

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie
a zabezpečování kvality
Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnosti snižování vnitřního napětí aditivně vyráběných kovových
komponent**

Autor: **Bc. Daniel VESELÝ**
Vedoucí práce: **Ing. Ivana ZETKOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel VESELÝ**
Osobní číslo: **S20N0020P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Možnosti snižování vnitřního napětí aditivně vyráběných kovových komponent**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Návrh vlastního řešení
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. The 4th edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, [2015], 2015. XXVIII, 518 stran. ISBN 978-981-4571-41-8.
- BIAN, Linkan, ed., SHAMSAEI, Nima, ed. a USHER, John , ed. Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2014. 498 s. 1493921134.
- REDWOOD, B., SHÖFFER, F., GARRET, B., The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 3D Hubs, 2017. 304 s. ISBN: 978-9082748505.
- STANĚK, J., NĚMEJC, J. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-363-9.

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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Nozar, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za odborné vedení mé práce a konzultantovi Ing. Martinu Nozarovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování mé práce.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům laboratoří, jmenovitě: Ing. Daně Kubátové, Ph.D., Ing. Andree Ronešové, Ing. Petru Bohdanovi, Bc. Romanu Pazdercovi a mému kolegovi Janu Procházkovi, za výpomoc při zpracování praktické části mé práce.

V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině, která mi byla po celou dobu studia oporou a podporovala mě při zpracování této práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|------------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Bc. Veselý | Jméno Daniel | |
| STUDIJNÍ OBOR | N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D. | Jméno Ivana | |
| PRACOVISŤE | ZČU – FST – KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Možnosti snižování vnitřního napětí aditivně vyráběných kovových komponent | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2022 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| CELKEM | 60 | TEXTOVÁ ČÁST | 53 | GRAFICKÁ ČÁST | 7 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

| | |
|----------------------|--|
| STRUČNÝ POPIS | <p>Diplomová práce se v teoretické části zabývá popsáním současné technologie aditivní výroby, především výroby z kovových materiálů, rozбором jejích výhod, nevýhod a základních procesních parametrů. Též je zde popsáno vnitřní napětí, která vzniká v aditivně vyrobených kusech, způsoby jeho měření, důvody vzniku a možnosti jeho odstraňování.</p> <p>V praktické části práce jsou pak popsány experimenty na zjištění velikosti vnitřního napětí ve vybraných vzorcích z oceli 316 L a MS1. Toto napětí je měřeno pomocí odvrtávací metody a velikosti deformace jednotlivých vzorků.</p> <p>V závěru práce jsou porovnány a vyhodnoceny jednotlivé výsledky s ohledem na nalezení parametrů a nastavení, při kterých je zbytkové napětí ve vytištěných kusech co nejmenší.</p> |
| KLÍČOVÁ SLOVA | 3D tisk, kovová aditivní výroba, vnitřní zbytkové napětí, SW Materialise Magics, SW EOSPRINT |

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

| | | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|-----------------------------------|--|
| AUTHOR | Surname Bc. Vesely | | Name Daniel | |
| FIELD OF STUDY | N0715A270011 – Machining, Additive Technology and Quality Assurance | | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková, Ph.D. | | Name Ivana | |
| INSTITUTION | ZČU – FST – KTO | | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable | |
| TITLE OF THE WORK | Options to reduce internal tensions of additively manufactured metal components | | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KTO | SUBMITTED IN | 2022 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 60 | TEXT PART | 53 | GRAPHICAL PART | 7 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | <p>In the theoretical part the thesis deals with current technologies of additive manufacturing, primarily with metal production, analysis of advantages and disadvantages as well as basic procedural parameters. Secondly, internal tension of additively manufactured products is described including methods of measurement, causes of appearance and removal options.</p> <p>In the practical part experiments were conducted to determine the extent of internal tension in selected samples from steel 316 L and MS1. The tension is measured using drilling method and scale of deformation. In the end the gained results are compared and evaluated in order to select suitable parameters and settings to minimize residual tension in the additively manufactured products.</p> |
| KEY WORDS | 3D printing, metal additive manufacturing, internal residual stress, SW Materialize Magics, SW EOSPRINT |

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk | 9 |
| Seznam obrázků | 9 |
| Seznam tabulek | 10 |
| Seznam grafů | 10 |
| 1 Úvod | 11 |
| 1.1 Cíl práce | 11 |
| 1.2 Postup řešení | 11 |
| 2 Analýza současného stavu | 12 |
| 2.1 Regionální technický institut ZČU | 12 |
| 2.2 Aditivní výroba | 12 |
| 2.2.1 Materiály využívané v aditivní výrobě | 13 |
| 2.2.2 Rozdělení technologie aditivní výroby | 13 |
| 2.3 Proces aditivní výroby dílu z kovu | 14 |
| 2.3.1 Software EOSPRINT | 15 |
| 2.4 Aspekty ovlivňující součást | 15 |
| 2.4.1 Orientace součástí na platformě | 15 |
| 2.4.2 Anizotropie součástí | 16 |
| 2.4.3 Materiálové vlastnosti součástí | 17 |
| 2.5 Parametry ovlivňující tisk | 17 |
| 2.5.1 Procesní parametry | 17 |
| 2.5.2 Strojní parametry | 20 |
| 2.5.3 Parametry kovového prášku | 21 |
| 2.6 Vnitřní napětí | 21 |
| 2.6.1 Dočasné vnitřní napětí | 22 |
| 2.6.2 Zbytkové vnitřní napětí | 22 |
| 2.6.3 Metody měření | 23 |
| 2.7 Vnitřní napětí v aditivní výrobě a možnosti jeho minimalizace | 31 |
| 2.7.1 Důsledky zbytkového napětí | 32 |
| 2.7.2 Možnosti odstranění napětí | 32 |
| 3 Návrh vlastního řešení | 34 |
| 3.1 Zadání experimentu | 34 |
| 3.1.1 Princip experimentu | 34 |
| 3.1.2 Použité experimentální vzorky | 34 |
| 3.1.3 Použité vybavení | 34 |
| 3.2 První experiment – tisk kalibračních vzorků 316 L | 35 |
| 3.2.1 Popis experimentu | 35 |
| 3.2.2 Provedení experimentu | 35 |
| 3.2.3 Výsledky experimentu | 36 |
| 3.2.4 Hodnocení experimentu | 39 |
| 3.3 Druhý experiment – tisk kalibračních vzorků MS1 | 40 |
| 3.3.1 Popis experimentu | 40 |
| 3.3.2 Provedení experimentu | 40 |
| 3.3.3 Výsledky experimentu | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.4 | Hodnocení experimentu | 41 |
| 3.4 | <i>Třetí experiment – vzorky s různými procesními parametry</i> | 41 |
| 3.4.1 | Popis experimentu..... | 41 |
| 3.4.2 | Provedení experimentu | 44 |
| 3.4.4 | Výsledky experimentu | 46 |
| 3.4.5 | Hodnocení experimentu | 49 |
| 3.5 | <i>Čtvrtý experiment – simulační ověření průběhu vnitřního napětí</i> | 50 |
| 3.5.1 | Popis experimentu..... | 50 |
| 3.5.2 | Provedení experimentu | 51 |
| 3.5.3 | Výsledky experimentu | 52 |
| 3.5.4 | Hodnocení experimentu | 53 |
| 4 | Zhodnocení | 54 |
| 5 | Závěr | 57 |
| 6 | Zdroje | 58 |

Seznam použitých zkratk

| | | |
|------|--|-----|
| 2D | Dvoudimenzionální | [-] |
| 3D | Trojdimenzionální | [-] |
| RTI | Regionální technický institut | [-] |
| ZČU | Západočeská univerzita | [-] |
| GmbH | Gesellschaft mit beschränkter Haftung, obdoba české zkratky s. r. o. | [-] |
| SW | Software | [-] |
| DMLS | Direkt Metall Laser Schmelzen | [-] |
| STL | Souborový formát k uložení modelů pro 3D tisk | [-] |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Schéma 3D tiskárny s technologií DMLS [8] | 14 |
| Obrázek 2 - Nastavení procesních parametrů v SW EOSPRINT [9] | 15 |
| Obrázek 3 - Vysvětlení Upskin, InFill a DownSkin | 15 |
| Obrázek 4 - Možnosti orientace dílu na platformě [4] | 16 |
| Obrázek 5 - Orientace zkoušeného dílu [10] | 16 |
| Obrázek 6 - Zbytkové napětí vůči orientaci dílu [11] | 16 |
| Obrázek 7 - Procesní parametry [12] | 17 |
| Obrázek 8 - Vliv rychlosti skenování na ovlivněnou oblast [12] | 18 |
| Obrázek 9 - Schéma vyplnění plochy [15] | 19 |
| Obrázek 10 - Laser 1) a ovlivněná oblast 2) [16] | 19 |
| Obrázek 11 - Nejčastější skenovací strategie [13] | 19 |
| Obrázek 12 - Velikost laserového paprsku [18] | 20 |
| Obrázek 13 - Schematické znázornění Makroskopických (σ^I), Mikroskopických (σ^{II}) a Submikroskopických (σ^{III}) napětí jednofázového polykrystalického materiálu [24] | 23 |
| Obrázek 14 - Metody pro měření zbytkových napětí a jejich hloubka [mm] [27] | 24 |
| Obrázek 15 - Uspořádání měření dělicí metodou (tloušťka vzorku t, hloubka štěrbin y, šířka štěrbin w, délka vzorku L, délka tenzometru l, tenzometr 1) a šířka vzorku B) | 25 |
| Obrázek 16 - Princip konturové metody [24] | 26 |
| Obrázek 17 - Teorie měření odvrtačací metody [28] | 26 |
| Obrázek 18 - Průběh tangenciálních a radiálních napětí [30] | 27 |
| Obrázek 19 - Tenká deska s průchozím otvorem [30] | 27 |
| Obrázek 20 - Orientace tenzometrické růžice – typ A (45°) [30] | 28 |
| Obrázek 21 - Rozměry vyvrtané díry [30] | 29 |
| Obrázek 22 - Schéma odvrtačací metody (vlevo) a metody sloupku (vpravo) [32] | 30 |
| Obrázek 23 - Uspořádání ultrazvukových metod [34] | 31 |
| Obrázek 24 - Deformace materiálu při skenování [35] | 31 |
| Obrázek 25 - Odtržení podpor kvůli zbytkovému napětí [14] | 32 |
| Obrázek 26 - Vznik trhliny vlivem zbytkového napětí kvůli přechodu z většího průměru na menší [14] | 32 |
| Obrázek 27 - Kalibrační hřeben | 34 |
| Obrázek 28 – Tiskárna EOS 290 M | 34 |
| Obrázek 29 - Vytisknuté kalibrační hřebeny | 35 |
| Obrázek 30 - Zdeformovaný hřeben po naříznutí drátořezem | 36 |
| Obrázek 31 - Náskres měření | 36 |
| Obrázek 32 - Kalibrační hřebeny, odvrtačací metoda | 36 |
| Obrázek 33 - Body měření kalibračních vzorků | 38 |
| Obrázek 34 - Strategie skenování [9] | 42 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 35 - Flow optimization - 1 laser; 2 již skenované pole; 3 nežádoucí produkty; 4 směr skenování | 43 |
| Obrázek 36 – Skywriting | 43 |
| Obrázek 37 - Power reduction mode | 44 |
| Obrázek 38 - Model se stříškou a vodící lištou..... | 44 |
| Obrázek 39 - Tištěná platforma a velikost šachovnicových polí..... | 45 |
| Obrázek 40 - Vytisknutá platforma se vzorky | 45 |
| Obrázek 41 - Záznam tisku jedné vrstvy v SW EOSTATE Exposure OT | 49 |
| Obrázek 42 - Platforma s hřebeny | 50 |
| Obrázek 43 - Odříznutí hřebenu | 50 |
| Obrázek 44 - Měřené hodnoty na hřebenu..... | 50 |
| Obrázek 45 - Tabulka kalibrace | 51 |
| Obrázek 46 - Nevykreslený model kvůli velkým voxelům | 51 |
| Obrázek 47 - Průběh teplot po vytištění první vrstvy | 52 |
| Obrázek 48 - Průběh teplot po vytištění celého modelu | 52 |
| Obrázek 49 - Napětí u kalibračních dílů | 52 |
| Obrázek 50 - Napětí u kalibračního modelu | 52 |
| Obrázek 51 - Průběh napětí MS1 | 53 |
| Obrázek 52 - Průběh tepla MS1 | 53 |
| Obrázek 53 - Simulace zbytkového napětí u složitějšího dílu | 53 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 - Metody zjišťování zbytkových napětí [26] | 24 |
| Tabulka 2 - Parametry kalibračního tisku vzorků z ocele 316L | 35 |
| Tabulka 3 - Tabulka naměřených hodnot z platformy A | 37 |
| Tabulka 4 - Tabulka naměřených hodnot z platformy B (protokol měření v příloze č. 3)..... | 39 |
| Tabulka 5 - Srovnání kalibračních vzorků..... | 40 |
| Tabulka 6 - Parametry kalibračního tisku vzorků z ocele MS1 | 40 |
| Tabulka 7 - Výsledky deformace MS1 (protokoly měření v příloze č. 4 a 5) | 41 |
| Tabulka 8 - Naměřené hodnoty vzorkové platformy (protokol měření v příloze č. 5)..... | 47 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 - Vývoj prodeje 3D tiskáren (v bilionech US dolarů) [1]..... | 12 |
| Graf 2 - Průběh teploty při žíhání [37]..... | 33 |
| Graf 3 - Změřený průběh napětí u odvrtávací metody..... | 37 |
| Graf 4 - Velikosti deformace vzorků | 46 |
| Graf 5 - Srovnání výsledků měření odvrtávací metody a metody měření deformace | 54 |
| Graf 6 - Srovnání deformace vzorků MS1 a 316 L | 55 |
| Graf 7 - Srovnání deformace vzorků s různými procesními parametry..... | 56 |

1 Úvod

Oblast aditivní výroby, běžně nazývaná 3D tisk, je rychle se rozvíjející technologie, jak v používaných materiálech, tak i v metodách tisku. Tento proces, cizojazyčně nazývaný Additive Manufacturing, vnesl do výrobního průmyslu možnost vyrábět tvarově složité součásti, které by jiným způsobem, například konvenčním obráběním, nešly vyrobit. Proces výroby pomocí aditivní technologie spočívá ve výrobě součástí z 3D dat, obvykle formou vytváření vrstvy po vrstvě. Regionální technologický institut v Plzni, kde byla prováděna výzkumná část této práce, se zabývá tiskem pomocí metody DMLS na tiskárnách EOS M 290.

Při procesu tisku metodou DMLS, která spočívá ve spékání kovového prášku vrstvu po vrstvě, vznikají lokální teplotní gradienty, které mohou způsobit vnitřní napětí v tištěných dílech. Vnitřní napětí u dílů je obecně nežádoucí, protože může způsobit například vznik trhlin v součásti, nebo deformaci. Proto je nutné součást po procesu tisku dále tepelně zpracovávat pro odstranění napětí, například žíháním. Nevýhodou tohoto postprocesingu je jeho časová náročnost, která následně zvyšuje i výslednou cenu součásti. Velikost vznikajícího napětí závisí na nastavených procesních parametrech tisku, které ovlivňují tvorbu napětí a další vlastnosti součásti. Správné nastavení parametrů je klíč ke zkvalitňování výrobků a ke snižování jejich finální ceny.

Vznik a velikost vnitřního zbytkového napětí lze také ovlivnit vhodnou optimalizací dílu. Toho je možné dosáhnout vhodnými konstrukčními úpravami nebo přidáním odpovídajících podpor, které zajistí dostatečný odvod tepla při tisku. Teplotní gradienty v průběhu tisku lze predikovat v simulačním modulu, kterým disponuje SW Materialise Magics.

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je identifikování příčin vzniku vnitřního napětí v aditivně vyráběných kovových komponentách a popsání možností zjištění jeho velikosti a účinného odstraňování. Pozornost zde bude věnována především možnostem snižování vnitřního napětí pomocí vhodného nastavení procesních parametrů aditivní výroby. Přítomnost tohoto napětí přitom bude sledována na speciálních kusech vyrobených z ocelí 316 L a MS1, u nichž bude hodnocena velikost zbytkového napětí pomocí odvrtávací metody a deformace těchto dílů po tisku. Jednotlivé naměřené hodnoty zbytkového napětí budou vzájemně srovnány a na základě vyhodnocení výsledků provedených experimentů pak budou navrženy možnosti, jak lze toto napětí snižovat pomocí vhodně zvolených procesních parametrů tisku.

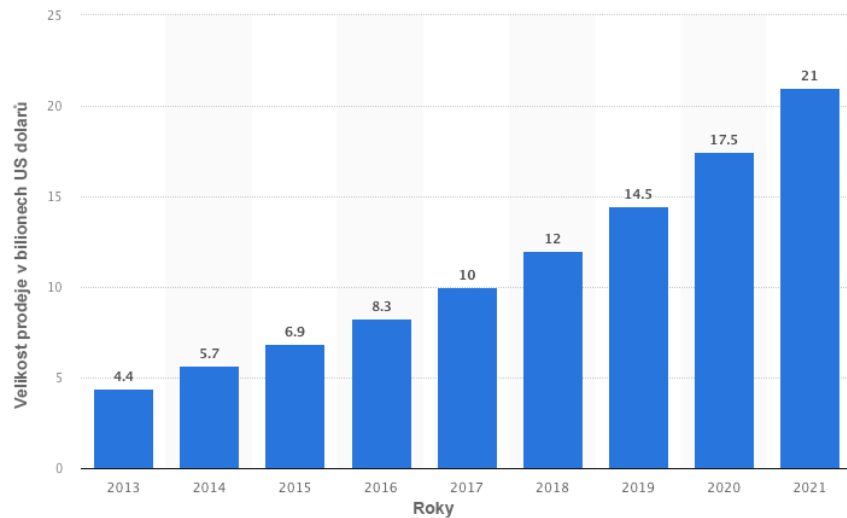
1.2 Postup řešení

Práce se v teoretické části zaměří na zhodnocení aktuálního stavu aditivní technologie, popis parametrů, které ovlivňují tisk, obecný rozbor vnitřního napětí a dopady a způsoby odstraňování zbytkového napětí u 3D tisku.

V praktické části práce experimentálně ověří velikosti vnitřního napětí u vzorků z ocele 316 L a MS1 pomocí odvrtávací metody a velikosti deformace vzorků. Dále se práce zaměří na možnosti snížení vnitřního zbytkového napětí pomocí nastavení procesních parametrů tisku a následné vyhodnocení. V poslední části budou pomocí dat zjištěných v předchozích experimentech nastaveny kalibrační profily pro simulační modul softwaru Materialise Magics.

2 Analýza současného stavu

V současnosti oblast aditivní výroby (která se neustále rozvíjí) skýtá nové možnosti ve výrobě prostorově složitých součástí. Tuto možnost ale ovlivňují mnohé proměnné faktory, které mají přímý či nepřímý dopad na složitost a kvalitu vlastní výroby. Rozvíjející trend prodeje tiskáren je možné pozorovat na grafu (Obrázek 1).



Graf 1 - Vývoj prodeje 3D tiskáren (v bilionech US dolarů) [1]

2.1 Regionální technický institut ZČU

Výzkum této diplomové práce byl prováděn v Regionálním technickém institutu, což je strojírenské a technologické výzkumné centrum Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Centrum se skládá z devíti laboratoří. Zabývá se jak základním, tak hlavně aplikovaným a experimentálním výzkumem v oblasti výrobních strojů, konstrukce vozidel, obráběcích a tvářecích technologií stejně jako moderních výrobních metod. Pro účely práce byly v RTI využity tyto laboratoře:

- Dílenská metrologie
- Kovové aditivní výroby
- Experimentální tváření
- Strojírenské experimentální metody [2]

2.2 Aditivní výroba

Aditivní výroba je proces postupného vytváření objektů z dat 3D modelů součástí, nejčastěji vrstvu po vrstvě. U aditivní výroby se materiál přidává spékáním kovového prášku či například vytlačováním roztaveného materiálu z trysky, oproti tomu se u konvenčních technologií materiál odebírá většinou ve formě třísek, například při soustružení nebo frézování. [3] [4]

Při aditivní výrobě se ve většině případů musí využívat podpůrné struktury, které pomáhají s odvodem tepla, dodávaného do materiálu pomocí skrz paprsku laseru, stabilizací dílu na platformě a bránění deformaci součásti způsobené vnitřním napětím. Každá technologie výroby, ať už aditivní výroba, nebo konvenční, má své výhody a nevýhody. Některé z hlavních výhod a nevýhod aditivní výroby jsou uvedené na další stránce.

Výhody

- Možnost tisku vnitřních i vnějších geometricky složitých tvarů
- Možnost výroby odlehčených součástí, např. pomocí speciálních vnitřních struktur nebo topologické optimalizace
- Možnost rychlého prototypování
- Technologie je šetrná k životnímu prostředí, např. díky snižování objemu používaného materiálu nebo úsporám na logistických nákladech [5]
- Možnost konstrukčních vylepšení – Smart design nebo možnost integrace nových funkčních prvků

Nevýhody

- Max. velikost dílu je omezena pracovním prostorem
- Vysoká pořizovací cena i cena příslušenství, materiálu a servisu v případě kovového tisku
- Rozdílné mechanické a materiálové vlastnosti v různých osách
- Potřeba dokončovacích operací (např. odstraňování podpor, broušení, tepelné zpracování)
- Omezené spektrum používaných materiálů
- Používané materiály jsou zdravotně rizikové (např. v případě kovů karcinogenní a výbušné) [4] [6]

2.2.1 Materiály využívané v aditivní výrobě

V dnešní době zasahuje aditivní výroba do mnoha odvětví, jako například letectví, strojírenství nebo zdravotnictví. Díky tomu se vyvíjí nové metody umožňující využívat různorodé materiály. Na materiály jsou kladeny specifické požadavky, které musí splnit. U kovových výrobků to může být tepelná vodivost, tuhost nebo pevnost. U polymerů, využívaných se například ve zdravotnictví, mohou být požadavky na pružnost nebo oteruvzdornost. V dnešní době se tiskne zejména z kovů a plastů. Kovové materiály využívané pro tisk jsou například ocel 316 L, EOS MaragingSteel MS1 (podle ČSN ocel 1.2709), inconel, hliník a titan. Ve výrobě z plastu to jsou např. ABS nebo PLA. [4] [6]

2.2.2 Rozdělení technologie aditivní výroby

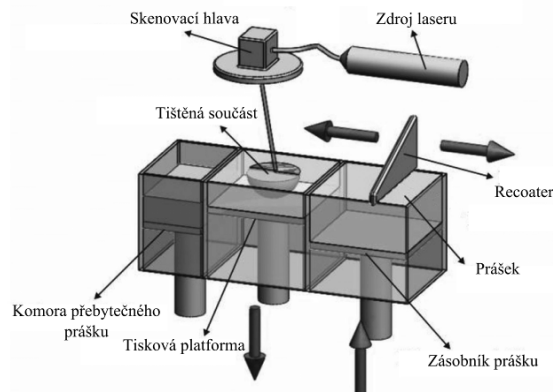
Vývojem aditivní výroby se zabývá mnoho firem. Mezi nejznámější patří EOS, DMG MORI, TRUMPF a RENISHAW. Stále se objevují další firmy, které se snaží vyvinout inovativní technologie v této oblasti. Firma EOS používá technologii Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Aditivní výroba se rozděluje dle normy ISO/ASTM 52900-15 do následujících 7 skupin: Binder jetting, Material extrusion, Direct Energy deposition, Photopolymerization, Powder bed fusion, Sheer lamination, Material jetting. Tyto skupiny se dále dělí na mnoho metod, popsaných v normě ASTM. Tato práce využívá jen metodu DMLS, která spadá pod Powder bed fusion. [3] [4]

Powder bed fusion

Metoda PBF je založena na tavení a spékání prášku energetickým paprskem. Prášek může být z různých materiálů. Do této technologie spadá Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM) a Multi Jet Fusion (MJF). Materiály využívané pro tuto metodu jsou plasty a kovy. [4] [7]

Tiskový proces

Postup výroby metodou DMLS spočívá v postupném nanášení prášku ve vrstvách (20-80 μm) na tiskovou platformu. Tento prášek je nanášen pomocí nanášecího systému. Nanášecí prvek (tzv. recoater) bývá z keramiky, kovu, silikonu či může mít podobu karbonového kartáčku. Nanesená vrstva prášku se vystaví laserovému paprsku, který kovový prášek roztaví na místech určených SLI daty pro danou vrstvu. Poté se stavěcí platforma posune níže o velikost vrstvy a proces se opakuje. Takto aditivně vytvořený kovový díl je obklopen kovovým práškem, který může být následně po odstranění dílu z platformy přezet a použit při dalším tisku. Proces tisku probíhá z větší části bez obsluhy. Na následujícím obrázku jsou schematicky vyobrazeny jednotlivé části tiskárny, která pracuje na principu DMLS. [3] [4] [8]



Obrázek 1 - Schéma 3D tiskárny s technologií DMLS [8]

2.3 Proces aditivní výroby dílu z kovu

Do celého procesu aditivní výroby spadá mnoho úkonů. Úkony se dají rozdělit následovně:

1. Příprava modelu
 - a. Vytvoření modelu v modeláři
 - b. Příprava tiskového modelu (na RTI využívaný SW Materialise Magics)
 - i. Potřebné opravy STL modelu
 - ii. Orientace modelu
 - iii. Přidání podpor
 - c. Příprava tiskové úlohy (na RTI využívaný SW EOSPRINT)
 - i. Nastavení polohy jednotlivých tištěných kusů
 - ii. Nastavení procesních parametrů tisku
 - iii. Exportování dat do tiskárny
2. Příprava tiskárny
 - a. Příprava tiskárny operátorem
 - i. Příprava materiálu
 - ii. Ustavení platformy
 - iii. Manuální nanesení první vrstvy
 - b. Příprava tiskové komory na tisk (ochranná atmosféra, předehřátí platformy)
3. Spuštění tisku
4. Tiskový proces
5. Dokončení tisku
 - a. Odstranění nevyužitého prášku
 - b. Vyjmutí vytištěné platformy
 - c. Vyčištění tiskárny

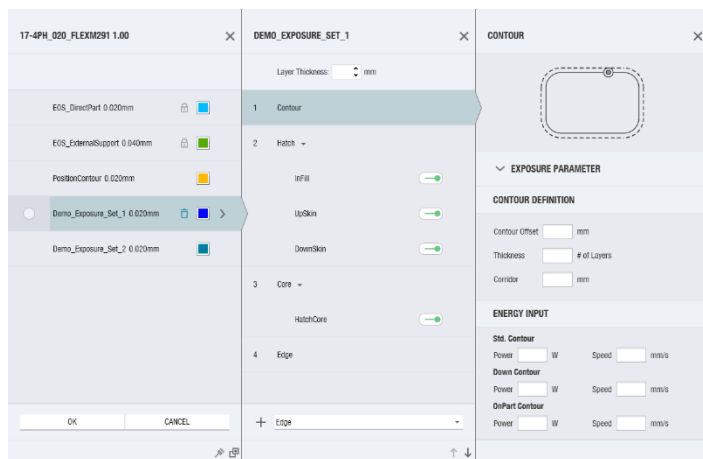
Práce se zaměřuje na nastavení procesních parametrů v programu EOSPRINT, proto je této problematice věnována následující kapitola.

2.3.1 Software EOSPRINT

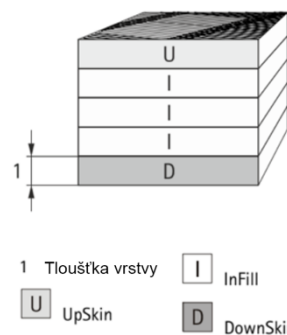
SW EOSPRINT je program vyvinutý firmou EOS GmbH, která dodává používané tiskárny EOS 290 M. Tento program umožňuje provádět základní modelářské úkony s modelem, jako je například změna velikosti, nebo vytvoření duplikátu. Hlavní funkcí je definování polohy všech vložených modelů na platformě a k nim následně nastavení procesních parametrů tisku.

Nastavení procesních parametrů je pod záložkou Exposure → Exposure Set Library. V této knihovně se nacházejí defaultně přednastavené profily od výrobce a profily, které si technolog nastaví a uloží. Výrobce přednastavené profily je možné editovat pouze se zakoupenou odpovídající licenci. V nastavení profilu lze nastavovat 4 nabídky (Obrázek 2): Contour, Hatch, Core, Edge. Práce se zaměřuje na editaci nabídky Hatch, která umožňuje nastavit 3 různé typy vrstev (Obrázek 3). Pro tyto vrstvy se nastavují různé procesní parametry. Tímto způsobem lze dosáhnout výsledku, který je optimální pro mechanické vlastnosti součásti a kvalitu povrchu:

- **UpSkin** – Vrchní vrstvy, ovlivňují kvalitu horních ploch dílu
- **InFill** – Vnitřní část tisku
- **DownSkin** – Energeticky slabší parametry používané pro první vrstvy



Obrázek 2 - Nastavení procesních parametrů v SW EOSPRINT [9]



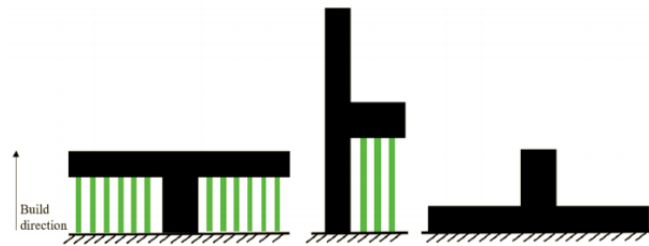
Obrázek 3 - Vysvětlení Upskin, InFill a DownSkin

2.4 Aspekty ovlivňující součást

2.4.1 Orientace součásti na platformě

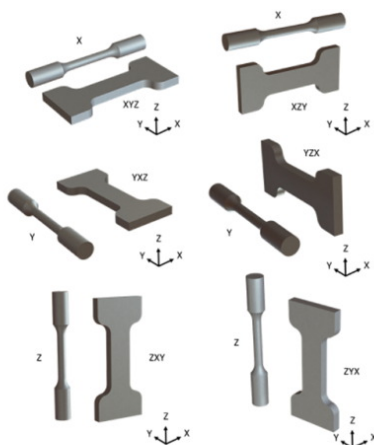
Jedním z aspektů je polohování dílu na platformě. Orientace ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti součásti, výslednou rozměrovou přesnost, jakost povrchu, tiskový čas a výslednou cenu součásti.

Při polohování dílu se musí zohlednit podpurné konstrukce (Obrázek 4), využívané při aditivní výrobě. Podpory se využívají pro stabilizování součásti na platformě, zajišťují odvod tepelné energie vznikající při tisku od laserového paprsku a zamezují deformaci dílu způsobené vnitřním napětím. [4]

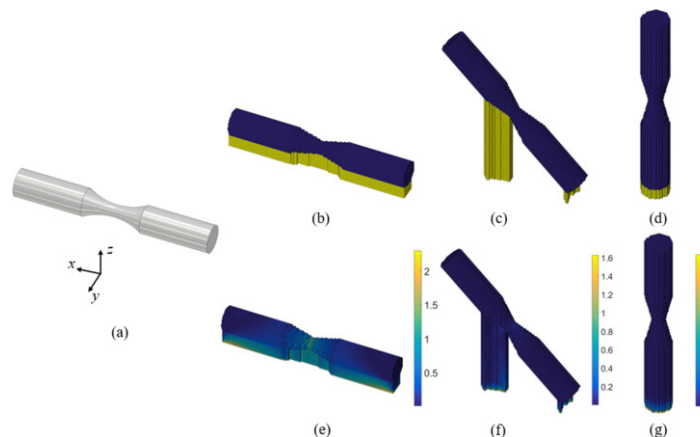


Obrázek 4 - Možnosti orientace dílu na platformě [4]

Tento aspekt byl zkoumán na praktickém výzkumu [10], kdy byly součásti (Obrázek 5) umístěny na platformu s různou orientací a následně byly sledovány jejich výsledné vlastnosti. Bylo zjištěno, že lepší tažnost mají vytisknuté součásti ve vertikální poloze, ve srovnání s horizontální orientací. Orientace součásti velmi ovlivňuje i způsob odvodu tepla a tím vznik teplotních gradientů (zbytkového napětí). Ve studii [11] byly využity stejné modely vzorků jako u předchozí studie, s tím rozdílem, že tato studie se zabývala porovnáním zbytkových gradientů. Vzorek byl orientován na stavěcí platformě (Obrázek 6) ve třech různých směrech (tj. 0° , 45° a 90° v ose y) s podpůrnými konstrukcemi kvůli tisknutelnosti dílu. Je možné pozorovat, že s rozdílnou orientací se mění i objem potřebných struktur (žlutá část). Měření bylo provedeno na simulaci tisku pomocí Hillova¹ měření. Bylo zjištěno, že největší hodnoty dosahuje horizontální orientace (e) s hodnotami 2,30 [-], střední (f) s 1,62 [-] a nejlépe z těchto orientací vychází součást umístěná vertikálně (g) 1,14 [-].



Obrázek 5 - Orientace zkoušeného dílu [10]



Obrázek 6 - Zbytkové napětí vůči orientaci dílu [11]

Výsledná orientace součásti vzhledem ke směru stavby musí být kompromisem mezi požadavkem dosažení optimálních mechanických vlastností a vyrobiteľností součásti.

2.4.2 Anizotropie součásti

S orientací dílu úzce souvisí anizotropie součásti. Anizotropie je vlastnost součásti, která má výsledné mechanické či fyzikální vlastnosti rozdílné v různých směrech měření. Tento fakt dokazuje výzkum [10] uvedený výše. U 3D tisku to je díky způsobu procesu tisku součásti vrstvu po vrstvě.

¹ Hill's stress - Mainprice, D.; Bachmann, F.; Hielscher, R.; Schaeben, H.; Lloyd, G. Calculating anisotropic piezoelectric properties from texture data using the MTEX open source package. Geol. Soc. Spéc. Publ. 2015, 409, 223–249

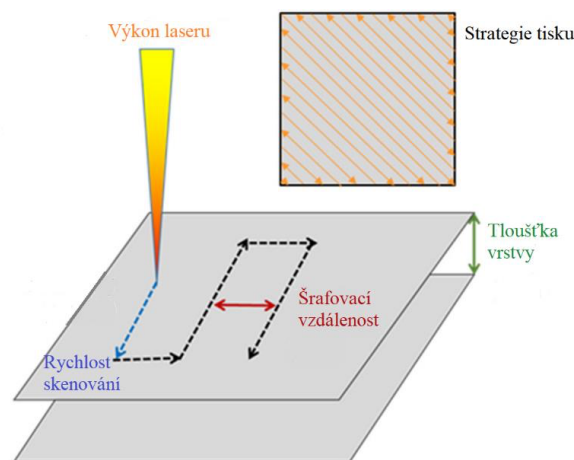
2.4.3 Materiálové vlastnosti součásti

Na zmíněnou anizotropii navazují materiálové vlastnosti součásti. Výsledné materiálové vlastnosti součásti ovlivňuje mnoho proměnných. Jsou to například:

- Velikost a výkon paprsku – může ovlivnit vznik pórovitosti
- Prostředí tisku – provoz v ochranné atmosféře s inertním plynem vede k zvýšenému odpařování taveniny a odplynění nečistot, což může zapříčinit heterogenitu chemického složení
- Teplota v práškovém loži – dle výzkumu může nižší teplota tavení vést ke vzniku nehomogenní mikrostruktury a zároveň může vést k většímu vzniku zbytkových napětí v materiálu součásti
- Strategie skenování – ovlivňuje krystalickou strukturu zrn v důsledku celkového rozdílu teplotních gradientů
- Materiál – morfologie a distribuce velikosti a fyzikální vlastnosti jsou jedny z činitelů, které ovlivňují tisk [10]

2.5 Parametry ovlivňující tisk

Parametrů, které ovlivňují tisk, je mnoho. Všeobecně lze parametry rozdělit na tři základní skupiny: procesní parametry, strojní parametry a parametry materiálu. Mezi základní procesní parametry patří výkon laseru (laser power), rychlost pohybu laseru (scanning speed), vzdálenost mezi laserovými drahami (šrafovací vzdálenost – hatch distance), tloušťka vrstvy (layer thickness) a strategie tisku vrstev (scanning strategy). Na obrázku níže (Obrázek 7) jsou tyto parametry znázorněny.



Obrázek 7 - Procesní parametry [12]

2.5.1 Procesní parametry

Proces aditivní výroby je ovlivňován mnoha procesními parametry. Správný průběh tisku je závislý na vhodném nastavení. Nastavení procesních parametrů je klíčovou problematikou při snižování zbytkových napětí. Základními parametry procesu jsou: [13]

- Výkon laseru
- Rychlost pohybu laseru
- Skenovací strategie
- Tloušťka vrstvy
- Rotace skenovacích drah
- Předehřev tiskové platformy
- Ochranná atmosféra

Pro různé typy tisku se používají odlišná doporučení nastavení parametrů. Změna těchto parametrů může vést k odlišným výsledným materiálovým charakteristikám. Například hustotě materiálu, drsnosti povrchu a poréznosti. Výše uvedené parametry může při přípravě tisku nastavit technolog.

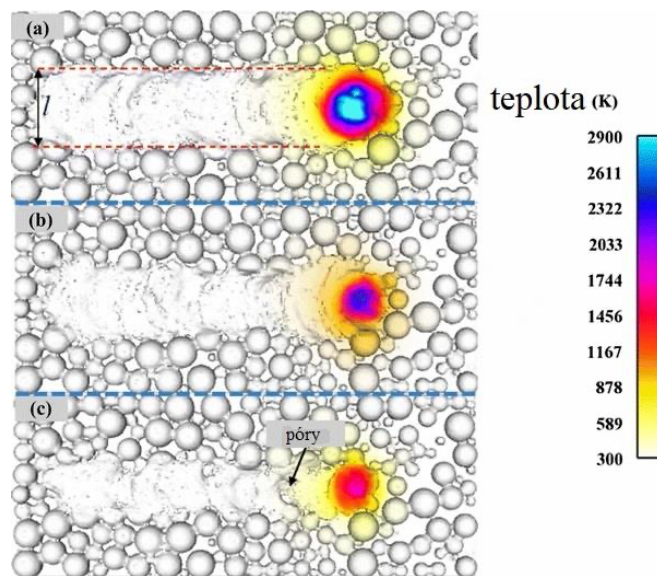
Výkon laseru a skenovací rychlost

Nastavení výkonu laseru (P [W]) má vliv na tepelně ovlivněnou oblast a zároveň hloubku, do které laser materiál protaví. Obvykle se pohybuje mezi 150 a 500 W. Pokud je potřeba vyšší skenovací rychlost, je potřeba zvýšit výkon laseru, kvůli dodržení konstantního přísunu energie. Z toho je patrné, že mezi výkonem laseru a skenovací rychlostí je úzká závislost. Pro definování energetického vstupu při tisku se využívá ukazatel objemové energetické hustoty ED . Vzorec pro výpočet je následující:

$$ED = \frac{P}{v * h * t} \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (1)$$

Kde P [W] je nominální velikost výkonu laseru, v [mm/s] je rychlost pohybu laseru, h [mm] je vzdálenost laserových drah, t [mm] je tloušťka tištěné vrstvy.

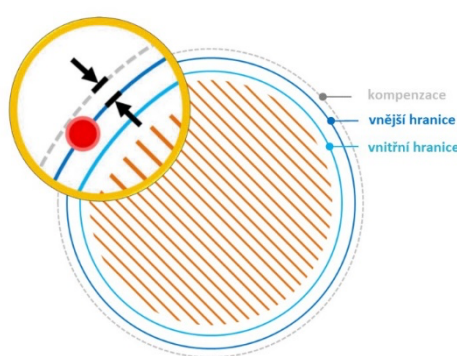
Pokud se zachová výkon laseru, ale mění se rychlost skenování, ovlivní to expoziční čas a tím skenovací oblast. Na obrázku (Obrázek 8) je vidět vliv rychlosti, kde za a) je použita nízká rychlost, za b) rychlost optimální a za c) rychlost vyšší.



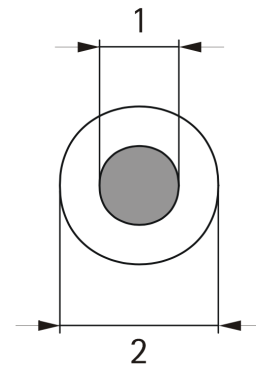
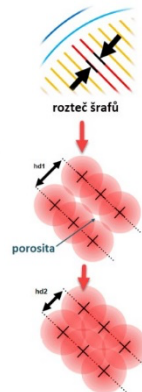
Obrázek 8 - Vliv rychlosti skenování na ovlivněnou oblast [12]

Skenovací strategie

Skenovací strategii lze chápat jako popis, jak je vyplněná 2D plocha vektory skenování. Rozdělují se na skenování výplně a kontury. Nastavení skenovací strategie ovlivňuje porozitu materiálu, drsnost materiálu a také zbytkové napětí. Hlavním aspektem je rozteč jednotlivých sousedních drah. Pokud jsou dráhy od sebe vzdálené více než je šířka tepelně ovlivněné oblasti, dojde vlivem nepřekrytí těchto drah k neúplnému spojení mezi jednotlivými drahami. Pokud rozteč šraf bude malá, má to za následek delší dobu skenování a také možné přehřívání v malých oblastech. To má za následek tvorbu rozdílné velikosti tavné lázně a tím ovlivnění výše uvedených aspektů. [14]

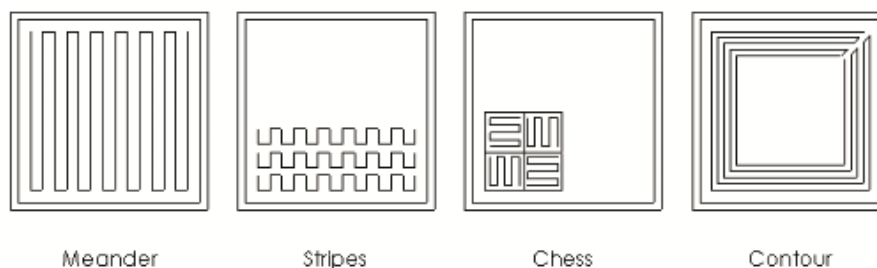


Obrázek 9 - Schéma vyplnění plochy [15]



Obrázek 10 - Laser 1) a ovlivněná oblast 2) [16]

Nejčastější využívanou strategií je skenování paralelní (Meander), jelikož je snadné na naprogramování. Další nejpoužívanější skenovací strategie jsou například Stripes, Chessboard anebo Contour. Správným zvolením strategie se může ovlivnit zbytkové napětí. Vzhledem k tomu, že vysoké teplotní gradienty mají za následek velká zbytková napětí, je třeba věnovat odpovídající pozornost faktu a dobře definovat pohyb laserového paprsku.



Obrázek 11 - Nejčastější skenovací strategie [13]

Snížení napětí lze dosáhnout rotací pohybu skenovacích vektorů o úhel α v jednotlivých vrstvách. V softwaru EOSPRINT je defaultně nastavená rotace 47 a 67 stupňů, jelikož schéma stejného skenování se opakuje až po velkém počtu vrstev.

Tloušťka vrstvy

Technologie DMLS spéká vrstvu po vrstvě, které jsou postupně nanášené. U těchto vrstev lze nastavit, jakou hodnotu tloušťky budou mít. Tato hodnota se pohybuje od 20 do 80 μm .

Přehřev platformy

Pro eliminaci teplotních přechodů mezi spékaným práškem a platformou lze nastavit přehřev platformy před zahájením tisku. Tiskárna EOS 290 M dokáže přehřát platformu do 200 °C. Některé jiné tiskárny mají možnost přehřátí platformy až na 500 °C.

Ochranná atmosféra

Tisk prášku u DMLS probíhá v ochranné atmosféře, kterou je například argon nebo dusík. Toto prostředí má zaručit stálost procesu a zamezení reakce prášku s okolím.

2.5.2 Strojní parametry

Do strojních parametrů vstupují všechny aspekty, kterou jsou pevně dané a stanovené dostupným zařízením (tiskárnou). Jsou to například:

- Maximální výkon laseru
- Maximální rychlost pohybu laseru
- Průměr laserového bodu
- Velikost tiskové komory
- Možnost přehřevu platformy

Maximální výkon laseru

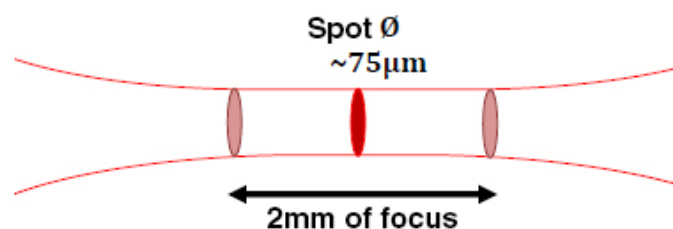
U strojních parametrů je výkon laseru definovaný maximálním výkonem, který laser dokáže vyvinout. Parametry mohou být různé, například: 200, 400, 500 W. Tiskárna EOS 290 M, na které se prováděl experiment má maximální výkon 400 W. [17]

Maximální rychlost pohybu laseru

Maximální rychlost pohybu laseru udává nejvyšší možnou skenovací rychlost, kterou stroj dokáže dosáhnout. Tyto hodnoty jsou taktéž pro každý stroj různé. U tiskárny EOS 290 M je tato hodnota 7 m/s. [17]

Průměr laserového bodu

Nejintenzivnější laserový paprsek je ten, který je soustředěn do nejmenšího bodu. Tím je energie koncentrována na definované místo. Průměr laseru, který je laser schopen vytvořit, je definován strojem a jeho laserovým paprskem (laser spot size).



Obrázek 12 - Velikost laserového paprsku [18]

Velikost tiskové komory

Velikost komory udává maximální možnou velikost tištěného dílu. Například u tiskárny EOS 290 M jsou maximální parametry 250x250x325 mm a u EOS M 100 jsou Ø100 x 95 mm. [17]

2.5.3 Parametry kovového prášku

Proces tisku závisí také na materiálu, který je využíván. Aditivní technologie je velmi komplexní proces z důvodu velkého množství mechanických, tepelných a chemických jevů, které při tisku probíhají. Vlastnosti prášku ovlivňuje mnoho proměnných.

Jsou to například:

- **Rozdělení velikosti částic v objemu** (Distribuce velikosti částic) - Particle size distribution PSD – D [$\mu\text{m}/\%$]
Určuje procentuální zastoupení částic v prášku. Označuje se D v percentilech. Data se získávají z laserové difrakční analýzy. Například specifikace prášku 15-45 μm by mohla být:
 - D10: >15 μm
 - D50: 30–35 μm
 - D90: <45 μm
- **Sypná hustota** – Apparent density – AD [g/cm^3]
Tato hodnota udává hustotu sypkého materiálu (prášku) po nasypání do měrného válce. Obvykle se měří sběrem prášku pod Hallovým průtokoměrem do 25ml kelímku, zvážením a výpočtem g/cm^3 .
- **Setřesná hustota** – Packing density PD – h_{pow} [mm]
Udává hodnotu objemu materiálu po setřesení či upěchování do měrného válce. Měří se pomocí stroje, který „poklepává“ odměrným válcem stanoveným počtem opakování, aby se prášek přeskupil a objem se snížil na minimální hodnotu.
- **Halovo měření** – Hall flow rate – [g/s]
K vyhodnocování se využívá Hallův průtokoměr, který je ve tvaru trychtýře s 2,5 mm otvorem. Měří se, za jak dlouho proteče tímto trychtýřem 50 g prášku.
- **Chemické složení**
Chemické složení prášku je zásadní, protože definuje výsledné vlastnosti součásti. Většina slitin obsahuje hlavní, vedlejší a stopové prvky. Například nerezová ocel 316L má Cr, Ni, Mo jako hlavní prvky, Si a Mn jako vedlejší prvky a C, P, S, N a O jako stopové prvky a dominujícím prvkem je Fe. Hlavní prvky určují vlastnosti slitiny. Je třeba poznamenat, že prvky se vzájemně ovlivňují a u některých slitin musí být zachovány poměry. [19]
- **Morfologie – tvar prášku**
U prášku je požadována kulovitost částic. Proto se vypočítává tvar částic pomocí Sphericity. Rozsah je maximální hodnota (1) minimální (0).
- **Rozptyl a tekutost** – Spread and flowability
Rozptyl a tekutost jsou ovlivněny velikostí a tvarem částic. Obecně řečeno, velké částice proudí lépe než malé; více kruhových / kulovitých částic proudí lépe než méně kruhových / kulovitých částic; a PSD má na tyto hlediska také vliv. [20]

2.6 Vnitřní napětí

Vnitřní napětí se obecně definuje jako napětí, které je výsledkem předcházejících operací, jako jsou například tváření, lití nebo tepelné zpracování. Toto napětí může být v závislosti na velikosti a orientaci buď prospěšné, nebo škodlivé, a to má zásadní vliv na životnost součásti. Napětí může negativně ovlivnit rozměrovou stabilitu součásti při provozu, únosnost při dynamickém namáhání či být náchylnější ke korozi pod napětím. Vnitřní napětí se dá rozdělit z pohledu časového působení: [21]

- Dočasné vnitřní napětí
- Zbytkové vnitřní napětí

2.6.1 Dočasné vnitřní napětí

Dočasné vnitřní napětí se v materiálu nachází, pokud na něj stále působí příčina, která ho vyvolala. Příčinou může být například nerovnoměrné teplotní pole mezi vrchními a vnitřními částmi součásti. V tomto případě vzniká pružná deformace díky lokální rozdílné dilataci, která způsobuje vnitřní napětí. To trvá do doby, než se teplotní gradienty vyrovnají v celém objemu výrobku. Dočasné vnitřní napětí může působit taktéž při vnější síle, která na součást působí a tím vzniká tahové a tlakové napětí. [21] [22]

2.6.2 Zbytkové vnitřní napětí

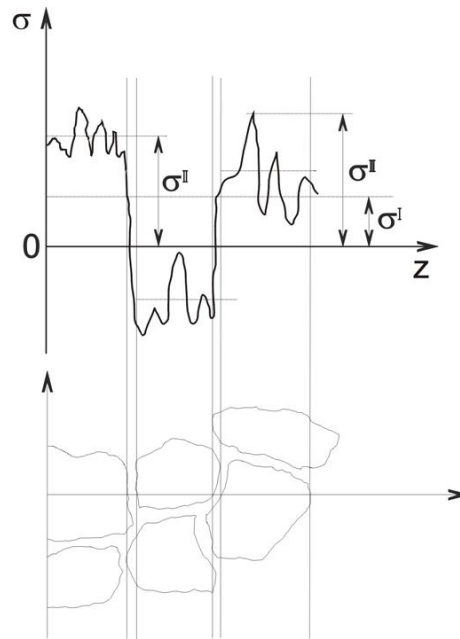
Zbytkové napětí se definuje jako napětí, který se vyskytuje v materiálu bez působení vnějších sil. Zbytkové napětí je do materiálu vnášeno při procesu zpracování materiálu a výsledná velikost napětí závisí na druhu použité technologie. Z hlediska příčiny vzniku vnitřního napětí lze rozdělit pnutí na několik druhů:

- **Tepelné zbytkové napětí:** Nerovnoměrná plastická deformace vlivem různých deformací v oblastech součásti. Ta vzniká při ohřátí či ochlazení součásti. Tento aspekt je podmíněn rozdílnými součiniteli teplotní roztažnosti. Velikost napětí bude tím větší, čím bude mít tepelně ovlivňovaná součást větší průřez a nižší tepelnou vodivost.
- **Mechanické přetvoření:** Nerovnoměrná plastická deformace při mechanickém zpracování materiálu. Například při konvenčních technologiích, jako je obrábění, jsou povrchové vrstvy součásti deformovány intenzivněji než inertní části obrobku. Po obrobení, a tím odstranění vnějších sil, vzniká na povrchu tahové a uvnitř součásti tlakové napětí.
- **Chemické a strukturální zbytkové napětí:** Vzniká v důsledku chemických reakcí, fázových přeměn a rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých fází. Objevuje se při prostorově nehomogenní transformaci struktury, se kterou se mění i objem součásti. U slitin železa lze pozorovat při přeměně austenitu na ferit, či u výraznější martenzitické přeměny. [21] [22]

Vnitřní napětí se v současnosti nejčastěji dělí podle objemu, ve kterém se nemění směr ani velikost působícího napětí. Podle toho rozdělujeme velikosti napětí na:

- **Napětí I. druhu – makroskopická:** Nachází se v homogenní makroskopické oblasti materiálu. Oblast může mít například tvar vrstvy o malé tloušťce a několika milimetrové ploše. Kolmo k této vrstvě jsou přípustné vysoké gradienty napětí I. druhu. V této ploše jsou výslednice vnitřních sil nulové. V případě měření zbytkových napětí pomocí destruktivní metody (nebo polodestruktivní) dochází k poruše rovnováhy v tělese, a to má za následek makroskopickou změnu tvarů tělesa. Ke změně napětí dochází například při hrubování povrchové vrstvy nevyžíhaného kovového odlitku, čímž se následně výrobek deformuje. Napětí taktéž vzniká u ochlazovaných a ohříváných výrobků, kvůli nerovnoměrnosti vnitřního a vnějšího přenosu tepelné energie.
- **Napětí II. druhu – mikroskopická:** Nachází se v homogenních oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků. Díky tomu jsou taktéž nazývaná jako mikroskopická pnutí. Vznikají fázovou deformací či transformací materiálu, anebo pokud různá zrna materiálu mají rozlišné napěťové stavy. Nulová výslednice sil (silová a momentová) se předpokládá u objemů tvořených větším počtem zrn. Porušení rovnováhy u tohoto druhu nemusí vést ke změně tvaru součásti.
- **Napětí III. druhu – submikroskopická:** Nachází se v oblastech nehomogenních, srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků (meziatomovými vzdálenostmi).

Nulové výslednice sil lze dosáhnout již u objemů tvořených malým počtem krystalků nebo i u dostatečně velkých částech jednoho zrna. [22] [23]



Obrázek 13 - Schematické znázornění Makroskopických (σ^I), Mikroskopických (σ^{II}) a Submikroskopických (σ^{III}) napětí jednofázového polykrystalického materiálu [24]

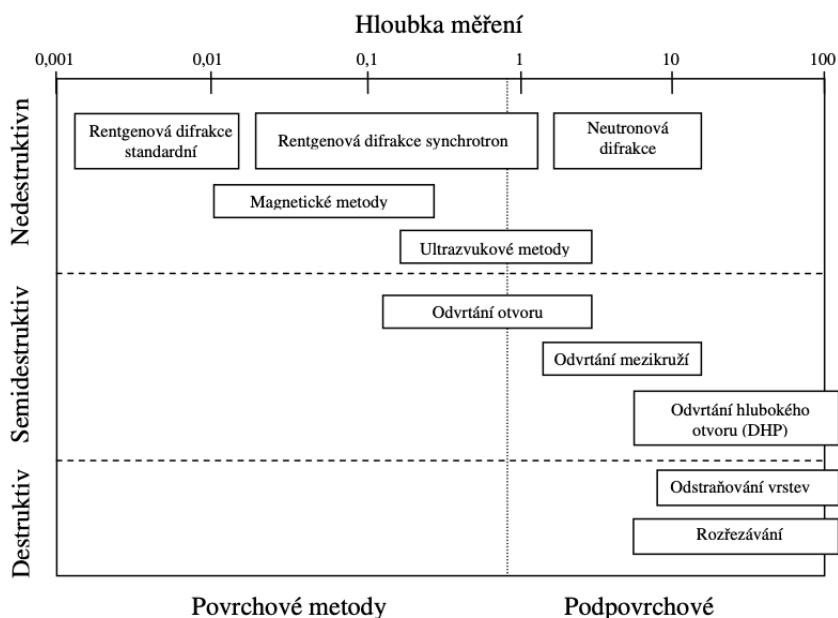
Zbytkové napětí měřené v konkrétním bodě tělesa je vždy součet napětí od I., II. i III. druhu. Jak je definováno v práci [23]: „Vnitřní napětí I. druhu jsou podle tohoto schématu (Obrázek 13) střední hodnotou zbytkových napětí působících v mnoha krystalcích. Podstata jejich vzniku spočívá v nekompatibilitě deformací makroskopických objemů. Zbytkové napětí II. druhu představuje odchylky mezi napětím I. druhu a středními hodnotami zbytkových napětí v jednotlivých krystalcích. Za příčinu zbytkových napětí II. druhu lze označit nekompatibility deformací jednotlivých krystalků. Zbytková napětí III. druhu odpovídají změnám skutečných místních zbytkových napětí kolem hodnoty zbytkových napětí II. druhu. Rozhodující rozměr pro tuto klasifikaci zbytkových napětí je tedy velikost krystalku materiálu uvažovaného objektu.“

2.6.3 Metody měření

V dnešní době existuje mnoho experimentálních metod pro určení stavu napjatosti materiálu (Tabulka 1). Základním rozdělení je na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní metodu. Destruktivní metoda je založená na odebrání materiálu a tím uvolnění napětí a následná deformace. Z poměru deformace je pak přepočítána na odpovídající napětí. Semidestruktivní metoda ovlivňuje jenom malou část součásti, a tím pádem nemá zásadní vliv na funkci a spolehlivost, případně lze způsobené narušení opravit. Nedestruktivní metody jsou založené na využití vztahů různých fyzikálních vlastností a vnitřním napětí. [25] Každá metoda měření je schopna měřit do určité hloubky. Níže je (Obrázek 14) schematicky zobrazeno v jaké hloubce se měření provádí.

Tabulka 1 - Metody zjišťování zbytkových napětí [26]

| Metoda zjišťování zbytkových napětí | Tvar součásti | Způsob měření | | |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------|--|--------------------------------|
| Mechanické | plochý tvar | deformace pásků | změna délky změna zakřivení | |
| | | vrtání děr | válcová díra mezikruží | |
| | rotační kroužek | trubka | odstranění povrchové vrstvy | rozříznutí trubky |
| | | | odstranění povrchové vrstvy | odstranění vnitřní vrstvy |
| | | kroužek | rozříznutí | změna křivosti |
| | | | podélné pásy z kroužků | |
| | obecný tvar | metoda sítí | deformace sítě | |
| | | křehké laky | vznik trhlin | |
| | | křehké modely | vznik trhlin | |
| | Fyzikální RTG | | difrakce | vzdálenost meziatomových rovin |
| Fyzikální ultrazvuk | obecný tvar | šíření vln | změna rychlosti | |
| | | | odraz vln | |
| | | | vnitřní tlumení | |
| Elektrické | obecný tvar | změna proudu | změna potenciálu procházejícího proudu | |
| | | | změna velikosti vířivých proudů | |
| | | | změna indukčního toku | |
| Magnetické | obecný tvar | změny magnetismu | magnetická indukce | |
| | | | zbytkový magnetismus | |
| Akustické | obecný tvar | prozvučitelnost | četnost akustických emisí | |
| Chemické | obecný tvar | difúze vodíku | trhliny na povrchu | |
| | | změna chemické aktivity | změna struktury | |



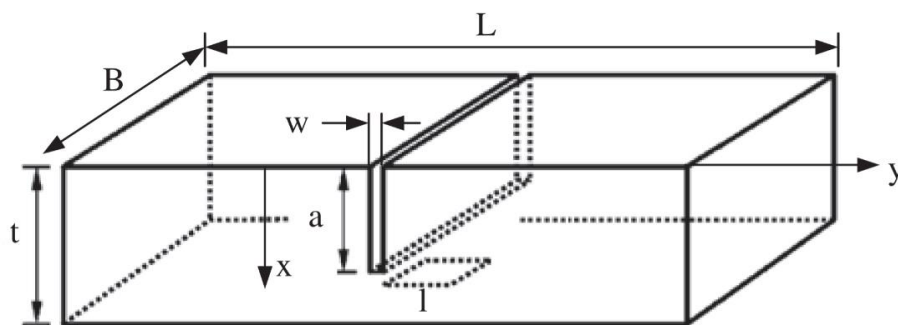
Obrázek 14 - Metody pro měření zbytkových napětí a jejich hloubka [mm] [27]

2.6.3.1 Destruktivní metody

Dělicí metoda

Pomocí této metody lze měřit zbytkové napětí kolmé na rovinu řezu v součásti, které je při této metodě vytvořeno. Zbytkové napětí měříme pomocí deformací vzniklých po odstranění části součásti, nejčastěji elektroerozivním obráběním. Měření lze provést analyticky, pomocí využití metody konečných prvků (MKP²) nebo pomocí můstkového tenzometru, který se pro toto měření využívá.

Na obrázku (Obrázek 15) je znázorněna geometrie pro typické použití této metody. Do materiálu je vytvořena inkrementálně drážka a z druhé strany je připevněn tenzometr, který měří napětí. Toto rozložení je vhodné pro měření po hloubce součásti. Pokud se měří po povrchu součásti, je vhodnější uspořádání drážky a tenzometru na stejné straně měřené součásti.



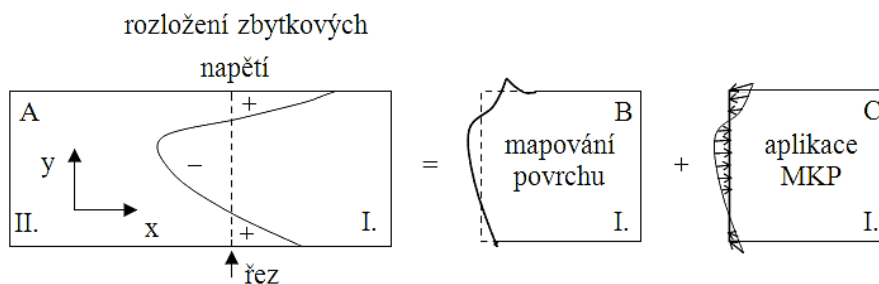
Obrázek 15 - Uspořádání měření dělicí metodou (tloušťka vzorku t , hloubka štěrbin a , šířka štěrbin w , délka vzorku L , délka tenzometru l , tenzometr 1 a šířka vzorku B)

Vzhledem k povaze měření (destruktivní metoda) má tato metoda uplatnění v laboratorním měření. Metoda neklade vysoké nároky na vybavení měřicí laboratoře. Tato metoda není citlivá k změnám v mikrostruktuře, a proto se hojně využívá při měření zbytkového napětí v kompozitech. [24]

Konturová metoda

Konturová metoda je relativně nový způsob měření, který byl představen v roce 2000. Je to měřicí technika založená na mapování zbytkových napětí v normálovém směru k provedenému řezu. Tato metoda je zcela destruktivní, jelikož je potřeba provést řez přes celý průřez měřené součásti. Po provedení řezu se uvolní zbytkové napětí, které se projeví deformací řezných ploch. Na řezných plochách se následně měří deformace dotykovou sondou na 3D měřícím stroji či laserem. Hodnoty se z obou ploch zprůměrují a zanesou se do MKP modelu součásti. Ze znalosti výchozího stavu součásti a za předpokladu elastických deformací lze dopočítat zpětně rozložení vnitřního napětí, které bylo v normálové ploše k rovině řezu (Obrázek 16). [24]

² MKP je jednou z možností numerického stanovení zbytkových napětí pomocí sítě vektorů



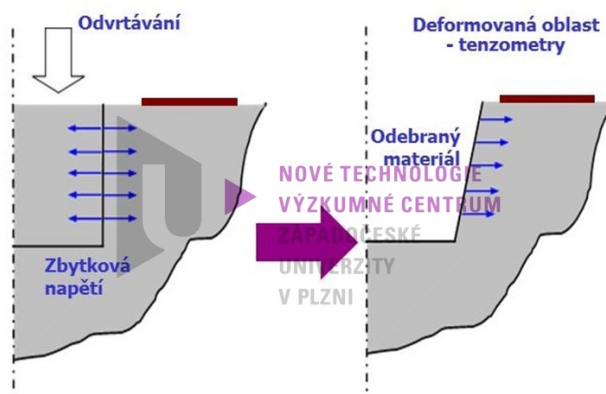
Obrázek 16 - Princip konturové metody [24]

U všech destruktivních (mechanických) metod se předpokládá, že technologií řezání není do materiálu vnášeno dodatečné napětí a materiál se chová pružně. Při řezu se kladou vysoké nároky na rovinnost provedeného řezu a konstantní šířku záběru. Řezy se provádí pomocí elektroerozivního obrábění s drátovými elektrodami (Wire EDM). Elektroerozivní obrábění se využívá proto, jelikož při obrábění nepůsobí mezi nástrojem a obrobkem žádné mechanické síly. [24]

2.6.3.2 Semidestruktivní metody

Odvrtávací metoda (tenzometrická metoda)

Odvrtávací metoda je jednou z nejpoužívanějších technik měření zbytkového napětí. Postup zahrnuje vyvrtání malého otvoru (obvykle \varnothing 1-4 mm) zhruba do hloubky průměru frézy. Nenarušené oblasti vzorku obsahující zbytková napětí se při obrábění otvoru deformují do jiného tvaru, čímž poskytnou data pro zpětný výpočet zbytkového napětí. Měření uvolněného zbytkového napětí se provádí pomocí tenzometrické růžice (Obrázek 17). Pro využití této metody se předpokládá, že zkoumaný materiál je izotropní (homogenní zbytková napjatost) a lineárně elastický. Postup měření i vyhodnocení je ustanoven normou ASTM E837 [24]



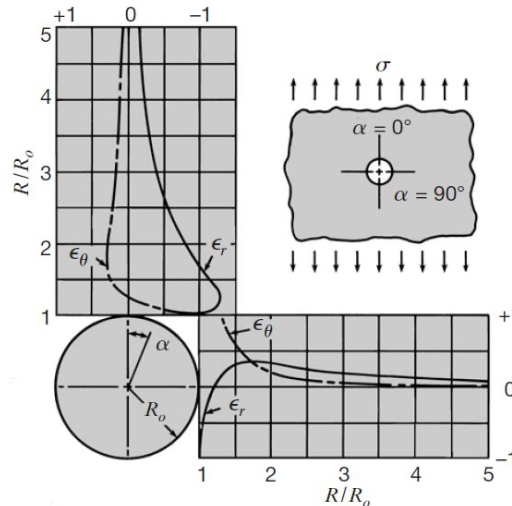
Obrázek 17 - Teorie měření odvrtávací metody [28]

a) Vyhodnocování zbytkových napětí pomocí tenzometrické růžice

Teorie základů pro metodu měření pomocí tenzometrické růžice byla poprvé vypracována pro průchozí díru s homogenní zbytkovou napjatostí po tloušťce materiálu. Článek k tomu publikoval G. Kirsch³ v roce 1898. Stanovil kalibrační koeficienty, které vycházejí

³ Ernst Gustav Kirsch – německý inženýr, profesor na Chemnitz University of Technology

z analytického řešení desky s průchozím otvorem, díky kterým lze uvolněnou deformaci přepočítat na zbytková napětí. Koeficienty jsou závislé na poloměru otvoru, vzdálenosti od otvoru a materiálových vlastnostech. V praxi není těchto podmínek ve většině případů dosaženo, a proto nelze použít tyto teoreticky odvozené koeficienty. Většinou je otvor neprůchozí. Na následujícím obrázku (Obrázek 18) je vidno, že tangenciální a radiální deformace klesají se vzdáleností od měřené díry. [29]

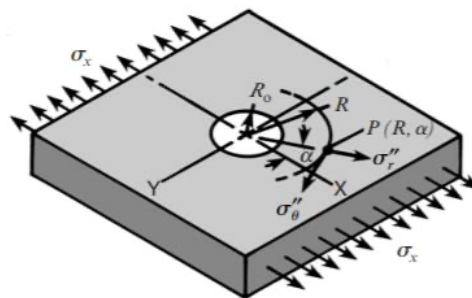


Obrázek 18 - Průběh tangenciálních a radiálních napětí [30]

Výpočet napětí se tedy dělí na dva případy. První je tenká deska s průchozím otvorem a druhý s neprůchozím otvorem.

a1) Tenká deska s průchozím otvorem

Na následujícím obrázku je znázorněno schéma napětí u desky, které působí v ose x.



Obrázek 19 - Tenká deska s průchozím otvorem [30]

Uvolnění radiální deformace v bodě P (R, α) lze vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_x(1 + \nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1 + \nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (2.1)$$

Kde:

$$r = \frac{R}{R_0} (R \geq R_0)$$

R ... vzdálenost od středu otvoru

R₀... poloměr otvoru

Rovnici (2.1) lze zjednodušit po zavedení konstant A a B

$$\varepsilon_r = \sigma_x [A + B \cos 2\alpha] \quad (2.2)$$

Zavedené konstanty lze vyjádřit

$$A = -\frac{1 + \nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (2.3)$$

$$B = \frac{1 + \nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1 + \nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.4)$$

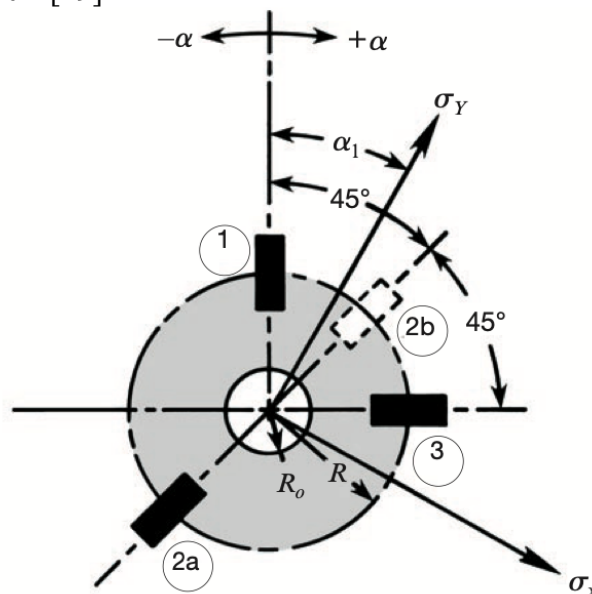
Pro odvození vztahů je předpokládána jednoosá napjatost. Vztahy pro dvouosou napjatost lze získat za předpokladu lineární elastického izotropního materiálu pomocí principu superpozice:

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad (2.5)$$

Neboli

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (2.6)$$

Předchozí rovnice (2.5) a (2.6) popisují vztah mezi radiální deformací a napětím v bodě P se souřadnicemi (r, α) . Tyto rovnice tvoří základ k určení dvou hlavních napětí rovinné deformace a úhlu jejich orientace. K řešení rovnice je potřeba znát tři radiální deformace, které jsou zjištěny pomocí měření tenzometrickými růžicemi. Pro tenzometrickou růžici dle (Obrázek 20) lze napsat pro jednotlivé tenzometry rovnice radiálních tenzometrů (2.7), (2.8), (2.9) v případě růžice v úhlu $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. [29]



Obrázek 20 - Orientace tenzometrické růžice – typ A (45°) [30]

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 45^\circ) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (2.9)$$

Řešením těchto rovnic jsou následující vztahy:

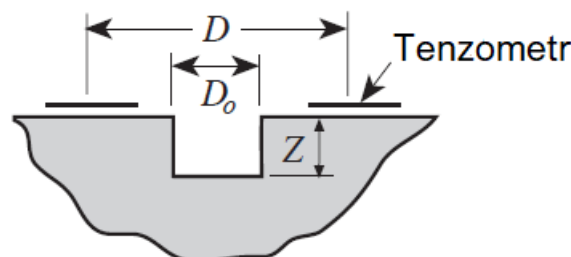
$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (2.11)$$

$$tg 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (2.12)$$

a2) Příklad s neprůchozím otvorem

Teoretické odvození vzorců výše bylo provedeno na základě předpokladu, že otvor je malý, skrz tenkou, širokou a plochou deskou. Zároveň je deska vystavena rovnoměrnému rovinnému namáhání. Praxe ukazuje, že je většina situací odlišná. Měřená součást má často libovolnou velikost a tvar, zpravidla nebývá tenká či plochá, a proto má většina případů neprůchozí otvor. Proto jsou koeficienty \bar{A} a \bar{B} závislé navíc na hloubce vrtného otvoru (Z), respektive na bezrozměrné hloubce otvoru $\frac{Z}{D_0}$. Pro maximalizování deformace je doporučeno vrtat díru na $\frac{Z}{D_0} = 0,4$. Norma ASTM E837 zároveň specifikuje maximální hloubku díry jako $\frac{Z}{D_0} = 0,4$. [29]



Obrázek 21 - Rozměry vyvrtané díry [30]

$$\bar{A} = f_A(E, \nu, r, z / D_0) \quad (2.13)$$

$$\bar{B} = f_B(E, \nu, r, z / D_0) \quad (2.14)$$

Měření součásti s neprůchozím otvorem představuje komplikovaný stav rovinné napjatosti, pro které není přesné analytické řešení. Typ měření s neprůchozím otvorem úzce souvisí s případem měření s průchozím otvorem. V obou případech je možné koeficienty \bar{A} a \bar{B} určit experimentální kalibrací. Kalibrací získané koeficienty jsou přesné, avšak vždy odpovídají pouze konkrétní geometrii rūžice a stejnému materiálu.

Další možností je určení pomocí numerického výpočtu. Jednou z metod výpočtu těchto koeficientů pomocí MKP uvádí ve své publikaci [31] Schajer. Takto spočtené koeficienty (pro rūžici se třemi tenzometry) se používají dnes u většiny komerčních měření pomocí odvrtávací metody. Schajer zavedl nové proměnné \bar{a} a \bar{b} , které nezávisí na materiálových vlastnostech a zahrnují pouze geometrii rūžice a otvoru. [29]

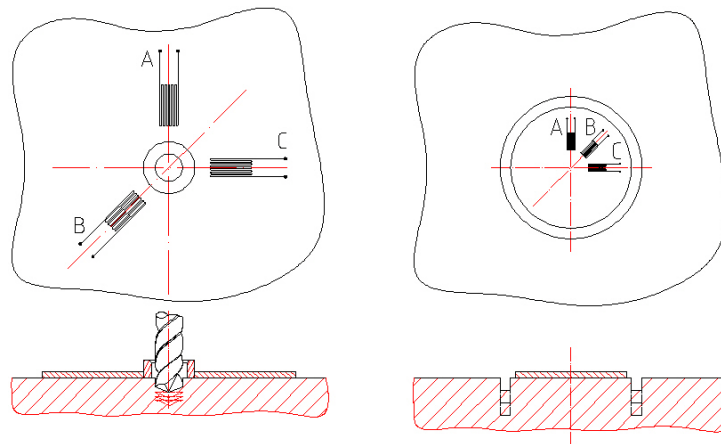
$$\bar{a} = \frac{2E\bar{A}}{1 + \nu} \quad (2.15)$$

$$\bar{b} = -2E\bar{B} \quad (2.16)$$

Pokud se tyto rovnice porovnají s (3.3) a (3.4), lze pozorovat, že pro průchozí otvor hodnota \bar{a} nezávisí na materiálu a u \bar{b} téměř nezávisí na Poissonově čísle. [29]

Metoda sloupku

Tato metoda je založená na odebrání materiálu pomocí odfrézování mezikruží. Po odfrézování materiálu vznikne sloupek, na kterém se měří deformace pomocí přidělané tenzometrické růžice (Obrázek 22). Na zhotovený tvar se nekladou takové požadavky na přesnost, jako u odvrtávací metody. Výhoda této metody je, že lze měřit i zbytkové napětí v různých hloubkách, ale pro tento případ je nutné znát kalibrační koeficienty, které jsou zjištěny buď experimentálně, nebo za pomoci MKP. [24]



Obrázek 22 - Schéma odvrtávací metody (vlevo) a metody sloupku (vpravo) [32]

2.6.3.3 Nedestruktivní metody

Magnetické metody

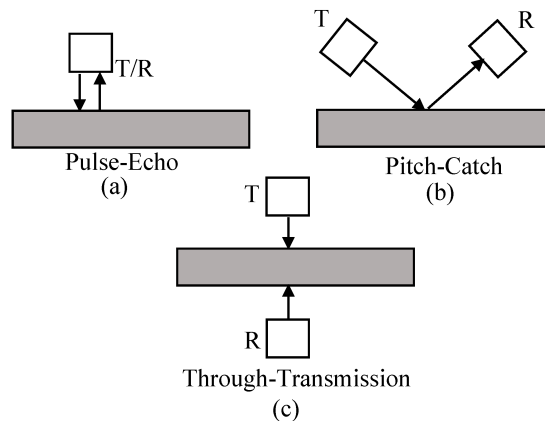
Při měření vnitřního napětí pomocí rentgenové difrakce (XRD) se využívá Barkhausenův šum. Podstatou je difrakce rentgenových paprsků na krystalech a následné přepočítání na napětí pomocí vztahů lineární teorie elasticity. Výsledná difrakce není pouze funkcí napětí v materiálu, ale je zároveň i funkcí tvrdosti a mikrostruktury.

Jako druhá metoda je magnetostriekční metoda. Ta je založena na měření permeability a magnetické indukce. [33]

Ultrazvuková metoda

Tato metoda funguje na principu akustickoelastického jevu. Podle tohoto jevu je rychlost šíření vlnění v pevných látkách závislá na přítomném mechanickém napětí. Pro měření se využívají podélné nebo příčně polarizované vlny. Lze provést měření integrální přes celý průřez vzorku (objemové vlnění), anebo měření povrchových napětí povrchovými vlnami (povrchové).

U objemového vlnění se využívají podélné (částice kmitají podél směru šíření – deformace objemu) a příčné vlny (částice kmitají v rovině kolmé ke směru šíření – deformace tvaru). K měření zbytkových napětí lze využít různé rozložení ultrazvukových sond. Pokud se k přijímání i vysílání ultrazvukových vln využívají podélné vlny a k tomu pouze jedna sonda, nazývá se tato metoda Pulse-Echo. Pomocí této metody je možno určit průměr zbytkových napětí přes celou tloušťku materiálu. Ostatní uspořádání s vícero sondami se nazývá Pit-Catch nebo Trough-Transmission. [24]



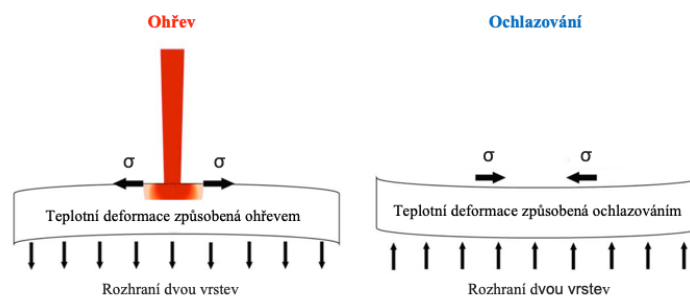
Obrázek 23 - Uspořádání ultrazvukových metod [34]

2.7 Vnitřní napětí v aditivní výrobě a možnosti jeho minimalizace

Vnitřní napětí je nedílnou součástí každého procesu 3D tisku. Hlavním aspektem vzniku je teplo, které se v procesu využívá. U některých procesů je zbytkové napětí využíváno ke zpevnění materiálu (např. laser peening), avšak u aditivní technologie se jedná o nevhodný jev.

Jak již bylo řečeno, při metodě DMLS se využívá spékání kovového prášku vrstvu po vrstvě. To znamená, že jsou vrstvy postupně natavovány pomocí laseru. Laser při natavování vrstvy neovlivňuje pouze samotnou vrstvu, ale i vrstvy pod a sousední dráhu laseru. Vektory skenování jsou voleny tak, aby každá dráha částečně překrývala předchozí. Tím vzniknou řádné kovové vazby a následně homogenní pevná součást. [35]

Zbytkové napětí je napětí, které zůstává uvnitř konstrukce po odstranění zatížení, které na součást působilo. V procesu DMLS jsou hlavním zdrojem zbytkového napětí teplotní gradienty, které vznikají při skenování každé vrstvy. Vzhledem k tepelně ovlivněné oblasti je působeno i na již skenované vrstvy, které jsou několikrát znovu natavovány a ochlazovány při nekonzistentních úrovních tepla. Při sledování gradientů napětí v konkrétní jedné vrstvě (Obrázek 24) součásti během ohřevu jsou nejdůležitější dvě oblasti. Horní část vrstvy (oblast vystavena energii laseru) a rozhraní mezi skenovanou vrstvou a předchozí. [36]



Obrázek 24 - Deformace materiálu při skenování [35]

V důsledku tepelné roztažnosti je horní část vrstvy vystavena tahovému napětí, zatímco na rozhraní vrstev působí tlakové napětí. V případě tisknutí jedné vrstvy by to nebyl problém, jelikož po ochlazení materiálu by se pnutí přirozeně rozptýlilo. Problém se projevuje, pokud se tiskne více než jedna vrstva, kde spodní vrstvy omezují tepelnou roztažnost a smršťování vrstev bezprostředně pod tavnou lázní. K tomuto jevu (vzhledem k tepelně ovlivněné oblasti) může dojít ve více vrstvách současně a zároveň se toto může stát ve stejné vrstvě vícekrát. Tento jev může způsobit elastickou deformaci ve vrstvách, což má za následek gradient napětí mezi vrstvami. [36]

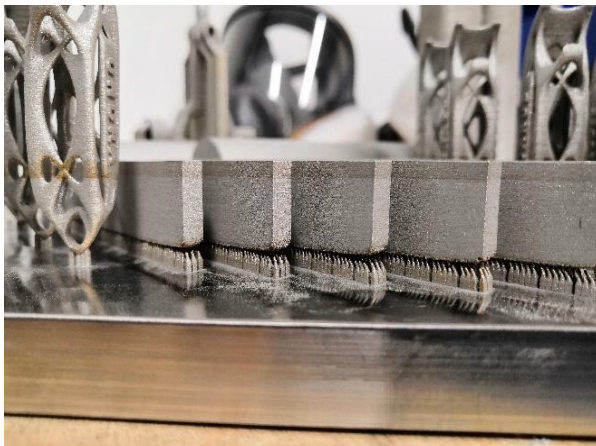
Pro snížení zbytkových napětí v součásti je možno využít následující možnosti:

- Předehřívání tiskové platformy
- Tepelné zpracování
- Strategie skenování
- Správné zvolení podpůrných struktur
- Expoziční čas (výkon laseru)

2.7.1 Důsledky zbytkového napětí

Zbytkové napětí může způsobovat nevhodné jevy. Jedním z jevů je odtržení součásti od tiskové platformy, a tím deformace dílu při tisku. Taktéž může deformaci způsobit odtržení podpor od součásti. (Obrázek 25). To má za následek možné riziko naražení nanášecího systému do tištěné součásti, a tím jeho poškození a selhání tisku. Pro tyto účely se při DLMS využívají podpůrné konstrukce, které stabilizují díl na stavěcí platformě, pomáhají odvádět teplo vznikající při tisku a brání deformaci dílu způsobené vnitřním napětí. [14]

Vnitřní napětí má dopad i na mechanické vlastnosti, příkladem je tvorba trhlin. (Obrázek 26). Tento jev je způsoben nedostatečným odvodem tepla i přes přidání podpor.



Obrázek 25 - Odtržení podpor kvůli zbytkovému napětí [14]



Obrázek 26 - Vznik trhliny vlivem zbytkového napětí kvůli přechodu z většího průměru na menší [14]

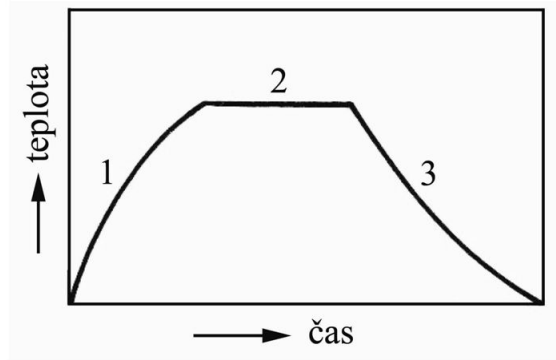
Vnitřní napětí je ve většině případů nežádoucí, a proto je potřeba ho minimalizovat.

2.7.2 Možnosti odstranění napětí

2.7.2.1 Tepelné zpracování

Nejvyužívanější možností k odstranění vnitřního pnutí je tepelné zpracování žíháním. Cílem mnoha druhů žíhání je snaha dosáhnout homogenní a jemnozrné struktury o dobré houževnatosti, tvárnosti a v mnoha případech i obrobitelnosti. K odstranění pnutí se využívá

žihání ke snížení vnitřního pnutí. Žihání probíhá ohřátím materiálu na určitou teplotu, setrvání na teplotě a pomalé ochlazování v peci rychlostí zhruba stejnou jako na vzduchu. [14]



1 – ohřev, 2 – výdrž na teplotě, 3 – ochlazování

Graf 2 - Průběh teploty při žihání [37]

2.7.2.2 Vibrování

Další metodou k odstranění vnitřního pnutí je vibrování. Metodu vyvinula a dále rozvíjí firma VSR Industrietechnik GmbH Duisburg. Podstatou této metody je rozkmitání součástky na její rezonanční frekvenci, při které vnášená mechanická energie způsobuje elastické deformace. Díky těmto deformacím se v místech koncentrace napětí překračuje mez kluzu materiálu, čímž vzniká plastická deformace, a tím dochází k přesunu napětí a celkovému poklesu. Výhodou této metody oproti žihání je velmi malá spotřeba energie a krátká doba zpracování. [38]

2.7.2.3 Stárnutí

Princip stárnutí neboli precipitačního vytvrzování je v mechanickém blokování pohybu dislokací pomocí tří způsobů:

- zachycováním dislokací rozpuštěnými atomy a precipitáty
- zamezení pohybu dislokací uspořádáním na krátkou vzdálenost
- zvětšením hustoty dislokací tak, aby docházelo k provázání dislokačních smyček

Mechanického blokování pohybu dislokací lze nejnázve dosáhnout dodáním drobných částic jiné fáze do krystalové mřížky. Tento proces nastává při zpevňování hliníku, kdy precipitují částice Al_2Cu nebo při zpevňování oceli, kdy se v železe vylučují částice karbidu železa. Přesycený tuhý roztok má tendenci přejít do stabilního stavu, ke kterému potřebuje dodat vnější energii, kterou je mechanická energie nebo teplo. Po dodání energie se začíná tento přesycený roztok rozpadat.

Stárnutí, které probíhá při teplotě okolí, se nazývá přirozené stárnutí. Stárnutí probíhající za umělé zvýšené teplotě se nazývá umělé stárnutí. [39]

3 Návrh vlastního řešení

3.1 Zadání experimentu

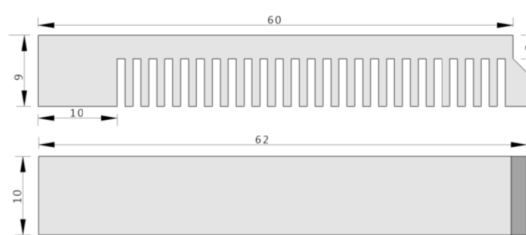
Experimentální ověření práce bylo rozděleno do 4 fází. V prvních bude práce řešit ověření hodnoty zbytkového vnitřního napětí v kalibračních vzorcích z materiálu ocel 316 L a MS1, měřené pomocí odvrtávací metody a míry deformace dílu. Poté se práce bude zabývat snížením vnitřního napětí pomocí změny nastavení procesních parametrů u vzorků. V poslední části práce ověří průběh napětí a teplotních gradientů pomocí simulace v SW Materialise Magics.

3.1.1 Princip experimentu

Tisk vzorků byl proveden z materiálů oceli 316L a MS1. Příprava součástí byla provedena v softwaru Materialise Magics a následném post procesoru EOSPRINT. Princip experimentů spočíval v zjišťování vnitřního napětí u vytisknutých platforem.

3.1.2 Použité experimentální vzorky

Pro demonstraci vnitřního napětí byla zvolena kalibrační součást ve tvaru hřebene definovaná výrobcem softwaru Materialise Magics, na které je možné pozorovat vliv vnitřního napětí na chování součásti. (Obrázek 27). Tato součást má základní rozměry 60x10x9 mm. V práci bylo používáno označení „pata součásti“, čímž byla myšlena oblast vlevo na obrázku níže a „vršek“ vpravo.



Obrázek 27 - Kalibrační hřeben

3.1.3 Použité vybavení

Pro experimenty byly využity tyto laboratoře a strojní vybavení RTI:

- Kovové laboratorní metody – pro tisk všech vzorků byly využity tiskárny EOS 290 M (Obrázek 28).



Obrázek 28 – Tiskárna EOS 290 M

- Experimentální tváření – v laboratoři byl využit stroj FANUC ROBOCUT α -C800iB. Tento stroj slouží k elektroerozivnímu obrábění.
- Dílenská metrologie – změření částí vzorků probíhalo na 3D měřicím stroji CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Stroj slouží k změření velikosti vzorků.
- Strojírenské experimentální metody – změření velikosti vnitřního napětí ve vzorcích se uskutečnilo pomocí stroje MTS3000 Restan od firmy SINT Technology. Pro odvrtání byla použita fréza o \varnothing 1,8 mm a tenzometrická růžice se třemi tenzometry.

3.2 První experiment – tisk kalibračních vzorků 316 L

3.2.1 Popis experimentu

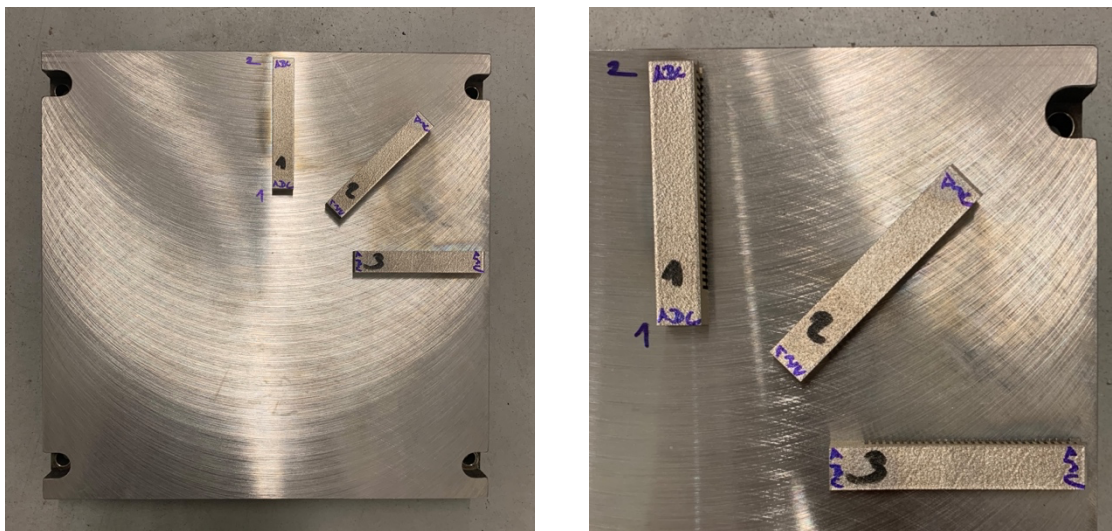
První experiment ověřoval velikost zbytkového napětí u vzorků vytisknutých z oceli 316 L. Napětí bylo změřeno na kalibračních dílech pomocí odvrtávací metody a měření deformace hřebene po nařiznutí. Následně byly naměřené hodnoty z obou metod spolu porovnány pro posouzení shodnosti měření.

3.2.2 Provedení experimentu

Na platformu byly umístěny 3 identické kusy kalibračního hřebene (dle zadání), které byly vůči sobě vždy natočeny o 45°. Kromě hřebenu nebyly na tiskovou platformu umístěny žádné další modely, aby nebyl tisk nijak ovlivněn. Vzorky byly umístěny do pravého horního rohu (Obrázek 29). Tisk byl proveden se standardně nastavenými procesními parametry:

Tabulka 2 - Parametry kalibračního tisku vzorků z ocele 316L

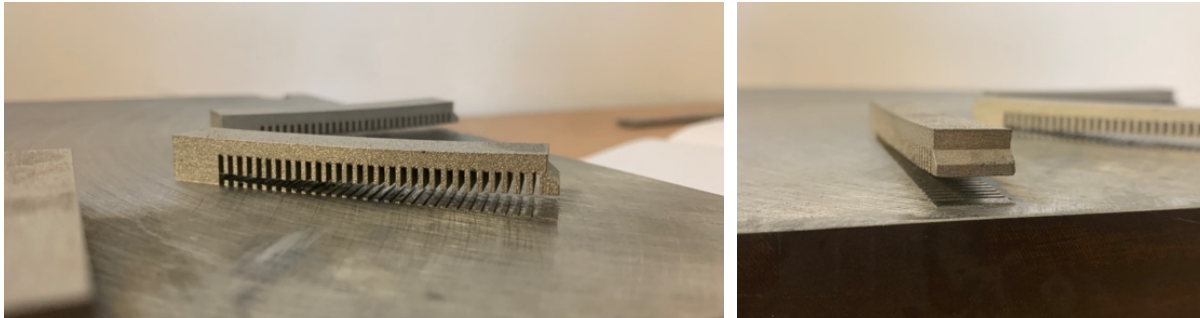
| | |
|----------------------|---------------|
| Výkon laseru | 214 W |
| Rychlost laseru | 930 mm/s |
| Šrafovací vzdálenost | 0,1 mm |
| Výška vrstvy | 40 μ m |
| Strategie | Stripes 10 mm |
| Předehřev platformy | 80 °C |



Obrázek 29 - Vytisknuté kalibrační hřebeny

Pro porovnání byly vytisknuty dvě identické platformy. První byla ponechána tak, jak byla vytisknuta (platforma A) a v laboratoři Strojírenské experimentální metody byla pomocí odvrtávací metody změřena velikost vnitřního zbytkového napětí. Druhá platforma

(platforma B) byla dle postupu v kalibračním manuálu [16] naříznuta elektroerozivní metodou obrábění (Obrázek 30) a následně změřena deformace v laboratoři Dílenské metrologie.

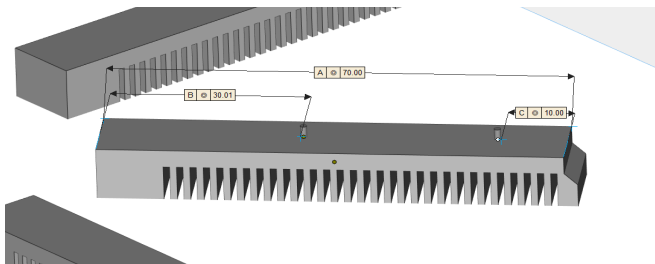


Obrázek 30 - Zdeformovaný hřeben po naříznutí drátořezem

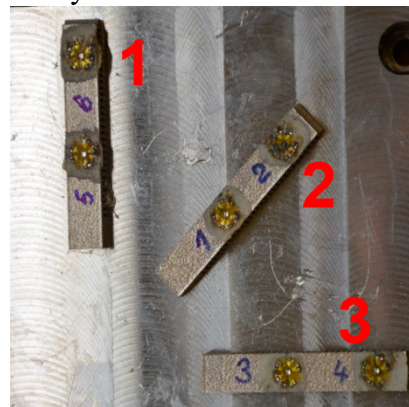
3.2.3 Výsledky experimentu

Měření odvrtávací metodou – platforma A

U první vytištěné platformy bylo změřeno zbytkové napětí pomocí odvrtávací tenzometrické metody v Laboratoři strojírenských experimentálních metod. Na každém vzorku byly změřeny 2 místa, dle obrázku (Obrázek 31), měření proběhlo do hloubky 1 mm.



Obrázek 31 - Náskres měření



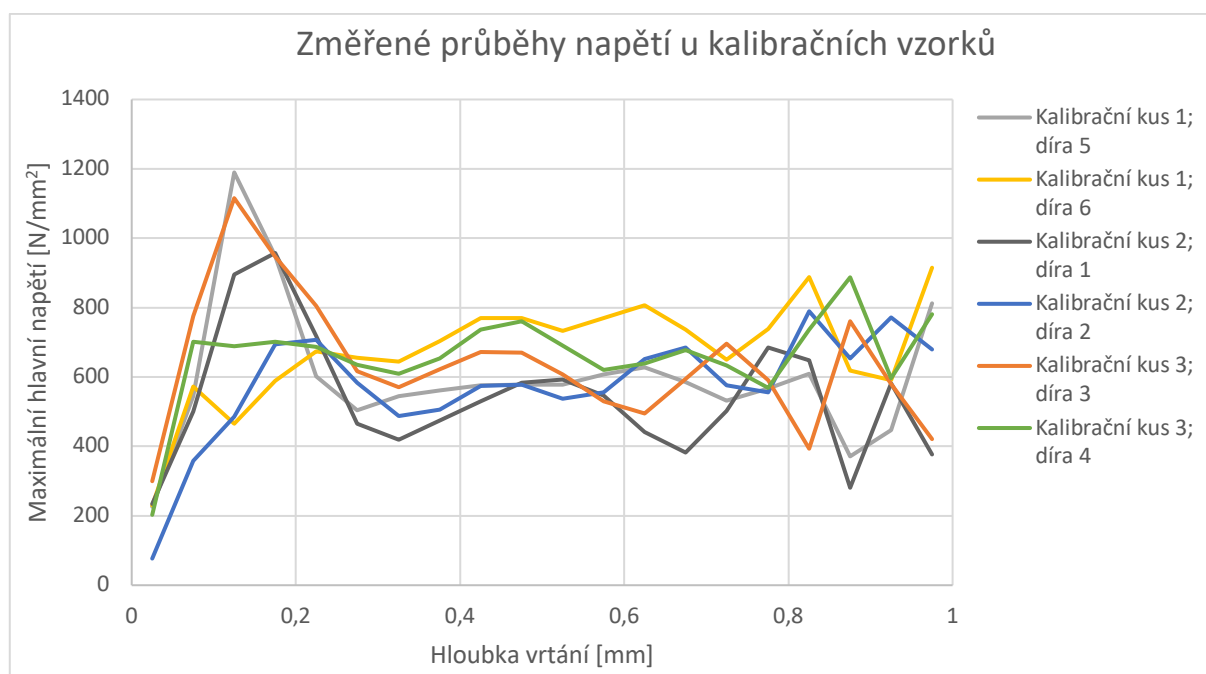
Obrázek 32 - Kalibrační hřebeny, odvrtávací metoda

Výsledky měření byly uvažované v intervalu $\langle 0,25;0,8 \rangle$ mm. Hodnoty na okrajích $\langle 0;0,25 \rangle$ a $\langle 0,8;1 \rangle$ mm nejsou při této metodě spolehlivé. Změřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce, kde byl zeleně označen výsledek s nejnižším zbytkovým napětím a červeně s nejvyšším:

Tabulka 3 - Tabulka naměřených hodnot z platformy A

| | Vzorek č. 1 (kolmo na pohyb recoateru) | | Vzorek č. 2 (prostřední) | | Vzorek č. 3 (rovnoběžně s pohybem recoateru) | |
|--|--|----------------|--------------------------|----------|--|----------|
| | Měření 5 | Měření 6 | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Měření 4 |
| Minimální hodnota σ_{min} [MPa] | 504,571 | 645,323 | 382,285 | 488,409 | 495,749 | 568,819 |
| Maximální hodnota σ_{max} [MPa] | 627,184 | 807,673 | 684,200 | 684,669 | 695,611 | 760,088 |
| Průměr hodnot σ_{prum} [MPa] | 569,189 | 725,513 | 511,184 | 571,859 | 605,947 | 656,922 |
| Průměr hodnot vzorku [MPa] | 647,351 | | 541,522 | | 631,435 | |

Z výsledku měření bylo možné pozorovat, že nejvíce maximálního zbytkového napětí se nacházelo ve vzorku číslo 3, kde byl průměr naměřených hodnot 647,351 MPa. Dále bylo možné pozorovat, že více zbytkového napětí bylo naměřeno u měření 2, 4, 6, to jest u měřících bodů na vršku kalibračních modelů (Obrázek 32). Největší napětí mělo hodnotu 807,673 MPa, což se nacházelo ve vzorku 1 (bod 6) a nejmenší 382,285 MPa u vzorku 2 (bod č. 1).



Graf 3 - Změřený průběh napětí u odvrtávací metody

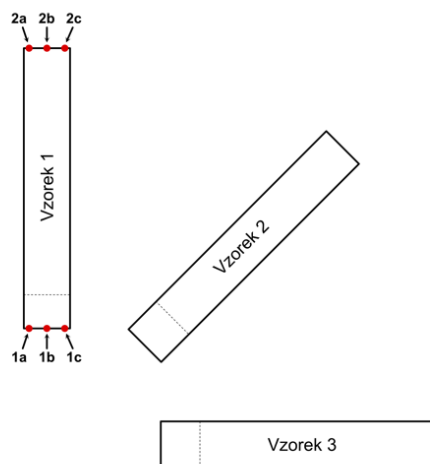
V uvažovaném intervalu bylo možné zhodnotit výsledky, které se pohybovaly v rozmezí 300 MPa, což značí správné provedení měření. Dále taktéž to, že se v materiálu v oblasti měření nevyskytla žádná anomálie, která by toto měření znehodnotila.

Jednotlivé vzorky byly měřeny s časovým odstupem a tento fakt mohl do výsledků měření vnést nepřesnosti.

Další nevýhodou odvrtávací metody je fakt, že tato metoda naruší součást, což je pro spoustu součástí a pozorování napětí nežádoucí. Vzhledem k malému porušení bývá metoda označována jako semidestruktivní. Metoda měří pouze po povrchu součásti (do hloubky 1 mm), a proto nelze z výsledků hodnotit stav vnitřního napětí v celém objemu součásti.

Měření pomocí odříznutí a následné deformace – platforma B

Druhá platforma byla naříznuta v laboratoři Experimentálního tváření. Vzhledem k rozložení součástí nebylo možné vzorek 2 úplně doříznout, a proto bylo potřeba řez dokončit ruční pilkou. Po narušení žebrování (naříznutí) bylo možné v čase pozorovat, jak se díky napětí díly tvarově deformují. Dořez vzorku č. 2 mohl mít vliv na relaxaci/deformaci materiálu, vzhledem k tomu, že nebyl odříznut najednou, jako to bylo u vzorku č. 1 a 3. Bylo uvažováno, že tento fakt deformaci neovlivnil. Platforma se zdeformovanými vzorky byla změřena v laboratoři Dílenské metrologie.



Obrázek 33 - Body měření kalibračních vzorků

Na každém vzorku bylo změřeno 6 hodnot výšky součásti (v ose Z). Tři body na patě (místo, kde je součást spojena s platformou) a 3 hodnoty v nejvyšším bodě vzorku (Obrázek 33). Naměřené hodnoty:

Tabulka 4 - Tabulka naměřených hodnot z platformy B (protokol měření v příloze č. 3)

| Vzorek | Název bodu | Naměřené hodnoty [mm] | Aritmetický průměr [mm] | Hodnoty ΔH [mm] (jmenovitý rozměr 9 mm) |
|--------|------------|-----------------------|-------------------------|--|
| 1 | 1_1a | 8,907 | 8,899 | -0,101 |
| | 1_1b | 8,903 | | |
| | 1_1c | 8,887 | | |
| | 1_2a | 10,426 | 10,380 | 1,380 |
| | 1_2b | 10,371 | | |
| | 1_2c | 10,342 | | |
| 2 | 2_1a | 8,935 | 8,931 | -0,069 |
| | 2_1b | 8,928 | | |
| | 2_1c | 8,930 | | |
| | 2_2a | 10,388 | 10,459 | 1,459 |
| | 2_2b | 10,476 | | |
| | 2_2c | 10,514 | | |
| 3 | 3_1a | 8,928 | 8,919 | -0,081 |
| | 3_1b | 8,931 | | |
| | 3_1c | 8,898 | | |
| | 3_2a | 10,839 | 10,882 | 1,882 |
| | 3_2b | 10,890 | | |
| | 3_2c | 10,918 | | |

Z naměřených hodnot bylo možné vyčíst velikost deformace vzorků i v patě součásti, která je pevně spojena s platformou. Vzorek by měl mít jmenovitou výšku 9 mm. Byl vzat v potaz aritmetický průměr, čímž se sumarizovaly vždy 3 naměřené body v jeden (pata a vršek). Poté vyšel s nejmenší odchylkou pro patu vzorek č. 2 (odchylka -0,069 mm) a pro zdeformovanou část (vršek) vzorek č. 1 (odchylka 1,380 mm). Z tohoto měření bylo možné vyhodnotit jako nejlepší orientaci vzorku pro nejmenší deformaci (zbytkové napětí) vzorek číslo 1, který má rozdíl bodů 1 a 2 hodnotu 1,481 mm. Tato orientace byla kolmá vůči pohybu recoateru. Přes identické nastavení všech procesních parametrů bylo vidno, že orientace součásti taktéž zasahuje do výsledného zbytkového napětí.

3.2.4 Hodnocení experimentu

V prvním experimentu byly zjištěny hodnoty zbytkového napětí, které byly vyhodnoceny pomocí odvrťovací metody a metody měření velikosti deformace ve vzorcích. U obou měření bylo možné pozorovat, že orientace součásti má vliv na výsledné vnitřní napětí. Následně byly tyto naměřené hodnoty z obou metod měření mezi sebou porovnány, zda spolu korelují. Korelace dat se nepotvrdila (Tabulka 5). Ke způsobení tohoto faktu mohlo přispět více faktorů. Od nepřesností měření obou metod, přes časový odstup mezi měřeními. Z důvodu časové náročnosti odvrťovací metody nebylo možné po vyhodnocení dat provést opětovný experiment pro potvrzení zhodnocení tohoto porovnání.

Tabulka 5 - Srovnání kalibračních vzorků

| Vzorek | Průměrné napětí [MPa] | Deformace ΔH [mm] |
|--------|-----------------------|---------------------------|
| 1 | 647,351 | 1,380 |
| 2 | 541,522 | 1,459 |
| 3 | 631,435 | 1,882 |

Vzhledem k časové náročnosti nebylo možné provést více měření, a proto nelze pronést jednoznačný závěr. Ke zjištění velikosti vnitřního napětí byla dále použita metoda měření deformace součásti.

3.3 Druhý experiment – tisk kalibračních vzorků MS1

3.3.1 Popis experimentu

Dalším experimentem bylo zjištění velikosti zbytkového napětí u oceli MS1 pomocí měření velikosti deformace součásti. K tisku vzorků byl využit nový prášek a již několikrát přesetý. Výsledky měření z těchto dvou platforem byly mezi sebou porovnány a následně i s výsledky z materiálu 316 L.

Pro rozlišení tiskových platforem bylo používáno následující označení: tisková platforma s přesetým práškem „MS1-1“ a s novým „MS1-2“.

3.3.2 Provedení experimentu

Tisk byl proveden dle standardních hodnot, které jsou pro tento materiál používané (Tabulka 6):

Tabulka 6 - Parametry kalibračního tisku vzorků z ocele MS1

| | |
|----------------------|------------------|
| Výkon laseru | 285 W |
| Rychlost laseru | 960 mm/s |
| Šrafovací vzdálenost | 0,08 mm |
| Výška vrstvy | 40 μm |
| Strategie | Stripes |
| Předehřev platformy | 40 °C |

Dokončovací operace vzorků byly identické jako při vzorcích z ocele 316 L. Vzorky byly naříznuty elektroerozivní metodou a následně změřeny v laboratoři Dílenské metrologie. Výsledky jsou uvedené a zhodnocené níže.

3.3.3 Výsledky experimentu

Z tabulky 7 bylo patrné, že na deformaci, a tedy zbytkové napětí, měla kvalita materiálu vliv. Průměrná deformace u MS1-1 byla 0,173 mm a u MS1-2 byla 0,226 mm. Lépe z těchto dvou vzorků vyšel několikrát přesetý materiál.

Dále byly hodnoty srovnány s výsledky z materiálu 316 L. Vzorky z materiálu 316 L vykazovaly větší deformaci (průměr byl 1,574 mm) než vzorky z MS1, a to až o 90 %, proto je z tohoto hlediska výhodnější volit pro tento tvar součásti materiál MS1.

Tabulka 7 - Výsledky deformace MS1 (protokoly měření v příloze č. 4 a 5)

| Vzorky z platformy MS1-1 | Naměřené hodnoty ΔH [mm] | Vzorky z platformy MS1-2 | Naměřené hodnoty ΔH [mm] | Vzorky z platformy 316L | Naměřené hodnoty ΔH [mm] |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0,139 | 1 | 0,182 | 1 | 1,380 |
| 2 | 0,162 | 2 | 0,187 | 2 | 1,459 |
| 3 | 0,219 | 3 | 0,308 | 3 | 1,882 |

Zjištěné hodnoty z nového prášku byly taktéž využity pro vytvoření kalibračního profilu pro materiál MS1, a tedy i pro tento prášek je možné v simulaci sledovat průběh napětí a teplotních gradientů u požadovaných součástí.

3.3.4 Hodnocení experimentu

Druhý experiment zhodnotil velikosti deformací u materiálu z oceli MS1. Z výsledků vzešel již několikrát recyklovaný materiál jako lepší materiál s menší deformací. Hodnoty byly následně porovnány s výsledky z prvního experimentu (materiál 316 L). V tomto porovnání vykazovala ocel MS1 výrazně menší deformaci, a tím pádem i menší zbytkové napětí.

3.4 Třetí experiment – vzorky s různými procesními parametry

3.4.1 Popis experimentu

Třetí experiment řešil snížení vnitřního napětí pomocí nastavení procesních parametrů tisku. Pro zkoumané vzorky byl parametr UpSkin vypnut, DownSkin ponechán u všech vzorků na defaultním nastavení a bylo pouze měněno nastavení InFillu. Vzorky byly vytištěny z oceli MS1. Pro výchozí vzorek (vzorek č. 1) se braly standardní přednastavené parametry pro tento materiál. Následně byl vždy pro každý vzorek vytvořen duplikát a v něm upraven pouze jeden procesní parametr oproti výchozímu. Souhrnný seznam s popisem nastavení je v příloze č. 1. Upravované parametry jsou popsány níže.

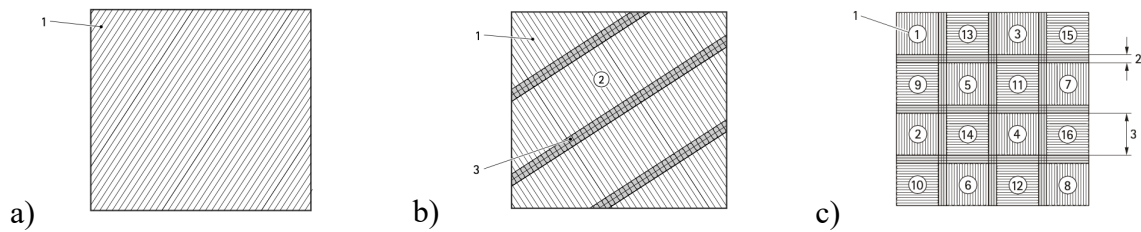
a) Strategie

Prvním upravovaným parametrem byla strategie skenování. Strategie ovlivňuje, jakým způsobem bude každá vrstva skenována. Pro demonstraci byl vytištěn, jako vzorek č. 2, vzorek bez strategie viz varianta a) (Obrázek 34). V defaultním nastavení se používá strategie pruhů o šířce 10 mm varianta b). Tyto pruhy byly následně změněny na:

- 5 mm (vzorek č. 3)
- 15 mm (vzorek č. 4).

Kromě pruhů se jako strategie používá takzvaná „šachovnice“ varianta c). Tato šachovnice je složena z pruhů, které se postupně skenují. Vždy prvně pole v jednom směru skenování a pak v druhém. Pro základní nastavení se používá šířka pole (obr. c-3) 10 mm (vzorek č. 5). Tyto hodnoty byly změněny na:

- 5 mm (vzorek č. 6)
- 15 mm (vzorek č. 7)



Obrázek 34 - Strategie skenování [9]

b) Výkon laseru (Laser power)

Výkon laseru zasahuje do objemové hustoty (vzorec 1), která ovlivňuje, jak bude prášek roztaven. Základní nastavení výkonu je 285 W. Pro experiment byl výkon vzorků upraven na:

- 225 W (vzorek č. 8)
- 340 W (vzorek č. 9)

Změna ovlivnila výslednou objemovou hustotu, kdy u prvního případu ji snížila a u druhého zvýšila. Došlo tedy k menšímu a většímu protavení materiálu.

c) Rychlost laseru (Laser speed)

Kromě síly laseru vstupuje do objemové hustoty i rychlost laseru. Rychlost laseru určuje, po jakou dobu bude laser působit na určitou oblast (expoziční čas). Proto byla rychlost upravena z výchozí hodnoty 960 mm/s na:

- 770 mm/s (vzorek č. 10)
- 1150 mm/s (vzorek č. 11)

d) Objemová hustota

Další změnou bylo ovlivnění parametru výkonu a rychlost skenování tak, aby byl zachována objemová hustota. Tato hodnota byla ve výchozím nastavení $67,47 \text{ J/mm}^3$. V úvahu se vzala hodnota výkonu laseru 225 W a 340 W. Pro tyto hodnoty byla dopočtena, dle vzorce 1, skenovací rychlost:

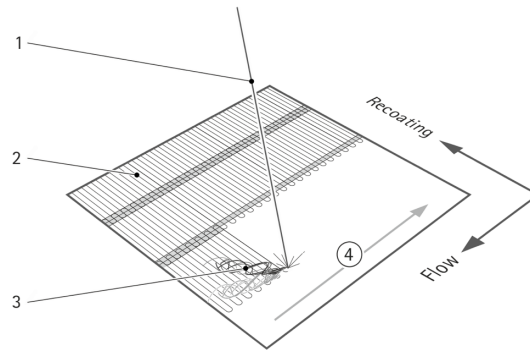
- 757,91 mm/s (vzorek č. 12)
- 1145,29 mm/s (vzorek č. 13).

Dále se vzaly v potaz skenovací rychlosti 770 mm/s a 1150 mm/s. Pro tyto hodnoty byl dopočten výkon laseru:

- 228,59 W (vzorek č. 13)
- 341,4 W (vzorek č. 14)

e) Optimalizace směru skenování vůči proudění plynu (Flow optimization)

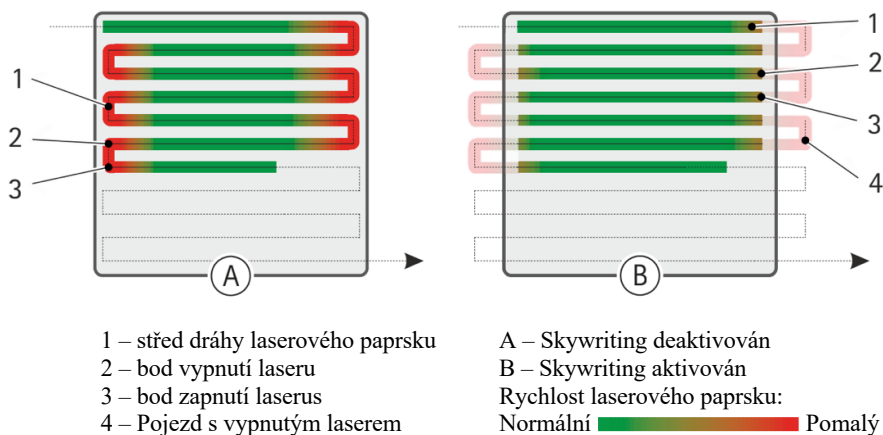
Tato funkce zohledňuje optimalizaci skenovacích vektorů vůči proudění plynu v komoře. Během procesu tisku se kontinuálním prouděním inertního plynu přes oblast skenování odsává ven ze stavební komory velká část odlétávajících částí, např. zbytkových částic po laserovém tavení. (Obrázek 35). Tyto částice mohou ovlivnit výsledky spékání a následně i výsledné vlastnosti součásti. Při zapnutí optimalizaci je zohledněn směr skenování vůči proudění plynu. Zjednodušeně řečeno, laser skenuje oblasti tak, aby vzniklé nežádoucí produkty byly odsáty či dopadly na plochu, která byla již naskenována. Při výchozím nastavení je tato možnost aktivovaná. Pro vzorek č. 16 byla vypnutá. [9]



Obrázek 35 - Flow optimization - 1 laser; 2 již skenované pole; 3 nežádoucí produkty; 4 směr skenování

f) Skywriting

Během expozice uzavřených oblastí vrstev dílu se laserový paprsek pohybuje podél šrafovacích čar ve střídavých směrech. Při deaktivovaném skywritingu jsou fáze brzdění a zrychlování laserového paprsku uvnitř oblasti součásti (Obrázek 36). Díky nižším rychlostem skenování během brzdění a zrychlování je aplikovaná větší energie na okrajích exponovaných ploch. Při aktivovaném skywritingu jsou fáze brzdění a zrychlování laserového paprsku mimo oblasti expozice. Během těchto fází je laser vypnutý. Energie aplikovaná při expozici skenovacích vektorů je tedy rovnoměrnější v celé oblasti expozice. Při základním nastavení je tato funkce vypnuta. Pro vzorek č. 19 byla tato funkce zapnutá. Tato funkce může způsobit delší skenovací čas a tím i vznik rozdílných teplotních gradientů vůči základnímu nastavení. [9]



Obrázek 36 – Skywriting

g) Energy Input Homogenization

Homogenizace vstupní energie nebo také optimalizace expozice je funkce dvou typů:

I. Minimum vector time

V nastavení minimálního času skenování vektoru lze nastavit, po jakou minimální dobu (ms) bude určitý vektor exponován. Tímto způsobem lze v případě potřeby zajistit, aby každý vektor byl exponován minimálně určený čas.

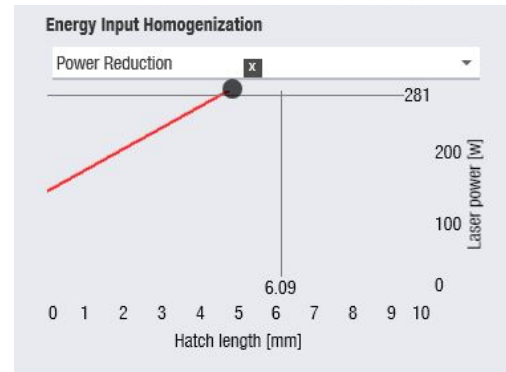
Například: Pokud bude nastaven minimální čas 5 ms, tak vektor, kterému vychází skenovací čas 3 ms, bude skenován 3 ms a další 2 ms bude laser čekat bez exponování. Pokud bude vektor dlouhý 7 ms, tak se bude exponovat 7 ms a poté laser přejde ihned na další skenovací vektor.

S aktivovanou funkcí lze očekávat významné prodloužení doby tisku. Hodnoty vzorků byly nastaveny následovně:

- 7,5 ms (vzorek č. 17)
- 10,14 ms (vzorek č. 18)

II. Power reduction mode

Power reduction mode (Obrázek 37), volně přeloženo mód redukce výkonu, slouží k omezení výkonu dle nastavení průběhu přímky. Do průběhu křivky vstupuje délka skenovacích vektorů a výkon laseru. Nastavením přímky může být snížen výkon laseru pro určitou délku skenovacích vektorů. Pro vzorek č. 20 byl průběh křivky nastaven následovně: Mezi délkou vektoru 0 a 5 mm byla nastavena přímka se směrnici $y = 27x + 150$. Od 5 mm byl výkon nastaven na 100 % tj. 285 W. Toto omezení mělo snížit přehřívání materiálu v malých oblastech.



Obrázek 37 - Power reduction mode

h) Rotace skenovacích vektorů

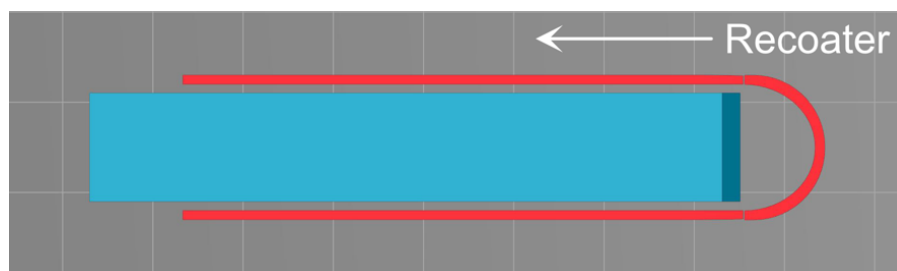
Snížení teplotních gradientů lze dosáhnout rotací skenovacích vektorů v jednotlivých vrstvách. Při normálních podmínkách se hodnota rotace mezi vrstvami nastavuje na 47 nebo 67 stupňů. Pro vzorek č. 21 byla nastavena hodnota 30° a pro vzorek č. 22 hodnota 50°. Tyto hodnoty mají menší počet vrstev skenování mezi tím, než se setkají dva stejně orientované skenované vektory, vůči výchozím hodnotám.

3.4.2 Provedení experimentu

Příprava tiskové platformy

Příprava tiskových platform probíhala opět v SW EOSPRINT. Na platformu bylo umístěno definovaných 24 vzorků. Uspořádání na platformě je v příloze č. 2.

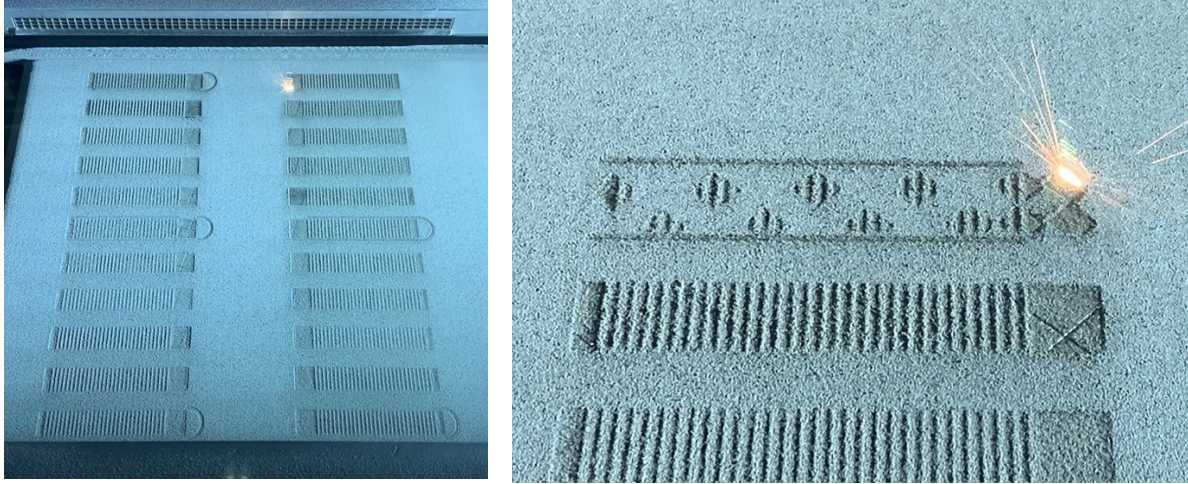
Poloha součástí na platformě může významně ovlivnit riziko selhání průběhu tisku. Pro zamezení možné kolize rocoateru a součástí při nanášení vrstvy prášku je vhodné součásti orientovat tak, aby přicházely do kontaktu s nanášecím systémem. Pro nařiznutí vzorků nebylo ale toto možné dodržet. Stroj provádějící elektroerozivní řezání umí řezat součásti pouze pod pravým úhlem a nelze ho nijak úhlovat. Proto byly na tiskovou platformu přidány takzvané náběhové stříšky (Obrázek 38), které se snažily zajistit plynulé nanášení vrstvy. Ke stříškám byly ještě přidány vodící lišty, které pomáhaly bezproblémově nanést prášek každé vrstvy.



Obrázek 38 - Model se stříškou a vodící lištou

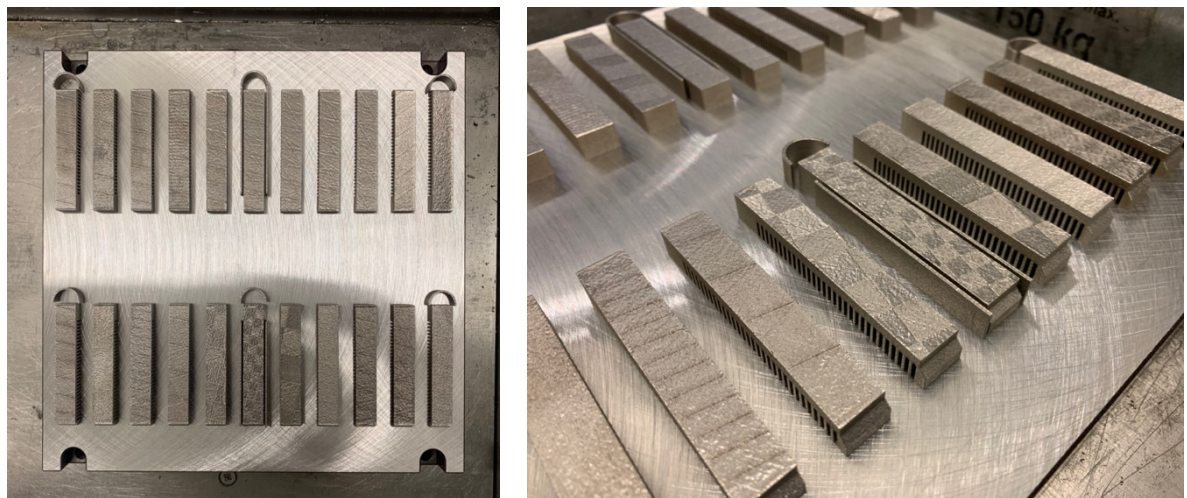
Tisk experimentu

Vytištění vzorků proběhlo bez problémů a při tisku bylo možné sledovat různé nastavení parametrů, především strategie tisku (například velikosti šachovnicových polí) (Obrázek 39). Následně byly vzorky v postprocesu naříznuty opět elektroerozivní metodou a změřeny v laboratoři metrologie.



Obrázek 39 - Tištěná platforma a velikost šachovnicových polí

Vzhledem k vypnutí UpSkinu bylo možné po vytištění platformy velmi dobře pozorovat různá nastavení strategie tisku a kvalitu povrchu (Obrázek 40). Vzorky byly z obou stran elektroerozivně naříznuty a následně opět změřeny v laboratoři Dílenské metrologie.

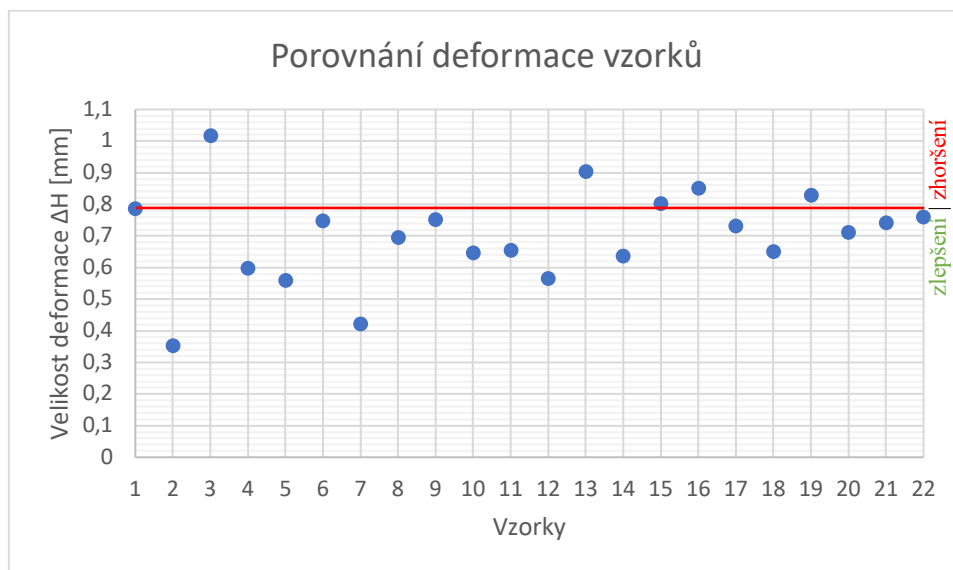


Obrázek 40 - Vytisknutá platforma se vzorky

3.4.4 Výsledky experimentu

Výsledky měření jsou uvedené níže v Tabulka 8, přičemž zeleně byly označeny výsledky s menší deformací než vzorek č. 1 s defaultním nastavením, a naopak červeně byly označeny horší výsledky. Z tabulky vychází, že nejlepší vzorek pro snížení deformace (zbytkového pnutí) je vzorek č. 2 (vzorek se skenovací strategií „Bez strategie“), který měl zlepšení o 0,433 mm (55,1 %). Druhé nejlepší zlepšení měl vzorek č. 7, kde se nastavovala velikost šachovnicového pole na 15 mm (o 45,3 %). Oproti tomu nejhorší výsledky vykazoval vzorek č. 3 se strategií velikosti pruhů 5 mm, který měl o 0,232 mm větší deformaci (29,5 %) a dále vzorek č. 13 s nevhodně nastavenými parametry.

Ze všech 21 vzorků s rozdílným nastavením mělo 16 lepší výsledky než defaultní vzorek (Graf 4).



Graf 4 - Velikosti deformace vzorků

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty vzorkové platformy (protokol měření v příloze č. 5)

| Vzorek | Nastavení | Naměřené hodnoty [mm] | | Deformace ΔH [mm] | Rozdíl od vzorku 1 [mm] |
|--------|---|-----------------------|-------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | Defaultní nastavení | Pata | 8,899 | 0,786 | 0 |
| | | Předek | 9,685 | | |
| 2 | Strategie – Bez strategie | Pata | 8,821 | 0,353 | 0,433 |
| | | Předek | 9,174 | | |
| 3 | Strategie – Velikost pruhů (5 mm) | Pata | 8,917 | 1,018 | -0,232 |
| | | Předek | 9,935 | | |
| 4 | Strategie – Velikost pruhů (15 mm) | Pata | 8,922 | 0,599 | 0,187 |
| | | Předek | 9,521 | | |
| 5 | Strategie – šachovnice (10 mm) | Pata | 8,943 | 0,561 | 0,225 |
| | | Předek | 9,504 | | |
| 6 | Strategie – šachovnice (5 mm) | Pata | 8,944 | 0,748 | 0,038 |
| | | Předek | 9,692 | | |
| 7 | Strategie – šachovnice (15 mm) | Pata | 8,930 | 0,422 | 0,364 |
| | | Předek | 9,352 | | |
| 8 | Laser power (225 W) | Pata | 8,864 | 0,695 | 0,091 |
| | | Předek | 9,559 | | |
| 9 | Laser power (340 W) | Pata | 8,841 | 0,753 | 0,033 |
| | | Předek | 9,594 | | |
| 10 | Laser Speed (770 mm/s) | Pata | 8,849 | 0,648 | 0,138 |
| | | Předek | 9,497 | | |
| 11 | Laser Speed (1150 mm/s) | Pata | 8,872 | 0,655 | 0,131 |
| | | Předek | 9,527 | | |
| 12 | Zachování objemové hustoty (225 W; 757,91 mm/s) | Pata | 8,919 | 0,567 | 0,219 |
| | | Předek | 9,486 | | |
| 13 | Zachování objemové hustoty (340 W; 1145,29 mm/s) | Pata | 8,903 | 0,905 | -0,119 |
| | | Předek | 9,808 | | |
| 14 | Zachování objemové hustoty (770 mm/s; 228,59 W) | Pata | 8,920 | 0,638 | 0,148 |
| | | Předek | 9,558 | | |
| 15 | Zachování objemové hustoty (1150 mm/s; 341,4 W) | Pata | 8,968 | 0,804 | -0,018 |
| | | Předek | 9,772 | | |
| 16 | Flow optimization (OFF) | Pata | 8,878 | 0,851 | -0,065 |
| | | Předek | 9,729 | | |
| 17 | Minimum vector time (7,5) | Pata | 8,922 | 0,732 | 0,054 |
| | | Předek | 9,654 | | |
| 18 | Minimum vector time (10,14) | Pata | 8,894 | 0,652 | 0,134 |
| | | Předek | 9,546 | | |
| 19 | Skywriting (OFF) | Pata | 8,855 | 0,829 | -0,043 |
| | | Předek | 9,684 | | |
| 20 | Power reduction mode (<0;5> $y = 27x + 150$, dále 285 W) | Pata | 8,864 | 0,711 | 0,075 |
| | | Předek | 9,575 | | |
| 21 | Rotace skenovacích vektorů (30°) | Pata | 8,800 | 0,742 | 0,044 |
| | | Předek | 9,542 | | |
| 22 | Rotace skenovacích vektorů (50°) | Pata | 8,759 | 0,76 | 0,026 |
| | | Předek | 9,519 | | |

Strategie skenování

Z výsledků je zřejmé, že rozdílné strategie skenování mají vliv na výslednou deformaci vzorku. Z měřených vzorů měl nejlepší zlepšení o 55,1 % vzorek č. 2, kde byla použita skenovací strategie „Bez strategie“. U vzorku s nejhorším výsledkem deformace (zhoršení o 29,5 %) byla taktéž měněna strategie skenování (velikost pruhů 5 mm). Obecně vzato, pokud se porovnají výsledky skenování pruhů a šachovnic, tak lze pozorovat závislost na velikosti skenovaných polí. Malá pole vykazují zhoršení, či velmi podobné výsledky jako defaultní vzorek, oproti tomu větší pole vykazují zlepšení (menší deformaci), průměrně o 50 %.

Výkon laseru a rychlost skenování

Do této kategorie výsledků spadají všechny vzorky, u kterých se upravoval výkon laseru a rychlost skenování. Zmíněné aspekty ovlivňují objemovou hustotu, jež do této kategorie taktéž spadá.

Vzorky, kde se snižoval a zvyšoval výkon laseru, vykazaly mírné zlepšení. U vzorku č. 8 s menším výkonem (225 W) než byl defaultní (285 W), to bylo o 11,6 %. U druhého vzorku (č. 9) s 340 W bylo zlepšení o 4,2 %. Z porovnání vychází lépe vzorek s menším výkonem laseru.

Zvýšení a snížení rychlosti skenování taktéž kladně ovlivnilo výsledky deformace vzorků. Vzorky č. 10 (770 mm/s) a č. 11 (1150 mm/s) měly prakticky stejné výsledky zlepšení. Bylo to 0,138 a 0,131 mm, což je zlepšení zhruba o 17 %.

Poslední vzorky, které spadají do této kategorie, jsou vzorky, kde se zachovala objemová hustota, ale měnil se výkon laseru a rychlost skenování. Ze získaných dat vyšlo zhoršení u vzorku č. 13, který měl nejhorší výsledek. U tohoto vzorku se deformace zvětšila o 0,119 mm, tj. o 15,1 %. Ostatní vzorky měly skoro identické hodnoty jako defaultní (vzorek č. 15), nebo vykazovaly zlepšení (vzorek č. 12 a 14). Tyto vzorky měly menší výkon laseru (č. 12) či rychlost skenování (č. 14) a k nim byla dopočtena hodnota výkonu a rychlosti skenování laseru.

Další nastavení

Následující upravené procesní parametry ovlivňovaly různými způsoby tisk vzorků. Jedním z nich byla funkce Flow optimization, která byla pro vzorek č. 16 vypnuta. Vypnutí této funkce mělo za následek mírné zhoršení deformace o 0,065 mm (8,3 %).

U dalších dvou vzorků (č. 16 a 17) byly nastaveny hodnoty Minimum vector time. Oba tyto vzorky vykazovaly zlepšení. Vzorek č. 16 s nastavenou hodnotou 7,5 sekundy měl zlepšení o 6,9 % a vzorek č. 17 s hodnotou 10,14 s měl zlepšení o 17,0 %.

Dalším měněným parametrem byla funkce Skywriting, která byla pro vzorek č. 19 vypnuta. Toto nastavení zvýšilo velikost deformace o 5,5 % na 0,829 mm. Posledním měněným parametrem v této kategorii byl Power reduction mode, který ovlivňoval výkon laseru vůči velikosti skenovaného vektoru. Při nastavení, jež bylo definováno, byl výsledek mírně lepší (o 9,5 %), oproti defaultnímu nastavení.

Minimum vector time, Skywriting a Power reduction mode ovlivňují vlastnosti skenovaných vektorů a tím i velikost teplotních gradientů v oblastech skenování, což vedlo u zkoumaných vzorků ke snížení zbytkového napětí v materiálu.

Rotace skenovacích vektorů

U posledních dvou vzorků (č. 21 a 22) byla měněna hodnota velikosti úhlu rotace jednotlivých skenovaných vektorů v po sobě jdoucích vrstvách. Nastaveno bylo 30 a 50 stupňů. Toto nastavení pouze mírně zlepšilo deformaci vzorků o 5,6 % a 3,3 %.

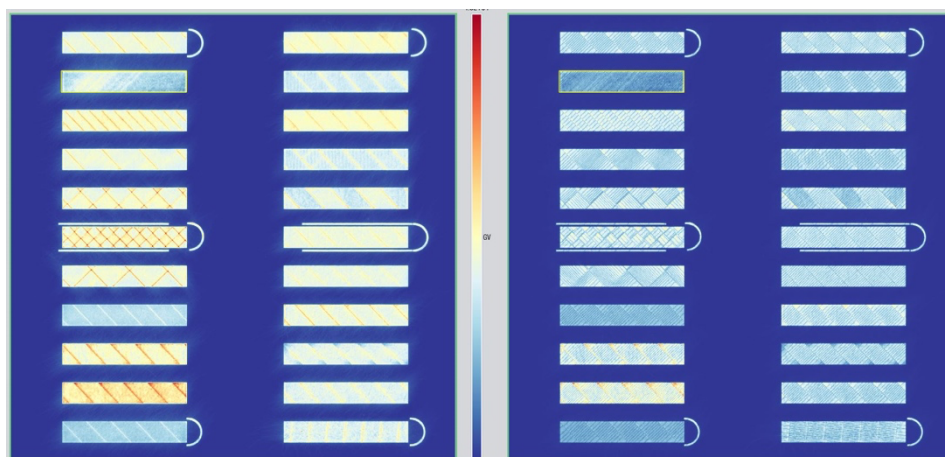
3.4.5 Hodnocení experimentu

Cílem tohoto experimentu bylo snížení vnitřního zbytkového napětí ve vzorcích, prostřednictvím nastavení procesních parametrů. Hodnoty vnitřního zbytkového napětí byly měřeny pomocí velikosti deformace vzorků. Výsledkem bylo, že 16 z 21 vzorků vykazovalo zlepšení oproti vzorku s defaultním nastavením.

Při vyhodnocování dat bylo zjištěno, že výsledek deformace defaultního vzorku (č. 1) vyšel při tomto experimentu jinak, než v experimentu č. 2. U tohoto byla hodnota deformace 0,786 mm a hřebene se stejnou orientací v experimentu č. 2 byla hodnota 0,308 mm. Tento rozdíl mohl být způsoben množstvím tisknutých součástí na platformě při třetím a druhém experimentu. Pokud se tiskne více dílu na platformě, prodlužuje se tím tiskový čas a snižuje se celková rychlost tisku, což má nejspíše dopad na zbytková vnitřní napětí, díky rozdílné rychlosti chladnutí vzorků.

Prekvapivé výsledné hodnoty byly u nastavení rotace skenovaných vrstev. Tyto hodnoty byly nastaveny jinak, než je výrobcem doporučeno, a přesto měly lepší výsledky.

Dále byl zkoumán vliv teplotních gradientů při tisku pomocí monitorovacího systému v softwaru EOSTATE Exposure OT. Na záznamu tisku níže (Obrázek 41) bylo možné pozorovat v levé části naakumulovanou energii a vpravo nejvíce energie ve vzorcích při tisku. Žádný vzorek nevykazoval přehřátí, jelikož by byl v levé části rudý. Nejvíce rudých částí bylo pozorováno u vzorku č. 6 a 10, avšak toto bylo způsobené strategií tisku a ani tyto vzorky nejevily přehřátí. Vzorek č. 2, který měl nejlepší výsledek zlepšení deformace byl modrý, avšak to neznamená, že by nebyl dostatečně spečen (málo dodané energie), pouze že vrstva neměla naakumulovanou energii. V případě detailnějšího zkoumání přehřátí by bylo potřeba více metalografických testů.



Obrázek 41 - Záznam tisku jedné vrstvy v SW EOSTATE Exposure OT

Výsledkem experimentu je, že pro jednoznačný závěr by bylo potřeba několikrát opakovaného tisku pro prokázání správnosti naměřených výsledků deformace.

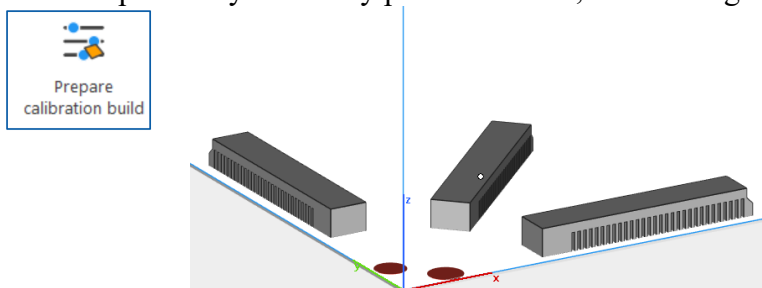
3.5 Čtvrtý experiment – simulační ověření průběhu vnitřního napětí

3.5.1 Popis experimentu

V posledním experimentu se práce zaměřila na vytvoření kalibračního profilu ze získaných dat pro možnost predikce průběhu teplotních gradientů při tisku a zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách. Predikce tisku lze využít pro optimalizování podpor pro správný odvod tepla a tím zmenšení teplotních gradientů, které ovlivňují tvorbu vnitřního napětí u tištěné součásti. Rovněž se informace o gradientech dají využít k optimalizaci tvaru součásti a tím taktéž předcházení přehřívání oblastí součásti při tisku. Tímto simulačním modulem disponuje SW Materialise Magics. Kalibrační profily byly vytvořeny pro ocel 316 L a MS1.

Kalibrace se používá k nastavení simulačního modulu pro zvolený typ materiálu. Ten následně slouží pro správnou simulaci průběhu tisku a zbytkového napětí v tištěných dílech. Kalibrace obsahuje tyto kroky [16]:

1. Vytvoření tiskové platformy se vzorky pomocí funkce, kterou Magics nabízí.



Obrázek 42 - Platforma s hřebeny

2. Vytisknutí platformy a následné odříznutí součásti od platformy



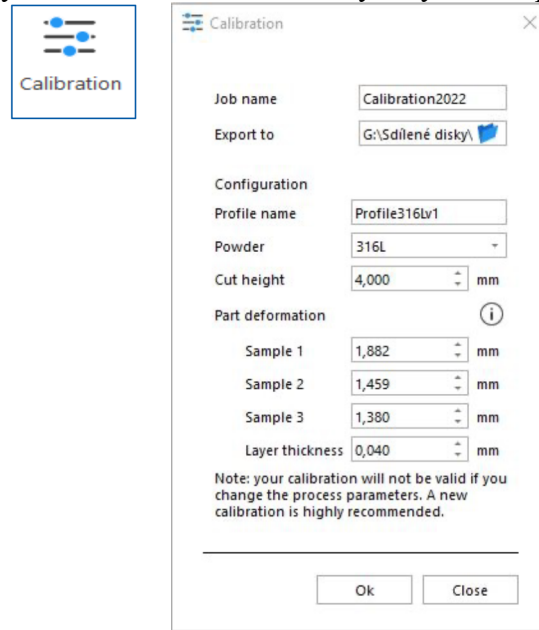
Obrázek 43 - Odříznutí hřebenu

3. Měření ohybu vytisknutého dílu a dopočet deformace pomocí vzorce $\Delta H = \frac{H_1}{H_0}$



Obrázek 44 - Měřené hodnoty na hřebenu

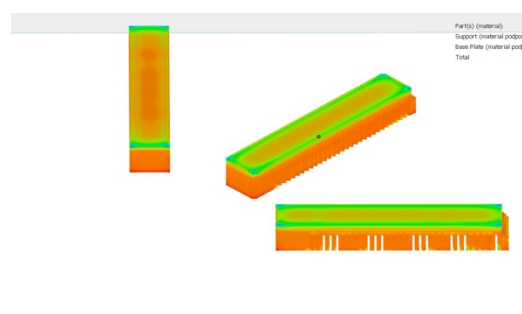
4. Zanesení naměřených dat do kalibrační tabulky a vytvoření profilu pro definovaný tisk



Obrázek 45 - Tabulka kalibrace

3.5.2 Provedení experimentu

Ze zjištěných deformací kalibračních vzorků z materiálu 316 L a MS1 byl nastaven kalibrační profil, (Obrázek 45) který umožní vytvořit simulaci pro zvolenou součást. Při zadávání simulace se zadává velikost voxelů, které simulace bude vykreslovat. Tento parametr se musí zohledňovat vůči účelu pozorování, jelikož samotné vypočtení modelu simulace (napětí i tepla) je náročná matematická operace a tím pádem je i náročná na hardware zařízení (čas vypočtení). Velikost voxelů by měla odpovídat struktuře simulovaného modelu. Pro prvotní ověření byla nastavena velikost voxelů v ose x a y 0,7 mm a v ose z 0,5 mm. Toto nastavení bylo nepřesné, jelikož nebyly vykresleny ani samostatně žebra kalibračních hřebenů. Proto se jako druhý výpočet nastavila velikost 0,4 mm ve všech osách, což odpovídá velikosti jedné tištěné vrstvy (v ose z).

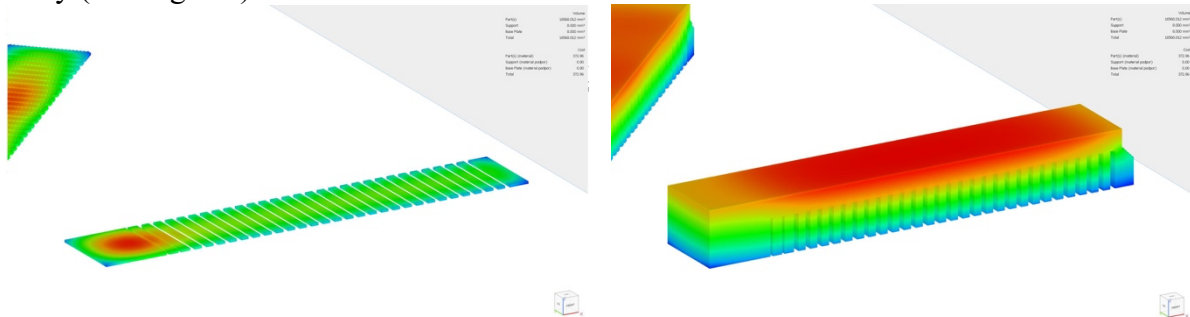


Obrázek 46 - Nevykreslený model kvůli velkým voxelům

3.5.3 Výsledky experimentu

Průběh teplotních gradientů v dílu (ocel 316 L)

Díky vytvořenému profilu byla provedena simulace tištěných hřebenu, na kterých byl pozorován průběh teplot. Vždy v každé vrstvě ve 3 fázích: stav při tisku (heating), stav bezprostředně po tisku (heating end) a stav po vychladnutí či před započítím exponování další vrstvy (cooling end).



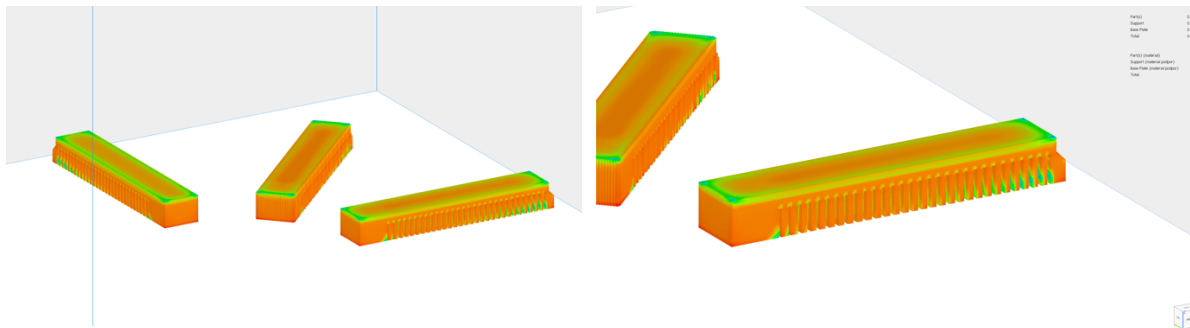
Obrázek 47 - Průběh teplot po vytištění první vrstvy

Obrázek 48 - Průběh teplot po vytištění celého modelu

Na snímkách ze simulace (Obrázek 48) bylo zjištěno, že největší teplotní gradienty vznikají u velkých objemových částí dílu. Toto pozorování lze využít pro vhodné doplnění podpor pro lepší odvod tepla, nebo optimalizaci tvaru součásti.

Průběh napětí v dílu (ocel 316 L)

Taktéž byl v simulaci pozorován průběh napětí, které bylo pozorováno v každé vrstvě. Ze simulace (Obrázek 49 a Obrázek 50) je vidno, že napětí po konci tisku se koncentruje v horních vrstvách nejvíce uprostřed, což koreluje s výsledky měření pomocí odvrtávací metody, kde bylo naměřené větší napětí u výsledků blíže k patě součásti než na jejím vrcholu.

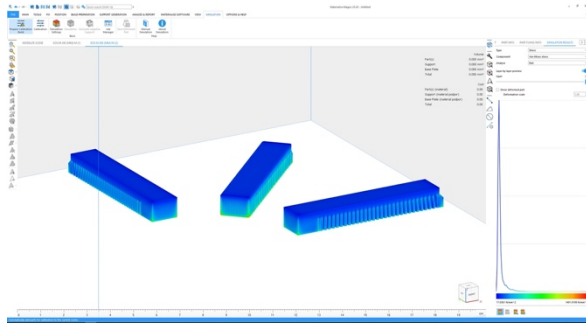


Obrázek 49 - Napětí u kalibračních dílů

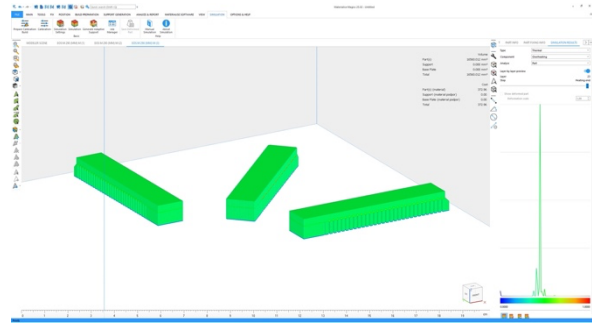
Obrázek 50 - Napětí u kalibračního modelu

Průběh napětí a teplotních gradientů ocele MS1

Kalibrační profil byl vytvořen i pro materiál MS1 z hodnot deformací kalibračních modelů u nového prášku. Jak již bylo prakticky ověřeno, tento materiál má větší tepelnou vodivost (oproti materiálu 316 L) a tím je méně náchylný na vznik vnitřního napětí. Toto lze pozorovat i na obrázcích ze simulace níže.



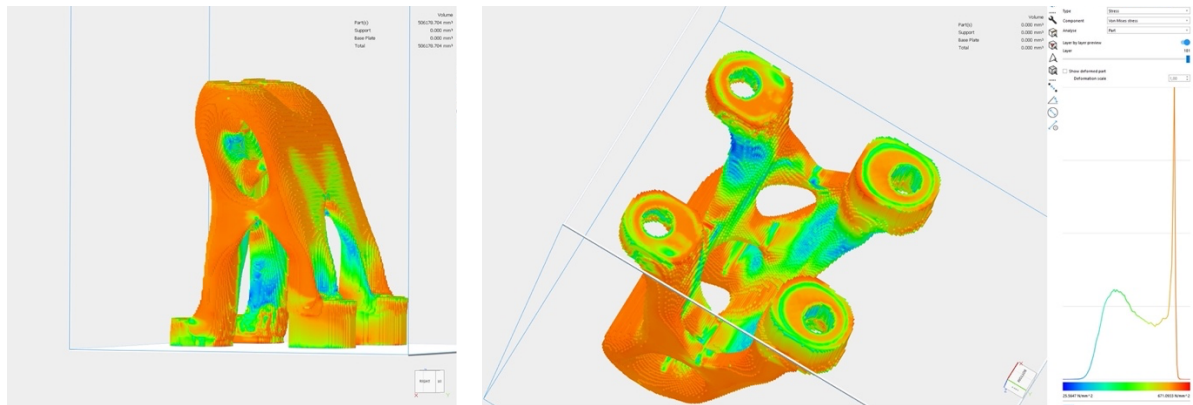
Obrázek 51 - Průběh napětí MS1



Obrázek 52 - Průběh tepla MS1

Simulace vnitřního napětí na reálném dílu

Kvůli tvarové jednoduchosti kalibračních hřebenuů nebylo možné pozorovat výrazné rozdíly teplot či napětí, a proto byla využita kalibrace pro ocel 316 L a provedena simulace na větším, tvarově složitějším kuse. Na snímku níže (Obrázek 53) je možné pozorovat riziko vzniku vnitřního napětí.



Obrázek 53 - Simulace zbytkového napětí u složitějšího dílu

3.5.4 Hodnocení experimentu

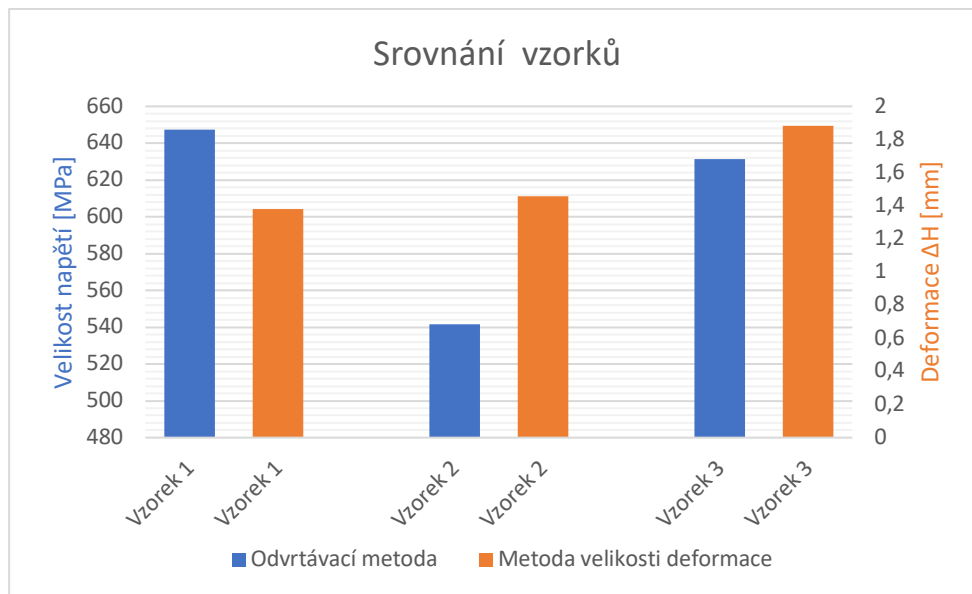
V experimentu byly nastaveny kalibrační profily pro materiál 316 L a MS1. Nastavení bylo vyzkoušeno na kalibračních hřebenech, u kterých bylo pozorováno možné přehřívání součásti. Jelikož tyto hřebeny nebyly tvarově složité, byla dále simulace vyzkoušena na tvarově složitější součásti, kde bylo již možné sledovat lokální koncentrátoory napětí a gradientů. Nastavené profily umožnily simulovat průběh napětí a teplotních gradientů v součásti. Profily mohou být dále využívány pro simulaci součástí v laboratoři Kovové aditivní výroby.

4 Zhodnocení

Z rešerše dostupných zdrojů, zabývajících se vnitřním napětím u 3D tisku, bylo zjištěno, že nejčastěji využívaná možnost jeho odstranění je postprocessing dílu ve formě tepelného zpracování. Obvykle to bývá žíhání na snížení pnutí. Tato metoda je účinná, avšak prodlužuje a zdražuje celý proces výroby součásti, a proto se jeví snaha předejít zbytkovému napětí při procesu výroby, jako velmi vhodná. Z toho důvodu se práce v praktické části zaměřila na některé možnosti, které by vnitřní zbytkové napětí mohly snížit.

Z hlediska přehlednosti práce a výsledků experimentů byly dílčí výsledky zhodnoceny vždy podrobně u každého experimentu zvlášť. Následující kapitoly jsou shrnutí výsledků experimentů.

Měření zbytkového napětí probíhalo pomocí dvou metod, odvrtávací metody a metody měření deformace dílu. Druhá zmiňovaná metoda byla možná, jelikož jako experimentální vzorky byly zvoleny kalibrační hřebeny od firmy EOS, na kterých bylo možné deformaci po nařiznutí vzorku pozorovat. Odvrtávací metoda má výhodu v číselném výstupu velikosti zbytkového napětí, oproti tomu metoda měření deformace je výrazně rychlejší a levnější. Výsledky měření pomocí těchto metod byly porovnány (Graf 5) a nebyla shledána korelace naměřených dat. Obě měření mají totiž svá úskalí, která mohly výsledky ovlivnit. Pro zjištění důvodů rozdílných výsledků měření by byla potřeba například validace výsledků třetí metodou měření, nebo vícekrát opakovaným měřením.

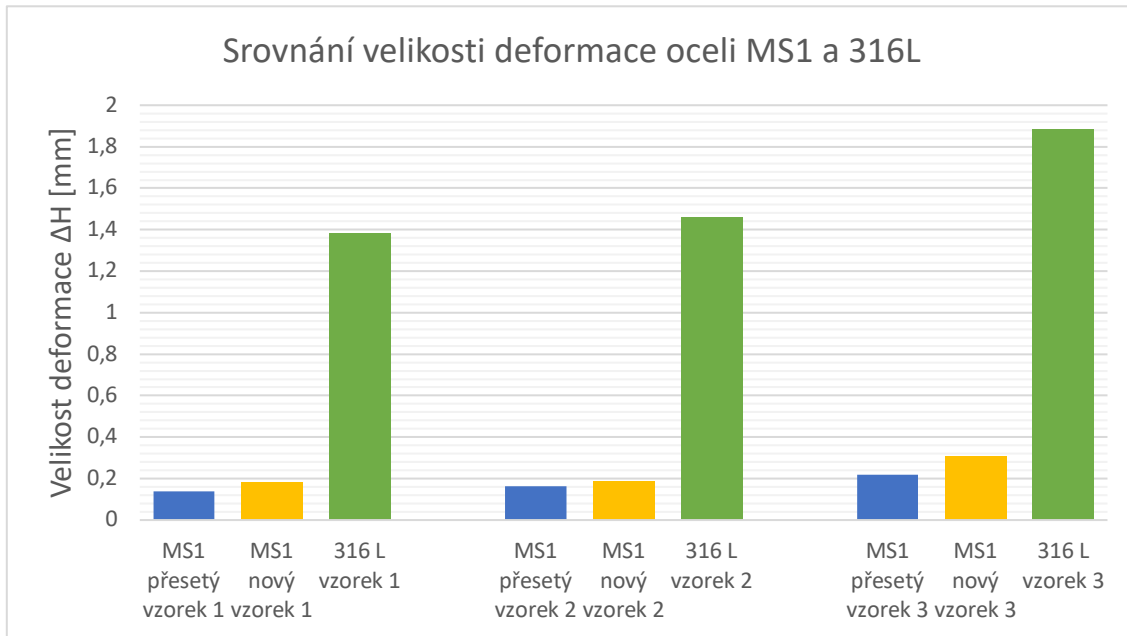


Graf 5 - Srovnání výsledků měření odvrtávací metody a metody měření deformace

Z práce plyne doporučení zohledňovat při měření zejména účel. Pokud bude potřeba zjistit číselný výstup velikosti zbytkového vnitřního napětí, je vhodné zvolit metodu odvrtávací. Pokud by bylo pouze potřeba zjistit, zda se vlivem napětí vzorek deformuje, lze použít rychlejší a levnější alternativní metodu odřiznutí, po které je možné vzorek přeměřit a zjistit snáze míru deformace součásti.

Pro možnost ovlivnění napětí dle vhodně zvoleného materiálu byly v prvním a druhém experimentu vytištěny vzorky z ocele 316 L a MS1. Z porovnání (Graf 6) vyšel poznatek, že volba materiálu má na výsledné zbytkové napětí výrazný vliv, jelikož ocel MS1 vykázala o 90 % větší deformaci (zbytkové napětí).

Navzdory výsledkům experimentu nelze jednoznačně říct doporučení, který materiál volit, jelikož do volby vstupují další aspekty, jako například požadované vlastnosti materiálu vůči jeho následnému zpracování a používání součásti.

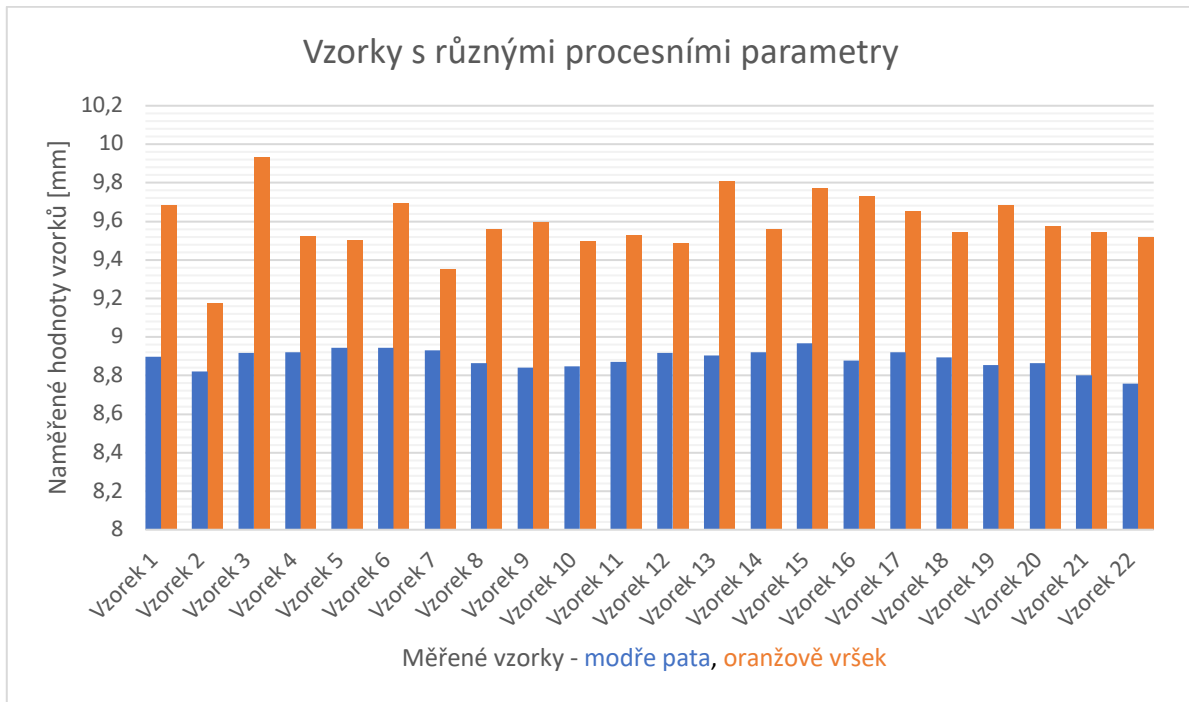


Graf 6 - Srovnání deformace vzorků MS1 a 316 L

K naplnění cíle práce bylo zkoumáno vhodné nastavení procesních parametrů tisku, které mohou ovlivňovat zbytkového napětí. V tomto experimentu bylo zkoumáno 21 vzorků s rozličnými parametry. U vzorků se měnily jak základní parametry, jako je výkon laseru nebo rychlost skenování, tak i pokročilejší funkce, jako jsou Minimum vector time nebo Flow optimization. Tyto vzorky byly měřeny pomocí velikosti deformace a srovnány se defaultním vzorkem (vzorek č. 1) s přednastavenými parametry od výrobce (Graf 7). Po změření bylo zjištěno, že 76 % vzorků vykázalo zlepšení oproti defaultnímu vzorku. K překvapení vzorek se strategií tisku „Bez strategie“ vykázal nejlepší hodnoty zlepšení. Ve výsledcích měření nebyl nalezen jednoznačný klíč, který by definoval, jaký parametr ovlivňuje výsledek deformace nejvíce.

Pro ověření výsledků byl zkoumán záznam tisku v monitorovacím systému, kde taktéž žádný vzorek nevykazoval výrazné anomálie při tisku.

V průběhu experimentu bylo zjištěno, že pro prokazatelnější výsledek by bylo potřeba více experimentálních tisků, například i s kombinacemi parametrů. To však bylo mimo časové možnosti této diplomové práce. Výsledek experimentu potvrdil, že optimalizace nastavení procesních parametrů je jedna ze správných cest k snižování vnitřního napětí.



Graf 7 - Srovnání deformace vzorků s různými procesními parametry

Poslední experiment byl zaměřen na možnosti predikce teplotních gradientů a napětí. Tuto predikci umožňuje simulační modul v SW Materialise Magics, který po provedené kalibraci z naměřených dat (1. a 2. experiment) byl schopen nasimulovat průběh napětí a teplot při tisku v každé skenované vrstvě. U experimentu bylo zjištěno, že při definování parametrů simulace je důležité zohlednit velikost voxelů (výsledné rozlišení součásti) vůči účelu pozorování. Vzhledem k jednoduchosti tvarů kalibračních hřebenů byla simulace vyzkoušena i na tvarově složitějším díle, kde bylo možné pozorovat kumulaci teplotních gradientů v částech součásti. Díky možnosti odhalení kritických míst kumulace tepla je možné součást tvarově optimalizovat, nebo vhodně přidat podpory, a tím zamezit vznikání gradientů a následného zbytkového napětí.

5 Závěr

Diplomová práce se věnovala možnosti snižování vnitřního napětí u aditivně tištěných kovových součástí.

Teoretická část byla zaměřena na stručné představení aditivní výroby, kde byly popsány výhody a nevýhody aditivní technologie a popsán proces výroby tisku pomocí technologie DMLS. V další části se práce zaměřila na popsání problematiky vnitřního napětí, dopady zbytkového vnitřního napětí na díly vyrobené aditivní výrobou a minimalizaci vnitřního napětí.

V praktické části práce vyhodnocovala velikost vnitřního zbytkového napětí u dílů z oceli 316 L. Použité vzorky byly měřeny pomocí odvrtávací metody a měření velikosti deformace vzorků. Pro měření deformace součástí bylo provedeno naříznutí vzorků a následné změření velikosti. Tato metoda je časově rychlejší a levnější metoda než dostupná odvrtávací metoda. Na základě měření bylo zjištěno, že data z měření spolu zcela nekorelují, a proto by bylo potřeba provést srovnání na větším počtu vzorků. Mezi jednotlivým měřením byl významný časový úsek, což pravděpodobně mohlo ovlivnit výsledky experimentu. Po zbytek práce se vnitřní napětí měřilo pomocí velikosti deformace. Potřebný tisk a měření byly provedeny v laboratořích RTI ZČU.

V další části práce byly vytištěny vzorky z materiálu MS1, pro zjištění hodnot zbytkového napětí u tohoto materiálu. První platforma byla vytištěna z přisetého prášku a druhá z nového. Tyto platformy byly následně porovnány mezi sebou a s předchozím tiskem z materiálu 316L. Výsledkem bylo, že lepší výsledky deformace vykazuje tisk s několikrát přisetým práškem. Ve srovnání s materiálem 316L, měly vytisknuté vzorky z MS1 podstatně menší deformace způsobené zbytkovým vnitřním napětím. Pokud bude v budoucnu na součást kladen důraz na vnitřní zbytkové napětí (deformaci součásti) a nebude možnost dalšího tepelného zpracování, bude vhodnější dle naměřených dat použít materiál MS1.

Dále práce hodnotila možnosti snížení vnitřního napětí pomocí nastavení různých dílčích procesních parametrů u vzorků. Celkově bylo nastaveno 22 vzorků, přičemž první vzorek byl vytisknut s přednastavenými parametry a dle něho byly ostatní porovnávány. Z měření vyplynulo, že nejvýraznější zlepšení měl vzorek s nastavením strategie tisku „bez strategie“. Z 21 vzorků vykazovalo 16 vzorků menší deformaci než defaultní vzorek. Největší zhoršení výsledků měl vzorek se strategií tisku „šachovnice“ s velikostí pole 5 mm. Obecně z výsledků plyne doporučení pro vyhnutí se skenování malých vektorů, ať už vhodnou strategií tisku nebo použitím nabízených funkcí, jako například Skywriting nebo Minimum vector time.

V poslední části práce byly vytvořeny kalibrační profily simulačního modulu pro ocel 316 L a MS1, který umožnily predikci průběhu vnitřního zbytkového napětí a teplot v součástech při tisku. Díky těmto informacím lze vhodně přidat podpory či optimalizovat tvar součásti, pro zamezení vzniku teplotních gradientů a tím vzniku vnitřního napětí.

Diplomová práce srovnala možnosti snižování vnitřního zbytkového napětí s ohledem na použitý materiál a nastavení procesních parametrů. Dále byly nastaveny profily simulačního modulu, které lze v budoucnu použít pro jakoukoliv součást z kalibrovaných materiálů. Poznatzky z této práce jsou předloženy jako výchozí doporučení pro další výzkum v této oblasti.

6 Zdroje

1. Statista. *3D printing market size worldwide from 2013 to 2021* [online]. 2022 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>
2. Regionální technologický institut. *O nás* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.rti.zcu.cz/cs/Centre/About-us/>
3. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstruktér* [online]. 2016 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
4. VESELÝ, D. *Využití SW Magics pro efektivní návrh podpůrných konstrukcí pro tištěné součásti*. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta strojní, 2020.
5. What are the advantages and disadvantages of 3D printing? *TWI Global* [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
6. www.3ders.org. *3D Printing Basics* [online]. 2012 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/3d-printing-basics.html>
7. FormLabs. *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing* [online]. [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
8. Materialise. *Tips and Tricks for Metal 3D Printing: Recoaters* [online]. 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/blog/metal-3D-printing-recoaters>.
9. SYSTEMS, E. G. E. O. *Software - EOSPRINT 2* [11.21]. München: 2021.
10. ScienceDirect. *Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive ...* [online]. 2018 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026412751830916X>
11. LIN CHENG, A. T. ScienceDirect. In: *Part-scale build orientation optimization for minimizing residual stress and support volume for ...* [online]. 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.03.004>
12. MÜNSTER, V. *Bakalářská práce: Optimalizace parametrů DMLS technologie 3D tisku*. Praha: Fakulta Strojní ČVUT v Praze, 2021.
13. FONTANARI, V. ResearchGate. In: *Finite Element Thermal Analysis of Metal Parts Finite Element Thermal Analysis of Metal Parts ...* [online]. 2018 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323461938_Finite_Element_Thermal_Analysis_of_Metal_Parts_Additively_Manufactured_via_Selective_Laser_Melting
14. HAJNYŠ, I. J. *Disertační práce: Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí ...*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2019.
15. GIBSON, B. Research Gate. In: *Process Development for Selective Laser Melting of Molybdenum* [online]. 2018 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331110596_Process_Development_for_Selective_Laser_Melting_of_Molybdenum
16. MATERIALISE. In: *Manual: Magics Simulation Module - Technical* [online]. [cit. 2022-04-16].
17. EOS. *EOS M 290* [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>

18. RENISHAW. In: *AM laser spot size* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://resources.renishaw.com/en/details/am-laser-spot-size--94106>
19. TINGSKOG, T. METAL AM. In: *An introduction to metal powders for AM: Manufacturing processes and properties* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/metal-powders-for-3d-printing-manufacturing-processes-and-properties/>
20. BARNES, J. E.. F. F. R. D. METAL AM. In: *Understanding metal powder requirements for Additive Manufacturing: Views from the industry* [online]. USA: 2019 [cit. 2022-02-12].
21. BC. ŠVANTER, M. *Zjišťování zbytkových napětí ve vícevrstvých strukturách*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2002.
22. PROF. ING. BUMBÁLEK, B. C. In: *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
23. KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. 272 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
24. I. KRAUS, N. G. *Difrakční analýza mechanických napětí*. Praha: ČVUT, 1995.
25. BURKET, T. In: *Bakalářská práce: Analýza metod pro měření zbytkových napětí a vhodnost jejich použití* [online]. 2021 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97193/F2-BP-2021-Burket-Tomas-analyza_metod_pro_mereni_zbytkovych_napeti.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
26. JANA PETRŮ, R. Č. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: 2011.
27. JAROSLAV VÁCLAVÍK, Z. B. P. B. O. W. In: *APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ* [online]. 2012 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
28. *Princip měření zbytkových napětí odvrtačací metodou*. [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Obr_04_CZ_wiki_odvrtavaci_metoda.jpg
29. HÁJEK, L. *Diplomová práce: Měření zbytkových napětí s využitím digitální korelace obrazu*. Praha: 2019.
30. Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. *Tech Note TN-503* [online]. 2010 [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80515/F2-DP-2019-Hajek-Libor-DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
31. SCHAJER, G. A. T. M. *A New Rosette Design for More Reliable Hole- Drilling Residual Stress Measurements*. 1997. pp. 299-306.
32. BC. CIVÍN, A. *Diplomová práce: STANOVENÍ ZBYTKOVÉ NAPJATOSTI METODOU VRTÁNÍ OTVORU S VYUŽITÍM MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6086
33. OMAR SULIMAN ZAROOG, C. Y. W. K. A. N. A. M. In: *Current and Challenge of Residual Stress Measurement Techniques* [online]. 2012 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.655.9803&rep=rep1&type=pdf>
34. ALEXANDRE, F. A. et al. In: *A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal ...* [online]. 2019 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19183932>

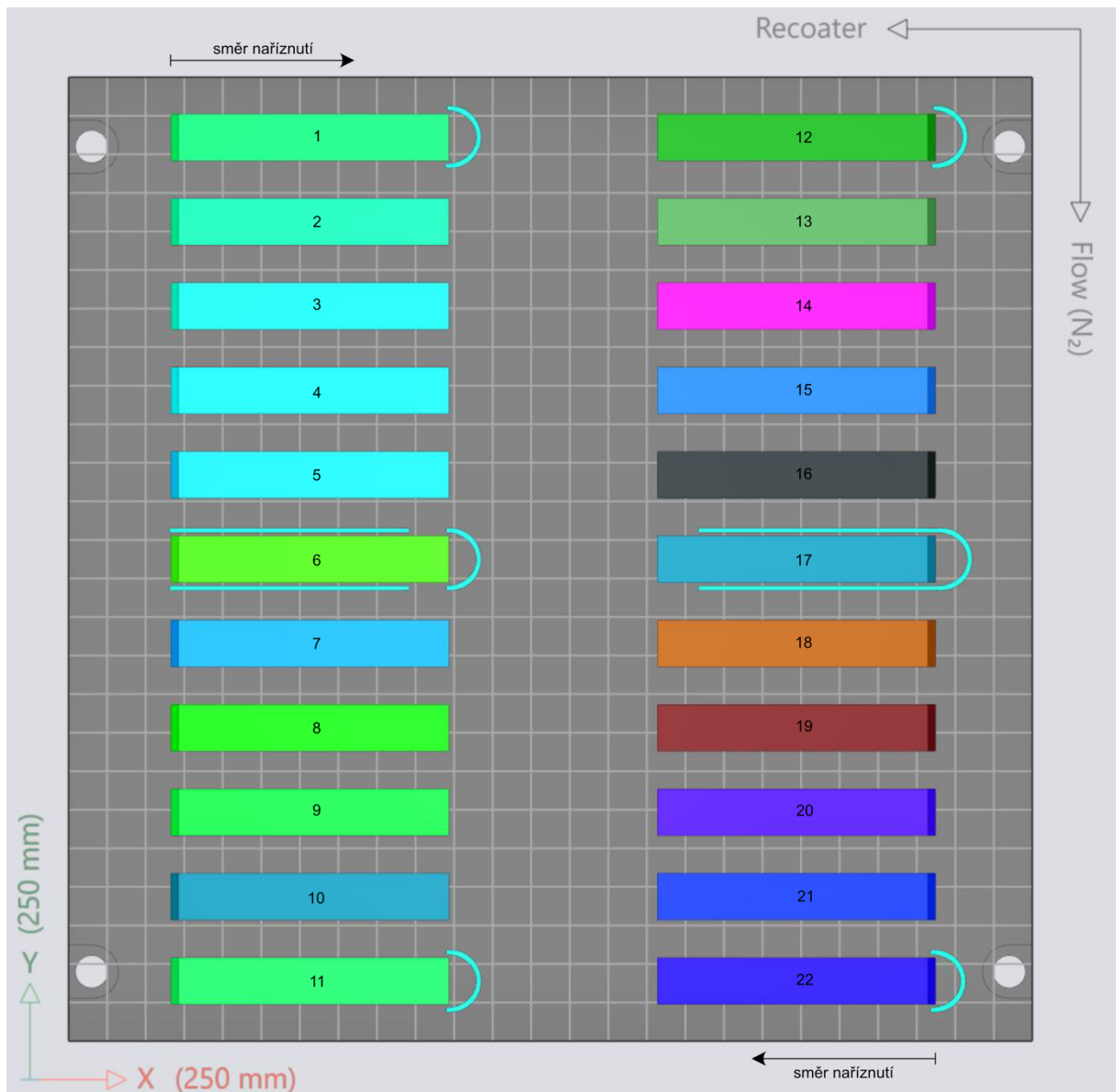
35. SYROVÝ, R. *Monitorování vad v průběhu tisku metodou DMLS*. Praha: ČVUT Praha, Fakulta strojní, 2021. ČVUT Fakulta strojní.
36. PATTERSON, A. E., S. L. M. A. P. A. F. MDPI. In: *Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need* [online]. 2017 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/technologies5020015>
37. DOC. ING. STANISLAV VĚCHET, C. a I. K. N. PH.D. SlidePlayer. In: *Tepelné zpracování ocelí* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>
38. MM Průmyslové spektrum. *Vibrace odstraňují vnitřní napětí v materiálech* [online]. 2010. 9. 1 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materialech>
39. MM Průmyslové spektrum. *Stárnutí konstrukčních materiálů* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu>

PŘÍLOHY











Příloha č. 1 – Tabulka parametrů

| Vzorek | Parametr | Výsledné nastavení |
|--------|---|---|
| 1 | Defaultní nastavení | Výkon laseru: 285 W; Rychlost skenování: 960 mm/s; Hatch Distance: 0,08 mm; Strategie: Stripes 10 mm |
| 2 | Strategie – Bez strategie | No pattern |
| 3 | Strategie – Velikost pruhů | 5 mm |
| 4 | Strategie – Velikost pruhů | 15 mm |
| 5 | Strategie – šachovnice | standart (10 mm) |
| 6 | Strategie – šachovnice | zmenšit (5 mm) |
| 7 | Strategie – šachovnice | zvětšit pole (15 mm) |
| 8 | Výkon laseru | 225 W (- 20 %) |
| 9 | Výkon laseru | 340 W (+ 20 %) |
| 10 | Rychlost skenování | 770 mm/s (- 20 %) |
| 11 | Rychlost skenování | 1150 mm/s (+ 20 %) |
| 12 | Zachování objemové hustoty (67,47 J/mm ³) | 225 W (- 20 %), poté laser speed 757,91 mm/s |
| 13 | Zachování objemové hustoty (67,47 J/mm ³) | 340 W (+ 20 %), poté laser speed 1145,29 mm/s |
| 14 | Zachování objemové hustoty (67,47 J/mm ³) | nechat rychlost 770 mm/s (- 20 %), poté 228,59 W |
| 15 | Zachování objemové hustoty (67,47 J/mm ³) | 1150 mm/s (+ 20 %), poté 341,4W |
| 16 | Flow optimization | OFF |
| 17 | Minimum vector time (5ms) | Změnit do + 7,5 ms |
| 18 | Minimum vector time (5ms) | Změnit do +10,14 ms |
| 19 | Skywriting | OFF |
| 20 | Power reduction mode | 150 W/ 0 mm – plný výkon/ 5 mm |
| 21 | Rotace skenovacích vektorů – Defaultně 47° | 30° |
| 22 | Rotace skenovacích vektorů – Defaultně 67° | 50° |










Příloha č. 2 – Tisková platforma vzorků














Příloha č. 3 – Protokol měření platformy z ocele 316 L (strana 1/2)

| Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie | | | | | |
|---|------------------|--------------------------|------------|---------------------------|------------------------|
| Regional technological institute - Metrology Laboratory | | | | | |
| Zkouška č. (Test no.): 018-22-LAV-platforma | | | | | |
| Plán měření 018-22-LAV-platforma | | Datum krátce 05.04.22 | | Metoda LDM_OP1 | |
| Číslo výkresu * drawingno * | | Čas 12:14:13 | | Tepl. souč. | |
| Operátor Dana Kubátová | | Stroj * LDM 15/003 * | | Č.dílu inkrementálně 1 | Délková jednotka mm |
| Stránka 1 / 2 | Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka |
|  | 1-1a_Z 8.907 | 8.908 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | 1-1b_Z 8.903 | 8.903 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | 1-1c_Z 8.887 | 8.888 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | 1-2a_Z 10.426 | 10.431 | 0.100 | -0.100 | - -0.005 |
|  | 1-2b_Z 10.371 | 10.372 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | 1-2c_Z 10.342 | 10.346 | 0.100 | -0.100 | - -0.005 |
|  | 2-1a_Z 8.932 | 8.935 | 0.100 | -0.100 | - -0.002 |
|  | 2-1b_Z 8.927 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | 2-1c_Z 8.927 | 8.930 | 0.100 | -0.100 | - -0.003 |
|  | 2-2a_Z 10.382 | 10.388 | 0.100 | -0.100 | - -0.006 |










Příloha č. 3 – Protokol měření platformy z ocele 316 L (strana 2/2)

| Náz.souč. 018-22-LAV-platforma | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 12:14:13 | Datum 5. dubna 2022 |  | |
|---|------------------|---------------------------|------------|-----------------|------------------------|---|--|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | | |
|  | 2-2b_Z 10.470 | 10.476 | 0.100 | -0.100 | - | -0.006 | |
|  | 2-2c_Z 10.508 | 10.514 | 0.100 | -0.100 | - | -0.006 | |
|  | 3-1a_Z 8.927 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | |
|  | 3-1b_Z 8.935 | 8.931 | 0.100 | -0.100 | - | 0.004 | |
|  | 3-1c_Z 8.897 | 8.898 | 0.100 | -0.100 | | 0.000 | |
|  | 3-2a_Z 10.830 | 10.839 | 0.100 | -0.100 | - | -0.009 | |
|  | 3-2b_Z 10.886 | 10.890 | 0.100 | -0.100 | - | -0.003 | |
|  | 3-2c_Z 10.921 | 10.918 | 0.100 | -0.100 | - | 0.002 | |











Příloha č. 4 – Protokol měření platformy z ocele MS1 nový přášek (strana 1/2)

| Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie | | | | | |  |
|---|--------------------------|--------------------------------|------------------------|------------|------------------|---|
| Regional technological institute - Metrology Laboratory | | | | | | |
| Zkouška č. (Test no.): 018-22-LAV-platforma | | | | | | |
| Plán měření 018-22-LAV-platforma | Datum krátce 28.04.22 | Metoda LDM_OP1 | | | | |
| Číslo výkresu * drawingno * | Čas 8:21:44 | Tepl. souč. | | | | |
| Operátor Dana Kubátová | Stroj * LDM 15/003 * | Č.dílu inkrementálně 2-nová | Délková jednotka mm | | | |
| Stránka 1 / 2 | Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | |
|  | 1-1a_Z 8.871 | 8.908 | 0.100 | -0.100 | -- -0.037 | |
|  | 1-1b_Z 8.886 | 8.903 | 0.100 | -0.100 | - -0.017 | |
|  | 1-1c_Z 8.884 | 8.888 | 0.100 | -0.100 | - -0.004 | |
|  | 1-2a_Z 9.210 | 10.431 | 0.100 | -0.100 | -1.121 -1.221 | |
|  | 1-2b_Z 9.164 | 10.372 | 0.100 | -0.100 | -1.109 -1.209 | |
|  | 1-2c_Z 9.173 | 10.346 | 0.100 | -0.100 | -1.073 -1.173 | |
|  | 2-1a_Z 8.906 | 8.935 | 0.100 | -0.100 | -- -0.028 | |
|  | 2-1b_Z 8.914 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | - -0.014 | |
|  | 2-1c_Z 8.897 | 8.930 | 0.100 | -0.100 | -- -0.033 | |
|  | 2-2a_Z 9.112 | 10.388 | 0.100 | -0.100 | -1.176 -1.276 | |










Příloha č. 4 – Protokol měření platformy z ocele MS1 nový prášek (strana 2/2)

| Náz.souč. 018-22-LAV-platforma | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 8:21:44 | Datum 28. dubna 2022 |  | |
|---|-----------------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------|---|--|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | | |
|  | 2-2b_Z 9.207 | 10.476 | 0.100 | -0.100 | -1.168 | -1.268 | |
|  | 2-2c_Z 9.241 | 10.514 | 0.100 | -0.100 | -1.173 | -1.273 | |
|  | 3-1a_Z 8.866 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | --- | -0.062 | |
|  | 3-1b_Z 8.865 | 8.931 | 0.100 | -0.100 | --- | -0.065 | |
|  | 3-1c_Z 8.913 | 8.898 | 0.100 | -0.100 | - | 0.015 | |
|  | 3-2a_Z 9.305 | 10.839 | 0.100 | -0.100 | -1.435 | -1.535 | |
|  | 3-2b_Z 9.300 | 10.890 | 0.100 | -0.100 | -1.490 | -1.590 | |
|  | 3-2c_Z 9.319 | 10.918 | 0.100 | -0.100 | -1.499 | -1.599 | |

Příloha č. 5 – Protokol měření platformy z ocele MS1 přeseťový prášek (strana 1/2)











| Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie | | | | | |
|--|-------|--------------------------|------------|---------------------------------|------------------|
| Regional technological institute - Metrology Laboratory | | | | | |
| Zkouška č. (Test no.): 018-22-LAV-platforma | | | | | |
| Plán měření 018-22-LAV-platforma | | Datum krátce 28.04.22 | | Metoda LDM_OP1 | |
| Číslo výkresu * drawingno * | | Čas 8:26:18 | | Tepl. souč. | |
| Operátor Dana Kubátová | | Stroj * LDM 15/003 * | | Č.dílu inkrementálně 3-stara | |
| | | | | Délková jednotka mm | |
| Stránka 1 / 2 | | | | | |
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | |
|  1-1a_Z | 8.909 | 8.908 | 0.100 | -0.100 | |
|  1-1b_Z | 8.908 | 8.903 | 0.100 | -0.100 | - |
|  1-1c_Z | 8.979 | 8.888 | 0.100 | -0.100 | ---- |
|  1-2a_Z | 9.191 | 10.431 | 0.100 | -0.100 | -1.140 -1.240 |
|  1-2b_Z | 9.188 | 10.372 | 0.100 | -0.100 | -1.085 -1.185 |
|  1-2c_Z | 9.038 | 10.346 | 0.100 | -0.100 | -1.208 -1.308 |
|  2-1a_Z | 8.917 | 8.935 | 0.100 | -0.100 | - -0.017 |
|  2-1b_Z | 8.914 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | - -0.015 |
|  2-1c_Z | 9.011 | 8.930 | 0.100 | -0.100 | ---- 0.081 |
|  2-2a_Z | 9.106 | 10.388 | 0.100 | -0.100 | -1.181 -1.281 |

Příloha č. 5 – Protokol měření platformy z ocele MS1 přesetý prášek (strana 2/2)

| Náz.souč. 018-22-LAV-platforma | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 8:26:18 | Datum 28. dubna 2022 |  | |
|---|-----------------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------|---|--|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | | |
|  | 2-2b_Z 9.157 | 10.476 | 0.100 | -0.100 | -1.219 | -1.319 | |
|  | 2-2c_Z 9.222 | 10.514 | 0.100 | -0.100 | -1.192 | -1.292 | |
|  | 3-1a_Z 8.957 | 8.928 | 0.100 | -0.100 | -- | 0.029 | |
|  | 3-1b_Z 8.921 | 8.931 | 0.100 | -0.100 | - | -0.010 | |
|  | 3-1c_Z 8.925 | 8.898 | 0.100 | -0.100 | -- | 0.028 | |
|  | 3-2a_Z 9.195 | 10.839 | 0.100 | -0.100 | -1.544 | -1.644 | |
|  | 3-2b_Z 9.201 | 10.890 | 0.100 | -0.100 | -1.589 | -1.689 | |
|  | 3-2c_Z 9.262 | 10.918 | 0.100 | -0.100 | -1.557 | -1.657 | |

**Příloha č. 6 – Protokol měření platformy se vzorky s různými procesními parametry
(strana 1/4)**

| | | | | |
|--|--------------------------|---------------------------|---|--|
| Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie Regional technological institute - Metrology Laboratory | | |  | |
| Zkouška č. (Test no.): 018-22-LAV platforma | | | | |
| Plán měření 018-22-LAV-platforma-1-22 | Datum krátce 09.05.22 | Metoda LDM_OP1 | | |
| Číslo výkresu * drawingno * | Čas 8:42:34 | Tepl. souč. | | |
| Operátor Dana Kubátová | Stroj * LDM 15/003 * | Č.dílu inkrementálně 1 | Délková jednotka mm | |

| Stránka 1 / 4 | Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka |
|---|--------------------|-------|------------|------------|--------------|
|  | vzd. 1_Z 9.685 | 9.685 | 0.100 | -0.100 | 0.001 |
|  | vzd. 2_Z 9.174 | 9.169 | 0.100 | -0.100 | - 0.005 |
|  | vzd. 3_Z 9.935 | 9.927 | 0.100 | -0.100 | - 0.008 |
|  | vzd. 4_Z 9.521 | 9.523 | 0.100 | -0.100 | - -0.002 |
|  | vzd. 5_Z 9.504 | 9.505 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | vzd. 6_Z 9.692 | 9.693 | 0.100 | -0.100 | - -0.002 |
|  | vzd. 7_Z 9.352 | 9.353 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | vzd. 8_Z 9.559 | 9.560 | 0.100 | -0.100 | -0.001 |
|  | vzd. 9_Z 9.594 | 9.592 | 0.100 | -0.100 | 0.001 |
|  | vzd. 10_Z 9.497 | 9.496 | 0.100 | -0.100 | 0.001 |









**Příloha č. 6 – Protokol měření platformy se vzorky s různými procesními parametry
(strana 2/4)**

| Názv.souč. 018-22-LAV-platforma-1-22 | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 8:42:34 | Datum 9. května 2022 |  |
|--|-------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------|---|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | |
|  vzd. 11_Z 9.527 | 9.526 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | |
|  vzd. 12_Z 9.486 | 9.489 | 0.100 | -0.100 | - | -0.002 | |
|  vzd. 13_Z 9.808 | 9.814 | 0.100 | -0.100 | - | -0.005 | |
|  vzd. 14_Z 9.558 | 9.559 | 0.100 | -0.100 | - | -0.002 | |
|  vzd. 15_Z 9.772 | 9.771 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | |
|  vzd. 16_Z 9.729 | 9.732 | 0.100 | -0.100 | - | -0.003 | |
|  vzd. 17_Z 9.654 | 9.658 | 0.100 | -0.100 | - | -0.004 | |
|  vzd. 18_Z 9.546 | 9.548 | 0.100 | -0.100 | - | -0.002 | |
|  vzd. 19_Z 9.684 | 9.685 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | |
|  vzd. 20_Z 9.575 | 9.579 | 0.100 | -0.100 | - | -0.003 | |
|  vzd. 21_Z 9.542 | 9.547 | 0.100 | -0.100 | - | -0.005 | |
|  vzd. 22_Z 9.519 | 9.519 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | |

**Příloha č. 6 – Protokol měření platformy se vzorky s různými procesními parametry
(strana 3/4)**

| Názv.souč. 018-22-LAV-platforma-1-22 | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 8:42:34 | Datum 9. května 2022 |  |
|---|-------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------|---|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | |
|  vzd. A1_Z 8.899 | 8.902 | 0.100 | -0.100 | - | -0.003 | |
|  vzd. A2_Z 8.821 | 8.827 | 0.100 | -0.100 | - | -0.006 | |
|  vzd. A3_Z 8.917 | 8.919 | 0.100 | -0.100 | - | -0.002 | |
|  vzd. A4_Z 8.922 | 8.924 | 0.100 | -0.100 | - | -0.002 | |
|  vzd. A5_Z 8.943 | 8.947 | 0.100 | -0.100 | - | -0.004 | |
|  vzd. A6_Z 8.944 | 8.945 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | |
|  vzd. A7_Z 8.930 | 8.937 | 0.100 | -0.100 | - | -0.007 | |
|  vzd. A8_Z 8.864 | 8.865 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | |
|  vzd. A9_Z 8.841 | 8.840 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | |
|  vzd. A10_Z 8.849 | 8.854 | 0.100 | -0.100 | - | -0.005 | |
|  vzd. A11_Z 8.872 | 8.881 | 0.100 | -0.100 | - | -0.009 | |
|  vzd. A12_Z 8.919 | 8.915 | 0.100 | -0.100 | - | 0.005 | |

**Příloha č. 6 – Protokol měření platformy se vzorky s různými procesními parametry
(strana 4/4)**

| Náz.souč. 018-22-LAV-platforma-1-22 | | Operátor Dana Kubátová | | Čas 8:42:34 | Datum 9. května 2022 | |  |
|---|-------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------|--|---|
| Mer | Jmen | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka | | | |
|  vzd. A13_Z 8.903 | 8.907 | 0.100 | -0.100 | - | -0.004 | | |
|  vzd. A14_Z 8.920 | 8.920 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | | |
|  vzd. A15_Z 8.968 | 8.966 | 0.100 | -0.100 | - | 0.002 | | |
|  vzd. A16_Z 8.878 | 8.878 | 0.100 | -0.100 | | 0.000 | | |
|  vzd. A17_Z 8.922 | 8.921 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | | |
|  vzd. A18_Z 8.894 | 8.893 | 0.100 | -0.100 | | 0.001 | | |
|  vzd. A19_Z 8.855 | 8.861 | 0.100 | -0.100 | - | -0.006 | | |
|  vzd. A20_Z 8.864 | 8.865 | 0.100 | -0.100 | | -0.001 | | |
|  vzd. A21_Z 8.800 | 8.793 | 0.100 | -0.100 | - | 0.006 | | |
|  vzd. A22_Z 8.759 | 8.753 | 0.100 | -0.100 | - | 0.006 | | |