm byl rozdíl vnější a vnitřní dráhy až 50 %. U prutu o průměru 3 mm byl rozdíl mezi vnitřní a vnější stranou návaru pouze 35 %. Rozdíly mezi vnitřní a vnější stranou jsou pravděpodobně zapříčiněny přehřátím prášku uvnitř prutu.



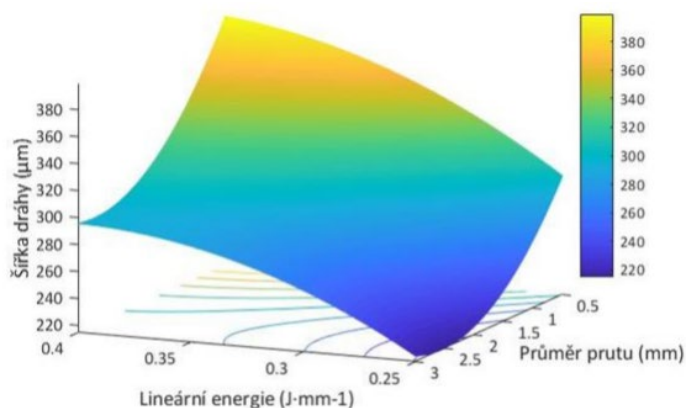
Obr. 2-13 (a) Schéma rozdělení šířky návaru; (b) graf závislosti šířky dráhy na průměru prutu [12]

Nesymetrie návarů se objevuje i u skloněných prutů, kde se navíc liší spodní strany prutů od vrchních. Toto je pravděpodobně způsobeno rozdílným odvodem tepla. S rostoucím průměrem prutu se rozdíly šířek návarů zmenšují.



Obr. 2-14 (a) Rozdílná horní a spodní šířka dráhy u skloněných prutů 1T v závislosti na průměru trajektorie laseru; (b) schéma rozložení vzorku při snímání; (c) snímky prutových vzorků 1T s průměrem trajektorie laseru 0,8; 1,2; 1,6 mm [12]

Na základě experimentů sestavil Jaroš rovnici plochy, podle které je možné předpovědět šířku návaru v závislosti na průměru prutu a vstupní lineární energii. Na základě přepokládané šířky návaru je možné upravit procesní parametry tak, aby se pruty vyráběly bez defektů. Rovnice plochy je rozdílná pro kolmé a skloněné pruty, protože šířky návarů se u kolmých a skloněných prutů liší.



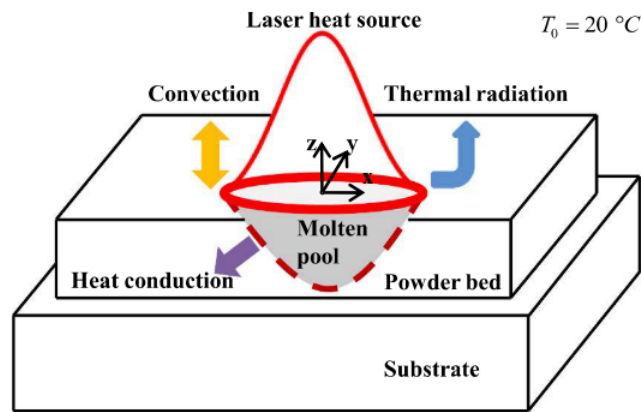
Obr. 2-15 Responce surface pro určení šířky dráhy u kolmých prutů [12]

2.4 Simulace procesu SLM

Pro simulaci procesu SLM již existují komerční softwary. [16, 17]. Pomocí těchto softwarů je možné například určit deformaci vzniklou tepelným namáháním součástí a další defekty. Simulace, které by popsaly teplotní chování prutů neexistují. Proto je nutné vytvořit vlastní simulaci, která umožní simulovat proces výroby tenkých prutů a zároveň popsat jejich teplotního chování při výrobě.

Yang [18] vytvořil simulaci pomocí metody konečných prvků, na základě které byl schopen popsat vliv změny skenovací rychlosti a výkonu laseru na termální chování hliníkového prášku AlSi10Mg. Tuto simulaci vytvářel za účelem efektivnější optimalizace procesních parametrů tisku bez nutnosti rozsáhlých experimentů. Aby mohl tuto simulaci provést, musel zavést několik zjednodušení:

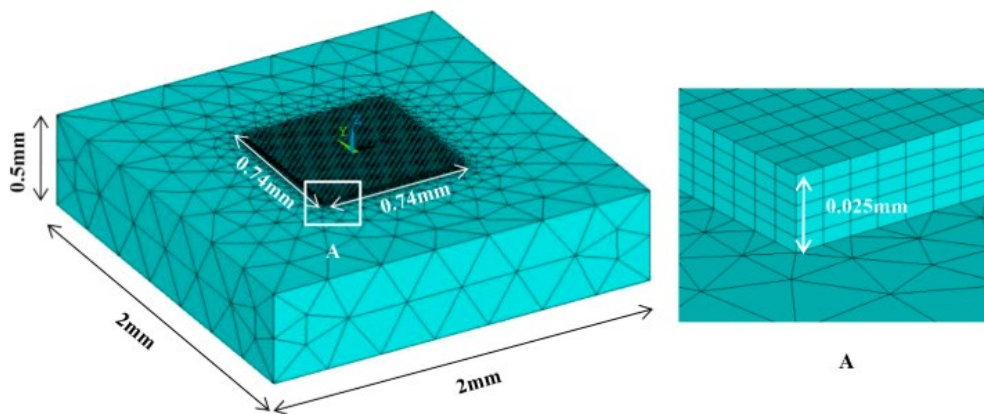
- kovový prášek je homogenní médium
- teplotní vodivost mezi práškem a vzduchem je konstantní (oproti teplotní vodivosti s práškem je zanedbatelná)
- tekutost taveniny se zanedbává
- zmenšení objemu materiálu vlivem vytěsnění vzduchu se zanedbává
- vypařování materiálu se zanedbává.



Obr. 2-16 Diagram okrajových podmínek simulace [18]

Jako počáteční podmínka byla zvolena okolní teplota $T=20\text{ °C}$. Dále termální okrajové podmínky byly pospány tak, že veškeré přijaté teplo se musí rovnat veškerému teplu odevzdanému. Během této simulace bylo použito dvojité chování materiálu. Rozdílné vlastnosti má materiál v práškovém a pevném stavu. V práškovém stavu je materiál do té doby, než přesáhne teplotu tavení. Poté, co materiál dosáhne teploty tavení, je ve stavu objemovém, ze kterého už nepřejde zpět do práškového stavu. Materiál v práškovém stavu má podle Stacyho [19] 2-3krát vyšší absorptivitu energie než materiál v tuhém stavu.

Pro simulaci v programu ANSYS byl použitý pohyblivý zdroj tepla řízený pomocí dvojdimenzionální tabulky, která obsahovala údaje o souřadnicích x a y .



Obr. 2-17 Rozložení 3D tělesa pro simulaci metodou konečných prvků [18]

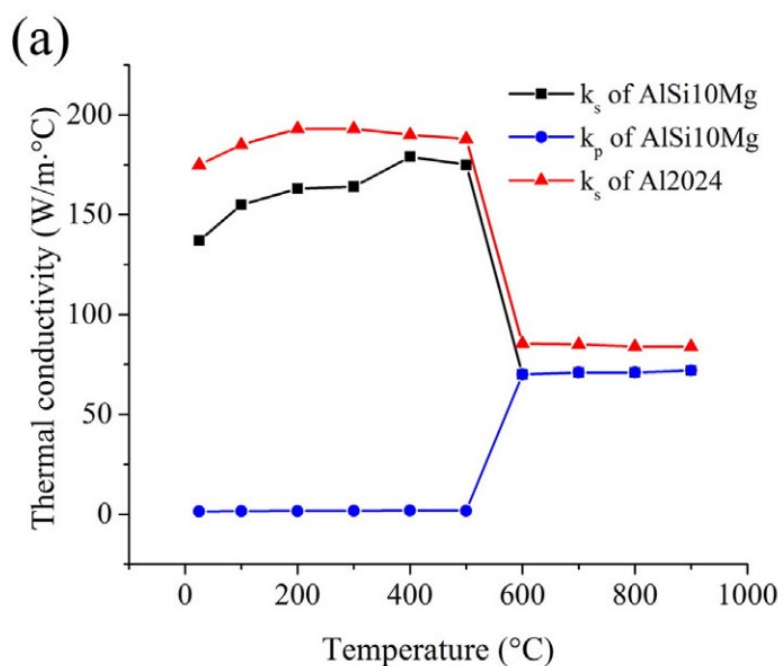
Na Obr. 2-17 je možné vidět rozměry modelu, na kterém byla prováděna simulace. Horní vrstva představuje vrstvu naneseného prášku. Výškou vrstvy 0,025 mm byla pokryta plocha o rozměrech 0,74 mm \times 0,74 mm. Použité elementy byly o velikosti 0,01 mm \times 0,01 mm \times 0,005 mm.

Simulace ukázala, že předcházející návary ovlivňují následující návary. První návar rozehřeje prášek kolem sebe. Při tvorbě následujícího návaru je potřeba menší energie pro roztavení, protože je prášek už přehřátý.

Při zvyšování výkonu laseru docházelo k růstu maximální dosažené teploty. Se zvyšováním výkonu rostla i délka taveniny (roztavená oblast za laserem). Při zkoumání vlivu skenovací rychlosti na tvorbu návarů zjistil, že při větší rychlosti je možné dosáhnout lepšího a rychlejšího chladnutí. Přílišné zvýšení rychlosti může zapříčinit nedostatečné roztavení vrstvy a následnou delaminaci.

Během zkoumání simulace zjistil, že čelo taveniny není kompletně roztavené a tím se mění vedení tepla, které zapříčiňuje vysoký teplotní gradient. Rozměry taveniny jsou více závislé na výkonu laseru než na skenovací rychlosti. Predikované výsledky byly v dobré shodě s experimentálními testy. Jako ideální parametry pro výrobu návaru s dobrými rozměry a minimálním „balling“ efektem označil výkon laseru 400 W a skenovací rychlost 800 mm/s.

Liu [20] vytvořil simulaci, která dokáže predikovat mikrostrukturu návaru při výrobě technologií SLM z materiálu AlSi10Mg. Podobně jako ve výše zmíněné studii použil dva stavy materiálu. Tedy materiál v práškovém stavu, který odpovídá stavu před roztavením a objemový materiál, který odpovídá stavu od roztavení, až po ztuhnutí.



Obr. 2-18 Graf tepelné vodivosti materiálu černě tiskové podložky, červeně v tuhém stavu, modře materiál v práškovém stavu [20]

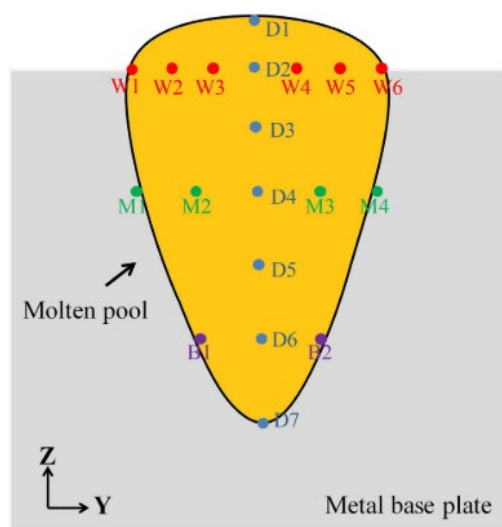
Při změně teploty a stavu materiálu se mění hustota podle rovnice:

$$\rho_p = (1 - \varphi) * \rho_s \quad (2)$$

Kde ρ_p je hustota práškového stavu, ρ_s je hustota tuhého stavu a φ je porozita prášku. Během procesu výroby má největší vliv z termálního hlediska přenos tepla vedením. Vliv radiace a konvekce je do výpočtů nutné také zavést, ale jejich vliv je výrazně menší.

Pro provedení simulace bylo nutné zjistit absorptivitu energie materiálu, tedy kolik procent energie je materiál schopen ze záření laseru přijmout. Hodnotu absorptivity energie získali na základě experimentu pomocí technologie „diffuse reflectance stereoscopy“ a zjistil, že je přibližně 60 %.

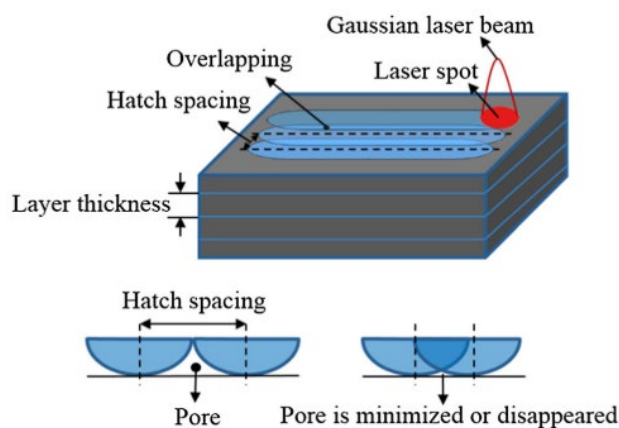
Na velikost zrn má zásadní vliv rychlost chladnutí. Na tvar zrn má vliv poměr teplotního gradientu a míra tuhnutí. Pro určení mikrostruktury rozdělil průřez návaru na několik bodů. V těchto bodech zjišťoval potřebné termální proměnné pro popis mikrostruktury (teplotní gradient, rychlost chladnutí a tuhnutí).



Obr. 2-19 Body v průřezu návaru, ve kterých byly zjišťovány termální proměnné [20]

Závěrem práce uvedl, že se mu podařilo předpovídat mikrostrukturu na základě vytvořené simulace s maximální chybou 8,6 %. Rychlost chladnutí a míra tuhnutí roste a teplotní gradient klesá se zvyšující se skenovací rychlostí. Rychlost chladnutí, teplotní gradient a míra chladnutí klesá s klesajícím výkonem laseru.

Wei [21] se také zabýval simulací návarů z materiálu AlSi10Mg. Na rozdíl od výše zmíněných článků uvažoval práškový materiál jako kuličky. Během jeho studie predikoval porozitu v návaru pomocí teploty. Popisuje, že vznik porozity je ovlivněn vzdáleností drah. Při velké vzdálenosti drah není prášek mezi drahami roztaven, a tím vzniká porozita mezi návarů. Zmenšování vzdálenosti drah vedlo ke kompletnímu roztavení prostoru mezi návarů, a k jeho zalití roztaveným kovem, což eliminovalo porozitu.



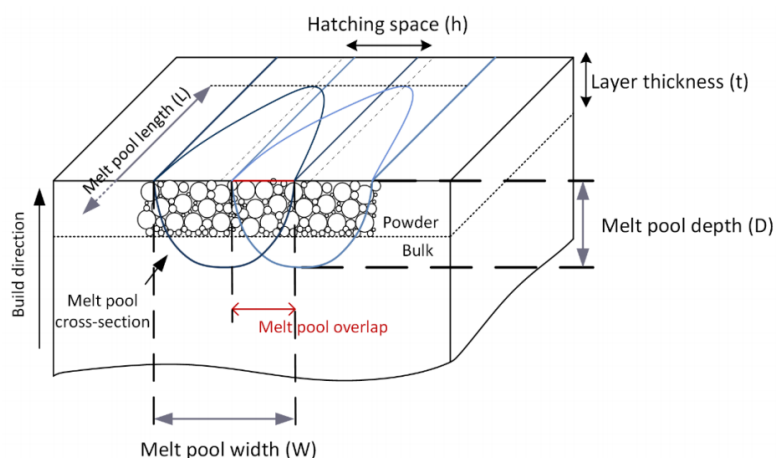
Obr. 2-20 Vliv vzdálenosti drah na tvorbu porozity [21]

Pro porovnávání vlivu procesních parametrů na tvorbu návarů použil plošnou energii AED ,

$$AED = \frac{P}{v \cdot HD} \quad (3)$$

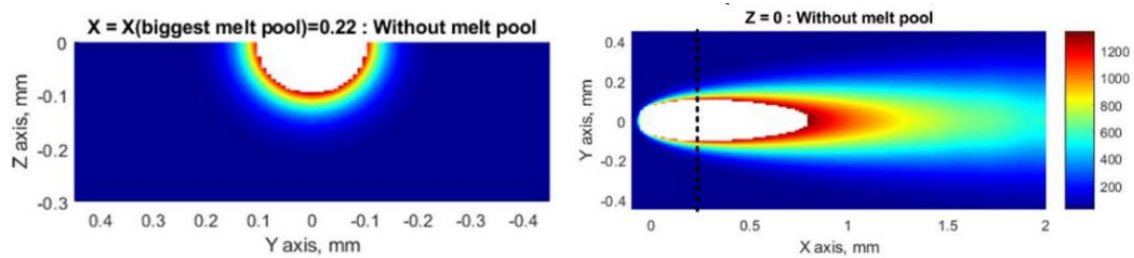
kde AED je plošná energie, P je výkon laseru, v skenovací rychlost a HD vzdálenost návarů. Při konstantním výkonu laseru 180 W, skenovací rychlosti 1000 mm/s měnil vzdálenost drah. Nejlepší výsledky byly pozorovány při použití vzdálenosti drah 50 μm . Při této hodnotě byla plošná energie rovna hodnotě 3,6 J/mm².

Letenneur [22] pomocí modelování návaru předpovídal hustotu výsledných výrobků. Primárně se zaměřoval na materiál IN625, Ti64 a Fe. Následně upravil simulaci i na nerezový materiál 316L a na materiál AlSi10Mg, který je shodný s materiálem použitým v této práci. Výsledky porovnával s daty, která získal v literatuře. Jeho metodologie spočívala v porovnávání bezrozměrných veličin taveniny. První byla D/t , což je hloubka průvaru ku výšce nanášené vrstvy, druhá veličina byla W/h , která představuje šířku návaru ku vzdálenosti drah laseru a poslední veličinou byla L/W představující délku taveniny k její šířce.



Obr. 2-21 Schéma rozměrů návaru [22]

Pro vlastnosti materiálu v práškovém stavu použil Letenneur procentuální změnu vlastností plného materiálu. Jednalo se konkrétně o hustotu, tepelnou vodivost, tepelnou kapacitu a elektrický odpor. Tyto hodnoty byly sníženy na 60 % hodnoty objemového materiálu. Zjistil, že hustota kovového prášku byla závislá hlavně na výšce vrstvy. Tento jev se nejvíce projevil, pokud byla výška vrstvy menší než D90 prášku. V takovém případě byly velké částice z povrchu vrstvy smeteny recoterem, čímž vzrostla hustota prášku.



Obr. 2-22 Výsledek simulace. Bílá barva představuje jádro taveniny [22]

Výsledkem Letenneurovi simulace byly rozměry návaru. Na obrázku **Obr. 2-22** je možné vidět, že při popisu výsledků simulace není zobrazena teplota ve středu taveniny. Pravděpodobně nebude odpovídat realitě, a bude extrémně vysoká.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Výroba tenkých prutů je velice specifická a neexistují doporučené procesní parametry pro výrobu prutů. Výrobce stroje a distributoři prášku dodávají doporučená nastavení pro tvorbu objemových dílů. Použitím nastavení pro objemová tělesa dochází u prutů k imperfkcím, které u objemových těles nevznikají. Proto je nutné se návrhem speciálních parametrů pro výrobu prutů a mikro-prutových struktur zabývat.

Experimentální výzkumy ukazují rozdíly při výrobě skloněných a kolmých prutů. Tyto rozdíly jsou odůvodňovány pouze na základě hypotéz a nejsou nijak podloženy. Pro lepší pochopení a analýzu rozdílů by mohla sloužit termální simulace, která umožní popsání teplotního chování materiálu v prutu, při jeho výrobě. V současné době se vědecké články zabývající pouze simulací rovných návarů umístěných přímo na tiskové podložce. Při výrobě prutů je však teplotní vývoj naprosto rozdílný, a proto je nutné sestavit simulaci, která bude reflektovat geometrii prutů.

Pomocí teplotní simulace výroby prutů by mohlo být možné objasnit některé fenomény, které se objevují právě u tenkých prutů (nesymetričnost návaru, rozdílná vnitřní struktura horní a spodní strany prutu, rozdílná šířka návaru při různých průměrech...). Navrhnout jejich potlačení a dosáhnout tak dobré stability a opakovatelnosti výroby prutů.

3.2 Analýza a zhodnocení řešerše

Při výrobě technologií SLM se vyskytují vady jako porozita, zvýšená drsnost, praskání materiálu [6]. Tyto vady v objemových dílech nepředstavují takový problém jako u tenkých prutů. Například malý pór představuje v tenkém prutu mnohem větší procento plochy průřezu. Taková změna průřezu může výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti prutů.

Základním testem při vývoji procesních parametrů jsou návarové testy. Na těchto testech je možné sledovat vliv výkonu laseru a skenovací rychlosti na rozměry návaru. Tyto testy provádělo více autorů [9–11]. Autoři pro lepší popis využívají lineární energii, která je vypočítána ze skenovací rychlosti a výkonu laseru. Na základě této energie se dá stanovit, jaká je limitní hodnota pro tvorbu kontinuálního návaru. Poznatky ukazují, že se zvyšující se lineární energií roste i šířka návaru. A právě šířka návaru je pro pruty významným faktorem, protože šířka dráhy a vzdálenost jednotlivých drah udává překryv. Při malém překryvu mezi jednotlivými návary zůstávají neroztavené oblasti, ve kterých zůstane uvězněný prášek. Vrána [11] udává vhodný překryv pro tenké pruty vyráběné contour strategií jako 25 %. Jaroš zmiňuje vhodný překryv drah 30-40 %, se kterým dosahuje velmi dobrých výsledků (vertikální pruty s porozitou do 0,02 %).

Vliv skenovací rychlosti a výkonu laseru ovlivňuje i pruty. Detailní popis vlivu procesních parametrů na průměry a porozitu prutů popsal Qiu [13]. Při zvyšování skenovací rychlosti se průměr prutů snižuje. To odpovídá poznatkům z návarových testů. Zvyšováním skenovací rychlosti se snižuje lineární energie a tím se zmenšuje i šířka návaru. Z tohoto důvodu se zmenšil i výsledný průměr prutu.

Při výrobě prutů vznikají defekty, které nejsou u objemových dílů popisovány. Zejména se jedná o nesymetričnost šířky návaru [12], nebo rozdílná vnitřní strukturu prutu [11]. Sestavení numerického modelu by mohlo objasnit, proč a za jakých podmínek tyto jevy vznikají a navrhnout jejich odstranění. Při výrobě prutů se objevují značné rozdíly mezi skloněnými a vertikálními pruty. U skloněných prutů se objevuje větší porozita a větší drsnost. Tyto jevy jsou pravděpodobně způsobeny teplotním gradientem, který je u skloněného prutu rozdílný.

Komerční systémy pro simulaci výroby technologií SLM [16, 17] pracují většinou na voxelovém principu a pro podrobný popis šíření tepla v prutu jsou nedostatečné. V literatuře se objevují simulace, které zkoumají rovné návary [18, 20]. Situace je při tvorbě prutů odlišná (**Obr. 2-6**) a vlivem geometrie prutů se rozměry návarů mění. Proto je nutné sestavit simulaci, která umožní zahrnout do výpočtu trajektorii.

Liu [20] díky simulaci dokázal s relativně dobrou přesností předpovědět mikrostrukturu návaru pomocí termálních proměnných, které sledoval na rozdílných místech v průřezu návaru s dobrou shodou s experimenty. Díky simulacím bylo možné snížit množství experimentálních vzorků pro nalezení optimální procesních parametrů. Použití simulace se jeví jako ideální volba pro nalezení optimálních procesních parametrů pro výrobu mikroprutových struktur, potažmo pro lepší pochopení principů a důvodu defektů při jejich výrobě.

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro sestavení simulace je materiálový model. Zásadní je materiál, který je v práškovém stavu. Některé parametry jsou obtížně měřitelné. Z tohoto důvodu využívají autoři násobení hodnot objemového materiálu konstantou, čímž vytvoří materiálový model pro práškový materiál. Jedná se například o hustotu, kterou Lettner [22] uvažoval jako 60 % hustoty plného materiálu. Dalším významným parametrem materiálu je teplotní vodivost. (**Obr. 2-18**) Materiál v práškovém stavu se chová téměř jako teplotní izolant. Po zvýšení teploty nad teplotu tání se teplotní vodivost shoduje s objemovým materiálem.

Aby bylo možné simulaci provést, je nutné zavést zjednodušení. Jedná se převážně o zjednodušení týkající se změny skupenství. Tekutá fáze se při tvorbě návaru neuvažuje, prášek je uvažován jako homogenní médium, zanedbává se jeho vypařování... [18]. Tato zanedbání snižují výpočetní čas a umožňují simulaci vůbec provést. I přes tato zjednodušení byli autoři [18, 20] schopni dosáhnout odchylky od reality do cca 7 %.

Nejdůležitější poznatky z rešerše:

- pro výrobu tenkých prutů jsou nutné speciální procesní parametry
- šířka návaru v prutech je rozdílná od návarových testů
- u dutých prutů dochází k nesymetričnosti návaru
- u skloněných prutů dochází k rozdílné vnitřní struktuře v horní a spodní straně prutu
- tloušťka stěny skloněného, dutého prutu je rozdílná
- i přes zjednodušení v simulaci je možné dosáhnout shody s realitou cca 7 %
- v simulaci je nutné použít rozdílný materiálový model pro objemový a práškový materiál
- absorptivita energie materiálu AlSi10Mg je 60 %
- hustota materiálu je možné uvažovat jako 60 % hodnoty plného materiálu
- rozměry návarů ze simulace je možné odečíst na základě teploty.

3.3 Podstata a cíle práce

Podstatou této diplomové práce je vytvoření numerického modelu, na základě kterého bude možné lépe pochopit proces výroby prutů technologií SLM, a díky tomu vysvětlit pozorované fenomény.

Hlavním cílem je sestavit výpočtový model pro simulaci aditivní výroby mikro-prutových struktur, který umožní analyzovat termální chování v rámci procesu Selective laser melting. Na základě simulace bude možné potlačit materiálové vady a tvarové imperfekce (např. porozita materiálu, změna tvaru, drsnost)

Díličí cíle práce jsou:

- rešerše dostupné literatury se zaměřením na výrobu mikro-prutové struktury technologií SLM
- softwarová analýza teplotního chování prutu při jeho výrobě
- návrh experimentů, způsobů vyhodnocení a tvorba závěrů
- publikace výsledků v časopise nebo konferenční publikaci.

Vědecká otázka č. 1:

Jak se mění distribuce tepla u kolmého a skloněného ($35,26^\circ$) prutu a jak je tím ovlivněna geometrie návaru a vnitřní struktura prutu?

Hypotéza č. 1:

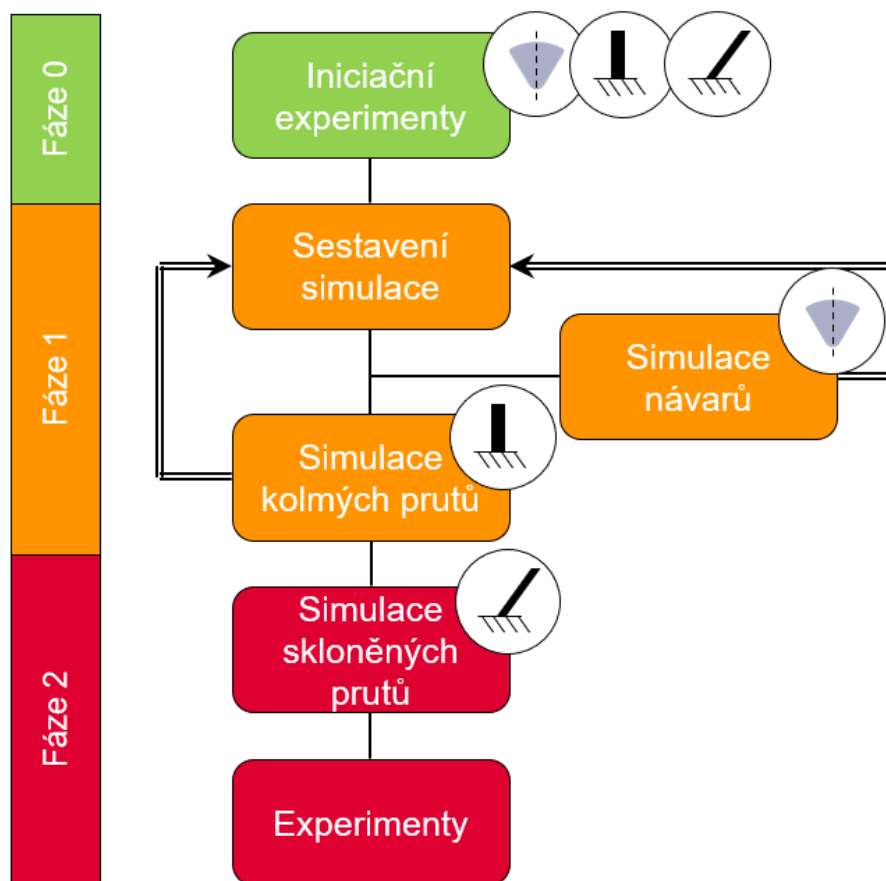
Na spodní straně skloněného prutu dochází k akumulaci energie. Vlivem vyšší energie dochází natavování a nalepování okolního prášku na spodní stěnu. Důsledkem této akumulace energie dochází k rozdílům ve vnitřní struktuře spodní a horní strany prutu.

Hypotéza č. 2:

Tepelná distribuce je závislá na průměru prutu.

4 MATERIÁL A METODY

Tato kapitola popisuje postup řešení použitý při řešení diplomové práce. V této kapitole je také detailně popsáno sestavení simulace a způsob jejího vyhodnocování.



Obr. 4-1 Schéma postupu řešení

4.1 Postup řešení

Postup řešení je schematicky znázorněn na **Obr. 4-1**. Nultá fáze této práce spočívala v analýze dat z literatury potřebných pro sestavení simulace. Z iniciačních experimentů byly získány rozměry, pomocí kterých byla sestavená geometrie pro simulaci. K těmto rozměrům byla vztažena i verifikace simulace.

V první fázi byla sestavována simulace. Na simulaci návarů byla ověřena citlivost simulace na změnu procesních parametrů. Dále byla vytvořena simulace kolmých prutů. Na simulaci kolmých prutů bylo otestováno, že je možné simulovat libovolnou trajektorii laseru. Simulace byla dále optimalizována (velikost sítě, velikost geometrie, trajektorie zatěžování...), aby nedocházelo k chybám v simulaci a aby se zbytečně neprodlužoval výpočetní čas.

V poslední fázi řešení diplomové práce byly simulovány skloněné pruty. Výsledky byly porovnávány s výsledky kolmých prutů. V poslední řadě byly vytvořeny experimenty, které měly za úkol ověřit výsledky a poznatky ze simulace.

4.2 Použitá zařízení a technologie

4.2.1 Zařízení SLM 280HL

Zařízení, na kterém byly prováděny testy nese název SLM 280HL. Toto zařízení je vybaveno laserem o výkonu 400 W, který je schopen dosahovat skenovací rychlosti až 10 000 mm/s. Maximální tiskový prostor je $280 \times 280 \times 350$ mm. Výšku naneseného prášku v jedné vrstvě je možné měnit v rozmezí od 20 μm do 100 μm . Průměr zaostřeného laserového paprsku je 80–115 μm . Komoru je možné vyplnit inertní atmosférou (argon, dusík), čímž lze omezit oxidaci materiálu (např. hliníku).



Obr. 4-2 Zařízení SLM 280HL od firmy SLM Solutions [23]

4.2.2 Práškový materiál AlSi10Mg

Materiál je jedním z mnoha proměnných při výrobě technologií SLM. Pro tuto práci byl zvolený materiál AlSi10Mg, který je složený převážně z hliníku s přísadami křemíku a hořčíku. Tyto legující prvky zajišťují dobrou stabilitu při spékání prášku. Před výrobou je nutné prášek vysušit v peci po dobu 10 hodin při teplotě 70 °C, aby byla odstraněna nežádoucí vlhkost. Použitý prášek měl střední velikost zrn 41,41 μm . 90 % zrn v prášku má menší velikost než 58 μm . Na základě těchto údajů je možné konstatovat, že je prášek vhodný pro výrobu s výškou vrstvy 50 μm . [11]

4.2.3 Keyence VHX-6000

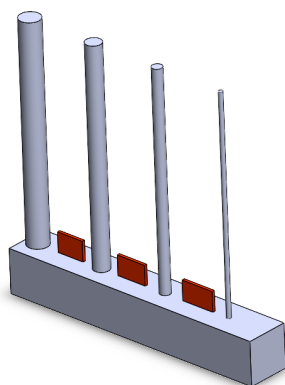
Pro vyhodnocení metalografických výbrusů byl použit digitální mikroskop Keyence VHX-6000. Tento mikroskop je osazen objektivem Z250R, který umožňuje přiblížení 250–2500krát. Pomocí funkce „stiching“ byly vytvořeny snímky prutů po celé jejich délce.

4.2.4 Metalografické výbrusy

Pomocí metalografických výbrusů je možné pozorovat porozitu a rozměry prutů v jednom řezu.

Vzorky byly zalité epoxidovou pryskyřicí EpoThin™ 2. Aby se předešlo výskytu bublin v pryskyřici, byly vzorky umístěny do vakuové komory, kde díky poklesu tlaku byly vzduchové bubliny z tvrdnoucí hmoty odstraněny. Hmota se nechala následně nejméně 6 hodin vytvrdnout.

Po vytvrdnutí hmoty byly vzorky broušeny brusnými papíry se zrnitostí 180-1500. Broušení probíhalo ručně, protože během zalévání nemohla být zaručena přesná poloha prutů. Aby bylo možné identifikovat středovou rovinu vzorku, byly mezi pruty přidány tenké stěny, které při broušení indikovaly středovou rovinu vzorku. Vybroušené vzorky byly následně pozorovány pomocí digitálního mikroskopu KEYENCE.



Obr. 4-3 3D model vzorku. Červeně tenké stěny pro určení středové roviny vzorku

4.2.5 Software

Pro zpracování simulace procesu tavení metodou konečných prvků je využit Ansys Workbench. V simulaci je použito rozšíření Moving heat source (MHS), pomocí kterého je možné vnášet do modelu energii zadáním výkonu a trajektorie, po které se zdroj pohybuje. Tato simulace bude detailně popsána v následující kapitole 4.3.

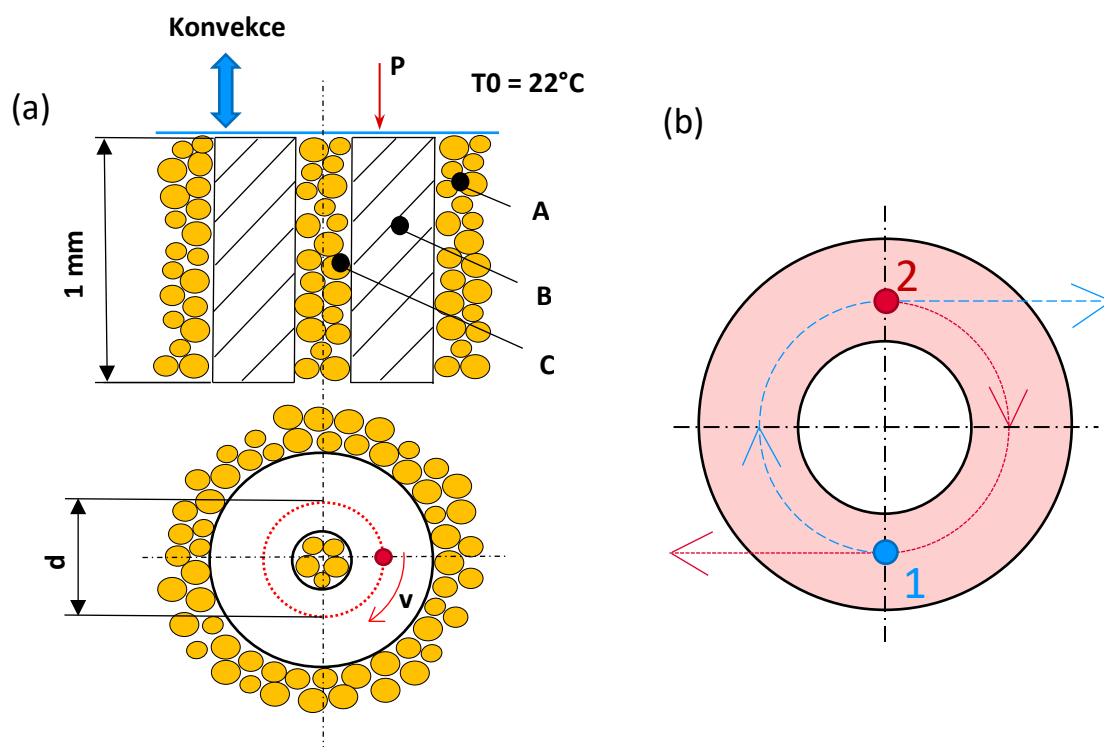
Pro zpracování pozorování z mikroskopu KEYENCE a měření na snímcích byl použitý dodaný software od výrobce mikroskopu.

4.3 Sestavení simulace

Simulace byla sestavena v prostředí Ansys Workbench jako transientní teplotní analýza. Zdroj tepla je zadán pomocí rozšíření MHS. Toto rozšíření pracuje s rovnicí pro zdroj tepla:

$$q = P e^{-\frac{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2]}{R_{laseru}^2}} \quad (3)$$

kde q je výsledné teplo, P výkon, R_{laseru} poloměr laserového paprsku a x,y,z jsou souřadnice, ve kterých má zdroj tepla působit. Řešič, kterým je simulace řešená je Mechanical APDL solver. Cílem simulace je ukázat trend šíření tepla u prutů s rozdílnými průměry a sklonem.



Obr. 4-4 (a) Schéma simulace: P výkon; A,B,C komponenty modelu; v rychlost; d průměr trajektorie; (b) rozdělení návaru s tečným prodloužením mimo materiál.

4.3.1 Okrajové podmínky

Výkon je v MHS zadáván jako intenzita výkonu, která má jednotku W/mm^2 . Z tohoto důvodu je nutné přepočítat výkon stroje na intenzitu výkonu. Laserový paprsek je zaostřený na průměr 0,082 mm. Tento výkon musí být tedy přepočítán na $1 mm^2$.

Ve skutečnosti není veškerá energie materiálem přijata, ale část je odražena od materiálu. Tento jev je možné do simulace zahrnout snížením energie laseru. Podle Lia [20] je absorptivita materiálu AlSi10Mg 60% a proto je výkon laseru snížen na 60 % vypočítané hodnoty.

Pohyb zdroje tepla je definován pomocí trajektorie a rychlosti, kterou se zdroj tepla pohybuje. Rychlost není nutné nijak upravovat, v simulaci odpovídá procesnímu parametru skenovací rychlosti.

Trajektorii, po které se laser pohybuje je nutné definovat pomocí geometrie. Aby bylo možné geometrii použít pro zadání trajektorie, je nutné z této geometrie vytvořit těleso. Proto tyto účely byly použity „line body“, s průměrem 0,01 mm. Následně byl těmto tělesům nastaven materiálový model vzduchu z knihovny Ansys. Tím bylo zajištěno, že tělesa trajektorie neovlivňovala teplotní chování prutu.

Vzdálenost, kterou zdroj tepla po trajektorii urazí je zadána rychlostí a časem, po který se zdroj laseru po trajektorii pohybuje. Při zadávání času není možné využít trajektorii po celé její délce, jinak hrozí selhání výpočtu. Z tohoto důvodu je za konec trajektorie přidána tečna a tím je zajištěno, že simulace neselže. Dále je nutné tečnu trajektorie vyvést mimo materiál, protože při ukončování teplotního zatěžování je vložený krátký impuls výkonu do koncového bodu trajektorie, což by ovlivnilo výsledky simulace. Tento impuls v konci trajektorie je chybou MHS. Z toho důvodu je nutné trajektorii vyvést mimo materiál, aby tato chyba nemohla způsobit zahřátí jiného místa, než je požadováno.

Na povrchu modelu je nastavená konvekce, která umožňuje výměnu tepla s okolím. Z knihovny byl nastaven model stojícího vzduchu („stagnant air“), který plně nereflektuje proudění atmosféry v komoře stroje, ale pro model na této úrovni je dostačující.

Celkové trvání výroby jedné vrstvy tenkého prutu je velice krátké. Maximální délka simulace, která je v této práci uvažována je 10^{-2} s. Tento čas je dostačující i pro pozorování chladnutí. V simulaci je nutné ručně nastavit krokování. MHS automaticky upravuje délku a počet mezikroků („substeps“) a nereflektuje úpravy v prostředí Workbench. Z tohoto důvodu je nutné zařadit do simulace kód, který má přednost před nastavením MHS. Mezikroky jsou nastaveny na maximální hodnotu 200 mezikroků s tím, že minimální počet mezikroků je 20. Pokud by nebyl upraven počet mezikroků, při ukončení teplotního zatěžování dojde k velkému rozdílu teplot a v této oblasti jsou mezikroky přílišně zjemněny. Toto zjemnění vede k několikanásobnému nárůstu výpočetního času.

Počáteční teplota je volena $T_0 = 22^\circ C$.

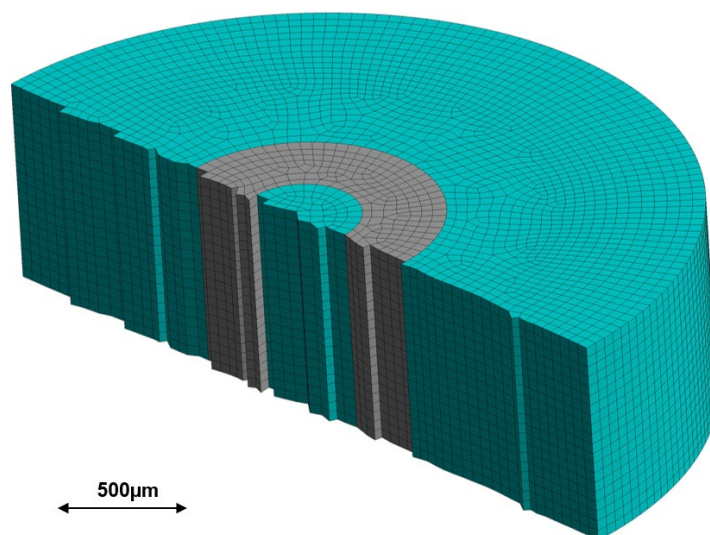
4.3.2 Materiálový model

V simulaci jsou použity 2 stavy hliníkového materiálu. Je to stav pro objemový materiál, který představuje již vyrobený prut a stav práškový, který představuje kovový prášek, ze kterého jsou pruty vyráběny.

Pro objemový stav je použit materiálový model AlSi10Mg z knihovny Ansysu pro additive manufacturing. Materiálový model pro práškový stav byl odvozen z objemového. Teplotní vodivost byla upravena dle **Obr. 2-18**. Hustota prášku je brána jako 60 % hustoty objemového materiálu [22].

4.3.3 Geometrie

3D model pro analýzu prutů je složený ze tří těles. Jedno těleso představuje již vyrobený prut a zbylé dvě tělesa představují materiál v práškovém stavu. Kontakt mezi těmito tělesy je volen jako „bonded“. Vedení tepla je u tohoto typu kontaktu zprostředkováno, pokud jsou tělesa v kontaktu, nebo jsou v rozmezí „pin ball“ regionu. Rozměry již vytvořeného prutu jsou voleny na základě „response surface“ (**Obr. 2-15**). Pomocí rovnice této plochy byla vypočítána šířka návaru na základě vstupní lineární energie a průměru prutu. Výška zkoumaného prutu je 1 mm. Tato výška geometrie je dostačující. Jelikož se jedná o velice rychlý děj, teplo se nestihne rozšířit na venkovní hranici geometrie. Pro simulaci návaru byl použit kvádr o rozměrech $1 \times 1 \times 2$ mm. Prášek nové vrstvy není uvažován.



Obr. 4-5 Řez geometrie kolmého prutu pro simulaci

4.3.4 Výpočtová síť

Výpočtová síť je volena jako hexagonální s velikostí elementů 0,02 mm (**Obr. 4-5.**) Při použití větších elementů docházelo ke kolísání teploty v okolí zdroje tepla. Při použití menších elementů doházelo k prodlužování výpočetního času a toto zjemnění neměnilo výsledky, a proto bylo vyhodnoceno jako zbytečné. Elementy jsou automaticky voleny podle Ansys Workbench a jedná se o SOLID 90.

4.3.5 Zjednodušení simulace

Simulace je termální a oproti skutečnému výrobnímu procesu technologií SLM jsou v ní určité zjednodušení:

- kovový prášek je uvažován jako homogenní médium
- tekutost taveniny se zanedbává
- zmenšení objemu materiálu vlivem vytěsnění vzduchu se zanedbává
- vypařování materiálu se zanedbává
- zanedbání změny materiálu z práškového na objemový materiál
- proudění atmosféry ve stroji.

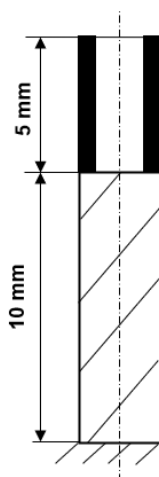
4.4 Návrh experimentálních testů

4.4.1 Začátek/konec trajektorie

U běžných procesních parametrů se počáteční bod trajektorie v jednotlivých vrstvách mění. Aby bylo možné lépe analyzovat návar v jedné vrstvě, byl navržen test, který zajistil konstantní polohu počátečního a koncového bodu tak, že ve všech vrstvách byl na stejném místě. Výkon laseru byl nastaven na 225 W a skenovací rychlost byla 900 mm/s. Délka prutu byla 15 mm. Spodních 10 mm bylo vyráběno jako plný prut, vrchních 5 mm bylo vyrobeno jen s obvodovou konturou, tak aby vznikl dutý prut (**Obr. 4-6**). Rozměry kontur byly nastaveny dle **Příloha 3, Příloha 4**.

4.4.2 Konstantní překryv návarů

Při běžně nastavených procesních parametrech je vzdálenost mezi trajektoriemi konstantní. Návary se u prutů s menším průměrem rozšiřují. Vlivem tohoto rozšíření se liší překryv návarů i přes to, že vzdálenosti trajektorií jsou stejné. Pro test konstantního překryvu návarů byly použity stejné vzorky jako v případě testů popsanych v předchozí kapitole (4.4.1). Překryv drah byl nastavený dle literatury [12] a to na 30 %. Dále byl překryv vypočítán pomocí předpokládaných šířek návarů v prutech. Skloněné pruty byly vyráběny se sklonem $35,26^\circ$. Tento sklon se nejčastěji vyskytuje v mikro-prutových strukturách, a to v BCC mřížkách, kde tvoří tělesovou úhlopříčku krychlové buňky.



Obr. 4-6 Schéma vzorku prutu

4.5 Vyhodnocování

4.5.1 Simulace

Výsledky simulace byly vyhodnocovány na základě teploty. Při sledování vývoje rozměrů návarů v prutech (**Obr. 5-4**). Na základě těchto výsledků bylo možné pozorovat rozšiřování návaru v průběhu trajektorie a postupné teplotní ovlivnění prášku.

Pro určení rozměru návaru byly teplotní výsledky zobrazeny jako maxima v čase. Na základě těchto hodnot bylo možné analyzovat teplotně ovlivněnou oblast. Roztavení a spečení prášku bylo uvažováno v místech, kde byla teplota vyšší jak teplota tání materiálu AlSi10Mg, tedy $570-660^\circ\text{C}$ [24, 25]. Aby bylo možné tyto výsledky jednoduše porovnávat, byly hodnoty v programu Ansys Workbench přeneseny na úsečku. Hodnoty teplot přenesené na úsečku byly exportovány a následně zpracovány v excelu (vyhodnocení šířky návaru).

Pro pozorování rozdílného šíření tepla v kolmých a šikmých prutech byla pozorována teplota v bodě umístěném kolmo pod laserem ve vzdálenosti 0,15 mm od povrchu (**Obr. 5-8**).

4.5.2 Experimenty

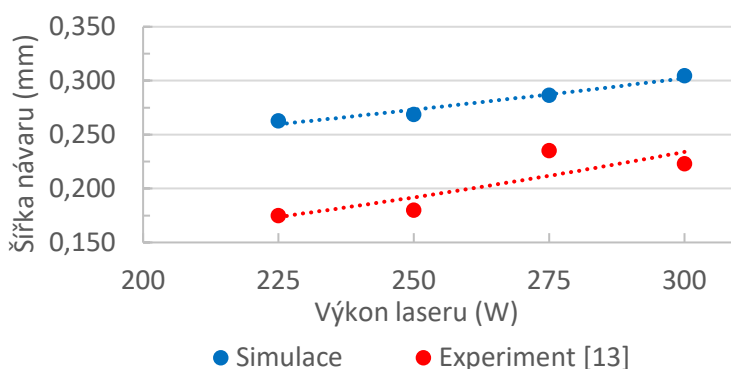
Při analyzování vzorků s konstantním počátečním a koncovým bodem trajektorie byl pozorován tvar návaru v místě začátku a konce trajektorie. Měření rozměrů návaru bylo provedeno na snímcích z mikroskopu KEYENCE (**Příloha 2**).

Při vyhodnocování konstantního překryvu drah byla zejména analyzována oblast v ose prutu, kde se vyskytovala oblast nespečeného prášku.

5 VÝSLEDKY

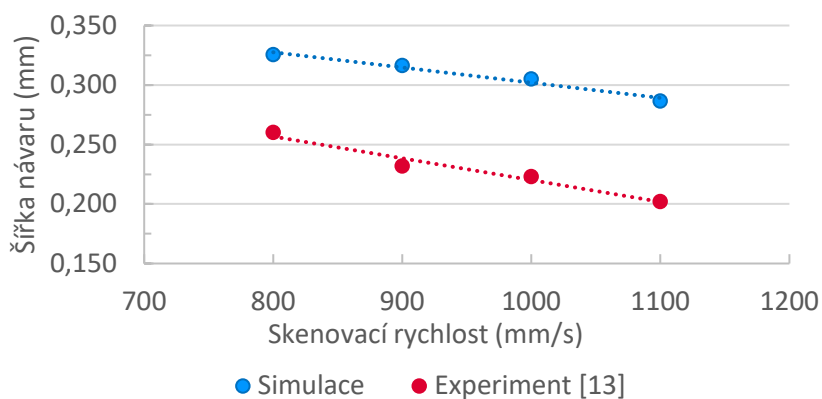
5.1 Návary

U návarů se potvrzuje funkčnost simulace. Cílem je ověřit, zda změna procesních parametrů (skenovací rychlosti a výkonu laseru) změní geometrii návaru stejně, nebo se stejným trendem, jako v reálných testech popsaných v literatuře.



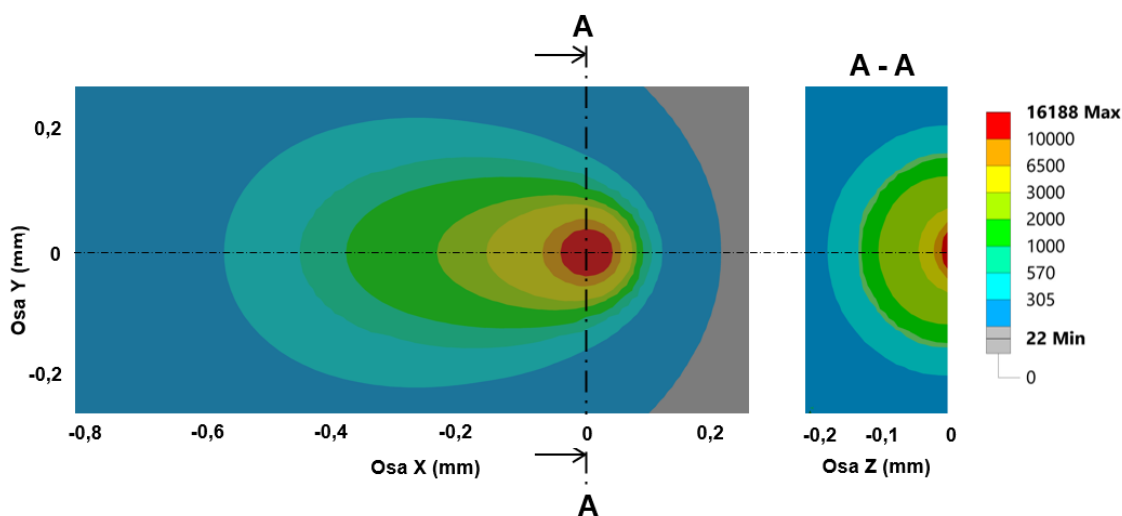
Obr. 5-1 Graf závislosti šířky návaru na výkonu laseru s konstantní skenovací rychlostí 1000 mm/s

V grafu na **Obr. 5-1** je vidět stejný trend rozšiřování návaru s rostoucím výkonem laseru. Do grafu byly vyneseny i hodnoty z experimentálního testu, který provedl Vrána [11] (**Tab. 2-1**). Rozdíl mezi šířkou návaru je přibližně 0,1 mm a zůstává stejný pro všechny výkony. Tato odchylka vznikla pravděpodobně z důvodu zanedbání vrchní vrstvy prášku, protože se v prostředí prášku teplo šíří hůře a je za potřeby více energie pro jeho roztavení. Tento rozdíl by bylo možné kompenzovat uvažováním jiné teploty, při které se bude brát materiál jako teplotně ovlivněný na tolik, že se bude považovat za roztavený.



Obr. 5-2 Graf závislosti šířky návaru na skenovací rychlosti s konstantním výkonem 300 W

Shodný trend i se shodnou odchylkou je možné pozorovat na **Obr. 5-2**, který srovnává výsledky simulace s reálnými experimenty pro různé skenovací rychlosti s konstantním výkonem laseru 300 W. Vzhledem ke shodnému trendu výsledků a možnosti její následné korekce, byla simulace shledána jako vyhovující pro další testy.

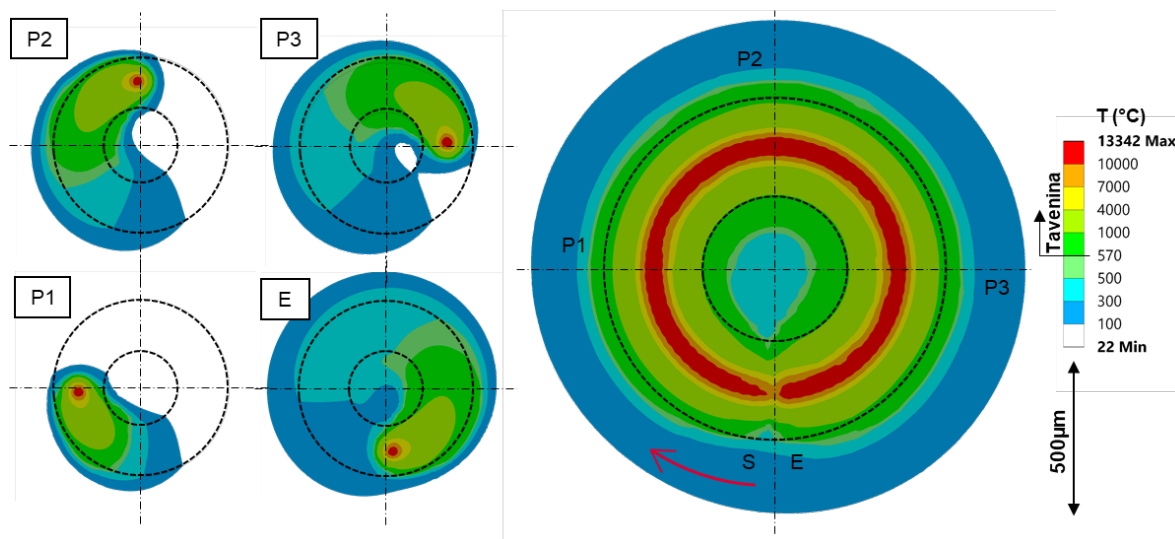


Obr. 5-3 Rozměry návaru v simulaci

Na **Obr. 5-3** je možné vidět, jak se tavná lázeň rozšiřuje za místem průjezdu laseru. To odpovídá materiálu, který je za laserem stále v tekutém stavu. Jeho tvar odpovídá předpokladům z literatury [22].

5.2 Kolmé pruty

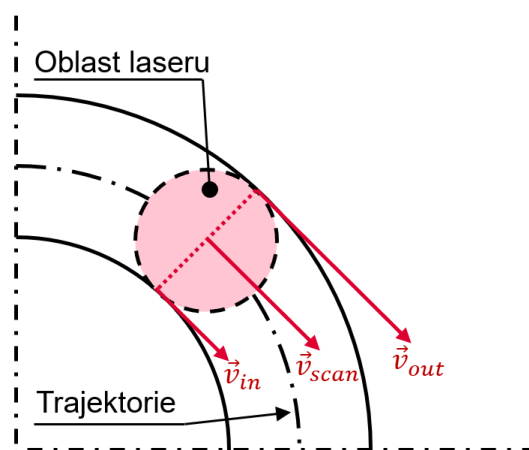
Byla provedena série simulací, která představovala procesní parametry 300 W výkon laseru a skenovací rychlost 1000 mm/s. S těmito parametry byly nasimulovány duté pruty o různých průměrech trajektorie, aby bylo možné sledovat šířku návaru ve výbrusu a bylo ji možné porovnávat s výsledky simulace.



Obr. 5-4 Vývoj návaru u trajektorie s průměrem 0,8 mm; maximální teplota při skenování

Na **Obr. 5-4** je vidět vývoj návaru v průběhu trajektorie. V prvních 25 % (bod P1) trajektorie je návar nejkratší. S rostoucí uraženou vzdáleností laseru se návar prodlužuje a rozšiřuje. Rozšíření návaru je výrazné v 75 % (bod P3) trajektorie směrem k ose prutu. Postupné rozšiřování návaru prutu v průběhu trajektorie je možné vidět i na **Obr. 5-11 (b)** na snímku z mikroskopu. Se zvětšujícím se průměrem prutu se rozdílné rozšíření návaru v průběhu trajektorie zmenšuje a při průměru trajektorie 1,5 mm zaniká, a při větších průměrech se už dále neobjevuje.

I přes shodnou celkovou šířku návaru v průběhu trajektorie zůstává u prutů s větším průměrem nesymetričnost návaru. Návar je více rozšířený do středu prutu a méně směrem ven do okolí. Tento rozdíl není tak výrazný jako u prutů s menším průměrem, ale přesto přetrvává. U prutu s průměrem 3 mm je rozdíl šířky od středu trajektorie cca 5 %.



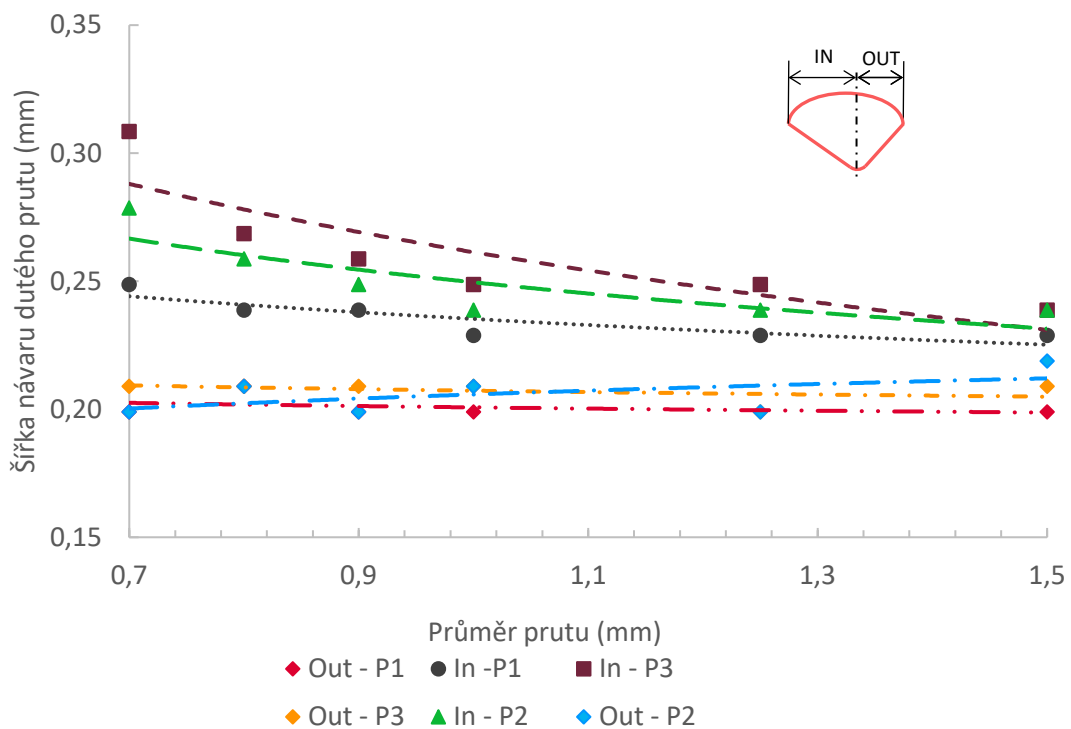
Obr. 5-5 Schéma rychlosti rozdílných míst laseru

Tento rozdíl by mohl být způsobený křivostí trajektorie. Pokud by místo působení laserového paprsku nebylo uvažováno jako bod, ale jako oblast, lišily by se v této oblasti rychlosti. Směrem ke středu prutu by měl laser menší rychlost, a tím by bylo do místa dodáváno více energie. Na druhou stranu, v nejbližším místě od osy prutu, by laser měl nejvyšší rychlost, a tak by do tohoto místa bylo dodáváno méně energie.

$$v_{in} = \frac{v_{scan} \cdot (d_{trajektorie} - d_{laseru})}{d_{trajektorie}} = v_{scan} \cdot \frac{d_{in}}{d_{trajektorie}} \quad (4)$$

$$v_{out} = \frac{v_{scan} \cdot (d_{trajektorie} + d_{laseru})}{d_{trajektorie}} = v_{scan} \cdot \frac{d_{out}}{d_{trajektorie}} \quad (5)$$

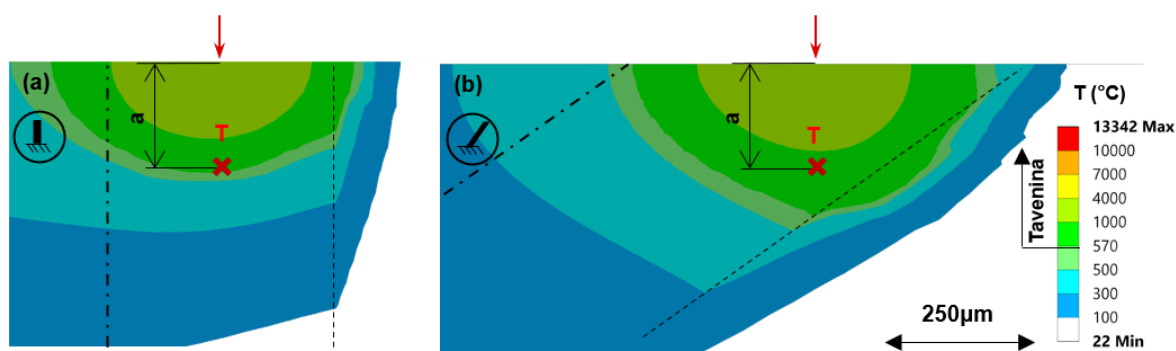
Na **Obr. 5-6** jsou vidět výsledky šířky návarů, které byly měřeny v simulaci. Místa P1–P3 odpovídají vyznačeným místům na **Obr. 5-4**. Je vidět, že venkovní šířka návaru se při rozdílném průměru prutu nemění. Naopak vnitřní návar se zvětšuje s klesajícím průměrem. Také lze z grafu vyčíst, že s rostoucí vzdáleností, kterou laser projel, se návar rozšiřuje a pro šířku v bodě P3 platí, že je větší než šířka v bodě P1 a P2. Tento rozdíl zaniká s rostoucím průměrem prutu.



Obr. 5-6 Graf vlivu průměru prutu na šířku návaru

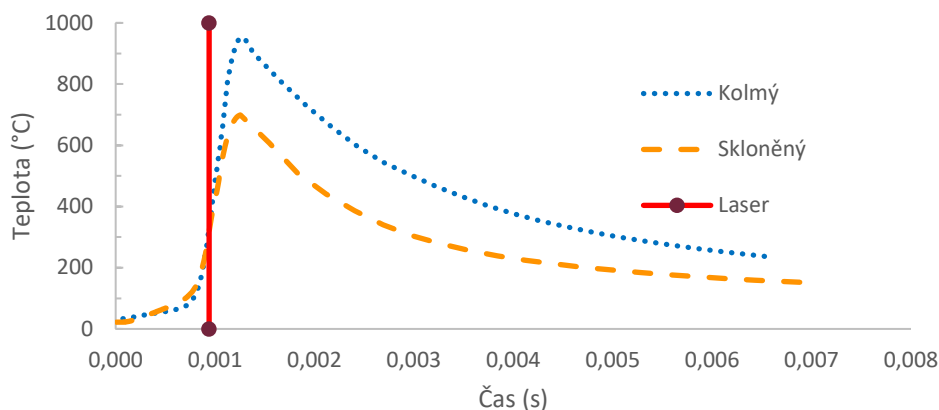
5.3 Skloněné pruty

Popis skloněných prutů je mnohem komplikovanější než popis prutů kolmých. Ukazuje se, že výsledná tloušťka návaru, potažmo geometrie prutu není tvořena v aktuální skenovací vrstvě. Ze simulace je možné pozorovat, že kořen návaru u skloněného prutu dosahuje až k jeho okraji. Tím dochází k dotvarování jeho geometrie a k rozšiřování tloušťky stěny, pokud by se jednalo o dutý prut tvořený pouze jedním návarem. Prohříváním prutu může také docházet k nalepování prášku ze spodní strany prutu, což vede ke zvýšení drsnosti na spodní straně prutu. Nejenom, že se kořen návaru u skloněného prutu dostává mnohem více ke stěnám prutu, čímž výrazněji tepelně ovlivňuje tuto stěnu prutu, ale zvýšená teplota u skloněného prutu pod návarem zůstává delší dobu po přejezdu laseru **Obr. 5-8**.



Obr. 5-7 Rozdíl teploty pod návarem u kolmého a skloněného prutu (pohled v řezu)

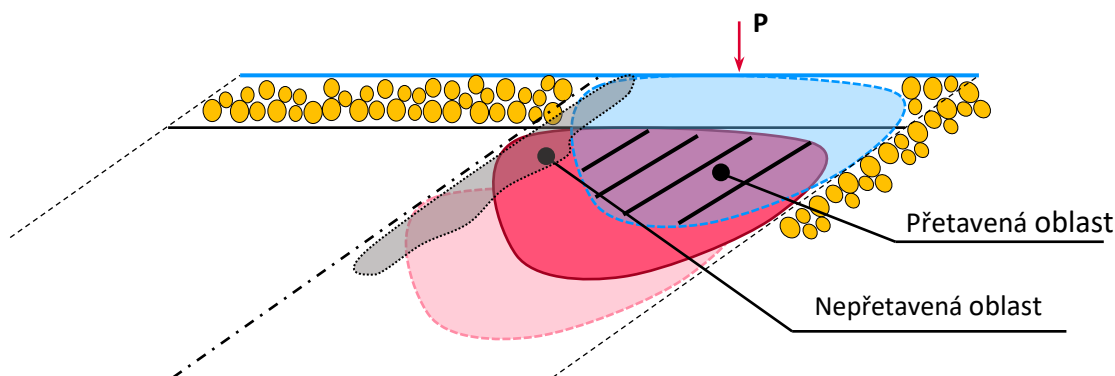
Na **Obr. 5-7** je možné vidět rozdíl tvorby návaru u kolmého a skloněného prutu. U kolmého prutu kořen návaru zůstává uvnitř materiálu a nehrozí změna geometrie, či nalepený prášek. Tepelně ovlivněná oblast je symetrická a teplo se šíří rovnoměrně směrem dolů. U skloněného prutu je možné vidět, jak se kořen návaru přibližuje ke stěně prutu a dostává se dokonce i za předpokládanou stěnu prutu, což by mohlo způsobovat změnu geometrie a drsnosti. Geometrie tepelně ovlivněné oblasti není symetrická jako u kolmého prutu. Teplo se dostane ke stěně prutu, kde narazí na prášek, který se oproti již spečenému prutu chová jako izolant. Po této stěně teplo jede směrem dolů ve směru osy prutu. Šíření tepla dále pokračuje zarovnané s kolmicí na osu prutu, nikoliv jako kulová plocha, jako tomu bylo v případě kolmého prutu. Na druhou stranu je vidět, že v místě převisu nejdál od osy prutu nebyl materiál protaven a bude protaven až v další vrstvě. V **Příloha 5** je možné vidět 3D pohled s výsledkem simulace. Ve snímku je skrytý okolní prášek a je vidět, že strana převisu prutu je zahřívána mnohem více než horní strana prutu.



Obr. 5-8 Rozdíl teplot v místě pod laserem ve vzdálenosti 0,15 mm pod povrchem. Červená čára představuje okamžik přejezdu laseru nad pozorovaným místem

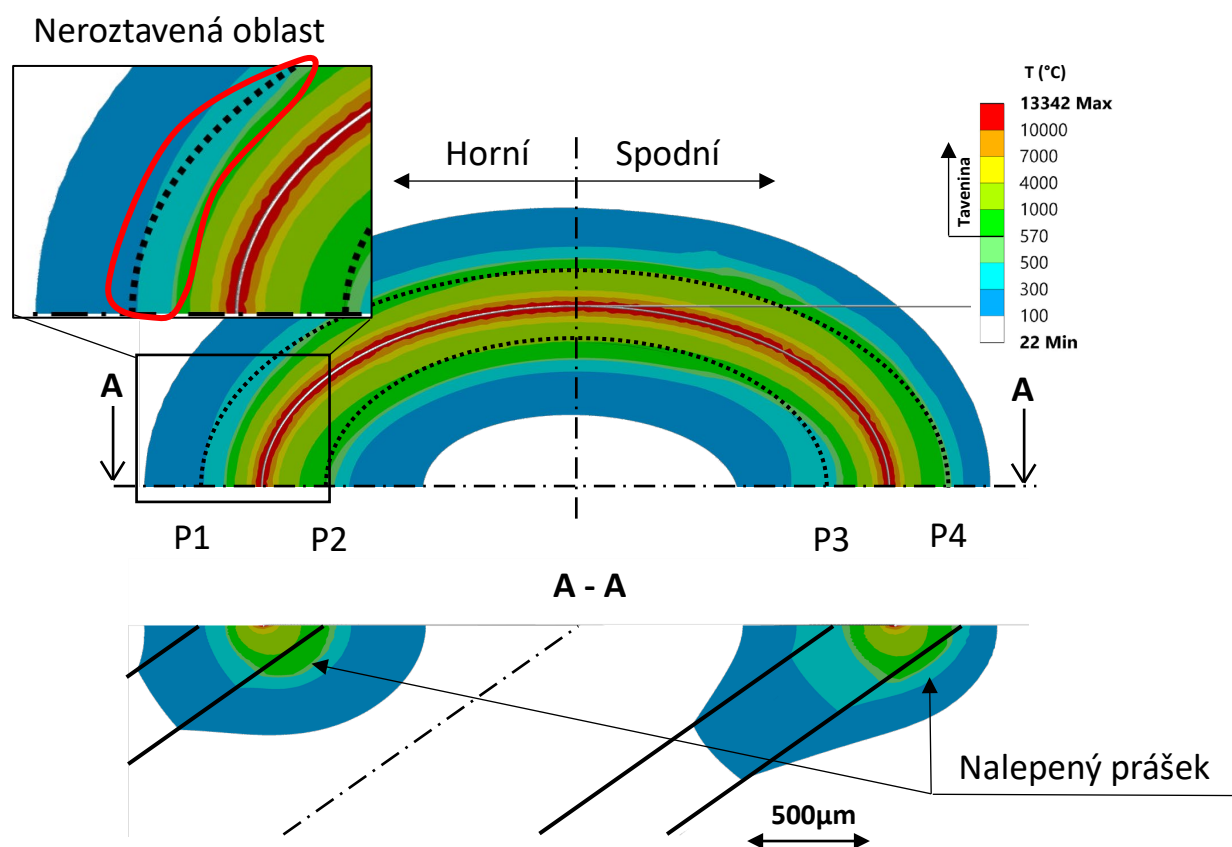
U skloněných prutů byla pozorována rozdílná mikrostruktura v horní a spodní části prutu [11]. Díky simulaci bylo možné tento jev více analyzovat. Na **Obr. 5-8** je graf rozdílů teplot pro skloněný a kolmý prut. Na grafu je možné pozorovat, že u skloněného prutu dochází k vyššímu nárůstu teplot. Trend chladnutí však zůstává stejný pro oba typy prutů. Zvýšená teplota je v prutu po delší dobu a tím může dojít ke změně vnitřní struktury prutu.

Ukazuje se (**Obr. 5-9**), že vlivem deformace návaru ve skloněném prutu a také posunu trajektorie v jednotlivých vrstvách dochází v místě převisu k vícenásobnému přetavování materiálu, což může výrazně ovlivnit mikrostrukturu. Na druhou stranu v oblastech, které nejsou v převisu (na schématu u osy prutu) je materiál roztaven pouze jednou, a tak není do těchto míst dodáváno takové množství energie. Z tohoto důvodu mohou vznikat i rozdíly ve tvarech pórů. V převisu vznikají kulaté póry, které jsou zapříčiněny velkým množstvím energie a v oblastech, které nejsou v převisu, vznikají ostré póry, které jsou způsobovány nedostatkem energie. V místě, které je nejvzdálenější od osy prutu a je v oblasti převisu není dostatek energie na to, aby byl prášek roztaven a spečen. Toto místo bude roztaveno až v následující vrstvě.



Obr. 5-9 Schéma přetavování ve skloněném prutu

U skloněných dutých prutů byla pozorována rozdílná tloušťka návarů ve spodní a vrchní straně prutu [12]. Pro vysvětlení tohoto jevu pomocí simulace je nutné sledovat výsledky jak v řezové rovině, která odpovídá metalografickému výbrusu, tak i ve vrchním pohledu.

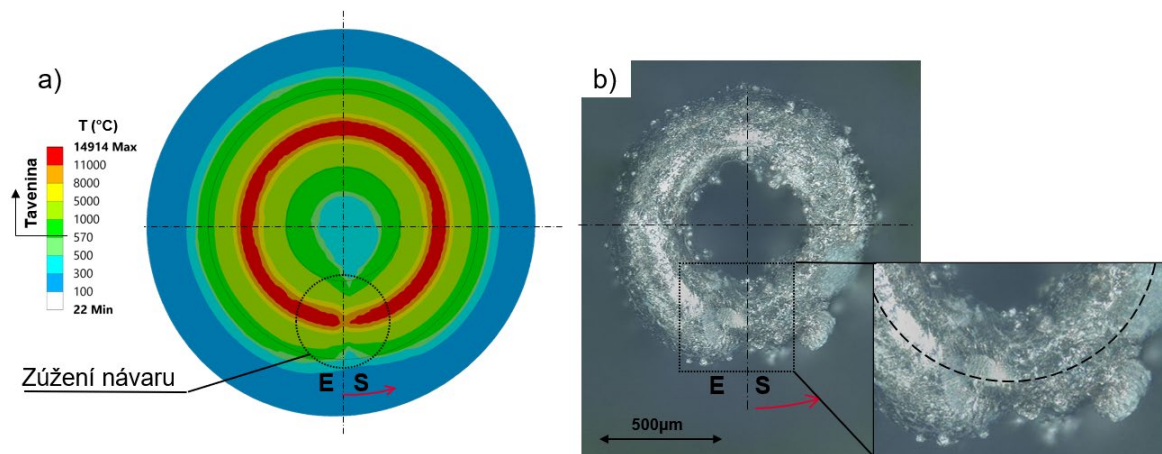


Obr. 5-10 Simulace skloněného prutu

Na Obr. 5-10 v místě P1 není materiál roztaven až po předpokládaný okraj prutu. Právě toto místo způsobí zúžení návaru v horní části prutu. V místě P2 lze v řezu vidět větší rozšíření návaru směrem do prášku než v místě P4. Toto rozdílné rozšíření je způsobené zahříváním prášku, který je uvnitř dutého prutu. Po zahřátí prášku stačí méně energie pro jeho roztavení. V místě P3 nedochází ke ztuhlým neroztavené oblasti, jako tomu je v místě P1. Tento rozdíl je opět způsoben zahříváním vnitřního prášku od předchozího přejezdu laseru. V místě P1 není prášek nijak předehříván, proto nemůže dojít k rozšíření návaru a jelikož se jedná o horní část, nemůže dojít ke skenování této oblasti v další vrstvě, jak bylo popsáno na Obr. 5-9.

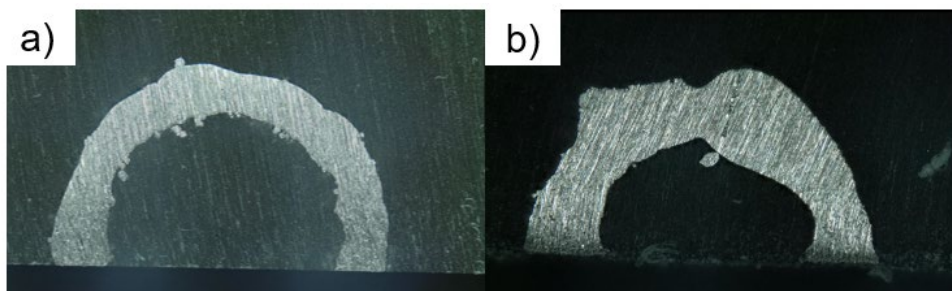
5.4 Začátek/konec trajektorie

V simulaci je možné vidět, že v oblasti, kde trajektorie začíná a končí dochází k rozdílným rozměrům tepelně ovlivněné oblasti oproti zbytku trajektorie.



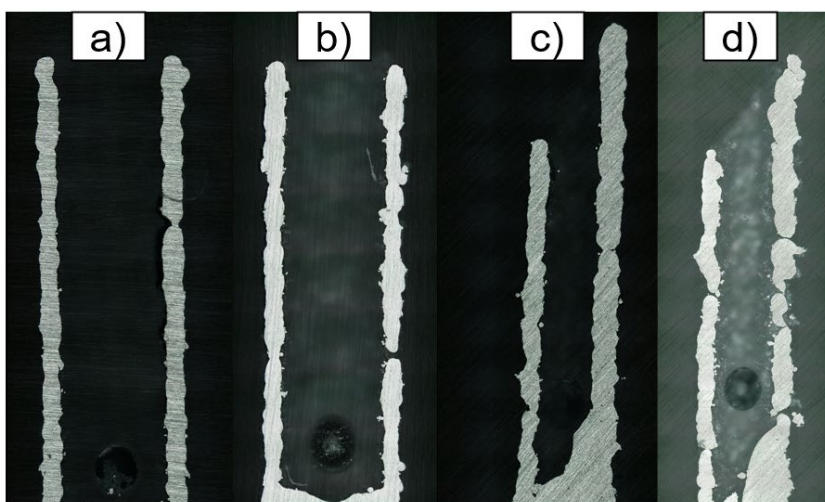
Obr. 5-11 (a) Simulace zúžení návaru v oblasti začátku a konce návaru; (b) zúžení návaru v experimentu

Jedná se o výrazné zúžení, které by mohlo ovlivňovat i vnější povrch prutu. Tento jev se objevuje u všech průměrů prutu. Pro ověření, zda se tento jev u prutů objevuje, byly pomocí mikroskopu KEYENCE pořízeny snímky vrchních pohledů prutů (**Obr. 5-11 (b)**).



Obr. 5-12 (a) Proměnlivý začátek trajektorie; (b) konstantní začátek trajektorie

Při použití standartních procesních parametrů s proměnlivým počátečním bodem trajektorie nebyl tento jev pozorován (**Obr. 5-12 (a)**). Pravděpodobně jsou zúžení v následujících vrstvách zalita taveninou, a v řezu tak nejsou pozorována. Při nastavení konstantního místa začátku a konce návaru se ukazuje stejné zúžení, jako v simulaci. Navíc lze také pozorovat, že na (**Obr. 5-12 (b)**) je návar užší než na straně pravé. Tento jev je možné pozorovat i na prutu s větším průměrem (**Příloha 2**) Toto opět odpovídá simulaci. Jelikož je pravá strana koncová, vstupuje do již přehřáté oblasti, a proto je cca o 30 % širší.



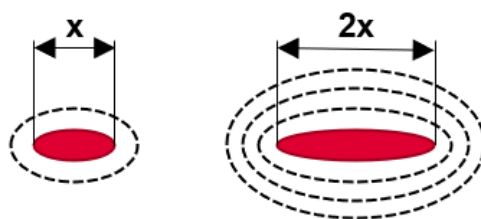
Obr. 5-13 Srovnání prutů s konstantním a proměnlivým startovním bodem trajektorie. (a) Kolmý konstantní bod; (b) kolmý nekonstantní bod; (c) skloněný konstantní bod; (d) skloněný nekonstantní bod

Při porovnání prutů vyráběných s konstantním a proměnlivým startovním bodem je možné pozorovat rozdíly. Výbrus byl zhotoven tak, aby neprocházel startovním bodem. Na **Obr. 5-13** je možné vidět, že kolmý i skloněný prut s konstantním startovním bodem má hladší stěny než ten s proměnlivým. To bude způsobeno tím, že v této rovině nevzniká rozšíření a zúžení návaru vlivem počátku a konce trajektorie.

5.5 Konstantní překryv návarů

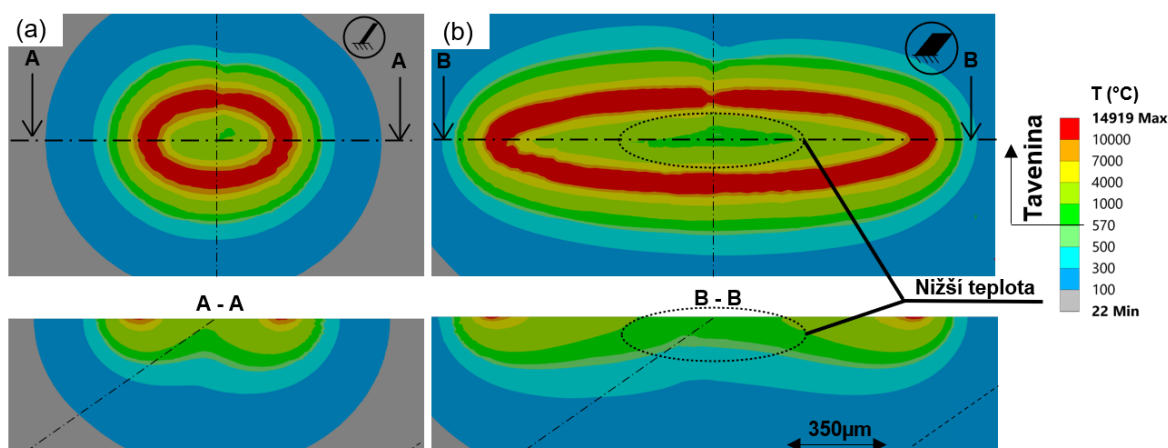
V simulaci se potvrzuje, že klesající velikostí průměru prutu roste šířka návaru. Proto byl vytvořen test na ověření konstantního překryvu návarů. Při volbě vzdáleností mezi jednotlivými návarů podle „Response surface“ [12] docházelo u skloněných prutů s průměrem 1 mm i přes použití směru výroby „Inside-Out“ (prut se vyrábí od středu ven, aby se předešlo vzniku ostrých pórů vzniklých vlivem nedostatku prášku ve středu prutu) k neroztavení prášku v ose prutu.

U kolmých prutů bylo použitím konstantního překryvu návarů dosaženo podobných výsledků, jako při použití fixní vzdálenosti drah laseru. U skloněných prutů se ukázalo, že konstantní skutečný překryv drah není vhodné použít. I přes použití strategie „Inside-Out“ se u prutů s větším průměrem objevovala oblast neprotaveného prášku v ose prutu. U tenkých prutů (průměr $<0,8$ mm) vyráběných se stejnými procesními parametry se tento problém neobjevoval.



Obr. 5-14 Schéma změny rozměru vnitřní elipsy

Tento rozdíl bude pravděpodobně způsobený protažením vnitřní elipsy trajektorie laseru. Prut vyrobený čtyřmi konturami má vnitřní elipsu cca 2krát delší než prut tvořený dvěma konturami (Obr. 5-14). U prutů s větším průměrem tak nedochází k tepelnému ovlivňování středu prutu ze všech míst trajektorie a tím pádem ve středu prutu není tak vysoká teplota jako u prutu s menším průměrem. V ose prutu tak není dostatek energie na kompletní roztavení, a proto zde vznikne oblast neroztaveného prášku. Což potvrzuje i výsledek simulace (Obr. 5-15), kde u menší vnitřní elipsy (pro prut tvořený dvěma konturami) je v ose prutu teplota až o 300 °C vyšší než u vnitřní elipsy prutu tvořeného čtyřmi konturami.



Obr. 5-15 Porovnání vlivu délky elipsy na protavení prutu; (a) délka elipsy 0,85 mm (b) délka elipsy 1,55 mm

6 DISKUZE

6.1 Návary

Simulace návarů ukázala, že se zvolenými zjednodušeními a nastavením je možné dosáhnout shody trendu šířky návaru v závislosti na výkonu laseru a skenovací rychlosti. Rozdíl mezi simulací a experimentálními daty je přibližně 0,1 mm. S rozdílnými procesními parametry se tato chyba nemění a výsledky simulace kopírují trend experimentálních výsledků [9–11]. Vzniklá chyba bude nejspíše zapříčiněna zanedbáním vrchní vrstvy prášku. Přeměna skupenství by spotřebovala více energie a tepelně ovlivněná oblast by byla menší. Dalším důvodem může být zanedbání tekutosti taveniny. Tavenina má v tekuté fázi povrchové napětí, které by mohlo zapříčinit zmenšení rozměrů návaru. Rozměry je možné korigovat volbou vyšší teploty, která je brána jako limitní pro spečení prášku. Zmíněná odchylka 0,1 mm je pro nejnižší teplotu tání 570 °C, která byla uvažována pro všechny simulace. Pokud by byla pro korekci uvažována teplota tání 750 °C, odchylka by se snížila přibližně na polovinu, tedy na 0,05 mm. Po korekci by nedošlo ke změně trendu výsledků. Pokud by tedy bylo nutné při tomto zjednodušení dosahovat přesnějších výsledků, bylo by možné k této korekci přistoupit. Zahrnutím vrchní vrstvy prášku a zajištění změny stavu materiálu by však pravděpodobně zapříčinilo ještě větší přiblížení k realitě. Na druhou stranu by se prodloužil i výpočetní čas. Při současném zjednodušení je možné simulaci provést cca za 1 hodinu, což přináší možnost simulovat větší množství procesních parametrů a na základě výsledků se dále rozhodovat, jak upravit procesní parametry pro dosažení požadované kvality dílů.

V simulaci se v jádru taveniny vyskytuje teplota až 15 000 °C, což je mnohem více než teplota bodu varu materiálu AlSi10Mg (cca 2500 °C [25]). Tato vysoká teplota je pravděpodobně zapříčiněna nutností zacílit laser na velmi malou plochu. Přepočtem výkonu laseru stroje na intenzitu výkon na 1 mm² dostáváme pro procesní parametry 20–40 kW/mm². Oblast této extrémně vysoké teploty odpovídá průměru laseru, takže se pravděpodobně jedná o teplotní špičku vzniklou zatěžováním laseru.

6.2 Kolmé pruty

Šířka návaru se u tenkých dutých prutů výrazně rozšiřuje směrem k ose prutu, což odpovídá naměřeným datům [12]. Na **Obr. 5-6** je vidět, že rozšíření návaru klesá s rostoucím průměrem prutu. To by potvrdilo hypotézu č.2, že je tepelná distribuce závislá na průměru prutu. Rozdíl mezi vnitřní a venkovní šířkou zůstává i při prutech s průměrem 3 mm. Tyto pruty už jsou natolik velké, že rozdíl šířky návarů není způsoben předehříváním prášku uvnitř prutu. Je možné, že tento rozdíl vzniká vlivem křivosti trajektorie (**Obr. 5-5**). Vzdálenější bod laseru od osy prutu má větší obvodovou rychlost než bod, který je ose blíže. S rostoucí obvodovou rychlostí klesá vnesená energie a tím pádem i rozměr návaru. Skutečná vnesená energie se pravděpodobně bude na okrajích oblasti ovlivňované laserem lišit od teoretických hodnot, které by se vypočítaly z rovnic (4-5). Laser stroje má Gaussovo rozložení energie. Na okrajích ovlivňovaných oblastí bude tedy nižší energie než ve středu oblasti. Rozšíření MHS v programu Ansys používá také Gaussovo rozložení pro teplotní zatěžování, což by mělo zajistit podobnou distribuci energie jako ve skutečnosti. U prutů s velmi malým průměrem pravděpodobně není rozšíření návaru způsobeno jen předehříváním prášku vlivem přejezdu laseru, ale také vlivem křivosti trajektorie.

Šířka návarů vyráběných se stejnými procesními parametry je rozdílná u kolmých prutů, skloněných prutů, v tenkých stěnách i u samotných návarů [12]. Tyto rozdílné šířky jsou způsobené předehříváním prášku od předchozího přejezdu laseru, což bylo popsáno v literatuře [26], a rozdílným vedením tepla v práškovém a plném materiálu. U sousedních návarů bylo rozšíření způsobeno pouze vlivem předehřívání prášku od předchozího přejezdu laseru [26]. U prutů je situace mnohem složitější. Návar se rozšiřuje s postupem přejezdu trajektorie, protože prášek, popřípadě již protavený materiál je uvnitř prutu nahříván více, což způsobí rozšíření návaru. Jedná se tedy o rozšiřování návaru směrem k ose prutu. U reálných experimentů by toto postupné rozšiřování mohlo být pozorováno pouze na dutých prutech, které byly popisovány v článcích [11, 12]. Autoři však tento jev nepopisují, protože při výbrusech je možné vidět pouze jednu řezovou rovinu. Rozdíly nejsou výrazné (do 10 %). Při změně počátečního bodu trajektorie se místo rozšíření v každé vrstvě posouvá a tím rozdíly zanikají. Pozorovatelné zůstane pouze rozšíření návaru k ose prutu. U prutů s menším průměrem, kde je jev výraznější, může dojít ke kompletnímu protavení a tím pádem není možné rozšiřování návaru vůbec pozorovat.

Šířka návaru u kolmých prutů je v simulaci větší cca o 25 % než tomu tak je u experimentálních testů. Pravděpodobné důvody rozšíření návaru oproti experimentům byly popsány v předchozí kapitole. **6.1**.

6.3 Skloněné pruty

U skloněných prutů je situace mnohem komplikovanější než u kolmých prutů. Simulace ukazuje, že výsledný tvar prutu, popřípadě rozměr návaru, který je možné odměřit z metalografického výbrusu není tvořen v dané vrstvě. Nejbližší místo od osy prutu, které se nachází v převisu prutu není při skenování dráhy dostatečně tepelně ovlivněno, aby mohlo dojít k jeho roztavení (**Obr. 5-9**). Zmiňované místo bude pravděpodobně roztaveno až v následující vrstvě. Toto nerovnoměrné spékání prášku může způsobovat vyšší drsnost u skloněných prutů, jak je popisováno v literatuře [12, 27].

Dle článku [11] způsobuje kumulace tepla na spodní straně prutu jak drsnost, tak i rozdílnou vnitřní strukturu ve spodní části prutu. Na grafu (**Obr. 5-8**) je možné vidět, že po průjezdu laseru vzroste u skloněných prutů teplota pod návarem více než u kolmých prutů. Tato vyšší teplota je pravděpodobně zapříčiněna tím, že prášek se chová jako izolant. Teplo se nemůže šířit za stěnu prutu a šíří se podél stěny dolů, směrem k podložce. Problémem může být, že místo pod návarem je u skloněného prutu mnohem blíže ke stěně prutu, než je tomu u kolmého prutu. To znamená, že se u skloněných prutů v oblasti převisu vyskytuje vysoká teplota poblíž stěny prutu. To by mohlo zapříčinit větší množství nalepeného prášku na spodní straně prutu. U kolmých prutů je kořen návaru, který má nejvyšší teplotu uzavřen uprostřed materiálu a nedochází k přibližování vysokých teplot ke stěnám prutu a nehrozí tak nárůst drsnosti.

Změnu vnitřní struktury popisované na **Obr. 2-11 (b)** pravděpodobně nepředstavuje výskyt vyšší teploty ve spodní části prutu. Tato změna vnitřní struktury by mohla být způsobena i vícenásobným přetavováním oblastí převisu. K tomuto přetavování dochází z důvodu deformace návaru v oblasti převisu. Přetavování je také dáno už samotnou geometrií prutu, a je způsobeno posouváním trajektorie v jednotlivých vrstvách. Na **Obr. 5-9** je možné vidět, že místa u osy prutu nejsou přetavována vůbec a místa dále od osy jsou přetavena vícekrát. Tento rozdíl v přetavování pravděpodobně zapříčiňuje rozdíl vnitřní struktury prutu. Do převisu je dodáváno více energie, a proto se tam tvoří menší kulaté póry. V místě u osy prutu je méně energie a proto se tam tvoří větší ostré póry [6, 8]. Tímto by mohla být vyvrácena hypotéza č. 1. Rozdílná vnitřní struktura není způsobena kumulací energie v převisu prutu, ale spíše vícenásobným přetavováním materiálu. Laser ovlivňuje stejné místo vícekrát, tím se mohou uvolňovat plyny, které vytvoří kulovité póry.

6.4 Začátek/konec trajektorie

Na základě pozorování simulace bylo zjištěno, že v oblasti, kde začíná a končí trajektorie laseru se vyskytuje rozdíl v rozměrech návaru. Na začátku trajektorie je návar úzký. Když návar dojde do koncového bodu je nejširší. Mezi koncovým a počátečním bodem je zúžení. Tento jev nebyl dříve popsán, protože se běžně používá proměnného místa začátku a konce trajektorie. Tím pádem je toto zúžení zalité v následující vrstvě a není možné jej pozorovat. Po vytvoření experimentálních vzorků s neměnným místem začátku a konce trajektorie bylo zúžení pozorováno. Návar v koncovém bodě je výrazně rozšířen (až o 30 %). V místě zúžení je šířka návaru poloviční oproti rozšíření v koncovém bodě. (**Příloha 2**). Toto zúžení a rozšíření může být způsobeno nasátím prášku do návaru [28]. Na začátku trajektorie je prášek nasán do návaru a když laser dojde na konec trajektorie, v oblasti začátku a konce nezbude žádný prášek pro vznik návaru, a tím vznikne zúžení. Energie se vlivem absence prášku mezi začátkem a koncem může šířit pouze do stran a tím vznikne rozšíření konce návaru.

Dalším možným důvodem, proč tento jev vzniká je kruhový průřez laserového paprsku. Pokud by laser byl nastaven tak, aby při začátku trajektorie byl posunut o svůj poloměr a na konci trajektorie skončil laser o poloměr dříve. Tím by bylo způsobeno, že v přesném místě dotyku konce a začátku trajektorie by došlo pouze k bodovému dotyku. V tomto místě by tak bylo malé množství energie pro vytvoření návaru se stejným rozměrem jako ve zbytku trajektorie.

Rozšíření konce trajektorie by mohlo být také způsobeno tím, že laser dodává teplo do již předehřátého prášku. V materiálu je tedy více energie a tím může dojít k rozšíření návaru. Větší množství energie může být v tomto místě způsobeno i pohybem laser. Laser má na začátku trajektorie nulovou rychlost. Než dosáhne požadované rychlosti, pohybuje se pomaleji a se zrychlením. Vlivem pomalejšího pohybu je do těchto oblastí dodáváno více energie, čímž může být zapříčiněna změna rozměrů návarů.

Tímto jevem by bylo vhodné se dále zabývat, i když při proměnném startovním bodu není pozorován. Zužování a rozšiřování návaru na hranicích trajektorie může vést k větší vlnitosti i drsnosti na povrchu prutů. K odstranění nestejných rozměrů návaru v počátku a konci trajektorie by mohlo být dosaženo prodloužením trajektorie takovým způsobem, aby byla část trajektorie přetavena. Toto řešení by pravděpodobně mohlo zlepšit výsledek pouze v případě, že by zúžení nevznikalo vlivem absence prášku ve zmiňované oblasti.

6.5 Konstantní překryv návarů

Vzhledem k tomu, že se změnou průměru prutu dochází ke změnám v rozměrech návaru (**Obr. 5-6**) by bylo vhodné měnit vzdálenosti jednotlivých kontur tak, aby reflektovaly proměnlivé rozměry návarů. Nabízí se možnost změny průměru prutu pouze přidáváním, či odebráním kontur. Nejtenčí prut by byl tvořen pouze jednou konturou a jeho průměr by byl pevně daný. Další, tlustší pruty by byly tvořeny větším množstvím kontur a jejich průměr by se odvíjel pouze od počtu použitých kontur. Výsledný průměr prutu by se tedy odvíjel od procesních parametrů, které ovlivňují šířku návaru. Při použití standartních procesních parametrů, kde jsou vzdálenosti mezi všemi konturami stejné, může dojít k tomu, že u vnitřní kontury bude nedostatečný překryv, nebo naopak moc velký překryv. Příliš velký i příliš malý překryv drah zapříčiňuje vznik porozity [11, 12]. Pokud by pruty byly tvořeny pouze přidáváním kontur s určitými vzdálenostmi, byl by zajištěn konstantní překryv návarů. Navíc by bylo zajištěno, že vnitřní kontura nebude nikdy příliš malá, ani velká. Nevýhodou by však mohlo být, že by průměry prutů byly dané na základě zvolených parametrů a nebylo by možné vyrábět pruty s naprosto libovolnými rozměry.

Tento způsob přidávání kontur nemůže být použit při výrobě skloněných prutů. Při zachování stejných překryvů návaru se vnitřní elipsa s rostoucím průměrem prutu protahuje (**Obr. 5-14**). Z tohoto důvodu není možné pouze přidávat kontury, ale je vždy nutné změnit rozměr elipsy tak, aby vyplnila vnitřek prutu. Jak popisuje i autor [12] při větších průměrech prutu docházelo v ose prutu k neroztavení prášku, což způsobilo vznik porozity. Ani způsob výroby „inside out“ nepomohl tento problém vyřešit.

Tato porozita uvnitř prutu je zapříčiněná právě změnou rozměru vnitřní elipsy. Protaháním elipsy dochází k tomu, že oblast osy prutu není dostatečně nahřívána od přejezdu laseru v převisu prutu a opačné strany převisu. Podle simulace může být teplota v ose prutu pouze změnou délky elipsy při zachování stejného překryvu změněna až o 300 °C (**Obr. 5-15**).

Pro použití tohoto způsobu tvorby trajektorií pro tvorbu drah laseru by bylo nutné upravovat procesní parametry vnitřní elipsy tak, aby bylo do oblastí kolem osy prutu přinášeno více energie. Tímto způsobem by mohlo být možné zabránit vzniku porozity v ose prutu.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na sestavení numerického modelu výroby tenkých prutů technologií SLM. Tento model umožňuje teplotní analýzu výrobu prutu vyráběného contour strategií. Díky simulaci byly lépe pochopeny a popsány jevy, které se při výrobě tenkých prutů, na rozdíl od objemových dílů objevují.

Simulace, která je výstupem této práce dokáže i přes zavedená zjednodušení reflektovat změny procesních parametrů a kopírovat trendy výsledků experimentálních vzorků. Díky tomu je možné považovat úroveň simulace za dostatečnou pro potřeby této práce.

V práci byl popsán vliv změny průměru prutu na rozměry návaru uvnitř prutu. Na geometrii návaru pravděpodobně nemá vliv pouze přehřívání prášku uvnitř prutu, které se se zmenšujícím průměrem prutu stupňuje, ale také křivost trajektorie, která zapříčiňuje rozdílné rychlosti bodů v oblasti ovlivněné laserem.

U skloněných prutů se ukazuje, že vlivem jejich geometrie není výsledný tvar prutu tvořen v jedné vrstvě, ale je tvořen ve více vrstvách. Vlivem deformace návaru u skloněného prutu dochází k vícenásobnému přetavování oblasti převisu, což zapříčiňuje rozdílnou vnitřní strukturu ve spodní části prutu.

V práci byly pozorovány značné rozdíly v rozměrech návaru na rozmezí začátku a konce trajektorie. Výsledky simulace potvrdil experimentální test s nastaveným konstantním startovním bodem trajektorie.

Použití konstantního skutečného překryvu návaru je možné dosáhnout stabilních výsledků při výrobě kolmých prutů. U skloněných prutů nastává problém s vnitřní elipsou. Rozměry této elipsy se mění v závislosti na průměru prutu. Pro pruty s větším průměrem jak 1 mm je do osy prutu dodáván nedostatek energie, a tím vzniká v ose prutu porozita. Tento problém by mohl být potlačen použitím procesních parametrů s větší energií pro vnitřní elipsu skloněných prutů.

Lepší přiblížení simulace k realitě by mohlo přinést zahrnutí prvků, které by simulovaly prášek v nové vrstvě. Aby bylo možné vrstvu s práškem v simulaci použít, bylo by nutné zajistit změnu stavu materiálu tak, aby se při chladnutí nevrátil do stejného stavu (tedy do stavu prášku), ale do stavu objemového, který má mnohem lepší tepelnou vodivost.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

V další fázi výzkumu bych se chtěl zaměřit na zahrnutí změny stavu materiálu do simulace, aby bylo možné uvažovat vrchní vrstvu prášku.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation? - Our World in Data.* [vid. 4. květen 2021]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>
- [2] *3D printing in aircraft - 3DGence.* [vid. 4. květen 2021]. Dostupné z: <https://3dgence.com/3dnews/3d-printing-aircraft/>
- [3] *3D Printing in Aviation | EOS GmbH.* [vid. 4. květen 2021]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/aerospace-3d-printing/airbus-case-study>
- [4] STAŠIĆ, J. a D. BOŽIĆ. The effect of NiB additive on surface morphology and microstructure of 316L stainless steel single tracks and layers obtained by SLM. *Surface and Coatings Technology.* 2016, roč. 307, s. 407–417. ISSN 02578972.
- [5] *Additive manufacturing crosses the finishing line.* [vid. 24. únor 2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.ru/ru/additive-manufacturing-crosses-the-finishing-line--38971>
- [6] ABOULKHAIR, Nesma T., Marco SIMONELLI, Luke PARRY, Ian ASHCROFT, Christopher TUCK a Richard HAGUE. *3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting.* B.m.: Elsevier Ltd. 1. prosinec 2019. ISSN 00796425.
- [7] BUCHBINDER, D., H. SCHLEIFENBAUM, S. HEIDRICH, W. MEINERS a J. BÜLTMANN. High power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminum parts. In: *Physics Procedia.* B.m.: Elsevier B.V., 2011, s. 271–278. ISSN 18753892.
- [8] GALY, Cassiopée, Emilie LE GUEN, Eric LACOSTE a Corinne ARVIEU. *Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences.* B.m.: Elsevier B.V. 1. srpen 2018. ISSN 22148604.
- [9] ABOULKHAIR, Nesma T., Ian MASKERY, Chris TUCK, Ian ASHCROFT a Nicola M. EVERITT. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology.* 2016, roč. 230, s. 88–98. ISSN 09240136.
- [10] WEI, Pei, Zhengying WEI, Zhen CHEN, Jun DU, Yuyang HE, Junfeng LI a Yatong ZHOU. The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior. *Applied Surface Science.* 2017, roč. 408, s. 38–50. ISSN 01694332.
- [11] VRÁNA, Radek, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK, Libor PANTĚLEJEV, Jan JAROŠ, Tomáš ZIKMUND a Jozef KAISER. Selective Laser Melting Strategy for Fabrication of Thin Struts Usable in Lattice Structures. *Materials.* 2018, roč. 11, č. 9, s. 1763. ISSN 1996-1944.
- [12] JAROŠ, Jan. Vývoj skenovací strategie laseru pro výrobu mikro-prutové struktury technologií SLM. Brno, 2020, 112 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Vrána, Ph.D.

- [13] QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, roč. 628, s. 188–197 [vid. 8. březen 2019]. ISSN 0921-5093.
- [14] LARIMIAN, Taban, Manigandan KANNAN, Dariusz GRZESIAK, Bandar ALMANGOUR a Tushar BORKAR. Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*. 2020, roč. 770, s. 138455. ISSN 09215093.
- [15] JAROŠ, J. Vývoj procesních parametrů technologie 3D kovového risku se zaměřením na výrobu mikro-prutové struktury. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.
- [16] *Additive Manufacturing & 3D Printing Simulation Software | Ansys*. [vid. 4. květen 2021]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/additive>
- [17] *Software Solution Simufact Additive - Simufact software solutions*. [vid. 4. květen 2021]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/simufact-additive.html>
- [18] DU, Yang, Xinyu YOU, Fengbin QIAO, Lijie GUO a Zhengwu LIU. A model for predicting the temperature field during selective laser melting. *Results in Physics*. 2019, roč. 12, s. 52–60 [vid. 7. březen 2020]. ISSN 22113797.
- [19] STACY, Shawn C., Xin ZHANG, Michelle PANTOYA a Brandon WEEKS. The effects of density on thermal conductivity and absorption coefficient for consolidated aluminum nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, roč. 73, s. 595–599. ISSN 00179310.
- [20] LIU, Shiwen, Haihong ZHU, Gangyong PENG, Jie YIN a Xiaoyan ZENG. Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis. *Materials and Design*. 2018, roč. 142, s. 319–328. ISSN 18734197.
- [21] WEI, Pei, Wei ZHENGYING, Chen ZHEN, Li JUNFENG, Zhang SHUZHE a Du JUN. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2017, roč. 123, č. 8, s. 1–15. ISSN 14320630.
- [22] LETENNEUR, Morgan, Alena KREITCBERG a Vladimir BRAILOVSKI. Optimization of laser powder bed fusion processing using a combination of melt pool modeling and design of experiment approaches: Density control. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019, roč. 3, č. 1. ISSN 25044494.
- [23] *SLM Solutions Group AG: Home*. [vid. 2. duben 2020]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/>
- [24] *Laser-Melting of High-end Aluminium Alloy Components | Farinia Group*. [vid. 10. květen 2021]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/blog/laser-melting-high-end-aluminium-alloy-components>
- [25] RENISHAW. *Safety Data Sheet (SDS), Aluminium powder AlSi10Mg*. 2018 [vid. 15. květen 2021]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/en/download/safety-data-sheet-alsi10mg-am-powder-eu--103790>

- [26] WEI, Pei, Zhengying WEI, Zhen CHEN, Yuyang HE a Jun DU. Thermal behavior in single track during selective laser melting of AlSi10Mg powder. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2017, roč. 123, č. 9, s. 1–13. ISSN 14320630.
- [27] HAN, Xuesong, Haihong ZHU, Xiaojia NIE, Guoqing WANG, Xiaoyan ZENG, Xuesong HAN, Haihong ZHU, Xiaojia NIE, Guoqing WANG a Xiaoyan ZENG. Investigation on Selective Laser Melting AlSi10Mg Cellular Lattice Strut: Molten Pool Morphology, Surface Roughness and Dimensional Accuracy. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 3, s. 392 [vid. 26. března 2019]. ISSN 1996-1944.
- [28] METEL, Alexander, Michael STEBULYANIN, Sergey FEDOROV a Anna OKUNKOVA. Power Density Distribution for Laser Additive Manufacturing (SLM): Potential, Fundamentals and Advanced Applications. *Technologies*. 2018, roč. 7, č. 1, s. 5 [vid. 10. květen 2021]. ISSN 2227-7080.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

3D	three dimensional space
AED	plošná energie
BCC	kubická prostorově středěná buňka
D	hloubka průvaru
d_{in}	průměr vnitřních bodů oblasti laseru
$d_{trajektorie}$	průměr trajektorie
d_{laseru}	průměr laseru
d_{out}	průměr venkovních bodů laseru
h	vzdálenost trajektorií laseru
HD	vzdálenost trajektorií laseru
L	délka návaru
LED	liniová energie
MHS	Moving heat source
P	výkon
q	výsledné dodané teplo
R_{laseru}	poloměr laseru
SLM	Selective laser melting
t	výška vrstvy
v	skenovací rychlost
v_{in}	rychlost vnitřních bodů laseru
v_{out}	rychlost vnějších bodů laseru
v_{scan}	skenovací rychlost
W	šířka návaru
ρ_p	hustota
ρ_s	hustota objemového materiálu
φ	porozita prášku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Mezichladič s mikro-prutovou strukturou pro studentskou formuli [5]	13
Obr. 2-1	Změna velikostí pórů v závislosti na skenovací rychlosti: (a) nejnižší skenovací rychlost; (b-d) rostoucí skenovací rychlost [6]	15
Obr. 2-2	(a) „Balling“ a „satelity“; (b) řez povrchu s výrazným „balling“ efektem [6].. ..	15
Obr. 2-3	Jednotlivé návary vyráběné se skenovací rychlostí: (a) 250 mm/s; (b) 500 mm/s; (c) 750 mm/s [9].....	17
Obr. 2-4	Vyleštěný řez návarem, který ukazuje návar při skenovací rychlosti: (a) 250 mm/s a hloubkou průvaru (modře), výškou návary (zeleně); (b) 500 mm/s; (c) 750 mm/s [9].....	17
Obr. 2-5	Návary vytvářené s rozdílnými parametry [10]	18
Obr. 2-6	Závislost šířky dráhy na lineární energii pro rozdílné vertikální vzorky [12] ..	20
Obr. 2-7	(a) Graf závislosti průměru prutu na výkon laseru (b) průměr prutu v závislosti na výkonu laseru [13].....	21
Obr. 2-8	Graf závislosti (a) porozity na výkonu laseru; (b) porozity na skenovací rychlosti [13]	21
Obr. 2-9	Skenovací strategie: (a) střídavé přejíždění laseru, s jedním přejetím; (b) střídavé přejetí laseru, vícenásobné přejetí laseru; (c) křížené přejíždění s jedním přejetím dráhy [14].....	22
Obr. 2-10	Porovnání standartní skenovací strategie s contour strategií [11].....	22
Obr. 2-11	Schéma přenosu energie u skloněného prutu, rozdílná vnitřní struktura skloněného prutu [11].....	23
Obr. 2-12	(a) Závislost porozity na výkonu laseru při konstantní skenovací rychlosti 700 mm/s; (b) závislost porozity na skenovací rychlosti při konstantním výkonu laseru 350 W [15].....	23
Obr. 2-13	(a) Schéma rozdělení šířky návary; (b) graf závislosti šířky dráhy na průměru prutu [12]	24
Obr. 2-14	(a) Rozdílná horní a spodní šířka dráhy u skloněných prutů 1T v závislosti na průměru trajektorie laseru; (b) schéma rozložení vzorku při snímání; (c) snímky prutových vzorků 1T s průměrem trajektorie laseru 0,8; 1,2; 1,6 mm [12].....	24

Obr. 2-15	Response surface pro určení šířky dráhy u kolmých prutů [12].....	25
Obr. 2-16	Diagram okrajových podmínek simulace [18]	26
Obr. 2-17	Rozložení 3D tělesa pro simulaci metodou konečných prvků [18]	26
Obr. 2-18	Graf tepelné vodivosti materiálu černě tiskové podložky, červeně v tuhém stavu, modře materiál v práškovém stavu [20]	27
Obr. 2-19	Body v průřezu návaru, ve kterých byly zjišťovány termální proměnné [20]...	28
Obr. 2-20	Vliv vzdálenosti drah na tvorbu porozity [21].....	29
Obr. 2-21	Schéma rozměrů návaru [22]	29
Obr. 2-22	Výsledek simulace. Bílá barva představuje jádro taveniny [22]	30
Obr. 4-1	Schéma postupu řešení.....	35
Obr. 4-2	Zařízení SLM 280HL od firmy SLM Solutions [23].....	36
Obr. 4-3	3D model vzorku. Červeně tenké stěny pro určení středové roviny vzorku	37
Obr. 4-4	a) Schéma simulace: P výkon; A,B,C komponenty modelu; v rychlost; d průměr trajektorie; b) rozdělení návaru s tečným prodloužením mimo materiál.	38
Obr. 4-5	Řez geometrie kolmého prutu pro simulaci	40
Obr. 4-6	Schéma vzorku prutu	42
Obr. 5-1	Graf závislosti šířky návaru na výkonu laseru s konstantní skenovací rychlostí 1000 mm/s.....	44
Obr. 5-2	Graf závislosti šířky návaru na skenovací rychlosti s konstantním výkonem 300 W	44
Obr. 5-3	Rozměry návaru v simulaci	45
Obr. 5-4	Vývoj návaru u trajektorie s průměrem 0,8 mm; maximální teplota při skenování	46
Obr. 5-5	Schéma rychlosti rozdílných míst laseru	46
Obr. 5-6	Graf vlivu průměru prutu na šířku návaru	47
Obr. 5-7	Rozdíl teploty pod návarem u kolmého a skloněného prutu (pohled v řezu)	48
Obr. 5-8	Rozdíl teplot v místě pod laserem ve vzdálenosti 0,15 mm pod povrchem. Červená čára představuje okamžik přejezdu laseru nad pozorovaným místem	49
Obr. 5-9	Schéma přetavování ve skloněném prutu	49

Obr. 5-10	Simulace skloněného prutu	50
Obr. 5-11	(a) Simulace zúžení návaru v oblasti začátku a konce návaru; (b) zúžení návaru v experimentu	51
Obr. 5-12	(a) Proměnlivý začátek trajektorie; (b) konstantní začátek trajektorie	51
Obr. 5-13	Srovnání prutů s konstantním a proměnlivým startovním bodem trajektorie. (a) Kolmý konstantní bod; (b) kolmý nekonstantní bod; (c) skloněný konstantní bod; (d) skloněný nekonstantní bod	52
Obr. 5-14	Schéma změny rozměru vnitřní elipsy	53
Obr. 5-15	Porovnání vlivu délky elipsy na protavení prutu; (a) délka elipsy 0,85 mm (b) délka elipsy 1,55 mm	53

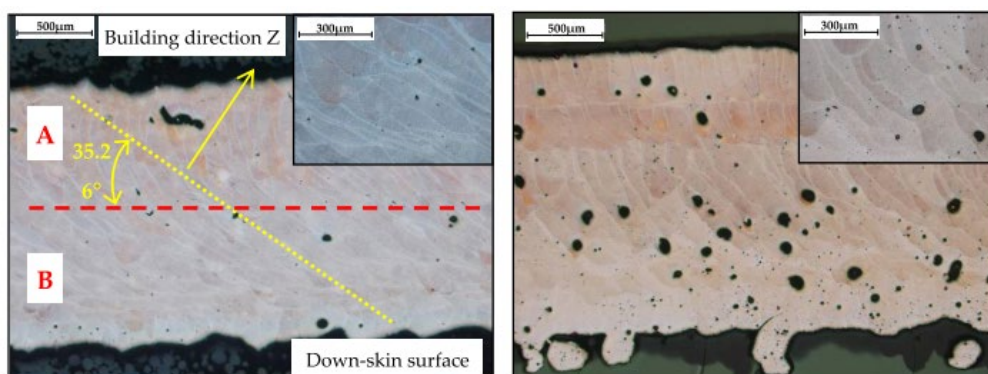
11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Průměrná šířka návarů (barevně), lineární energie (bíle) [11]	19
-----------------	---	----

12 SEZNAM PŘÍLOH

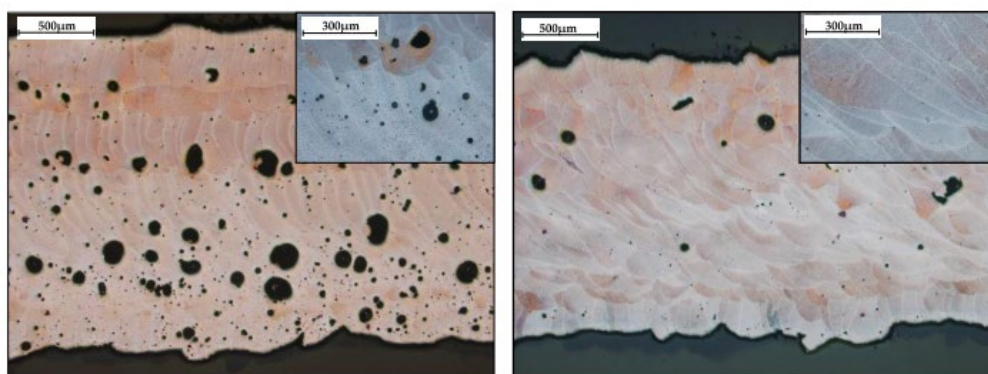
Příloha 1 – Rozdílná vnitřní struktura prutů (a) $P = 250 \text{ W}$, $v = 1400 \text{ mm/s}$; (b) $P = 300 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/s}$; (c) $P = 350 \text{ W}$, $v = 500 \text{ mm/s}$; (d) $P = 400 \text{ W}$, $v = 1700 \text{ mm/s}$ [11]	69
Příloha 2 – Rozdílná šířka návaru na začátku a na konci trajektorie	70
Příloha 3 – Rozměry kontur pro skloněné pruty; $P = 225 \text{ W}$; $v = 900 \text{ mm/s}$	70
Příloha 4 – Rozměry kontur pro vertikální pruty; $P = 225 \text{ W}$; $v = 900 \text{ mm/s}$	71
Příloha 5 – 3D pohled na simulaci prutu, okolní prášek je skrytý	71

Příloha 1 – Rozdílná vnitřní struktura prutů (a) $P = 250$ W, $v = 1400$ mm/s; (b) $P = 300$ W, $v = 500$ mm/s; (c) $P = 350$ W, $v = 500$ mm/s; (d) $P = 400$ W, $v = 1700$ mm/s [11]



(a)

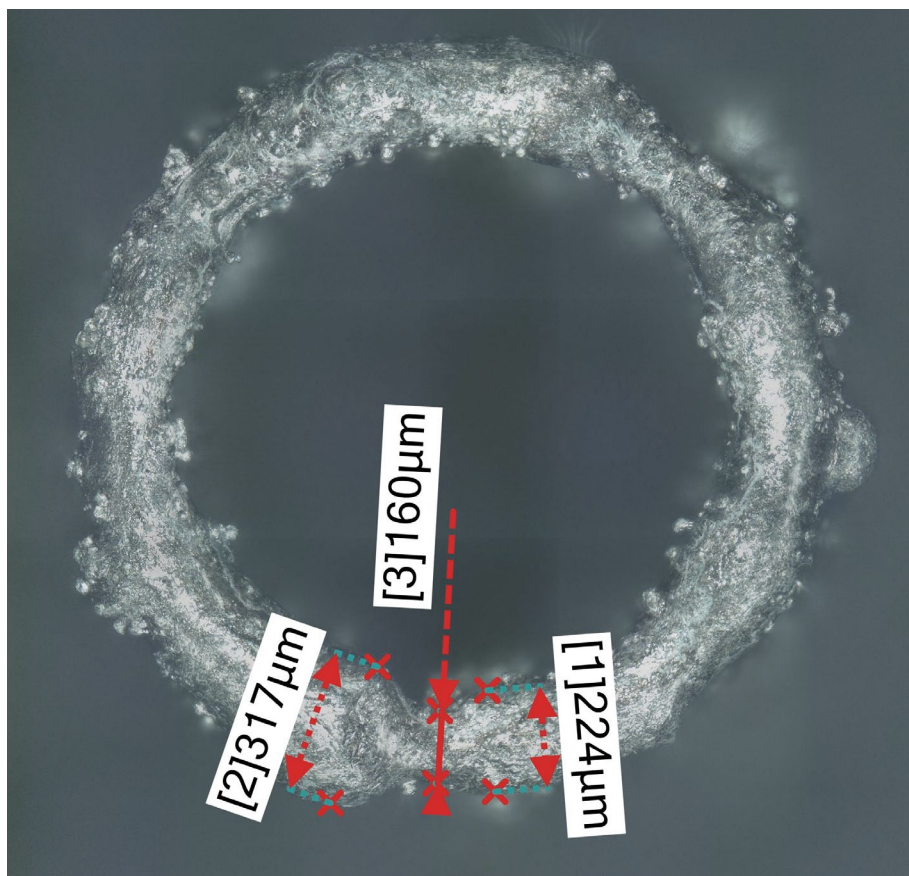
(b)



(c)

(d)

Příloha 2 – Rozdílná šířka návaru na začátku a na konci trajektorie



Příloha 3 – Rozměry kontur pro skloněné pruty; P = 225 W; v = 900 mm/s

Počet kontur	Číslo kontury	Šířka elipsy (mm)	Délka elipsy (mm)
1	1	0,30	0,52
2	1	0,30	0,84
	2	0,72	1,25
3	1	0,30	1,21
	2	0,72	1,58
	3	1,10	1,91
4	1	0,30	1,54
	2	0,72	1,88
	3	1,10	2,21
	4	1,45	2,52

Příloha 4 – Rozměry kontur pro vertikální pruty; $P = 225 \text{ W}$; $v = 900 \text{ mm/s}$

Číslo kontury	Průměr kontury (mm)
1	0,30
2	0,72
3	1,10
4	1,45

Příloha 5 – 3D pohled na simulaci prutu, okolní prášek je skrytý

