



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ZPRACOVÁNÍ SLITINY INCONEL 939 SELEKTIVNÍM LASEROVÝM TAVENÍM ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT

PROCESSING OF INCONEL 939 ALLOY USING LASER POWDER BED FUSION AT ELEVATED TEMPERATURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Hertl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Malý

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. David Hertl
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Martin Malý
Akademický rok:	2021/22

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

Zpracování slitiny Inconel 939 selektivním laserovým tavením za zvýšených teplot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při zpracování materiálů metodou Selective Laser Melting jsou v komponentech indukována velká zbytková napětí, která způsobují poruchy při výrobě a snižují tvarovou přesnost výtisků. Pro zabránění deformací se používají podpůrné struktury, které prodlužují výrobní čas a následně je nutné je složitě odstraňovat. Předehřev základové desky byl identifikován jako jeden z nejvýznamnějších procesních parametrů ovlivňujících zbytková napětí, a proto by mohl být využit pro snížení nezbytného množství podpůrných struktur.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je ověřit vliv předehřevu na tvorbu zbytkových napětí v niklové slitině Inconel 939 zpracované selektivním laserovým tavením.

Díličí cíle diplomové práce:

- stanovení optimální teploty předehřevu základové desky,
- vliv předehřevu na mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a zbytková napětí,
- kontrola vlivu předehřevu na nezpracovaný práškový materiál,
- ověření možnosti snížení množství podpůrných struktur při snížení zbytkových napětí.

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

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

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

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

MERCELIS, Peter a Jean-Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal [online]. 2006, 12(5), 254–265. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540610707013

KRUTH, J P, J DECKERS, E YASA a R WAUTHLE. Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture [online]. 2012, 226(B6), 980–991. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1177/0954405412437085

ALI, Haider, Le MA, Hassan GHADBEIGI a Kamran MUMTAZ. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V. Materials Science and Engineering: A [online]. 2017, 695, 211–220 [vid. 2017-08-17]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2017.04.033

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou zpracování slitiny Inconel 939 technologií SLM s využitím přehřevu základové desky. Hlavním cílem práce je ověřit vliv přehřevu základové desky na zbytková napětí. Problém byl řešen dvěma přístupy: simulací procesu a následným experimentálním ověřením. Simulace procesu o teplotě přehřevu 400 °C dosáhla největší shody s experimentem s odchylkou 4,1 %. Na základě experimentu byla stanovena vhodná teplota přehřevu základové desky pro snížení deformací a zbytkových napětí na teplotu 100 °C. Zpracováním Inconelu 939 s využitím přehřevu o teplotách 100 °C a 400 °C bylo dosaženo statických mechanických vlastností, které jsou srovnatelné s mechanickými vlastnostmi standardně zpracovaných komponent, technologií SLM, z Inconelu 939 po tepelném zpracování. Tyto výsledky přináší potenciál pro výrazné snížení celkového výrobního času a nákladů spojených s výrobou komponent ze slitiny Inconel 939.

KLÍČOVÁ SLOVA

SLM, přehřev základové desky, zbytková napětí, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The thesis deals with the problem of Inconel 939 alloy processing by SLM technology using base plate preheating. The main objective of the work is to verify the effect of base plate preheating on residual stresses. The problem was solved by two approaches: process simulation, and subsequent experimental verification. The process simulation with preheating temperature of 400 °C achieved the highest agreement with the experiment with a deviation of 4.1 %. Based on the experiment, a suitable base plate preheating temperature of 100 °C was determined to reduce the deformation and residual stresses. By processing Inconel 939 using preheating temperatures of 100 °C and 400 °C, static mechanical properties comparable to those of the standard components processed by SLM technology from Inconel 939 after the heat treatment were achieved. These results offer the potential for significant reductions in overall production time and costs associated with manufacturing Inconel 939.

KEYWORDS

SLM, base plate preheating, residual stresses, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HERTL David. *Zpracování slitiny Inconel 939 selektivním laserovým tavením za zvýšených teplot*. Brno, 2022, 79 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Malý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinovi Malému za odborné vedení a cenné rady při vypracování této diplomové práce. Dík patří dále také Ing. Kláře Nopové a Ing. Vítovi Šreibrovi za pomoc s přípravou, zpracováním a vyhodnocením metalografických vzorků. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za možnosti a podporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	Úvod	13
2	Přehled současného stavu poznání	15
2.1	Rešeršní metody	15
2.2	Kritická rešerše	17
2.2.1	Zbytková napětí	17
2.2.2	Předehřev základové desky	19
2.2.3	Procesní parametry	22
2.2.4	Mikrostruktura a mechanické vlastnosti	25
2.2.5	Simulace procesu SLM	28
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	29
2.4	Mezera v poznání	30
3	Cíle práce	31
3.1	Výzkumné otázky	31
3.2	Cíl výzkumu	31
3.3	Hypotézy	31
4	Materiál a metody	32
4.1	Metodika	32
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	33
4.3	Materiál a testovací podmínky	34
4.4	Metody	34
4.5	Testované predikce	41
5	Výsledky	42
5.1	Ověření zpracovatelnosti materiálu	42
5.1.1	Relativní hustota a pórovitost vzorků	42
5.1.2	Drsnost povrchu a tvrdost vzorků	45
5.1.3	Procesní parametry a 3D návary	46
5.1.4	Vliv předehřevu na mikrostrukturu	48
5.1.5	Vliv vyšších teplot předehřevu na nezpracovaný materiál	50
5.2	Simulace procesu	51

5.2.1	Zkušební těleso	51
5.2.2	Konečno-prvková síť	52
5.2.3	Okrajové podmínky	53
5.2.4	Výsledky simulace	53
5.3	Tisk zkušebního tělesa	55
5.4	Mechanické vlastnosti	59
6	Diskuze	61
6.1	Interpretace hlavních zjištění	62
6.2	Interpretace dílčích výsledků	65
6.3	Verifikace hypotéz	67
7	Závěr	68
8	Výsledek výzkumu podle riv	69
9	Seznam použitých zdrojů	70
10	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	73
11	Seznam obrázků a grafů	74
12	Seznam tabulek	77
13	Seznam příloh	78

1 ÚVOD

Technologie Selective Laser Melting (SLM), v literatuře označována také jako Laser Powder Bed Fusion (LPBF), je aditivní technologie výroby kovových komponent. Výroba dílů probíhá postupně po jednotlivých vrstvách pomocí roztavení prášku laserem v určitých regionech. Technologie SLM umožňuje výrobu dílů s komplexní geometrií při zachování srovnatelných mechanických vlastností jako při konvenčním obrábění.

Vstupními daty pro výrobu je 3D CAD model, který je softwarově rozložen na jednotlivé vrstvy. Každá vrstva si s sebou nese informace spojené s procesními parametry a geometrií drah laserů [1]. Proces stavby začíná nanášením první vrstvy, typicky o tloušťce 20 μm až 100 μm , na základovou desku. První vrstva je kritická pro úspěšné dokončení stavby a je proto nanášena manuálně. Po nanášení první vrstvy následuje proces skenování (roztavení laserem) prášku v požadovaných místech. Po skenování se posouvá základová deska směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a následuje nanášení druhé vrstvy prášku. Tento proces se poté cyklicky opakuje až do dokončení celé stavby. Celý proces stavby probíhá v ochranné atmosféře, nejčastěji argonu nebo dusíku.

Problematikou výroby komponent pomocí technologie SLM jsou zbytková napětí. Ty v dílech vznikají především díky dvěma mechanismům. Prvním je mechanismus vysokých teplotních gradientů, které vznikají v místě dopadu laseru [2]. Při dopadu laseru dochází k prudkému ohřátí materiálu a poté k pomalému odvodu tepla. Druhým mechanismem vzniku zbytkových napětí je poté teplotní smršťování tisknutého dílu [3]. Při chladnutí fázi vrchních vrstev dochází k jejich deformaci vyvolané teplotním smršťováním. Této deformaci však brání spodní vrstvy, a tím dochází ke vzniku vnitřních napětí.

V průmyslu je problematika zbytkových napětí u aditivně vyráběných komponent řešena pomocí tepelného zpracování. Tento proces je však jak časově, tak energeticky a finančně náročný. Mnohé výzkumné skupiny se proto začaly věnovat problematice předehřevu základové desky. Cílem předehřevu základové desky je snížit teplotní gradienty a tím snížit hodnoty zbytkových napětí, které v dílech po zpracování technologií SLM zůstávají. Mimo snížení zbytkových napětí má předehřev základové desky pozitivní dopad, při zpracování některých materiálů, také na vznik trhlin a jiných defektů, které vznikají právě kvůli vysokým zbytkovým napětím uvnitř dílů [2]. Některé materiály, jako například wolfram nebo keramické materiálu, není možné bez předehřevu základové desky ani zpracovávat.

Předehřev přináší také zlepšení smáčivosti zpracovávaného materiálu. To napomáhá ke snížení výskytu sferoidizačního efektu. Sferoidizace je nepříznivý jev, který se běžně vyskytuje při procesu výroby pomocí technologie SLM [4]. Projevuje se tvorbou globulí během tavení prášku, které vznikají vlivem povrchového napětí. Dochází ke snaze taveného materiálu dosáhnout stavu s nejnižší možnou hodnotou energie.

Technologie SLM bývá často využívána k výrobě komponent, které jsou extrémně tvarově komplexní. Dalším využitím bývá často také kusová výroba nebo rapid-development. Slitina Inconel 939 (IN-939) je velmi obtížně obrobitelná konvenčními způsoby obrábění a je proto vhodným kandidátem pro zpracování právě technologií SLM. IN-939 je žáruvzdorná super-slitina na bázi niklu, která je nejčastěji využívána pro výrobu komponent leteckých motorů a v energetickém průmyslu. IN-939 vyniká především svou korozivzdorností, výbornými mechanickými vlastnostmi a velmi dobrými creepovými vlastnostmi i za vysokých pracovních teplot až do hodnot 850 °C.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Základními parametry rešerše jsou její transparentnost a opakovatelnost. Tyto parametry umožňují opakovatelnost a následné rozšíření dalšími výzkumy [5]. Rešerše pro tuto diplomovou práci byla sestavena především z pramenů na základě výsledků hledání v databázích Scopus a Web of Science. Hlavním kritériem při hledání byla klíčová slova. Ty vycházela především z tématu této diplomové práce. Mimo klíčová slova byly sledovány také další scientometrické parametry:

- H-index hlavního autora
- počet citací článku
- afiliace autorů
- Impact Factor časopisu
- rok vydání

Mimo články získané rešeršními požadavky byly do rešerše zařazeny také práce z jiných zdrojů, a to zejména příspěvky z konferencí, prameny doporučené vedoucím diplomové práce a publikace, které již byly zpracovány při řešení mé bakalářské práce. V neposlední řadě byly zařazeny také práce od významných vědeckých pracovišť a vědeckých skupin v oboru aditivní výroby a kovového 3D tisku.

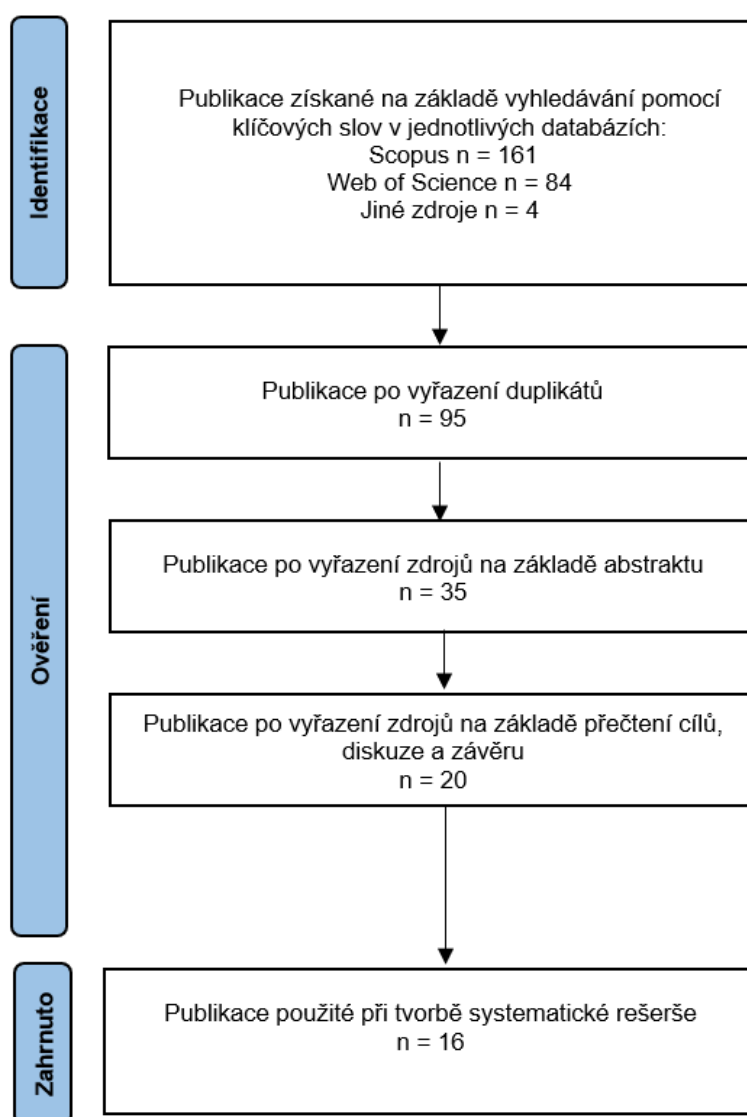
Seznam klíčových slov rešeršního požadavku:

- SLM
- LPBF
- Preheating
- Residual stress
- Process parameters
- Inconel
- Microstructure
- Temperature

Rešeršní požadavek byl sestaven za pomoci logických operátorů *AND* a *OR*. Vzhledem k relativně novému tématu využití předehřevu základní stavební desky při výrobě dílů pomocí technologie SLM byly sestaveny dva rešeršní dotazy:

Tab. 2-1 Rešeršní dotazy a počet výsledků

Rešeršní požadavek	Počet výsledků	Scopus	Web of Science
(SLM OR LPBF) AND (Preheating OR Inconel) AND Residual stress AND Microstrucutre	161	50	111
(SLM OR LPBF) AND Preheating AND process parameters AND Temperature	60	28	32



Obrázek 2-1 PRISMA diagram použitých pramenů

2.2 Kritická rešerše

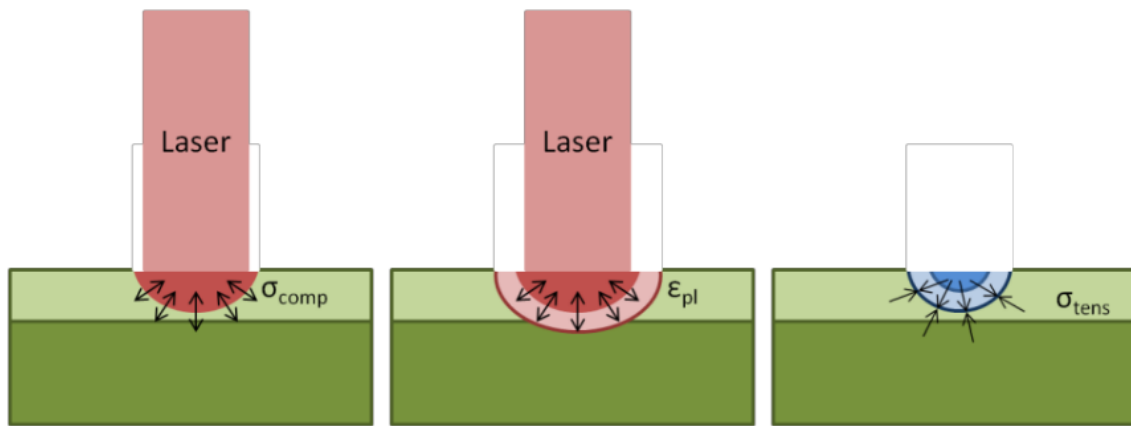
2.2.1 Zbytková napětí

Zbytková napětí lze definovat jako napětí, která zůstávají v materiálu po výrobě a zpracování bez působení vnějších sil nebo teplotních gradientů [6]. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, právě zbytková napětí jsou jedním z hlavních problémů výroby komponent pomocí technologie SLM. Zbytková napětí, která během tisku dílů vznikají, představují hned několik limitací praktického využití tisknutých komponent [3]. Právě vlivem zbytkových napětí dochází k deformaci dílů a vzniku mikrotrhlin. V kritických případech může dojít k výrazné deformaci již během stavby. Tyto deformace ústí v poškození podpůrných struktur a předčasné neúspěšné ukončení stavby (Obr. 2-1). Mimo již zmíněné vady mají vysoká zbytková napětí za následek také změnu mechanických vlastností tisknutých dílů a mohou ovlivnit odolnost tisknutých komponent proti zatížení.



Obr. 2-1 Poškození podpůrných struktur vlivem vysokých vnitřních napětí

Vzhledem k významnosti zbytkových napětí je velmi důležité pochopit proces jejich vzniku. Při zpracování komponent pomocí technologie SLM dochází ke vzniku zbytkových napětí hlavně díky dvěma mechanismům vzniku. Prvním je mechanismus teplotních gradientů (v anglické literatuře označován často jako TGM) [2]. Při TGM dochází k vyvolání pnutí ve vrstvě, která je pod vrstvou, co je právě skenována. K tomu dochází vlivem vysokých teplotních rozdílů. Nejnovější vrstva má tendenci se vlivem vysokých teplot rozpínat. Tomu ovšem brání předchozí mnohem chladnější vrstva. Tento fenomén vyvolává vysoká tlaková napětí, která mohou přesáhnout mez kluzu materiálu. V těchto případech dochází k plastické deformaci horní vrstvy. Tyto deformace se při zchladnutí vrstvy promění ve zbytková tlaková napětí (Obr. 2-2). Druhým mechanismem vzniku zbytkových napětí je poté chladnutí fází vrchních vrstev [3]. K tomu dochází vlivem teplotního smršťování chladnoucích vrchních vrstev, kterému je opět bráněno předchozí vrstvou. Tím dochází k vyvolání tahových napětí ve vrchní vrstvě a tlakových napětí pod ní.

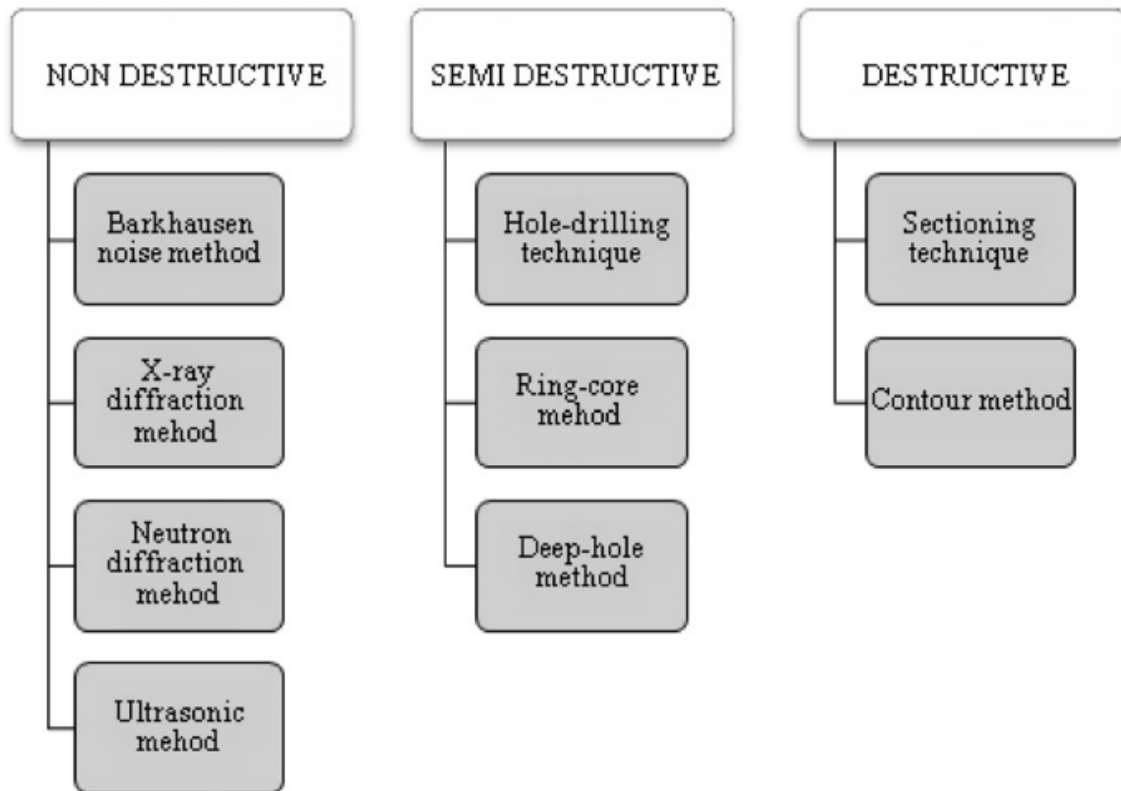


Obr. 2-2 Proces vzniku zbytkových napětí vlivem strmých teplotních gradientů [2]

Zbytková napětí dělíme na základě velikosti oblasti jejich působení do tří kategorií [6]:

- Kategorie I – Makroskopická zbytková napětí: ke vzniku zbytkových napětí kategorie I dochází v měřítku větším, než je velikost zrna.
- Kategorie II – Mikroskopická zbytková napětí: zbytková napětí kategorie II působí v rámci jednotlivých zrn.
- Kategorie III – Mikroskopická zbytková napětí: zbytková napětí kategorie III existují v rámci jednotlivých zrn, a to z důvodu výskytu dislokací a jiných defektů krystalické mřížky.

Měření zbytkových napětí se dělí do tří základních kategorií: destruktivní, semi-destruktivní a nedestruktivní (Obr. 2-3). Mezi nejčastěji měřená zbytková napětí patří zbytková napětí spadající do kategorie I, které se často vyskytují na úrovni celého dílu. To je způsobeno také tím, že zbytková napětí kategorií I a II jsou obtížně měřitelná [3].



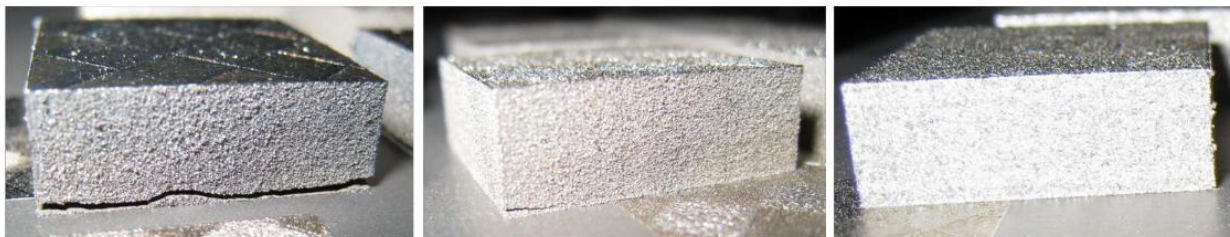
Obr. 2-3 Metody měření zbytkových napětí [6]

Předehřev základové desky byl identifikován jako jeden z nejefektivnějších procesů pro snížení zbytkových napětí as-built komponent, tedy komponent, které nejsou vystaveny teplotnímu zpracování [2, 3, 7].

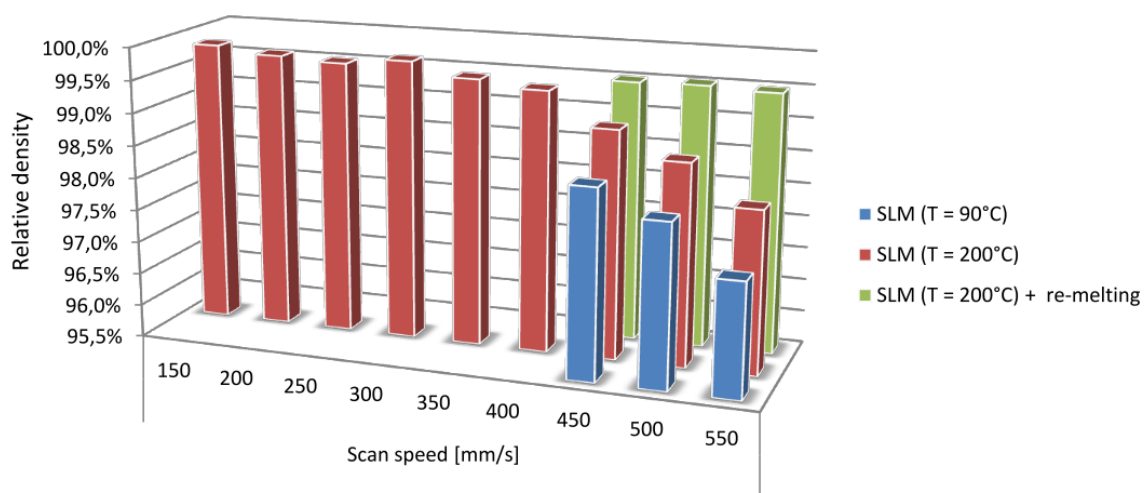
2.2.2 Předehřev základové desky

Vliv předehřevu stavební platformy na výsledná zbytková napětí zkoumala KEMPEN K. [2]. Autorka se ve své práci zabývá vlivem předehřevu stavební platformy na výsledná zbytková napětí, která mají za následek vznik trhlin a delaminaci. Právě tyto fenomény spolu s dalšími faktory jsou důsledkem, proč není možné tisknout všechny známé kovové materiály. Autorka pracovala s experimentálně získanými daty. Experimenty byly provedeny na zařízení Concept Laser M3 a zpracovávána byla nástrojová ocel M2. Předehřev stavební platformy byl zajištěn pomocí topného tělesa, které bylo tepelně odizolováno od zbytku zařízení, aby nedocházelo k ohřívání ostatních částí tiskárny.

Teplota předehřevu byla řízena kontrolní PI smyčkou s přesností ± 2 °C. Testovací vzorky o rozměrech (20 x 20 x 10) mm byly tištěny za teploty předehřevu 90 °C, 150 °C a 200 °C. Mimo využití předehřevu byl zkoumán také vliv opětovného skenování (remeltingu), proces „dvojitého“ skenování bez nanesení další vrstvy prášku. Výsledkem práce byl tisk vzorku z nástrojové oceli M2 bez trhlin a delaminací (Obr. 2-4). Tohoto výsledku bylo dosaženo s využitím předehřevu o teplotě 200 °C. Mimo tisk vzorku bez trhlin bylo dosaženo relativní hustoty 99,88 %. Tento proces byl dále vylepšen pomocí opětovného skenování (Obr. 2-5).

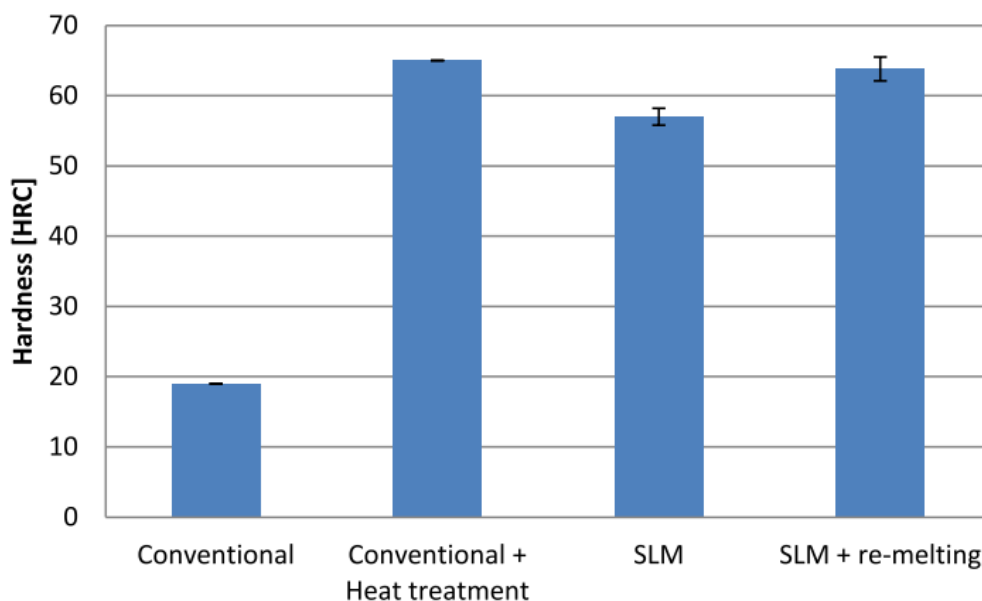


Obr. 2-4 Vytiskované vzorky z nástrojové oceli M2 s teplotou předehřevu základové desky 90 °C (vlevo), 150 °C (uprostřed) a 200 °C (vpravo)



Obr. 2-5 Vliv rychlosti skenování, teploty předehřevu a remeltingu na výslednou relativní hustotu vzorků [2]

Mimo tisk vzorku bez trhlin s relativně vysokou hustotou bylo dosaženo také lepší drsnosti povrchu 8,6 μm . Vzhledem k použití nástrojové oceli bylo přihlíženo také k tvrdosti vzorku. U konvenčně vyráběných komponent je dosaženo tvrdosti pomocí stárnutí. Vzhledem k povaze výrobního procesu SLM bylo ovšem s využitím opětovného skenování dosaženo tvrdosti 64 HRC, což je srovnatelná hodnota s hodnotou tvrdosti dosažené stárnutím konvenčně obráběných komponent (Obr. 2-6).



Obr. 2-6 Tvrdost vzorků H2 vyrobených pomocí technologie SLM oproti konvenčnímu způsobu výroby [2]

Dalším autorem, který se zabýval vlivem předehřevu na zpracování slitiny Inconel 625, je SHUAI L. [7]. Cílem práce bylo objasnit proces vzniku trhlin a snížit zbytkové napětí v tisknutých dílech o 50 %. Vzorky byly tisknuty na zařízení HRPM-II v ochranné atmosféře argonu. Autor převzal optimalizované procesní parametry z předchozích experimentů (Tab. 2).

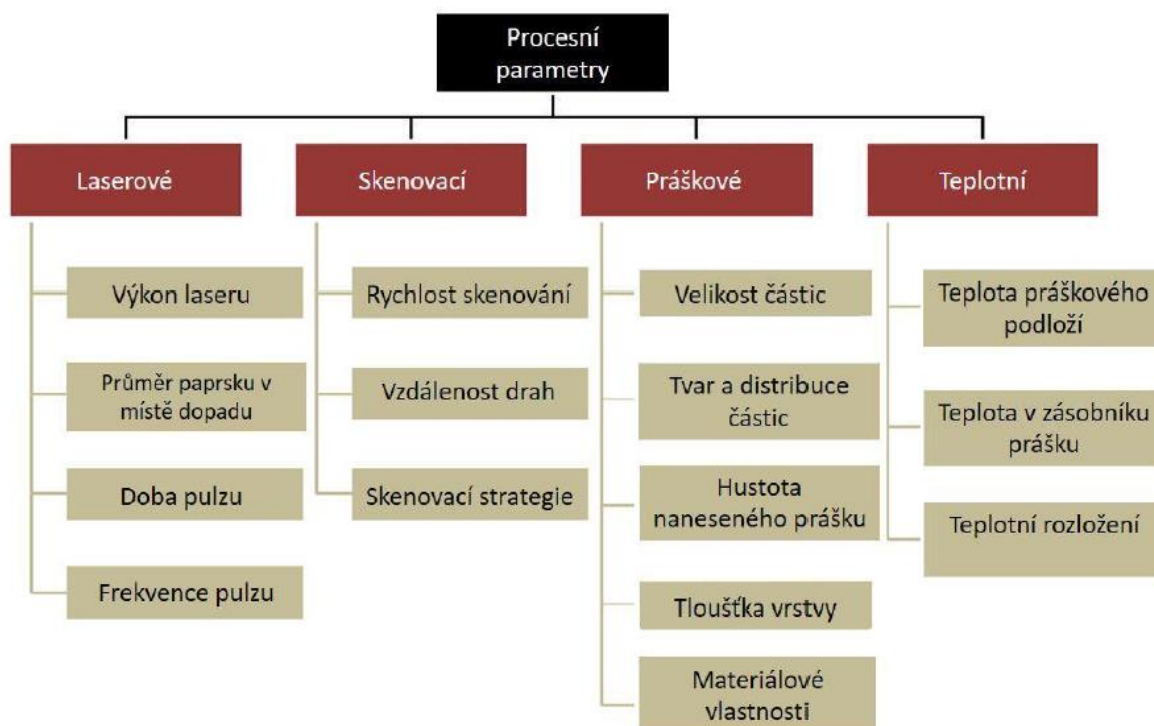
Autor ve svém výzkumu tiskl tři sady vzorků s předehřevem o teplotě 25 °C, 150 °C a 300 °C. Stavební platforma byla z nerezové oceli 316L. Všechny vzorky byly po stavbě mechanicky a chemicky povrchově upraveny pro potřeby vyhodnocení výsledků na elektronovém mikroskopu. Výsledky experimentů odhalily proces vzniku trhlin v Inconelu 625. Fenomén vzniku trhlin se skládá ze dvou procesů. Prvním procesem je segregace eutektických fází s nízkou teplotou tavení na bázi Nb, Mo. Tyto eutektické fáze jsou vzhledem k vyšší křehkosti oproti okolním fázím následně místem, kde dochází k uvolnění zbytkových napětí a vzniku trhlin. Druhou příčinou jsou vysoká zbytková napětí, která vznikají v dílech v důsledku vysokých teplotních gradientů. Tyto vysoká napětí slouží jako akcelerační a iniciáční faktory vzniku trhlin a poskytují celému procesu vzniku trhlin potřebnou energii. Tento proces vzniku trhlin lze zásadně ovlivnit využitím předehřevu. Výsledky experimentů odhalily, že s využitím předehřevu o teplotě 300 °C lze dosáhnout snížení zbytkových napětí o více než 50 %. Vzorky s teplotou předehřevu 150 °C dosáhly výrazně nižšího počtu trhlin a výrazně kratších délek trhlin, nepodařilo se ovšem dosáhnout tisku vzorku bez trhlin. Toho autor dosáhl až s předehřevem o teplotě 300 °C.

Tab. 2 Procesní parametry použité při tisku [7]

Výkon laseru	Průměr bodu laseru	Skenovací rychlost	Vzdálenost mezi drahami laseru	Tloušťka vrstvy
150 W	(50–80) μm	400 mms^{-1}	70 μm	70 μm

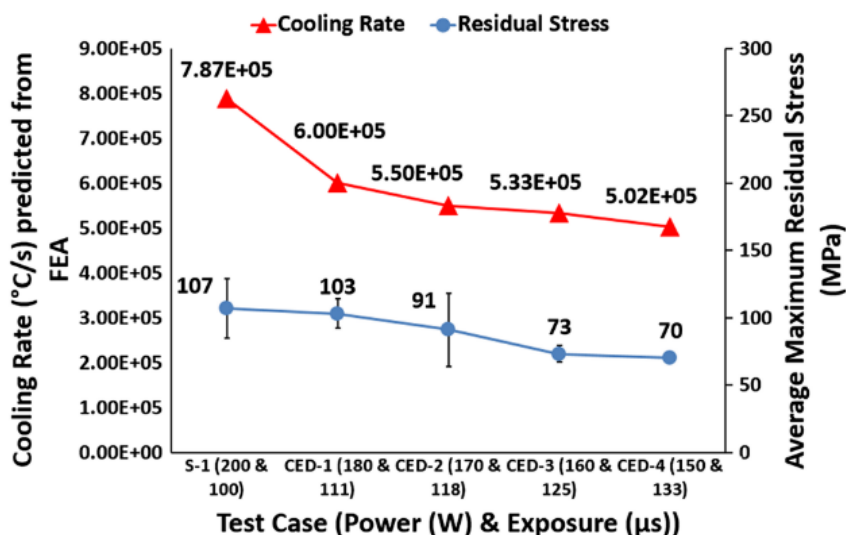
2.2.3 Procesní parametry

Proces výroby dílů pomocí technologie SLM řídí hned několik procesních parametrů (Obr. 2-7). Hlavními parametry, které ovlivňují proces jsou výkon laseru, skenovací rychlost, vzdálenost mezi drahami laseru a tloušťka nanesené vrstvy prášku [8]. Poslední studie ukazují také, že velký vliv na výsledek stavby má také předehřev základové desky [2, 7, 9].

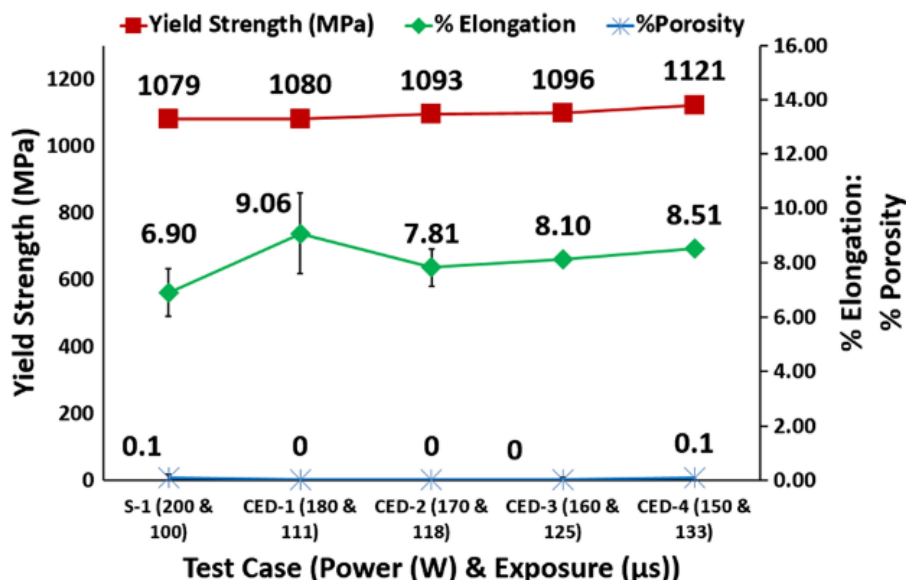


Obr. 2-7 Seznam procesních parametrů [8, 10]

ALI H. ve svém výzkumu dokázal, že změnou procesních parametrů je možné nejen snížit výsledná zbytková napětí, ale také zlepšit mechanické vlastnosti tisknutých dílů [11]. Autor uvažoval ve své práci kombinaci procesních parametrů při zachování konstantní hodnoty hustoty energie. Vzhledem ke zvolené strategii konstantní hustoty energie byly měněny následující procesní parametry: výkon laseru, expoziční doba a tloušťka vrstvy prášku. Autor změnou procesních parametrů a expoziční doby dokázal snížit zbytková napětí v dílech tisknutých z Ti6Al4V až o 30 % (Obr. 2-8) a zvýšit mez kluzu tisknutých vzorků téměř o 5 % (Obr. 2-9).

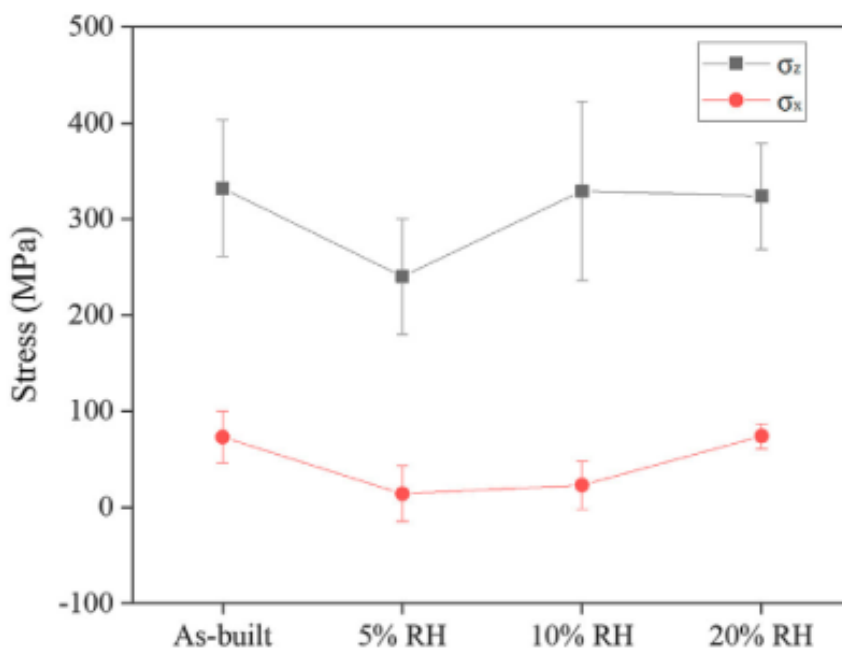


Obr. 2-8 Vliv jednotlivých kombinací výkonu laseru a expoziční doby na rychlost ochlazování a výsledná zbytková napětí [11]



Obr. 2-9 Vliv jednotlivých kombinací výkonu laseru a expoziční doby na výsledné mechanické vlastnosti vzorků [12]

Mimo procesní parametry vstupuje do výsledných parametrů také skenovací strategie. Strategii opětovného skenování využila ve své práci již KEMPEN K. [2], blíže se věnoval tomuto procesu PARK J.H. [12]. Hlavním předmětem jeho práce bylo zkoumání vlivu opětovného skenování na výsledné zbytkové napětí v dílech tisknutých ze slitiny Inconel 718. Experimenty byly prováděny na zařízení FS271M ochranné atmosféře argonu. Proces opětovného skenování (reheatingu, remeltingu) je skenování každé vrstvy prášku podruhé bez nanesení nové vrstvy prášku. Tento proces napomáhá ke snížení teplotních gradientů a teoreticky by tedy měl mít vliv na zbytková napětí v tisknutých dílech. Výkon laseru byl pro reheating (opětovné skenování bez opakovaného roztavení materiálu) nastaven na 80 W a skenovací rychlost byla proměnlivá. Rychlost byla měněna v závislosti na výkonu laseru (konstantní) tak, aby bylo dosaženo 10 %, 20 % a 30 % celkové hustoty energie z původní hustoty energie využité pro samotné skenování prášku. Tisknuty byly krychlové vzorky o rozměrech (10 x 10 x 10) mm. Výsledky experimentů ukázaly, že závislost zbytkových napětí na „síle“ opětovného skenování není lineární. Při použití opětovného skenování o hustotě energie 10 % a 20 % původní energie tisku bylo dosaženo částečného znovunatavení materiálu nikoliv reheatingu a hodnoty zbytkových napětí se proto příliš neliší od as-built stavu. Nejlepších výsledků v oblasti zbytkových napětí dosáhlo opětovné skenování o hustotě energie 5 % (Obr. 2-10). Vzhledem k nízkému vstupu energie do tiskutého dílu nedošlo k znovunatavení vlivem opětovného skenování a naopak došlo k relativně významnému snížení zbytkového napětí v díle.

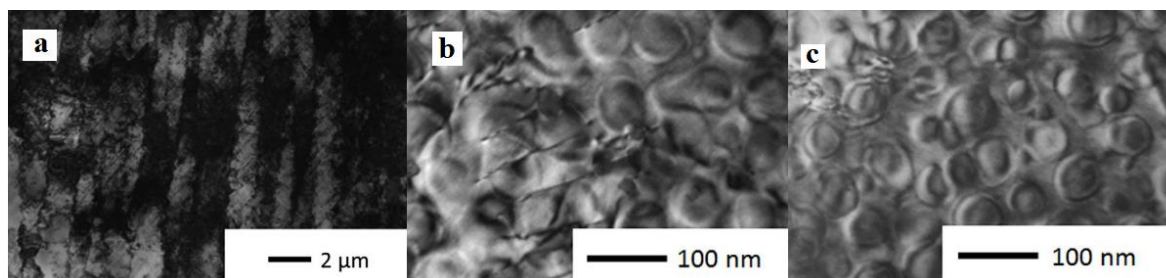


Obr. 2-10 Porovnání výsledných zbytkových napětí s využitím remeltingu o síle (5, 10, 20) % hustoty energie původního skenování [12]

2.2.4 Mikrostruktura a mechanické vlastnosti

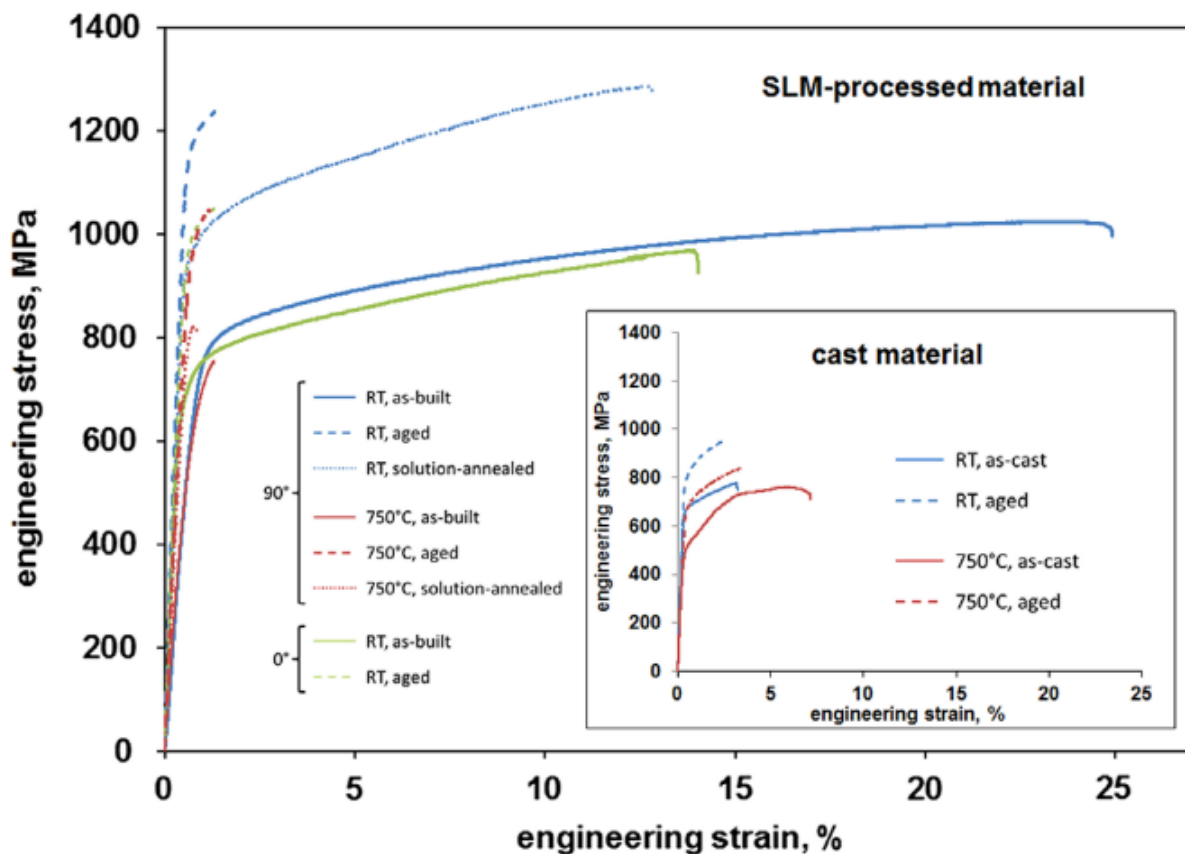
Další velmi často zkoumanou problematikou je mikrostruktura dílů zpracovaných pomocí technologie SLM. Vlivem mikrostruktury na mechanické vlastnosti dílů zpracovaných pomocí technologie SLM se zabýval KANAGARAJAH P. [13]. Autor ve své práci srovnával mechanické vlastnosti dílů ze slitiny Inconel 939 zpracované pomocí technologie SLM a dílů ze slitiny Inconel 939 zpracované odléváním. Mimo rozdíly v mikrostruktuře jednotlivých vzorků zkoumal autor také mechanické vlastnosti vzorků při statickém i cyklickém namáhání. Vzorky zpracované pomocí technologie SLM byly tištěny na zařízení SLM 250 HL od společnosti SLM Solutions.

Pro zkoumání vlivu orientace zrn byly tištěny dvě sady vzorků s orientací 0° a 90° . Všechny vzorky byly následně tepelně zpracovány podle požadovaných parametrů pro využití Inconelu 939 na konstrukci turbín. Tepelné zpracování se skládalo ze čtyřhodinového žíhání za teploty 1160°C a následného stárnutí po dobu šestnácti hodin za teploty 850°C . Vzorky byly následně mechanicky i chemicky povrchově upraveny pro následné zpracování výsledků pod elektronovým mikroskopem. Jako další testy byly provedeny tahové zkoušky a creepové zkoušky. Obě varianty orientace tisku představují kolumnární zrna rostoucí ve směru tisku (Obr. 2-11a). Rozdílné byly ovšem velikosti zrn. Sada vzorků s orientací tisku 0° dosáhla průměrné velikosti zrn $30\ \mu\text{m}$, zatímco sada s orientací tisku 90° dosahuje průměrné velikosti zrn $35\ \mu\text{m}$. Obě sady vzorků prošly během tepelného zpracování procesem zdrsňení zrn a ztratily pro SLM typický sloupovitý tvar zrn. Mimo ztráty typického tvaru zrn došlo také ke změně velikosti zrn (Obr. 2-11).



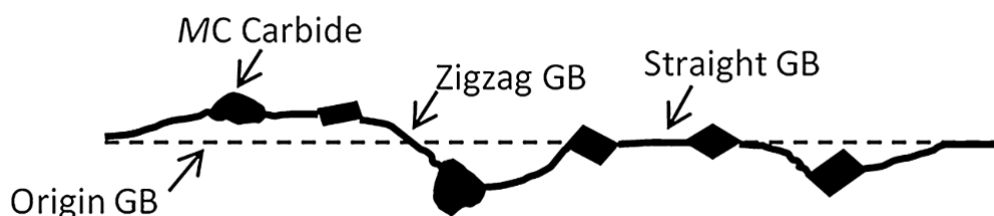
Obr. 2-11 Mikrostruktura vzorků: a) v as-built stavu b) vzorek vyrobený technologií SLM po tepelném zpracování, c) vzorek vyrobený pomocí odlévání [13]

Z předchozích 30 μm a 35 μm byla po tepelném zpracování velikost zrn 35 μm a 75 μm . Tohle chování je přisuzováno vyšším zbytkovým napětím, které se vyskytovaly ve vzorcích s orientací tisku 90°. Výsledky mechanických zkoušek se také zásadně liší u as-built stavu a tepelně zpracovaných vzorků (Obr. 2-12). Oba tištěné vzorky v as-built stavu dosahují stejných hodnot meze kluzu, vzorek s orientací tisku 90° dosahuje vyšší kujnosti. Po tepelném zpracování se tyto hodnoty ovšem liší a vzorek s orientací tisku 90° dosahuje vyšších hodnot meze kluzu, ale ztrácí kujnost. Obě sady as-built vzorků dosahují vyšších hodnot meze kluzu než odlévané vzorky. Creepové zkoušky vykazují u obou sad vzorků obdobné výsledky. Tyto výsledky jsou v korelaci s již známým chováním dílů vyráběných pomocí technologie SLM. Ačkoliv dosahují výrobky zpracované pomocí SLM lepší životnosti za pokojových teplot, creepová životnost za zvýšených teplot je podstatně nižší než u konvenčně vyráběných dílů. Vzhledem k vysokým teplotám během procesu stavby dochází k tvorbě precipitátů, které se při následovném zahřátí materiálu během creepové zkoušky vytvrzují, a materiál křehne.



Obr. 2-12 Monotónní křivky napětí a deformace pro IN-939 [13]

Mikrostrukturu dílů zpracovaných pomocí technologie SLM zkoumal také SHUAI L. [14]. Autor ve své práci porovnává tvrdosti vzorků slitiny Inconel 625 zpracovaných pomocí technologie SLM a kovaných vzorků. Vzorky byly zpracovány na zařízení HRPM-II, a zpracováván byl klasicky komerčně dostupný prášek Inconel 625. Prášek byl před zpracováním po dobu pěti hodin přehřát na teplotu 50 °C. Tisk probíhal v ochranné atmosféře argonu. Vzorky byly před zpracováním a zkouškami tvrdosti mechanicky a chemicky povrchově upraveny. Pro porovnání vlivu mikrostruktury na výslednou tvrdost byly sady vzorků žíhány na teplotách 700 °C, 1000 °C, a 1150 °C po dobu jedné hodiny. Tvrdost byla měřena na stupnici Vickerse zatížením 500 g po dobu 30 sekund. Vzorky zpracované pomocí technologie SLM v as built stavu vykazovaly tvrdost o hodnotě 343 HV, zatímco kované vzorky dosahovaly hodnot 305 HV. Tvrdost vzorků zpracovaných pomocí SLM se dá zvýšit využitím žíhání za teplot 800 °C a 900 °C, při žíhání za teplot na 1000 °C dochází ke ztrátě tvrdosti. Během experimentů byly pozorovány dva fenomény. Prvním je orientace zrn po žíhání v materiálu zpracovaném pomocí SLM. Všechna zrna vykazují stejnou orientaci. To je způsobeno pozicí nečistot v materiálu. Během procesu tavení se nachází většina nečistot v tavné lázni. Tyto nečistoty poté tvoří heterogenní jádra zrn, která vznikají po hranici tavné lázně. Druhým fenoménem je poté tvorba „zig-zag“ vzoru (Obr. 2-13). Tento vzor zrn má zásadní vliv na kujnost, tvrdost a další materiálové vlastnosti. Tvorba tohoto vzoru je přisuzována primárním karbidům MC (metal-carbon). Kdy úhel ohybů je závislý na orientaci karbidu, vzdálenosti karbidů od sebe a jejich velikosti. V případě, že dva sousední karbidy mají stejnou orientaci, poté dochází k většímu vychýlení hranice zrn.



Obr. 2-13 Zig-zag vzor vznikající po hranici zrn (GB = hranice zrn)

2.2.5 Simulace procesu SLM

Simulace využívající metody konečných prvků pro simulace SLM procesů slouží k získání odhadů zbytkových napětí a deformací dílů. Díky těmto predikcím jsme schopni odhalit problematická místa v tisknutých dílech ještě před samotným tiskem. Relativně krátké výpočetní časy těchto simulací v porovnání s délkou tisku umožňují provedení několika iterací procesních parametrů a změny geometrie, které mohou výrazně zkrátit výsledný čas a náklady pro design aditivně vyráběných komponent. Simulace procesu SLM jsou často dělena do kategorií na základě způsobu výpočtu a na základě velikosti konečno-prvkových elementů [15].

Prvním zástupcem je čistě mechanický přístup (Inherent strain approach). Tento přístup pracuje pouze s mechanickými vlastnostmi materiálu na základě kalibrace a neuvažuje vysoké teploty, kterých díly během procesu SLM dosahují. Výhodou tohoto přístupu je rychlost výpočtu a relativně jednoduché nastavení simulace pomocí korekčních koeficientů, které vyplývají přímo z kalibrace.

Druhým komplexnějším přístupem je poté termomechanický přístup. Tento přístup bere v potaz teploty komponent během procesu výroby. Výhodou této metody je relativně krátký výpočetní čas společně se získáním více fyzických informací z modelu oproti čistě mechanické metodě. Výsledky tohoto přístupu lze zpřesnit kalibrací, není však pro tento přístup k výpočtu nutná.

Poslední nejkompexnější metodou je poté metoda pohyblivého zdroje tepla (Moving Heat Source). Tento přístup simuluje jak pohyb laseru, tak proces vzniku tavné lázně. Ze všech metod dosahuje nejvyšších detailů za cenu vysokých výpočetních nároků.

Mezi základní nástroje pro výpočet konečno-prvkových simulací procesu SLM patří ANSYS Workbench, s rozšířením Additive Manufacturing, ANSYS Fluent, který je často využívám pro simulace pohyblivého zdroje tepla, Simufact a Altair.

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Zbytková napětí byla definována jako jeden z hlavních problémů výroby dílů pomocí technologie SLM. Právě vlivem zbytkových napětí dochází jak k limitaci geometrie vyráběných komponent, tak k jejich deformaci během výroby a vzniku trhlin a mikrotrhlin [6]. Mimo již zmíněné problémy mají vysoká zbytková napětí za následek také zhoršení mechanických vlastností tisknutých komponent a mohou snížit odolnost tisknutých komponent proti zatížení.

Byly objasněny také základní mechanismy vzniku zbytkových napětí [2, 3]. První příčinou vzniku jsou vysoké teplotní gradienty v místě dopadu laseru. Při dopadu laseru dochází k prudkému ohřátí materiálu a poté k pomalému vedení tepla samotným dílem. V těchto případech dochází k plastické deformaci horní vrstvy, která se při zchladnutí vrstvy promění ve zbytková tlaková napětí. Dále pak kvůli chladnutí fázi ve vrchní vrstvě. Při chladnutí fázi dochází k deformaci díky teplotnímu smršťování, kterému však brání spodní vrstvy, a tím je vyvoláno vnitřní napětí.

KEMPEN K. [2] svým výzkumem prokázala, že zvýšením teploty předehřevu jsme schopni snížit dopad teplotních gradientů na zpracované komponenty pomocí technologie SLM. Snížením teplotních gradientů jsme schopni dosáhnout výrazného snížení výsledných zbytkových napětí v tištěných dílech. V její práci bylo dosaženo snížení zbytkových napětí při zpracování nástrojové oceli M2 až o 50 % s využitím předehřevu o teplotě 200 °C. Mimo významnost předehřevu na výsledná napětí poukazuje autorka také na vliv opětovného skenování na výslednou relativní hustotu dílu. Vlivu opětovného skenování se dále věnuje PARK J. H. [12]. Ten ve své práci poukazuje na nelineární závislost hustoty energie opětovného skenování na výsledná zbytková napětí. Při příliš vysoké síle opětovného skenování dochází v dílech k znovu natavení materiálu což má negativní dopad na výsledné zbytková napětí a mechanické vlastnosti. Autor odhalil optimální intenzitu znovu opětovného skenování při zpracování IN-718 o hodnotě 5 % hustoty energie původního skenování.

Mimo teplotu předehřevu a skenovací strategii ovlivňují ve značné míře výsledná zbytková napětí v dílech zpracovaných pomocí technologie SLM také procesní parametry. Mezi nejvýznamnější patří teplota předehřevu, výkon laseru, skenovací rychlost, tloušťka vrstvy prášku, expoziční doba a vzdálenost skenovacích drah. Vliv kombinací výkonu laseru a expoziční doby při zpracování Ti6Al4V zkoumal ve své práci ALI H. [11]. Ve své práci prováděl experimenty za konstantní hodnoty hustoty energie. Provedl tisk za různých hodnot výkonu laseru a různých expozičních délek. Výsledkem jeho práce byla téměř lineární závislost výsledných zbytkových napětí na poměru výkonu laseru a expoziční doby v dílech zpracovaných pomocí technologie SLM. Prokázal, že s nižším výkonem laseru a delší expoziční dobou dochází k tisku dílů s nižší hodnotou zbytkových napětí. Mimo snížení zbytkových napětí až o 30 % dochází také ke zvýšení hodnoty meze kluzu daných dílů.

2.4 Mezera v poznání

Předehřev základové desky byl identifikován jako jeden z nejefektivnějších způsobů snížení zbytkových napětí při zpracování mnoha materiálů pomocí technologie SLM [2, 14, 16]. V současné době ovšem není dostatek studií, které se věnují vlivu teploty předehřevu na zpracování Inconelu 939. Právě vliv teploty předehřevu základové desky na zpracování Inconelu 939 řeší tato diplomová práce.

Zároveň není v současné době komerčně dostupný břit vhodný pro stavbu komponent z Inconelu 939 s využitím vysokých teplot předehřevu. Běžně používány jsou břity silikonové a pevné, ocelové nebo keramické. Silikonové břity není možné v případě vyšších teplot předehřevu využít a pevné břity jsou často výrazně poškozovány při zpracování Inconelu 939. Možným řešením by bylo využití poddajných břitů například z uhlíkových vláken, které ve svém experimentu při zpracování keramiky $ZrO_2-Y_2O_3$ s teplotou předehřevu 1 500 °C LIU Q. [17].

Další mezerou a možným pokračováním výzkumu je také kombinace metod předehřevu. Mimo předehřev základové platformy jsou momentálně vyvíjeny také metody předehřevu prášku před nanášením, ať už přímo v recoateru (nanášeči) nebo v dispenzeru (zásobníku prášku v tiskárně). Právě kombinace předehřevu základové desky a předehřevu prášku před nanášením by bylo možné odstranit problémy související s nanášením studeného prášku na předehřátou základovou desku. Současně by tato kombinace předehřevu prášku a základové desky napomohla k odstranění nedostatku předehřevu základové desky. Tento problém souvisí s rozdílnými teplotami s rostoucí výškou tisknutého dílu.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Výzkumné otázky

V této práci byly předloženy dvě výzkumné otázky:

- Jak výrazný vliv má změna teploty předehřevu základové desky na snížení vnitřních napětí?
- Jak se projeví snížení vnitřních napětí na nutný objem podpůrných struktur?

3.2 Cíl výzkumu

Cílem práce je výzkum vlivu předehřevu stavební platformy na zbytková napětí při zpracování slitiny Inconel 939 pomocí technologie SLM. Dílčím cílem práce je také aplikace získaných znalostí pro efektivnější stavbu komponent z Inconelu 939.

Dílčí cíle diplomové práce:

- stanovení optimální teploty předehřevu základové desky
- vliv předehřevu na mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a zbytková napětí
- kontrola vlivu předehřevu na nezpracovaný práškový materiál
- ověření možnosti snížení množství podpůrných struktur při snížení zbytkových napětí

3.3 Hypotézy

Byly stanoveny následující pracovní hypotézy:

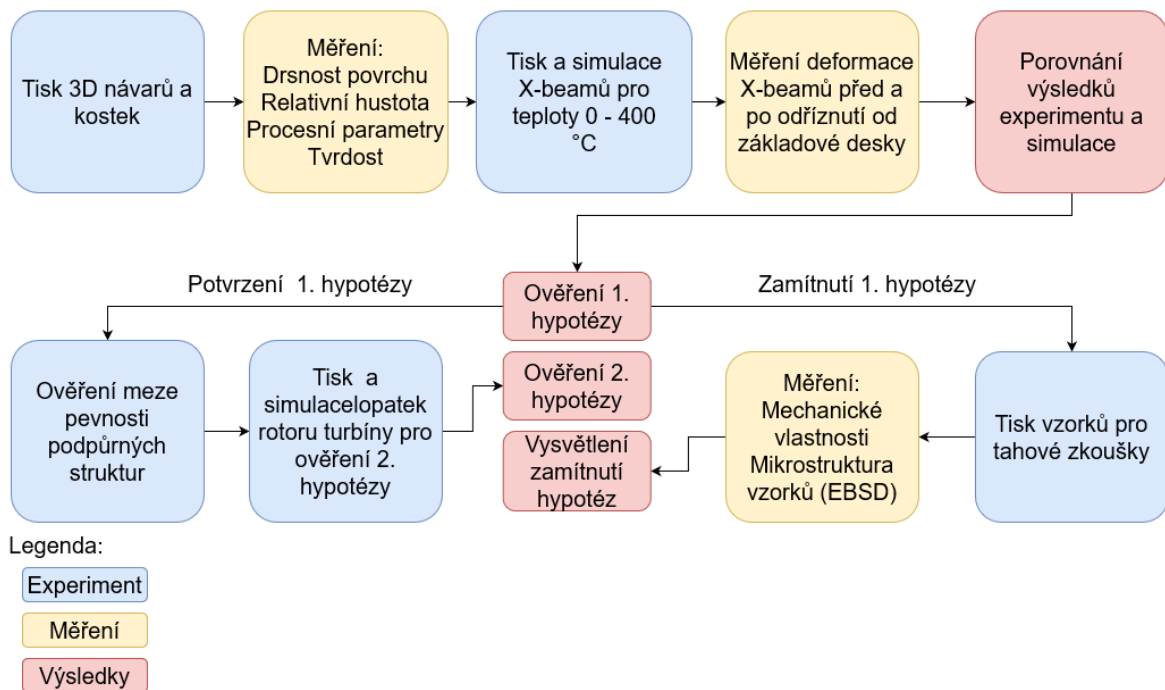
- Využitím vyšších teplot předehřevu povede ke snížení zbytkových napětí v tisknutých dílech, což se projeví nižšími hodnotami deformací a umožní menší zmetkovitost výroby.
- Snížením vnitřních napětí v důsledku vyšších teplot předehřevu dojde ke snížení potřebného počtu podpůrných struktur a tím k výrazné úspoře jak celkového času potřebného na stavbu, tak použitého prášku.

Výsledkem výzkumných otázek bude závislost zbytkového napětí na použité teplotě předehřevu. Tato závislost bude poté dále využita ve vývojové části práce pro zvýšení efektivity využití prášku potřebného na stavbu. Tato predikce vychází z pracovní hypotézy, která se opírá o obdobné výsledky při využití předehřevu jiných materiálů [2, 14, 16]

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

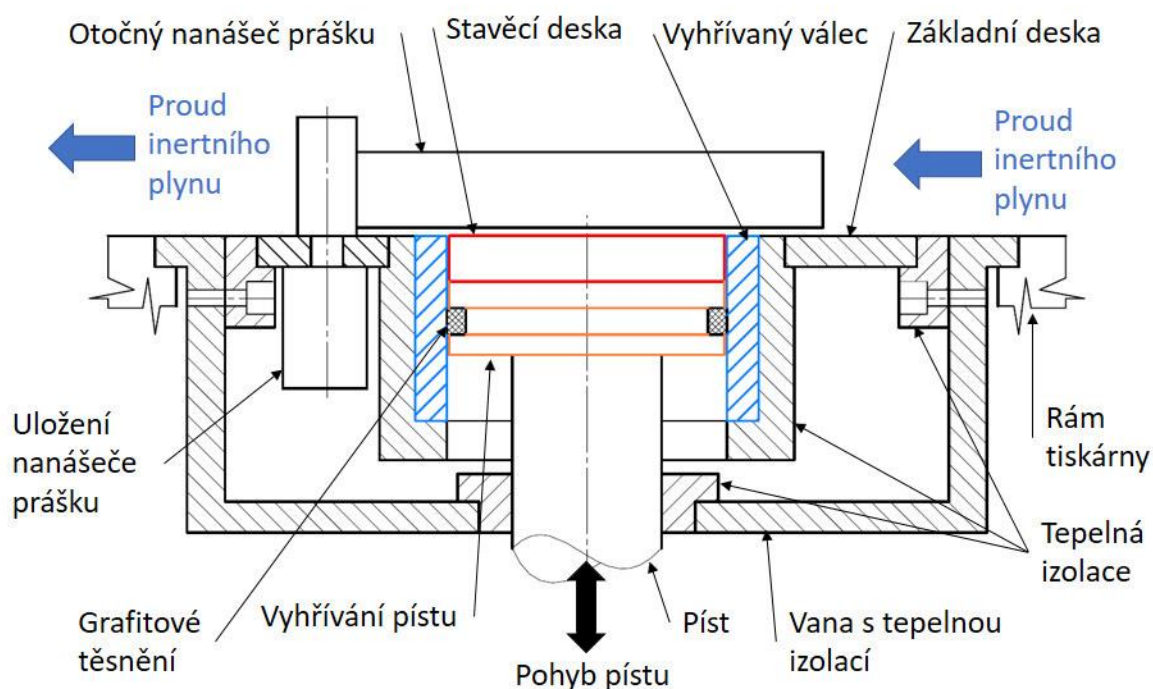
Prvním krokem bylo určení typu výzkumu diplomové práce, který byl identifikován jako aplikovaný výzkum. Dalším krokem bylo určení výzkumného problému a volba výzkumného přístupu. Jako výzkumný problém byl určen vliv přehřevu základové desky na výsledná zbytková napětí komponent ze slitiny IN-939 zpracovaných pomocí technologie SLM. Jedná se o problém relační, který dává do vztahu jev (zbytková napětí) a činitele (snížení teplotních gradientů pomocí přehřevu základové desky). K řešení výzkumného problému bylo využito dvou vědeckých metod, a to experimentu a měření. Seznam experimentů a měření je uveden ve schématu řešení práce (Obr. 4-1). Jako výzkumný přístup byl zvolen deduktivní přístup. Dedukce vysloví na základě teorie hypotézy, a následně je po sběru a analýze dat zamítne nebo potvrdí.



Obr. 4-1 Schéma řešení diplomové práce

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

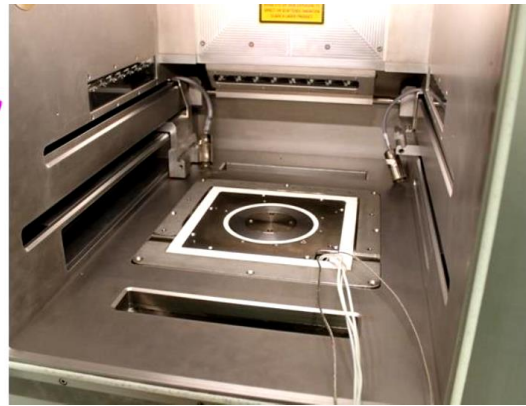
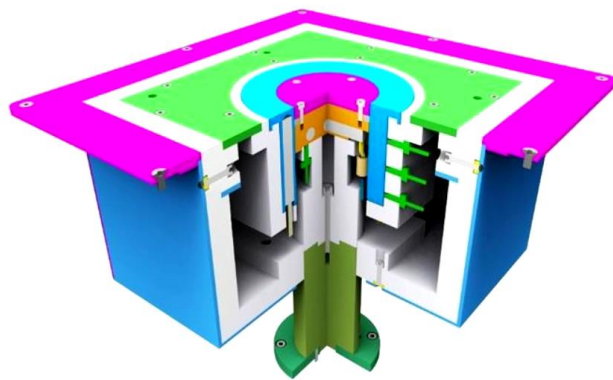
Všechny stavby byly provedeny na zařízení SLM 280HL od společnosti SLM Solutions. Tiskárna SLM 280HL disponuje stavebním prostorem o velikosti (280 x 280 x 325) mm a jedním vláknovým laserem o maximálním výkonu 400 W. Tiskárna umožňuje také předehřev základové desky do teplot až 200 °C. Vzhledem k tomu, že výzkum cílil na vyšší teploty předehřevu bylo využito experimentální komory předehřevu, která umožňuje předehřev základové desky do teplot až 400 °C. Pro zachování konzistentních podmínek všech experimentů byla využita experimentální komora předehřevu (Obr. 4-2) pro všechny stavby.



Obr. 4-2 Schéma experimentální komory předehřevu [10]

Experimentální komora předehřevu se vkládá do procesního prostoru tiskárny (Obr. 4-3). Díly vystavené vysokým teplotám předehřevu jsou zkonstruovány ze superslitiny Inconel 718 [10]. Pro ostatní ocelové součásti byla zvolena korozivzdorná ocel 1.4301. Teplotní izolace je zajištěna technickou bezazbestovou keramikou Duratec 750 a Monolite M1. Předehřev je zajištěn topnými patronami. Tři patrony o celkovém výkonu 600 W byly využity pro ohřev pístu a deset patron o celkovém výkonu 1 000 W bylo využito na ohřev válce. Vzhledem k vysokým teplotám předehřevu základové desky bylo pro potřeby nanášení vrstev prášku také potřeba nahradit silikonovou stěrku, která je součástí recoateru, keramickým břitem.

Pro zpracování výsledků bylo využito 3D optického mikroskopu Keyence VHX 6000 a 3D skeneru ATOS III Triplexscan 8M.



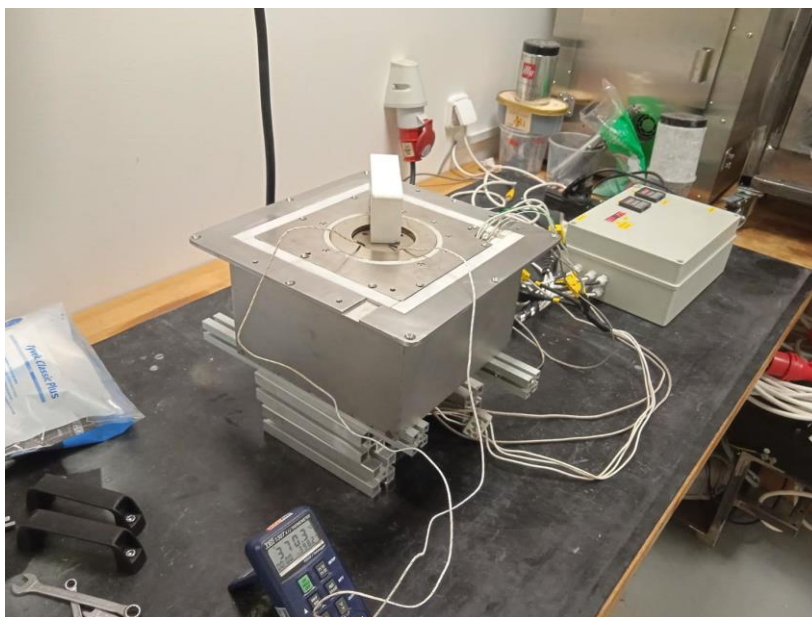
Obr. 4-3 Experimentální komora předehřevu [10]

4.3 Materiál a testovací podmínky

Zkoumaným materiálem je Inconel 939 (IN-939). IN-939 je žáruvzdorná superslitina na bázi niklu. Za superslitiny jsou považovány slitiny, které jsou schopny dosáhnout vysokých provozních teplot (až 85 % jejich teploty tavení) [9]. Mimo vysoké provozní teploty vynikají superslitiny také svými mechanickými vlastnostmi a korozivzdorností. IN-939 má mimo již zmíněnou vysokou korozivzdornost a velmi dobré creepové vlastnosti i za vysokých provozních teplot dosahujících až 850 °C také velmi dobrou tažnost [18]. Kombinace těchto vlastností je důvodem, proč jsou superslitiny značky Inconel často využívány v kosmickém průmyslu pro výrobu leteckých motorů a pro výrobu turbín v energetickém průmyslu.

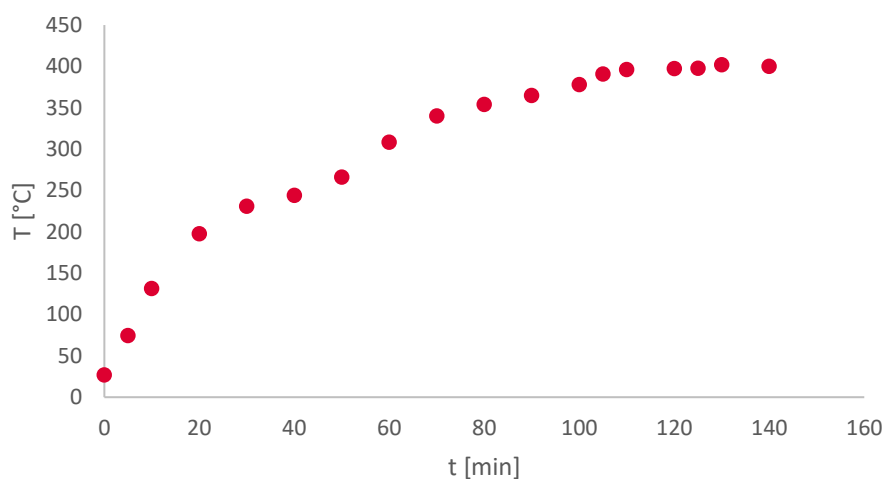
4.4 Metody

Vzhledem k využití experimentální komory předehřevu bylo za potřebí určit maximální teplotu předehřevu, které je možné dosáhnout. Tento test byl proveden mimo procesní komoru tiskárny (Obr. 4-4). Na základě technických možností byla stanovena maximální udržitelná teplota předehřevu 400 °C, které bylo dosaženo za 140 min (Obr. 4-5). Na základě výsledků testu dosažení a udržení teploty předehřevu 400 °C byl sestaven návod předehřevu. Právě návod pro dosažení požadované teploty předehřevu byl zásadní vzhledem k tomu, že není možné během stavby, která je prováděna v ochranné atmosféře argonu, přesně měřit teplotu na povrchu stavební platformy. Test byl proveden také pro druhou zkoumanou teplotu předehřevu 200 °C.



Obr. 4-4 Zkouška přehřevu experimentální komory

Vývoj teploty stavební platformy



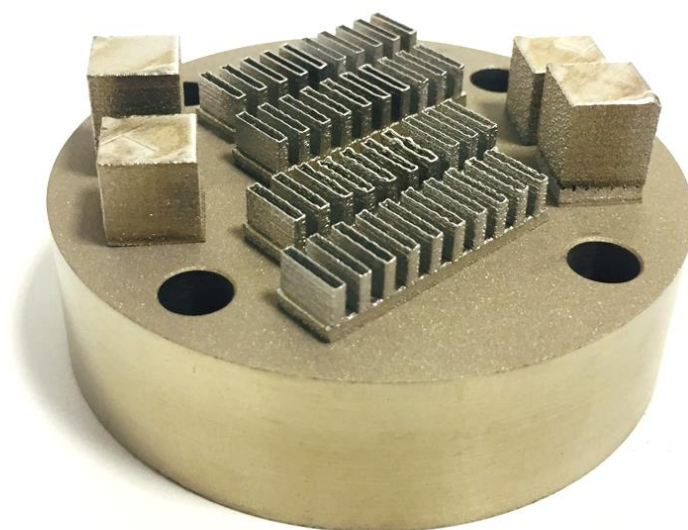
Obr. 4-5 Časový vývoj teploty přehřevu stavební platformy pro teplotu přehřevu 400 °C

První stavba sloužila především pro ověření zpracovatelnosti IN-939 při zvýšených teplotách přehřevu. Tisknutými vzorky byly čtyři kostky o rozměrech (10 x 10 x 10) mm, tisknuty využitím standartních procesních parametrů doporučených výrobcem prášku, a čtyřicet tenkostěnných vzorků o tloušťce stěny jedné dráhy laseru – single-track 3D návarů (Obr. 4-6). Každý z 3D návarů byl tisknut s jinými procesními parametry. Proměnné procesní parametry byly rychlost skenování a výkon laseru.

Kostky sloužili pro určení vlivu teploty předehřevu na relativní hustotu vzorků, drsnost povrchu vzorků a tvrdost vzorků. Relativní hustota byla měřena pomocí dvou metod, a to CT snímkováním kostek a snímkováním metalografických výbrusů kostek pomocí optického 3D mikroskopu Keyence VHX 6000. Keyence VHX 6000 byl využit také pro měření drsnosti povrchu. Tvrdost byla měřena také na kostkách metodou Vickerse.

Mikrostruktura vzorků byla také zkoumána na kostkách, které byly rozříznut na metalografické pile ve směru nanášení prášku. Rozříznuté vzorky byly následně zality za tepla do polymerní pryskyřice, vybroušeny pod vodou na brusných papírech o zrnitosti 120 μm – 4 400 μm a následně leštěny pomocí diamantových past o zrnitosti 3 μm a 1 μm a ethanolového smáčedla. Takto připravené vzorky byly naleptány a nasnímány. Porovnávána byla šířka tavných lázní a charakter mikrostruktury.

Single-track 3D návary byly po vytisknutí a odříznutí ze stavební platformy zality za tepla do polymerní pryskyřice a vybroušeny. Měřena byla tloušťka a deformace návarů. Na 3D návarech byla zkoumána především vhodnost parametrů pro tisk tenkostěnných těles, tento údaj sloužil k ověření, zda je daná sada procesních parametrů vhodná pro tisk podpor za zvýšených teplot. Seznam jednotlivých procesních parametrů a jejich procesních parametrů je uveden v příloze A.

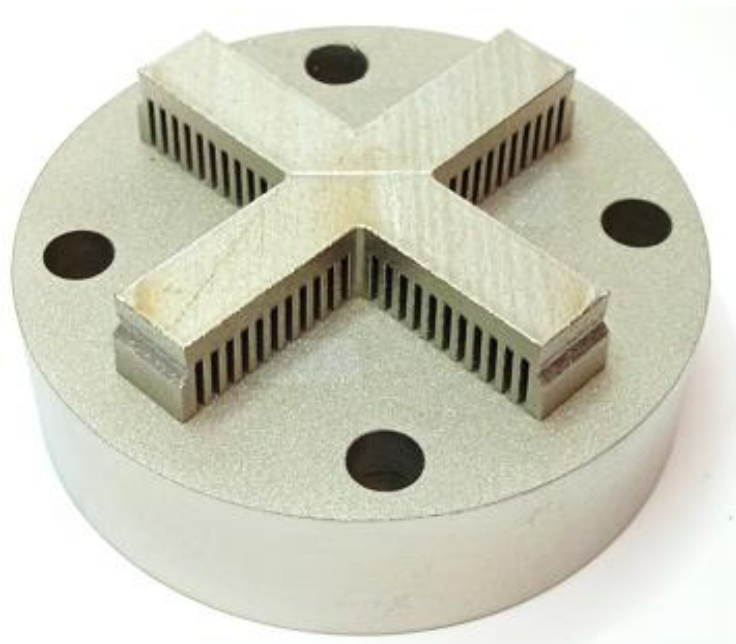


Obr. 4-6 Stavba kostek a single-track 3D návarů

Před samotným tiskem zkušební geometrie byl výrobní proces zkušební geometrie simulován. Simulace byly zprvu prováděny v softwaru Simufact. Tento software byl vybrán pro simulaci vzhledem k tomu, že do výpočtu vstupují základní procesní parametry, jako jsou výkon laseru, rychlost skenování, teplota předehřevu ale také skenovací strategie. V průběhu řešení práce bylo od Simufactu upuštěno a simulace byly nadále počítány v softwaru Ansys v prostředí Mechanical. Tato změna byla ovlivněna možností úprav modelu, které Ansys umožňuje. Simulace byly prováděny s využitím automatizovaného rozšíření Additive Manufacturing (AM).

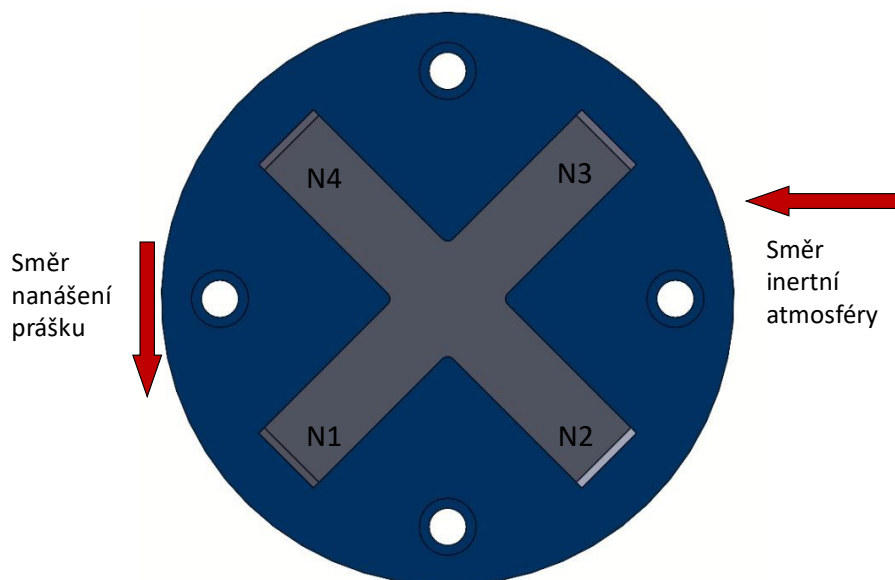
Simulace procesu SLM v prostředí Ansys Mechanical využívá termomechanický přístup. Tento přístup bere v potaz teploty komponent během procesu výroby a je vhodným kompromisem přesnosti výsledků a požadavků na výpočetní čas. Vzhledem k relativní jednoduchosti testované geometrie byl tento přístup dostačující. Další výhodou je také materiálový model IN-939, který odpovídá přímo tisknutému materiálu IN-939 zpracovávaného na použité 3D tiskárně. Tento materiálový model byl vyvinut na Ústavu konstruování ve společnosti s SVS FEM.

Vzhledem k omezenému zástavbovému prostoru při využití experimentální komory předehřevu, která využívá stavební platformu o průměru 74,2 mm, bylo potřeba navrhnout vlastní zkušební geometrii, na které byly vyhodnocovány vlivy předehřevu na zbytková napětí a deformace. Navržená zkušební geometrie „X-beam“ (Obr. 4-7) spojuje čtyři standardní zkušební vzorky (nosníky) do kruhového uspořádání s 90° úhly mezi jednotlivými vzorky. Tento design byl inspirován zkušebním tělesem, které při výzkumu zpracování slitiny Inconel 718 využil POYRAZ O. [19]. Hlavní výhodou tohoto zkušebního tělesa je možnost tisku čtyř nosníků v různých vzájemně kolmých směrech.



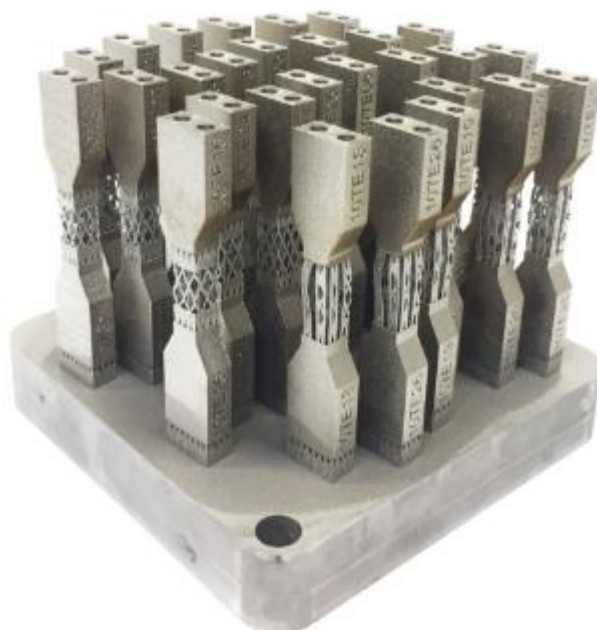
Obr. 4-7 Zkušební geometrie

Tato geometrie byla tisknuta za teplot přehřevu (22, 100, 200 a 400) °C. Zkušební geometrie byly po vytisknutí naskenovány pomocí 3D skeneru ATOS III Triplexscan 8M, následně odříznuty od základové desky a naskenovány znovu po relaxaci napětí. Při měření deformací byly jednotlivé nosníky označeny čísly od jedné do čtyř tak, aby bylo možné jednoznačně určit jejich polohu na stavební platformě a jejich orientaci vůči proudění inertní atmosféry a směru nanášení prášku (Obr. 4-8).



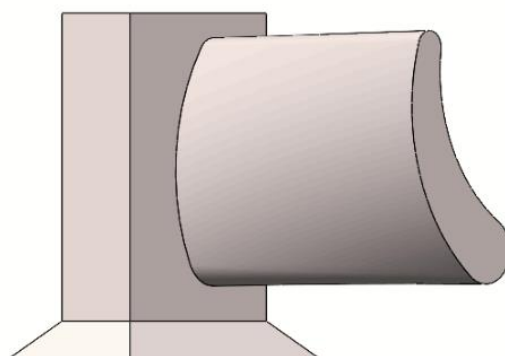
Obr. 4-8 Zkušební geometrie s označením jednotlivých nosníků

Pro ověření druhé hypotézy byla tisknuta sada vzorků pro tahovou zkoušku s využitím podpurných struktur. Tyto struktury o podstavě (6 x 6) mm a výšce 10 mm (Obr. 4-9) byly různých geometrií a proměnnými byli perforace, geometrie zubů, okraje a hatching. Tento experiment byl inspirován studií P.N.J Lindeckeho [20]. Cílem tohoto experimentu bylo získat geometrii podpurných struktur, která dosahuje přijatelných hodnot meze pevnosti s ohledem na nejnižší objem využitého prášku. Sada vzorků byla následně podrobena tahové zkoušce a výsledky měly sloužit k navržení geometrie podpurných struktur pro simulaci a tisk lopatek rotoru.



Obr. 4-9 Stavba vzorků na tahovou zkoušku s využitím různých geometrií podpůrných struktur

Navržena byla také geometrie lopatky rotoru (Obr. 4-10). Ačkoliv se jedná o zmenšený model vzhledem k omezení zástavového prostoru komory. Tento experiment měl předvést interpretaci hypotéz a využití přehřevu v praxi. Pro zvětšení plochy, která slouží jako opora celé geometrie, byly základny lopatek rozšířeny o zkosení, které zvětšuje plochu v kontaktu se stavební platformou. Objektem zkoumání by byla v tomto případě deformace geometrie lopatky rotoru před odstraněním z platformy.



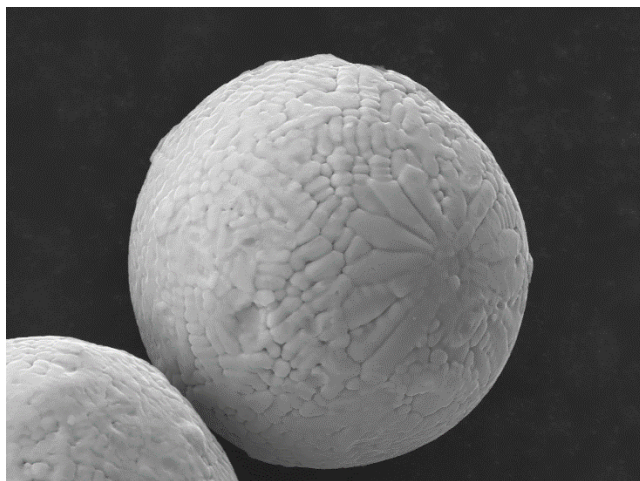
Obr. 4-10 Geometrie lopatky rotoru

Poslední stavbou byl tisk vzorků pro tahovou zkoušku podle normy DIN 50125 B (Obr. 4-11) o nominálním testovacím průměru 6 mm. Větší průměr byl opatřen přídatkem na obrábění 1,2 mm. Vzorky byly tištěny za teplot přehřevu (22, 100, 200 a 400) °C. Po vytištění byly vzorky odříznuty ze stavební platformy, byly odstraněny podpory a vnější průměr byl obroben pro upnutí do čelistí testovacího zařízení.



Obr. 4-11 Stavba vzorků pro tahovou zkoušku

Práškový materiál IN-939 od společnosti SLM Solutions, který byl využíván pro všechny stavby, byl podroben EDS analýze pro ověření, zda během procesu nedochází ke změně chemického složení a degradaci prášku. EDS analýza byla provedena na materiálech, které byly využity při stavbě s teplotou přehřevu základové desky 200 °C a 400 °C



Obr. 4-12 Částice prášku IN-939 (zvětšení: 2500)

4.5 Testované predikce

Při výrobě komponent pomocí technologie SLM dochází ke vzniku zbytkových napětí, především vlivem strmých teplotních gradientů a teplotnímu smršťování [2, 3]. Vzhledem k relativní náročnosti a vysoké ceně metod měření zbytkových napětí nebyla měřena přímo zbytková napětí, ale deformace dílů, ke kterým dochází právě vlivem relaxace zbytkových napětí. Predikce vlivu teploty předehřevu základové desky na výsledná zbytková napětí je taková, že s rostoucí teplotou předehřevu základové desky dochází ke snížení výsledných zbytkových napětí v tištěných komponentách. Tato predikce vychází z pracovní hypotézy, která se opírá o obdobné výsledky při využití předehřevu základové desky při zpracování jiných materiálů [2, 14, 16].

Hypotézy budou potvrzeny, nebo vyvráceny, pomocí série experimentů tisku navrženého zkušebního tělesa „X-beam“ o teplotách předehřevu (22, 100, 200 a 400) °C. Nezávislou proměnnou je v tomto případě teplota předehřevu základové desky a závislou proměnnou jsou poté deformace vyvolané zbytkovými napětími. Současně s ověřením hypotézy bude také ověřen vliv teploty předehřevu na pórovitost, mechanické vlastnosti a mikrostrukturu komponent.

5 VÝSLEDKY

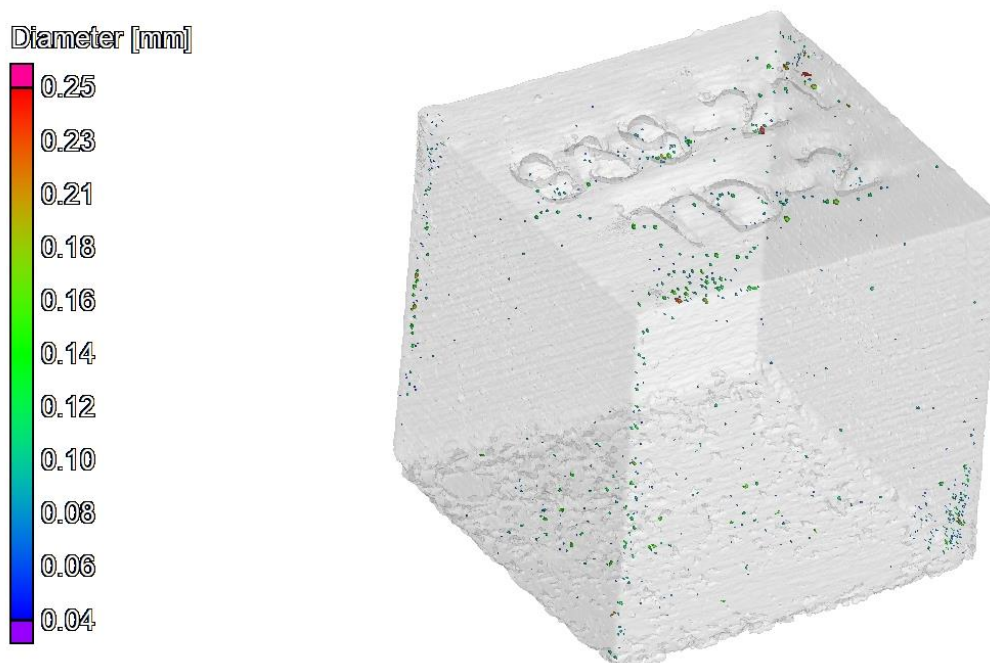
5.1 Ověření zpracovatelnosti materiálu

5.1.1 Relativní hustota a pórovitost vzorků

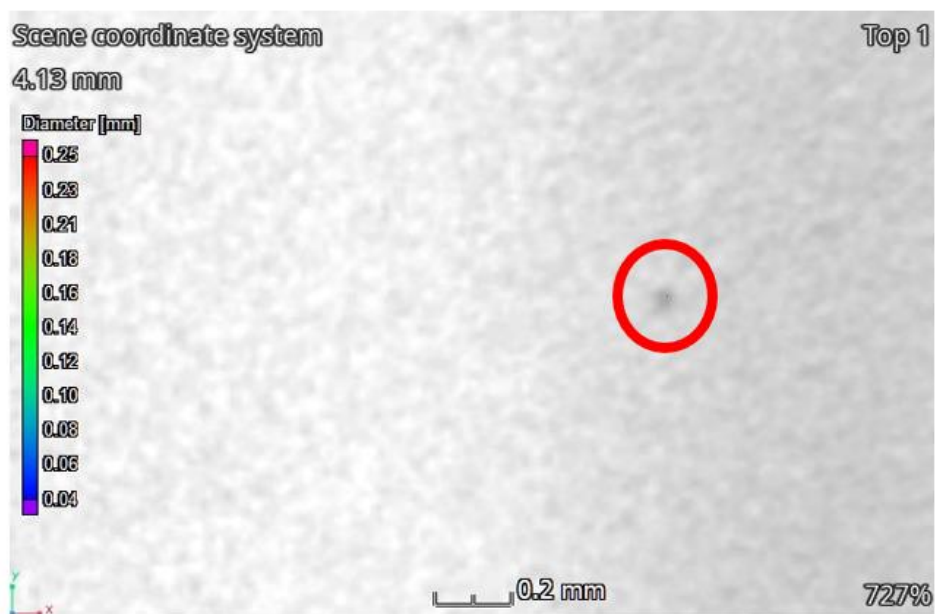
Relativní hustota byla měřena pomocí CT snímkování. Sestavením řady rentgenových snímků byl sestaven model, na kterém bylo možné změřit relativní hustotu (Obr. 5-1). Omezením této metody je ovšem minimální velikost rozpoznatelných pórů 40 μm (Obr. 5-2). Výsledky ukázaly, že vyšší teploty předehřevu vedou na vyšší hodnoty povrchové porozity (Tab. 5-1). Tedy nižší relativní hustotu v blízkém okolí povrchu. Pro analýzu menších pórů, které nebylo možné analyzovat pomocí CT snímkování, bylo provedeno měření metalografických výbrusů pro teploty předehřevu 200 $^{\circ}\text{C}$ a 400 $^{\circ}\text{C}$.

IN939_200C

Scene coordinate system



Obr. 5-1 Výsledky CT snímkování – rozložení póru včetně jejich velikosti průměru

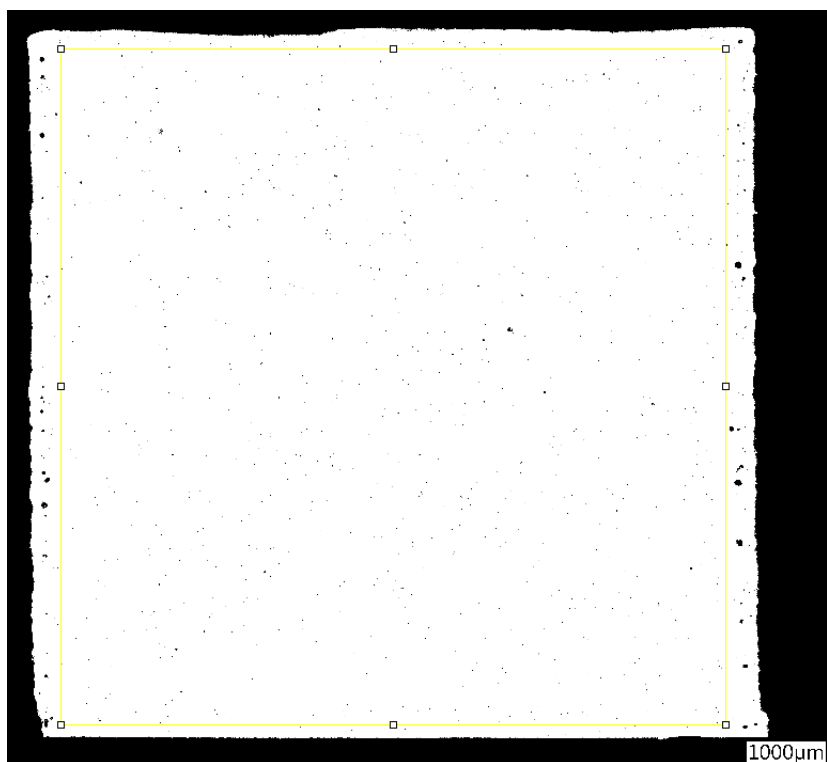


Obr. 5-2 Ukázka omezení měření pórovitosti použitím technologie CT

Tab. 5-1 Výsledky měření relativní hustoty technologií CT

Teplota předehřevu [°C]	Relativní hustota [%]
22	99,97
200	99,99
400	99,93

Metalografické výbrusy byly nafoceny optickým 3D mikroskopem a výsledné fotky byly v softwaru ImageJ převedeny do binárního obrazu, na kterém byla změřena relativní hustota. Relativní hustota byla měřena uvnitř samotného objemu vzorků (Obr. 5-3).



Obr. 5-3 Binární obraz vyleštěného vzorku a náhled plochy měření relativní hustoty

Tab. 5-2 Výsledky měření relativních hustot kostek

Vzorek	Teplota předehřevu [°C]	Relativní hustota [%]		
		Řez č. 1	Řez č. 2	Výsledná
1	200	99,484	99,576	99,530
2	200	99,790	99,769	99,780
3	400	99,638	99,695	99,667
4	400	99,830	99,745	99,786
1 a 2	200			99,655
3 a 4	400			99,727

5.1.2 Drsnost povrchu a tvrdost vzorků

Dalším objektem zkoumání první stavby byl vliv teploty předehřevu na drsnost povrchu vzorků a tvrdost. Obě veličiny byly měřeny opět na kostkách. Na každé stěně kostku byla nafocena plocha o velikosti 5 x 5 snímků při zvětšení – 250. Tyto plošky byly následně pětkrát změřeny a na základě těchto výsledků byla určena drsnost povrchu bočních stěn a vrchní stěny. Tvrdost byla měřena na kostkách zkušební metodou podle Vickerse.

Tab. 5-3 Výsledky měření drsnosti povrchu vzorků

Vzorek	Teplota předehřevu [°C]	Drsnost povrchu Ra [μm]	
		Boční stěna	Vrchní stěna
1	200	6,2	8,4
2	200	6,1	11,4
3	400	7,6	2,6
4	400	6,2	3,6

Tab. 5-4 Výsledky měření tvrdosti vzorků

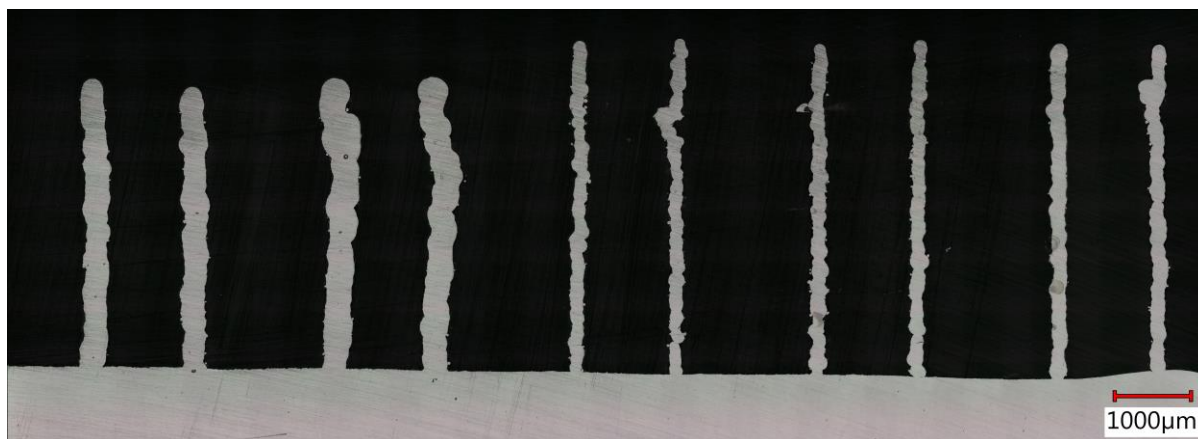
Vzorek	Teplota předehřevu [°C]	Tvrdost
1	200	323 HV10
2	200	322 HV10
3	400	388 HV0,3
4	400	387 HV0,3

5.1.3 Procesní parametry a 3D návary

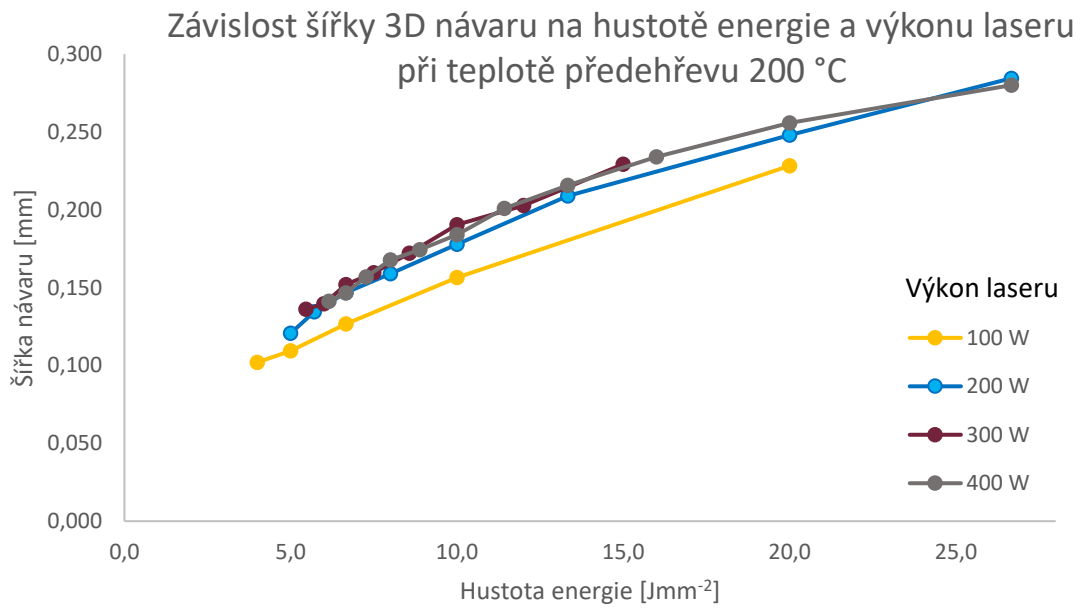
Vzorky 3D návarů byly tištěny v sadách po deseti vzorcích. Po vytištění a odříznutí ze stavební platformy byly nafoceny (Obr. 5-4). Následně byly vzorky metalograficky zpracovány. Metalografické výbrusy těchto vzorků byly následně nafoceny optickým 3D mikroskopem (Obr. 5-5) a posuzován byl profil jednotlivých návarů v řezu. Každý návar byl rozdělen na dva snímky. První snímek byl profil v řezu tisknutý po směru inertní atmosféry, druhý snímek byl poté profil v řezu tisknutý proti směru inertní atmosféry. Tyto snímky byly následně převedeny do binárního obrazu, byly vyplněny póry a zahlazen povrch návaru. Tyto upravené snímky byly následně využity pro měření tloušťky profilu návarů (Obr. 5-6, Obr. 5-7).



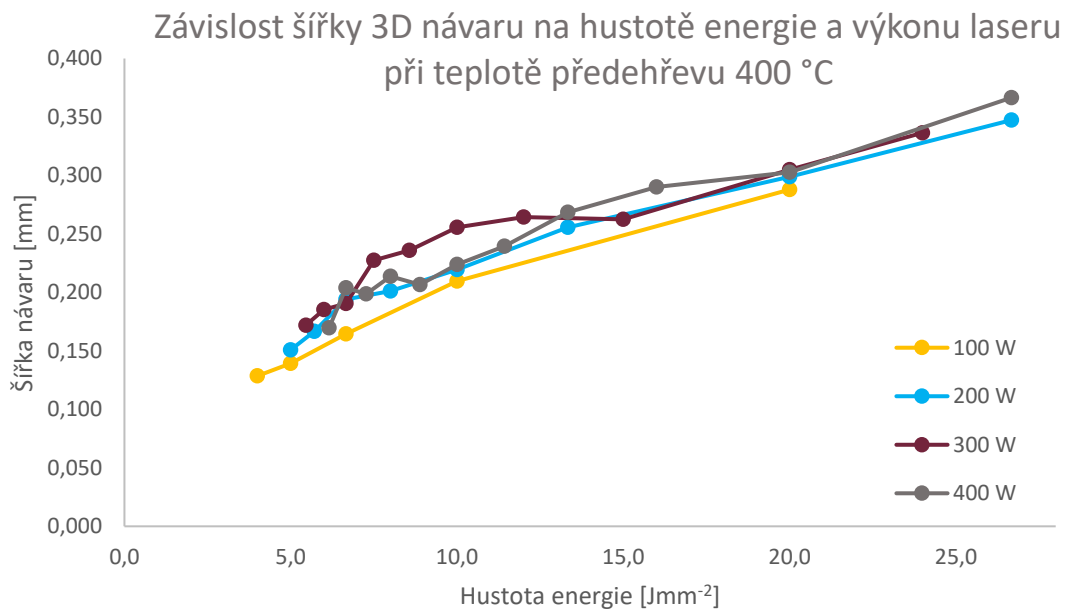
Obr. 5-4 Snímek nevhodného vzorku 3D návaru číslo 26



Obr. 5-5 Snímek metalografických výbrusů 3D návarů (nevhodné vzorky č. 26 a 27 - první dva zleva)



Obr. 5-6 Závislost šířky 3D návaru na hustotě energie a výkonu laseru pro teplotu předehřevu 200 °C

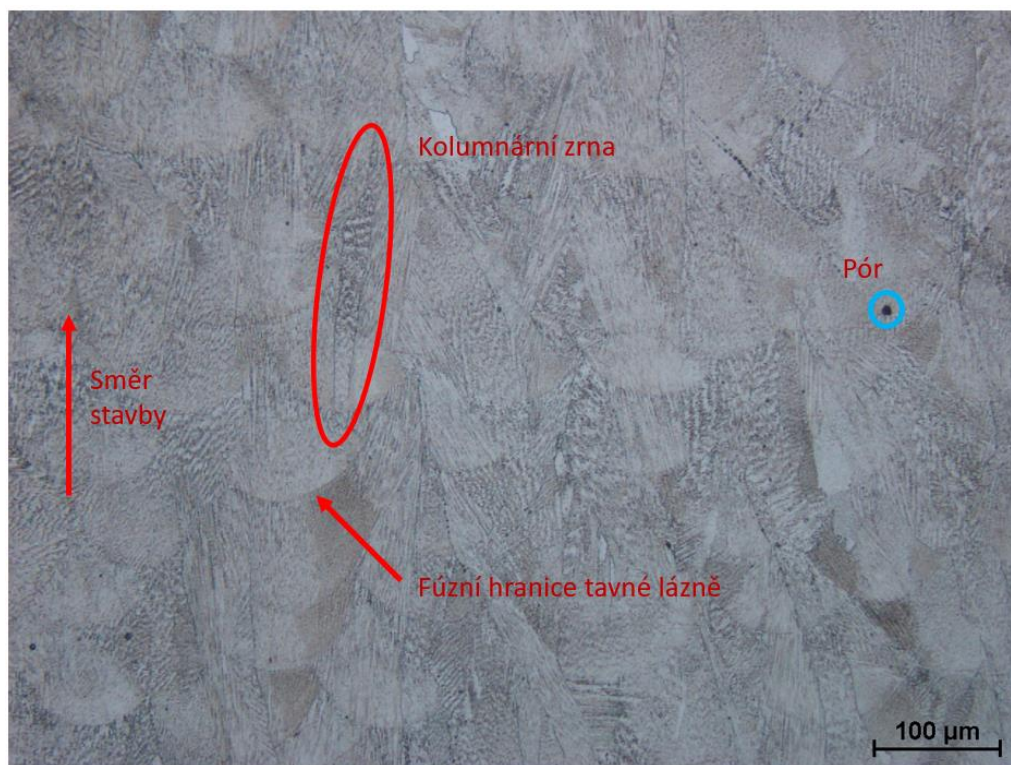


Obr. 5-7 Závislost šířky 3D návaru na hustotě energie a výkonu laseru pro teplotu předehřevu 400 °C

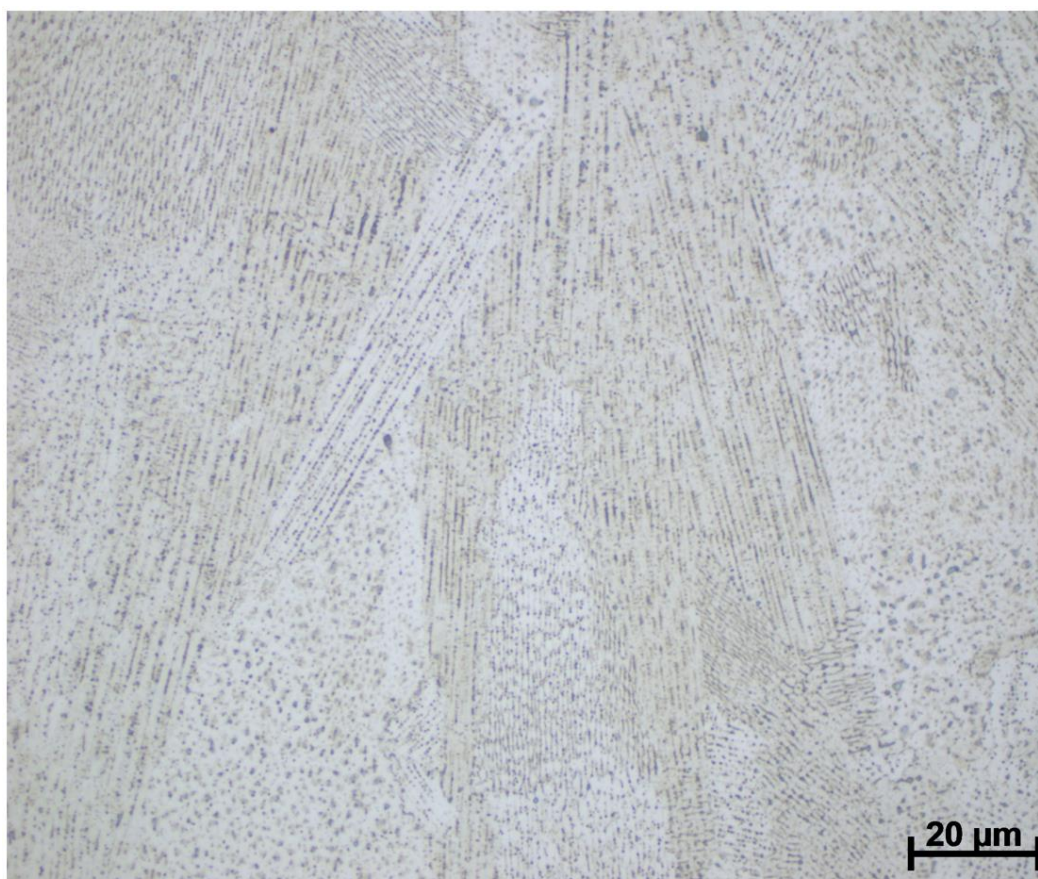
Hlavním výsledkem tohoto měření bylo ověření použitelnosti standartních procesních parametrů doporučených výrobcem práškového materiálu IN-939 pro zpracování při vyšších teplotách předehřevu. Tyto parametry byly vyhodnoceny jako vhodné a byly proto použity pro tisk v dalších fázích výzkumu.

5.1.4 Vliv předehřevu na mikrostrukturu

Na snímku (Obr. 5-8) můžeme vidět fúzní hranice jednotlivých ztuhlých tavných lázní (místa dopadu laseru, ve kterých dochází k tavení materiálu). Mikrostruktura materiálu je tvořena převážně velmi jemnou celulární (buněčnou) strukturou (Obr. 5-8). Dále je možné na snímku vidět dlouhá kolumnární zrna, které si udržují svou orientaci a přerůstají přes několik tavných lázní. Tyto kolumnární zrna rostou ve směru stavby, tedy kolmo vůči stavební platformě (Obr. 5-8, Obr. 5-9). Obdobná mikrostruktura materiálu byla pozorována u obou teplot předehřevu 200 °C a 400 °C.



Obr. 5-8 Snímek mikrostruktury vzorku tisknutého s teplotou předehřevu 200 °C



Obr. 5-9 Detailní snímek mikrostruktury materiálu zpracovaného s teplotou předehřevu 400 °C

Na snímcích byly také v softwaru ImageJ měřeny šířky jednotlivých ztuhlých tavných lázní. Snímek byl proložen pěti čarami, na kterých byl počítán počet průsečíků s fúzními hranicemi. Na základě počtu průsečíků a délky úsečky, která byla přepočítána pomocí měřítka, byla stanovena průměrná délka tavné lázně.

Tab. 5-5 Vliv teploty předehřevu na šířku tavné lázně

Teplota předehřevu [°C]	Průměrná šířka tavné lázně [mm]
200	0,120
400	0,127

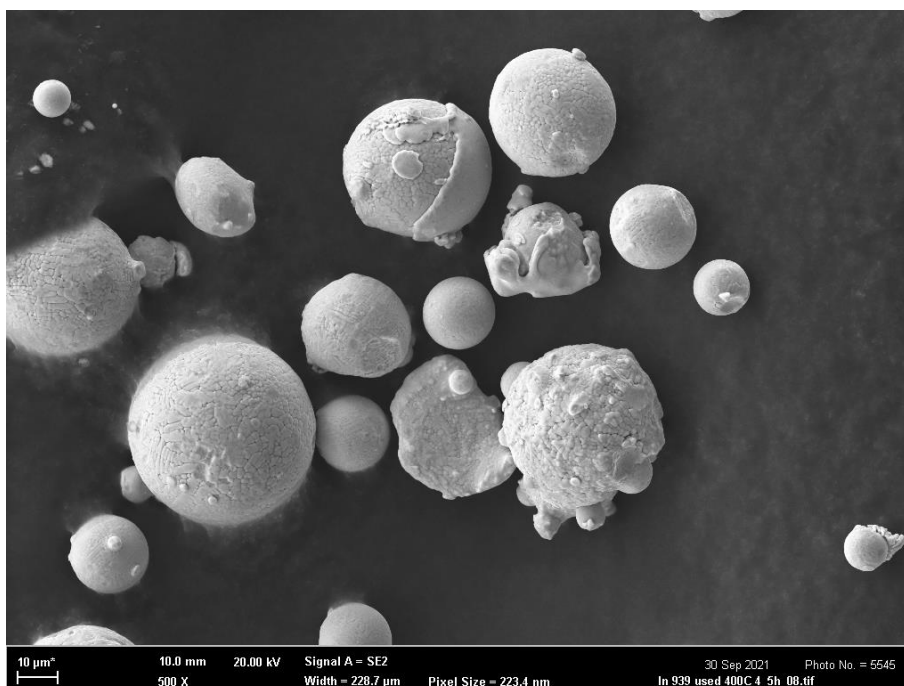
5.1.5 Vliv vyšších teplot předehřevu na nezpracovaný materiál

EDS analýza provedená na materiálu, který byl využit při stavbách s teplotou předehřevu základové desky 200 °C a 400 °C, ukázala, že nedochází ke změně chemického složení prášku. Výsledky analýz byly porovnány se složením, které uvádí výrobce prášku [21] (Tab. 5-6).

Tab. 5-6 Chemické složení prášku před a po stavbě s teplotou předehřevu základové desky 200 °C a 400 °C

Prvek	Hm. podíl od výrobce [%]		
	Od výrobce	T = 200 °C	T = 400 °C
Ni	± 47	47,1	48,76
Cr	22,00–23,00	22,93	22,69
Co	18,00–20,00	17,96	19,71
Ti	3,00–4,50	3,65	3,72
W	1,00–3,00	1,37	2,15
Al	1,00–3,00	0,83	1,70
Ta	1,00–1,80	1,77	-
Nb	0,50–1,50	0,48	0,79
Mn	0,50	0,15	-
Si	0,50	-	0,47
C	0,15	-	-
Zr	0,10	-	-

Nezpracovaný materiál, který byl využit při stavbě s teplotou předehřevu 400 °C po dobu 4,5 hodin byl také nasnímkován, aby bylo možné ověřit, zda nedochází ke spékání jednotlivých částic (Obr. 5-10).



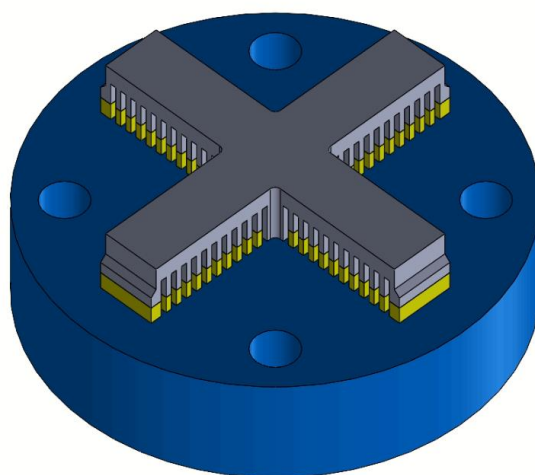
Obr. 5-10 Snímek nezpracovaného materiálu využitého při stavbě s teplotou předehřevu 400 °C (zvětšení: 500)

5.2 Simulace procesu

Simulace procesu probíhala v prostředí ANSYS Workbench s využitím rozšíření Additive Manufacturing. Simulace procesu se skládá ze dvou úloh: teplotní transientní úlohy a statické strukturální úlohy. Jedná se o termomechanickou simulaci, která uvažuje teploty komponent během procesu výroby. Simulace uvažuje deformaci a předehřev základové desky a odříznutí podpor a následnou relaxaci zbytkových napětí. V simulacích nebyl zohledňován okolní prášek ani vliv teploty předehřevu na mikrostrukturu a případnou změnu mechanických vlastností.

5.2.1 Zkušební těleso

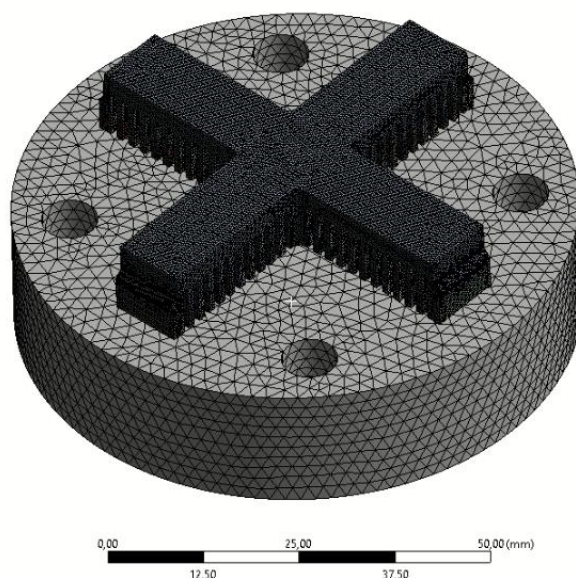
Zkušební těleso bylo rozděleno na dvě sekce: samotné zkušební těleso a podpory. Lamely zkušebního tělesa byly rozděleny ve výšce 3 mm od stavební platformy. Tyto odříznuté lamely byly v simulaci uvažovány jako podpory a byly v simulaci odříznuty (Obr. 5-11).



Obr. 5-11 Rozdělení zkušebního tělesa na samotné těleso (šedá barva) podpory (žlutá barva) a stavební platformu (modrá barva)

5.2.2 Konečno-prvková síť

Velikost vrstvy byla zvolena 1 mm, velikost elementů zkušebního tělesa a podpor 0,5 mm a velikost elementů základové desky byla zvolena 2 mm. Celkový počet prvků konečno-prvkové sítě je 343 741. Velikost vrstvy byla volena na základě doporučení pro tento typ výpočtu, které doporučuje využít deseti až dvaceti násobek reálné tloušťky vrstvy [22].



Obr. 5-12 Konečno-prvková síť simulace

5.2.3 Okrajové podmínky

Během simulace procesu byly všechny lamely spojeny se stavební platformou a samotným zkušebním tělesem pevnou vazbou – svar. Spodní plocha stavební platformy je poté uchycená vazbou vetknutí. Na stavební platformu je také aplikována teplota předehřevu (22 °C až 400 °C).

Po dokončení simulace procesu dochází k chladnutí celé stavby na teplotu 22 °C. Následně jsou lamely označené jako podpory odstraněny a dochází k relaxaci zbytkových napětí a deformaci dílu.

Jako výpočetní model materiál byl zvolen model materiálu IN-939, který byl na Ústavu konstruování vyvinut ve spolupráci s firmou SVS FEM. Vstupující procesní parametry (Tab. 5-7) odpovídají procesním parametrům, které byly využity při reálné stavbě zkušební geometrie.

Tab. 5-7 Procesní parametry vstupující do simulace

Parametr	Hodnota
Tloušťka vrstvy	0,05 mm
Vzdálenost drah laserů	0,1 mm
Rychlost skenování	760 mms ⁻¹
Doba čekání mezi skenováním	60 s
Počet laserů	1
Teplota předehřevu	(22 / 100 / 200 / 300 / 400) °C
Teplota po zchladnutí	22 °C

5.2.4 Výsledky simulace

Deformace byla měřena po odříznutí podpůrných struktur. Vyhodnocována byla deformace horní plochy zkušebního tělesa na koncích jednotlivých nosníků. Každý nosník byl uvažován jako samostatný vzorek.

H: AM Structural Analysis

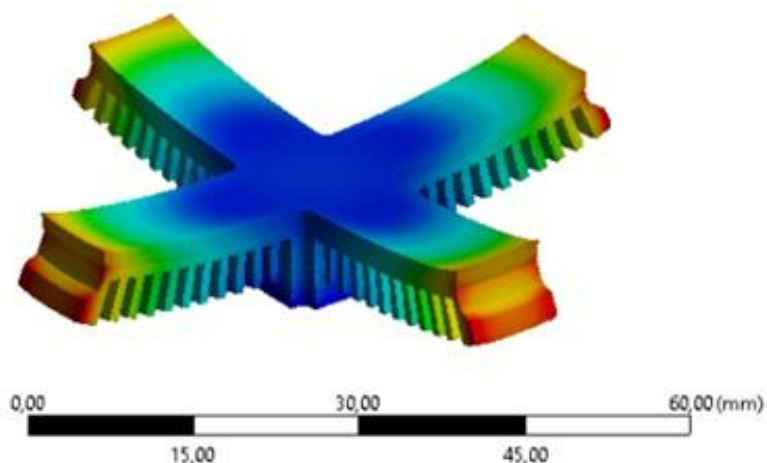
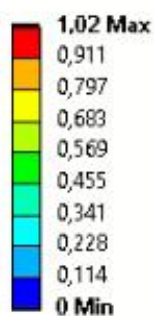
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 6577,1 s

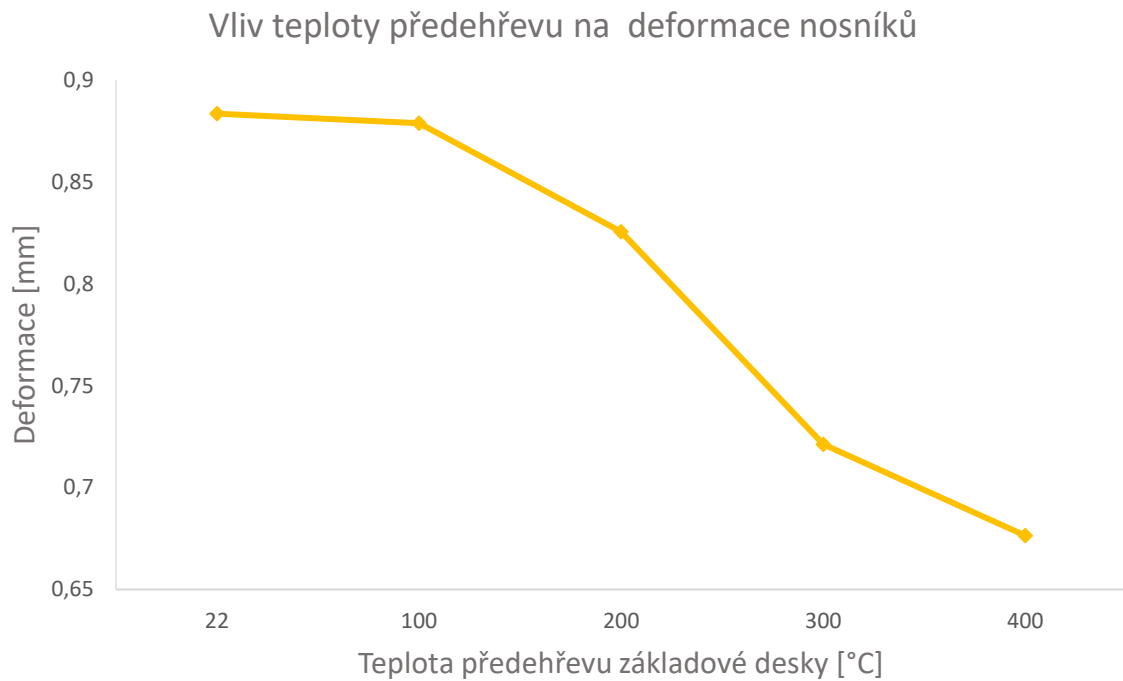
18.05.2022 9:22



Obr. 5-13 Výsledná simulovaná deformace pro teplotu předehřevu 100 °C po odříznutí lamel (zkušební těleso je stále uchyceno ke stavební platformě, která je v obrázku potlačena)

Tab. 5-8 Výsledky deformací jednotlivých simulovaných nosníků

Teplota předehřevu [°C]	Deformace nosníků [mm]				
	N1	N2	N3	N4	Průměr
22	0,881	0,888	0,863	0,903	0,883
100	0,883	0,884	0,868	0,881	0,879
200	0,837	0,818	0,813	0,835	0,825
300	0,717	0,682	0,732	0,754	0,721
400	0,692	0,657	0,671	0,686	0,676

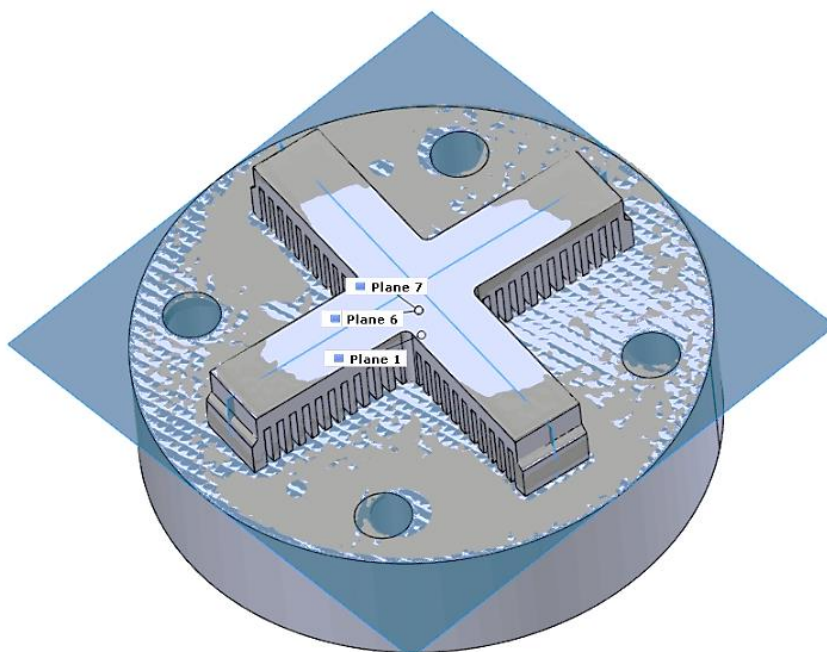


Obr. 5-14 Výsledky simulací procesu

5.3 Tisk zkušebního tělesa

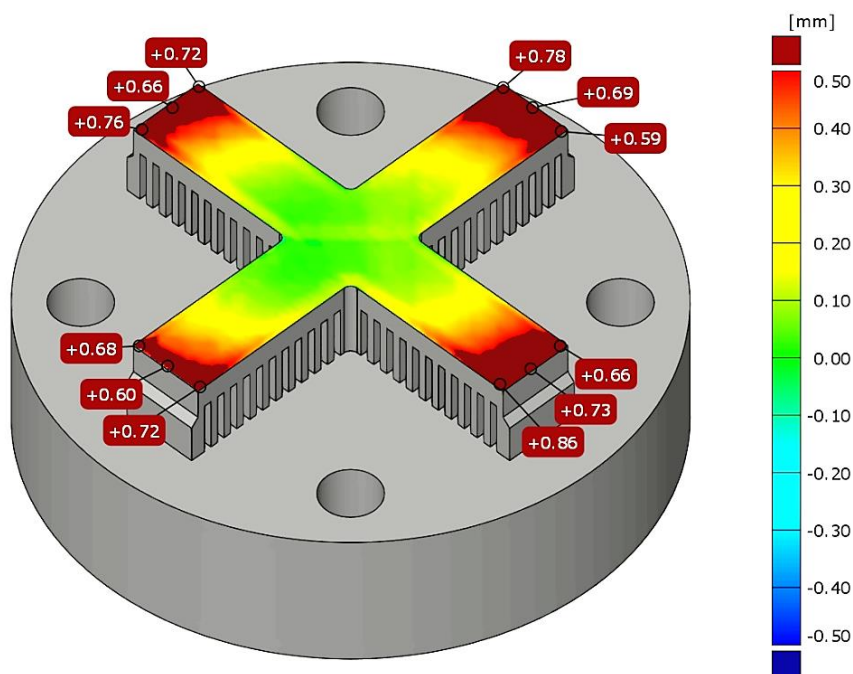
Vzorky byly po vytištění skenovány 3D skenerem ATOS TripleScan 8M. Následně byly odříznuty lamely, které v simulaci byly uvažovány jako podpory, a vzorky byly opět skenovány. Výsledky byly porovnány s původní CAD geometrií v softwaru GOM Inspect.

Zarovnání výsledné sítě ze skenů s CAD modelem bylo provedeno pomocí tří základních rovin (Obr. 5-15). První rovina (Plane 1) byla vrchní plochou stavební platformy. Druhé dvě roviny byly tvořeny rovinami symetrie nosníků orientovaných na stejné ose (Plane 6, Plane 7).

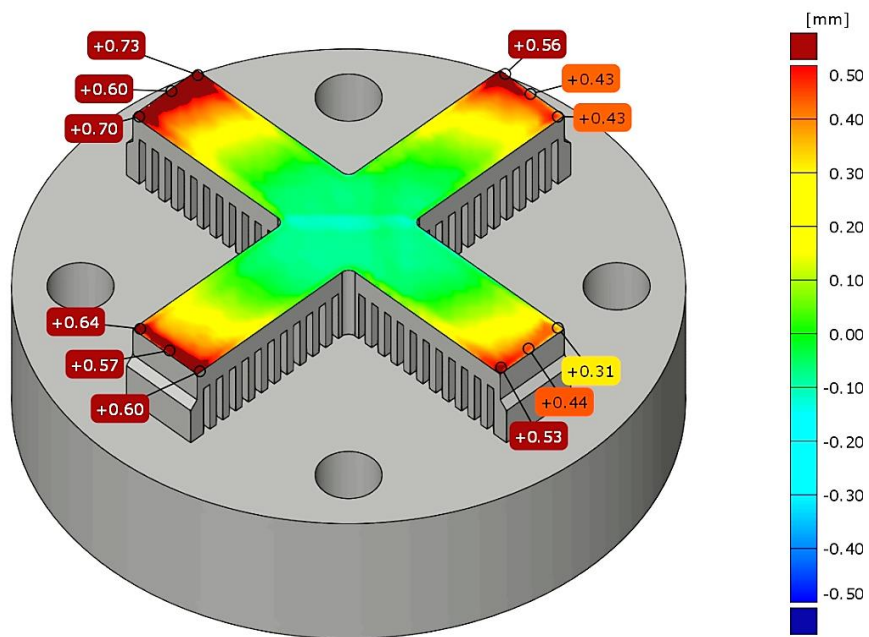


Obr. 5-15 Zarovnání CAD modelu se síťovým modelem ze skenování

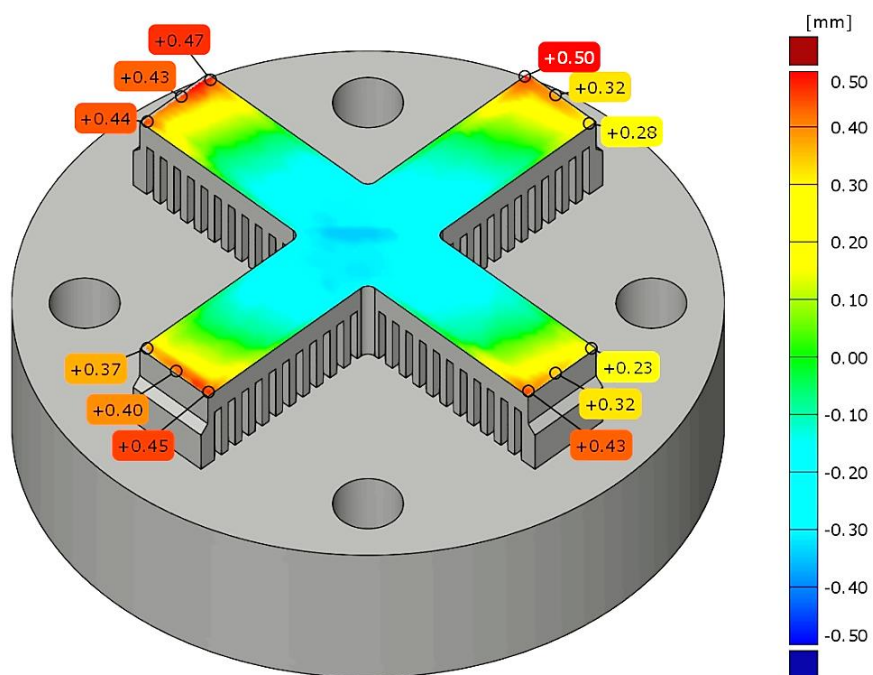
Obdobně jako při vyhodnocení deformace v simulacích byla vyhodnocována byla horní plocha vzorku. Každý nosník byl uvažován jako samostatné testovací těleso. Deformace byly měřeny na koncích jednotlivých nosníků a uvažována byla průměrná hodnota deformace horní hrany na konci každého nosníku. (Obr. 5-16, Obr. 5-17., Obr. 5-18, Obr. 5-19).



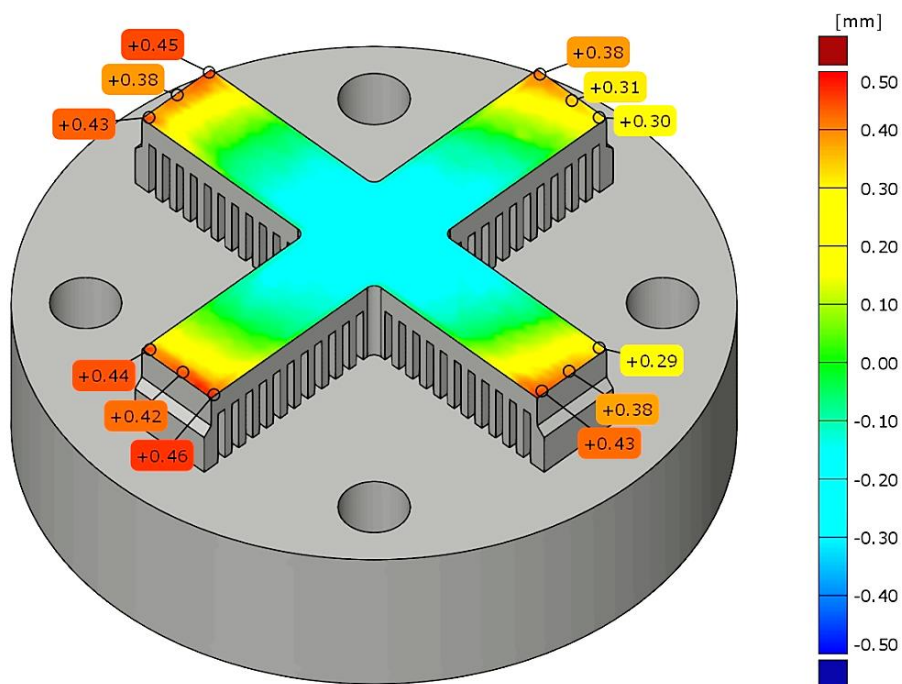
Obr. 5-16 Výsledky deformace zkušební tělesa s teplotou předehřevu 400 °C



Obr. 5-17 Výsledky deformace zkušebního tělesa s teplotou předehřevu 200 °C



Obr. 5-18 Výsledky deformace zkušebního tělesa s teplotou předehřevu 100 °C

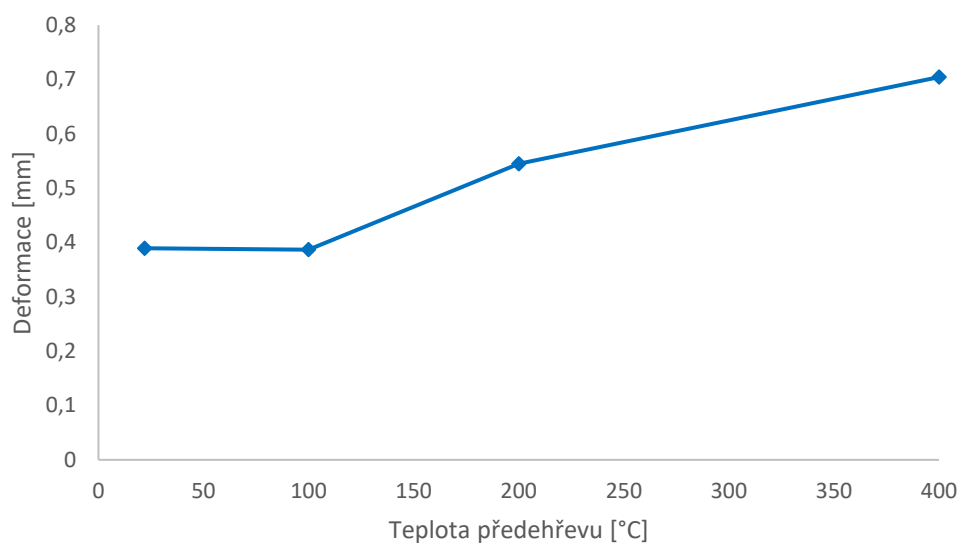


Obr. 5-19 Výsledky deformace zkušebního tělesa s teplotou předehřevu 22 °C

Tab. 5-9 Výsledky deformací tištěných nosníků

Teplota předehřevu [°C]	Deformace nosníků [mm]				
	N1	N2	N3	N4	Průměr
22	0,440	0,367	0,330	0,420	0,389
100	0,407	0,327	0,367	0,447	0,387
200	0,603	0,427	0,473	0,677	0,545
400	0,668	0,750	0,687	0,713	0,704

Vliv teplotypřehřevu na deformace nosníků

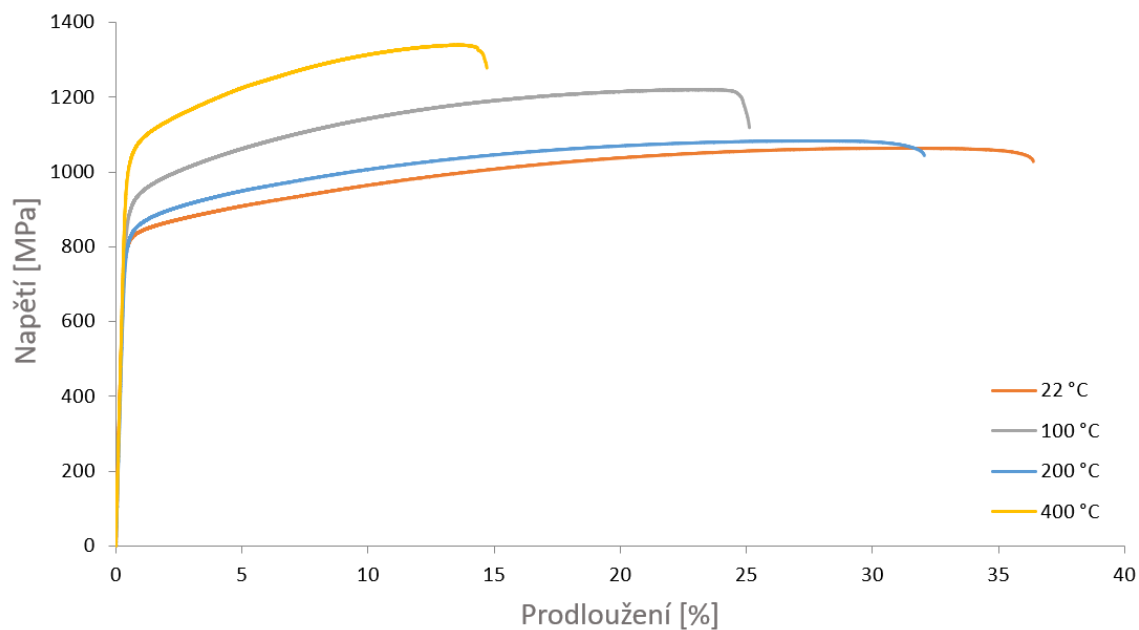


Obr. 5-20 Výsledky deformací tištěných nosníků

5.4 Mechanické vlastnosti

Vliv teploty přehřevu na statické mechanické vlastnosti byl zkoumán pomocí tahové zkoušky. Byly tištěny kruhové vzorky podle normy DIN 50125 B o nominálním testovaném průměru 6 mm. Zkoumány byly teploty přehřevu 22 °C, 100 °C, 200 °C a 400 °C. Tyto zkoušky sloužily pro ověření předpokladu, že výsledky simulací a experimentů se liší právě vlivem změny mechanických vlastností tištěných dílů vlivem vyšších teplot přehřevu.

Výsledky tahových zkoušek



Obr. 5-21 Výsledky zkoušky tahem vybraných vzorků

Tab. 5-10 Výsledky tahových zkoušek (průměrné hodnoty všech měření)

Teplota předehřevu [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_g [%]	Zúžení průřezu Z [%]
22	821,5	1073,8	25,1	35,2
100	904,3	1 218,5	20,1	20,8
200	809,8	1 062,5	29,7	29,7
400	1 034,5	1 340,6	14,1	15,00

6 DISKUZE

V této diplomové práci byl zpracován IN-939 s využitím předehřevu základové desky o teplotách předehřevu 22 °C, 100 °C, 200°C a 400 °C. Hypotéza, která byla založena na chování jiných materiálů při zpracování pomocí technologie SLM předpokládající pokles zbytkových napětí a deformací s vyššími teplotami předehřevu, byla na základě experimentu zamítnuta. Nejnižších deformací, respektive zbytkových napětí, bylo dosaženo s teplotou předehřevu 100 °C. Zkušební tělesa o délce 28,65 mm byly na koncích při zpracování s teplotou předehřevu 100 °C zdeformovány průměrně o 0,387 mm, zatímco vzorky s teplotou předehřevu 400 °C byly zdeformovány průměrně o 0,704 mm. Zvýšením teploty předehřevu o 300 °C došlo k navýšení deformací o 81,9 %. Vliv vyšších teplot předehřevu na zbytková napětí a deformace dílů tisknutých z IN-939 se ukázal být opačného charakteru, než bylo předpokládáno na základě literatury o zpracování jiných materiálů. Na základě těchto výsledků byla zamítnuta již zmíněná pracovní hypotéza.

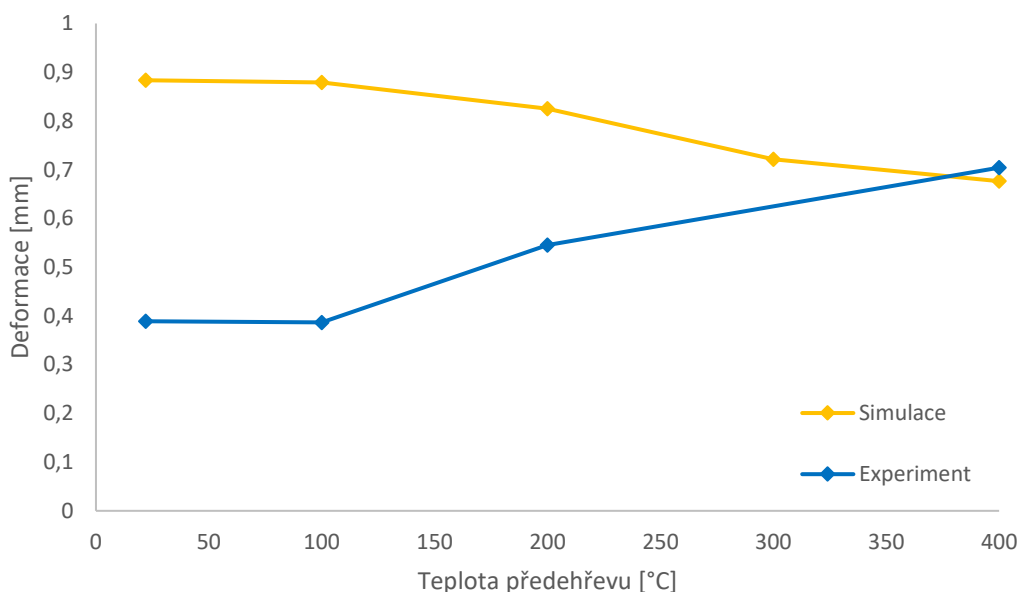
Ukázalo se ovšem, že vyšší teploty předehřevu mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti tisknutých komponent. Využitím předehřevu základové desky o teplotě 400 °C při zpracování IN-939 technologií SLM bylo dosaženo tisku vzorků s relativní hustotou 99,7 % a statickými mechanickými vlastnostmi jako po teplem zpracování (Tab. 6-1): mez kluzu 1 034,5 MPa, mez pevnosti 1 340,6 MPa, a tažnost 14,1 %. Proces tepelného zpracování, který dosahuje délek až 25 h a skládá se ze čtyř fází je detailněji popsán v kapitole 6.1. Změna mechanických vlastností je s největší pravděpodobností způsobena změnou mikrostruktury, ke které dochází vlivem vyšších teplot předehřevu (400 °C). Tyto výsledky by po ověření vlivu vyšších teplot předehřevu na únavové a creepové chování materiálu mohly vést k zásadnímu snížení celkového výrobního času a nákladů spojených s výrobou komponent z IN-939 technologií SLM.

6.1 Interpretace hlavních zjištění

Výsledky simulací procesu, které byly provedeny pro teploty předehřevu 22 °C až 400 °C, ukazují lineární klesající trend deformace nosníků zkušební tělesa (Obr. 4-7). Průměrná deformace na konci nosníků byla využitím předehřevu snížena z 0,883 mm pro teplotu předehřevu základové desky 22 °C na 0,676 mm pro teplotu předehřevu 400 °C (Tab. 5-8). Využitím předehřevu došlo ke snížení deformace o 23,43 %. Tyto výsledky jsou v souladu se stanovenou pracovní hypotézou, která předpokládá, že vlivem vyšších teplot předehřevu dochází ke snížení vnitřních zbytkových napětí zpracovaných dílů, což má za následek nižší deformace dílů po relaxaci těchto napětí. Výsledky simulací představují obdobný trend vlivu teploty předehřevu základové desky na zbytková napětí a výsledné deformace dílu jako výsledky výzkumů zpracování jiných materiálů technologií SLM [2, 14, 16]. Simulace procesu provedená v prostředí ANSYS Mechanical s využitím rozšíření Additive Manufacturing ovšem nepředpokládá změnu mechanických vlastností tištěných dílů, ke které během zpracování s vyššími teplotami předehřevu dochází. Výsledky tahových zkoušek ukázaly, že tato změna dosahuje při zpracování IN-939 s teplotou předehřevu 400 °C až 32,8% nárůst statické hodnoty meze pevnosti oproti hodnotám udávaných výrobcem. Výpočet byl proto doplněn také experimentem.

Experiment se skládal z tisku zkušební geometrie (Obr. 4-7) při teplotách předehřevu základové desky 200 °C a 400 °C. Výsledky průměrné deformace na koncích jednotlivých nosníků byly pro teplotu předehřevu základové desky 400 °C 0,704 mm (Tab. 5-9). Právě při experimentu a v simulaci s teplotou předehřevu 400 °C bylo dosaženo nejlepší shody. Průměrná měřená deformace nosníků (0,704 mm) se liší od výsledku simulace (0,676 mm) pouze o 4,1 %. Výsledky deformací nosníků pro teplotu předehřevu 200 °C byly ovšem v rozporu se simulací. Průměrná deformace na koncích nosníků pro teplotu předehřevu 200 °C dosahovala 0,545 mm v experimentu a 0,825 mm v simulacích. Tyto výsledky byly také v rozporu s pracovní hypotézou a byly proto rozšířeny o teploty předehřevu 22 °C a 100 °C. Výsledky experimentů (Tab. 5-9, Obr. 5-20) byly proto porovnány s výsledky simulací (Obr. 6-1). Výsledky ukazují, že při zpracování materiálu IN-939 dochází ke zcela opačnému trendu, než který byl předpokládán pracovní hypotézou. Nejnižších deformací konců nosníků bylo dosaženo při tisku s teplotou předehřevu základové desky 100 °C, a to s průměrnou deformací 0,386 mm. Podobných výsledků dosáhl také tisk bez využití předehřevu, tedy s teplotou základové desky 22 °C s průměrnou deformací nosníků 0,389 mm.

Vliv teploty předehřevu na deformace nosníků



Obr. 6-1 Porovnání výsledků simulací a experimentů

Na základě těchto výsledků byla zamítnuta pracovní hypotéza. Bylo odhaleno, že optimální teplota předehřevu základové desky pro snížení zbytkových napětí, a tím deformací dílů, se pohybuje v okolí 100 °C. Tyto výsledky jsou v částečném souladu s výzkumem, ve kterém se MIRKOOHI E. věnoval tvorbě analytického modelu vlivu předehřevu základové desky na zbytková napětí při zpracování materiálu IN-718 [23]. Autor ve své práci využívá simulaci pohyblivého zdroje tepla. Jako optimální teplotu předehřevu základové desky pro zpracování IN-718 určil teplotu 200 °C. Výsledky simulace, které byly následně ověřeny experimentem, ukazují že zbytková napětí v tisknutých dílech za teplot předehřevu 22 °C až 200 °C klesají s téměř lineární závislostí zbytkových napětí na teplotě předehřevu. Po překročení teploty předehřevu se tato závislost ovšem dramaticky mění. Výsledné hodnoty zbytkových napětí při zpracování IN-718 vyššími teplotami předehřevu, stejně jako při zpracování IN-939 v této práci, rostou.

Ověřen byl také vliv teploty předehřevu na mechanické vlastnosti. To bylo provedeno zkušebními vzorky kruhového průřezu podle normy DIN 50125 B. Vzorky o testovaném průměru 6 mm byly po vytisknutí a odstranění podpůrných struktur obrobeny na vnějším průměru pro upnutí do testovacího zařízení. Mechanické vlastnosti po zpracování IN-939 s využitím předehřevu (Tab. 5-10) vykazují podobný trend jako mechanické vlastnosti IN-939 zpracovaného bez využití předehřevu s následným tepelným zpracováním. Dochází ke zvýšení pevnosti na úkor snížení tažnosti. Zajímavé jsou především mechanické vlastnosti dosažené s využitím předehřevu o teplotách 100 °C a 400 °C s porovnáním s hodnotami mechanických vlastností vzorků, které jsou tepelně zpracovány (Tab. 6-1). IN-939 je standardně po vytisknutí tepelně zpracováván při teplotách 1 107 °C po dobu dvou hodin, následně velmi pomalu ochlazován na 899 °C a poté dále udržován na teplotách 913 °C po dobu 8 h, 982 °C po dobu 6 h a nakonec opět ochlazen na teplotu 802 °C, na které je držen 4 h [21]. Díly zpracované metodou SLM určené pro kritické aplikace, jako jsou například díly v areo-space průmyslu, jsou následně zpracovány metodou HIP (Hot Isostatic Pressing) pro minimalizaci možných rizik [24]. Tato metoda tepelného zpracování je prováděna za vysokých teplot a tlaků po krátkou dobu, v případě IN-718 jsou optimální parametry HIP: teplota 1 200 °C a tlak 150 MPa po dobu 4 h [25].

Tab. 6-1 Srovnání mechanických vlastností IN-939 po tepelném zpracování uváděných výrobcem [21] s výsledky dosaženými předehřevem základové desky

Zpracování	Mez kluzu Rp_{0,2} [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost Ag [%]
Předehřev 200 °C (výrobce)	735	1 009	30
Tepelné zpracování (výrobce)	749	1 247	13
Tepelné zpracování + HIP (výrobce)	957	1 348	11
Předehřev 100 °C	904	1 219	20
Předehřev 400 °C	1 035	1 341	14

Využitím předehřevu základové desky o teplotě 400 °C bylo dosaženo obdobných statických mechanických vlastností při zpracování IN-939 jako po tepelném zpracování následovaném horkým izostatickým stlačováním (HIP). Velmi dobrých výsledků poměru pevnosti a tažnosti dosahovaly také vzorky tisknuty s teplotou předehřevu základové desky 100 °C. Tyto vzorky dosahovaly meze pevnosti srovnatelné s mezí pevnosti vzorků bez využití předehřevu po tepelném zpracování ovšem s tažností vyšší o téměř 55 %.

Výsledky výzkumu naznačují, že proces tepelného zpracování IN-939, který může dosahovat délky až 25 h, lze potenciálně nahradit pro potřeby statického namáhání zpracováním IN-939 s využitím předehřevu základové desky o teplotě 400 °C. Předehřev základové desky na teplotu 400 °C byl s využitím experimentální komory předehřevu dosažen za 2 h. Tyto výsledky by mohly v případě rozšíření o větší počet testovaných vzorků o různých orientacích, standardně v horizontální poloze, vertikální poloze a nakloněné o 45 ° vůči stavební platformě, vést k výraznému zjednodušení celého procesu výroby komponent z IN-939 zpracovaného pomocí technologie SLM. Dále je nutné ověřit vliv předehřevu základové desky na únavové a creepové vlastnosti materiálu. Eliminací potřeby tepelného zpracování by došlo jak k výraznému urychlení celého procesu, tak k výraznému snížení celkových nákladů na výrobu komponent z IN-939 technologií SLM.

6.2 Interpretace dílčích výsledků

Výsledků měření relativní hustoty z CT snímků (Tab. 5-1) naznačují, že vyšší teploty předehřevu (400 °C) dosahují nižších hodnot relativní hustoty. Tyto výsledky jsou ovšem omezeny přesností technologie CT, která rozpoznává pouze póry od průměru 40 μm. Bylo proto provedeno také měření na snímcích pořízených 3D optickým mikroskopem. Tyto výsledky (Tab. 5-2) ukázaly, že vzorky s vyššími hodnotami předehřevu dosahují vyšších hodnot objemové relativní hustoty. Tyto výsledky jsou v souladu s jinými studiemi, které prokázaly pozitivní vliv předehřevu základové desky na relativní hustotu při zpracování mnohých materiálů [2, 7, 14].

Výsledky měření drsnosti povrchu (Tab. 5-3) ukázaly, obdobně jako výsledky měření relativní hustoty, že vyšší teploty předehřevu nemají zásadní vliv na drsnost povrchu bočních stěn. Ukázalo se však, že dochází ke značnému poklesu drsnosti vrchních stěn. Toto zjištění může být využito pro tisk komponent, kde je nízká drsnost povrchu klíčová pro správnou funkci například při tisku turbínových kol. Snížení drsnosti povrchu využitím předehřevu základové desky využila ve svém výzkumu také K. KEMPEN při zpracování nástrojové oceli M2 [2]. Příčinou je pravděpodobně snížení šířky tavných lázní v kombinaci se snížením rychlosti chladnutí tavných lázní.

Měření tvrdosti vzorků (Tab. 5-4) naznačilo jako první z výsledků možné zamítnutí hypotézy. Vzorky zpracované s vyšší teplotou předehřevu 400 °C dosahovali průměrné tvrdosti 388 HV0,3, zatímco vzorky zpracované s teplotou předehřevu 200°C dosahovali průměrné tvrdosti 322 HV10. Obě tyto hodnoty jsou vyšší než hodnota tvrdosti uváděná výrobcem materiálu pro vrstvu tloušťce 50 μm, která dosahuje 305 ±7 HV10. Důvodem pro růst tvrdosti vzorků s teplotou předehřevu 400 °C oproti vzorkům s teplotou předehřevu 200 °C byl nárůst zbytkových napětí, ke kterému zpracování s vyšší teplotou předehřevu vedlo. Stejných závěrů, tedy že s vyššími hodnotami zbytkových napětí roste také tvrdost testovaných vzorků, dospěl ve svém výzkumu při zpracování IN-718 také PARK J.H. [26].

Na základě snímků 3D návarů a průběhu stavby s teplotou předehřevu 400 °C byly vzorky číslo 24, 25, 26, 27 a příslušné procesní parametry určeny jako nevhodné pro tisk za vyšších teplot předehřevu. Hlavním výsledkem tohoto měření bylo ověření procesních parametrů doporučených výrobcem práškového materiálu IN-939. Tyto procesní parametry byly vyhodnoceny jako vhodné pro tisk za vyšších teplot předehřevu a byly proto využity pro tisk v dalších fázích výzkumu. Výsledky měření tloušťky stěny jednotlivých návarů sloužily pro ověření vlivu výkonu laseru a hustoty energie skenování na šířku tavné lázně. Výsledky ukázaly (Obr. 5-6, Obr. 5-7), že při využití procesních parametrů s vyššími hodnotami výkonu laseru a celkové hustoty energie skenování dochází ke zvětšení šířky tavné lázně. Závislost šířky tavné lázně na hustotě energie vykazuje lineární charakter. Lineární trend této závislosti prokázal ve svém výzkumu také KUMAR P. při zpracování IN-718 [27].

Na snímku metalografického výbrusu kostek (Obr. 5-8) můžeme vidět fúzní hranice jednotlivých ztuhlých tavných lázní (místa dopadu laseru, ve kterých dochází k tavení materiálu). Mikrostruktura materiálu tvořena převážně velmi jemnou celulární (buněčnou) strukturou (Obr. 5-8, Obr. 5-9). Dále je možné na snímku vidět dlouhá kolumnární zrna, které si udržují svou orientaci a přerůstají přes několik tavných lázní. Tyto kolumnární zrna rostou ve směru stavby, tedy kolmo vůči stavební platformě (Obr. 5-8). Fenomén tvorby kolumnárních zrn ve směru stavby pozoroval při zpracování IN-939 technologií SLM také KANAGARAJAH P. [28]. Obdobná mikrostruktura byla pozorována u obou teplot předehřevu 200 °C a 400 °C. Výsledky měření šířky tavných lázní ukázaly, že s vyšší teplotou předehřevu roste šířka tavné lázně. Tento výsledek je způsoben snížením intenzity odvodu tepla v materiálu. Průměrná šířka tavné lázně pro vzorky tištěné s teplotou předehřevu 200 °C byla 0,120 mm a pro vzorky tištěné s teplotou předehřevu 400 °C pak 0,127 mm (Tab. 5-5). Tyto výsledky potvrzuje také tisk 3D návarů, kde šířka jednoho návaru pro teplotu předehřevu 200 °C byla 0,155 mm a pro teplotu předehřevu 400 °C pak 0,195 mm. Rozdílné hodnoty tloušťek jsou způsobeny přesahem jednotlivých tavných lázní při tisku objemového vzorku.

Analyzován byl také vliv vyšších teplot předehřevu na nezpracovaný materiál. Pro ověření tohoto vlivu byla provedena EDS analýza, která analyzuje chemické složení prášku. EDS analýza byla provedena pro prášek využit při stavbě o teplotě 200 °C a 400 °C. Výsledky analýzy byly porovnány s hodnotami, které uvádí výrobce. Výsledky prokázaly, že vyšší teploty předehřevu nemají výrazný vliv na chemické složení prášku a během jeho zpracování tedy nedochází k jeho degradaci a prášek je možné recyklovat přesíváním a znovu použít. Ověřeno bylo také, že nedochází ke spékání jednotlivých částic prášku (Obr. 5-10).

6.3 Verifikace hypotéz

Na základě systematické rešerše chování různých materiálů při zpracování technologií SLM s využitím předehřevu základové desky byla stanovena pracovní hypotéza:

- Využitím vyšších teplot předehřevu povede ke snížení zbytkových napětí v tisknutých dílech, což se projeví nižšími hodnotami deformací a umožní menší zmetkovitost výroby.

První výsledky získané ze simulace procesu výroby zkušební geometrie „X-beam“ naznačovaly pravdivost hypotézy. Tyto výsledky odpovídaly předpokládaným výsledkům, které se opírali o rešerši a chování jiných materiálů zpracovaných technologií SLM.

Tyto výsledky byly následně ověřeny experimentálně tiskem těchto zkušebních těles. Po výrobě a odříznutí lamel od základové desky byly výtisky skenovány a výsledky skenování byly porovnány s původní CAD geometrií. Výsledky experimentu nepotvrdily předpokládané výsledky vycházející z rešerše a ze simulací procesu. Ukázalo se, že při zpracování slitiny IN-939 nedochází ke snížení zbytkových napětí, a tedy ani k deformaci vyráběných dílů. Jako nejvhodnější teplota předehřevu pro zpracování slitiny Inconel 939 byla z testovaných teplot předehřevu stanovena teplota 100 °C. Na základě těchto výsledků byla hypotéza zamítnuta. Jak bylo nastíněno ve schématu řešení diplomové práce po zamítnutí první pracovní hypotézy, dalším krokem bylo objasnění procesů, které vedly k zamítnutí pracovní hypotézy.

7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl proveden výzkum vlivu předehřevu základové desky na zpracovatelnost a zbytková napětí slitiny IN-939 zpracované metodou SLM. Problematika výroby komponent selektivním laserovým tavením byla zpracována v systematické rešerši, na základě, které byla stanovena pracovní hypotéza. Pracovní hypotéza předpokládala, že s vyššími teplotami předehřevu dojde k poklesu vnitřních zbytkových napětí a tím ke snížení deformací tištěných dílů.

Hypotéza byla ověřována analyticky pomocí simulace procesu SLM a experimentálně. Výsledky simulací naznačovaly platnost hypotézy, tedy potvrdily klesající trend závislosti zbytkových napětí a deformací dílů v závislosti na vyšších teplotách předehřevu. Výsledky simulace byly následně ověřovány experimentem. Výsledky experimentu nekorespondovaly s výsledky simulací a pracovní hypotéza byla na základě experimentu zamítnuta.

Důvodem byla změna mechanických vlastností, ke kterých zpracováním IN-939 technologií SLM dochází. Tyto změny nebyly v simulacích zohledněny. Ověřen byl výpočetní model pro teplotu předehřevu 400 °C, který dosáhl odchylky zkoumaných deformací 5 %. Na základě výsledků experimentu byla stanovena vhodná teplota předehřevu pro snížení zbytkových napětí na teplotu 100 °C.

Využitím předehřevu základové desky o teplotě 100 °C a 400 °C bylo dosaženo statických mechanických vlastností komponent tisknutých z IN-939, které jsou srovnatelné se statickými mechanickými vlastnostmi komponent standardně zpracovaných technologií SLM a následně tepelně zpracovaných. Proces tepelného zpracování IN-939 zpracovaného technologií SLM dosahuje délek až 25 hodin. K této změně dochází s největší pravděpodobností změnou mikrostruktury, ke které vlivem předehřevu dochází.

Výsledek výzkumu proto představuje významný potenciál na snížení celkového výrobního času a nákladů spojených s výrobou dílů z IN-939 zpracovaných metodou SLM. Je nutné ovšem ověřit také vliv předehřevu na vliv odolnosti materiálu proti dynamickému zatížení a ověřit únavové a creepové vlastnosti materiálu po zpracování s využitím předehřevu.

Dalším vhodným rozšířením výzkumu by byla optimalizace procesních parametrů s využitím teploty předehřevu 100 °C. Optimalizace procesních parametrů s příslušnou optimální teplotou předehřevu by mohla vést k dalšímu zlepšení mechanických vlastností a k redukci potřebného objemu podpůrných struktur. Tyto výsledky mohou vést ke zjednodušení odstraňování podpůrných struktur a mohou přispět ke snížení celkového výrobního času a nákladů.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Součástí výzkumu je také finalizovaný rukopis, který je podkladem pro publikační výsledek I. Kategorie J_{imp} [29]:

HERTL D.; MALÝ M.; NOPOVÁ K.; MICHÁLEK M. C.; PANTĚLEJEV L. a KOUTNÝ D. Investigation of residual stress of Inconel 939 processed by Laser Powder Bed Fusion at elevated preheating temperatures. *Materials* 2022

Abstract: This paper deals with the problem of processing of Inconel 939 alloy by SLM using base plate preheating. The main objective of the work is to verify the effect of base plate preheating on residual stresses and part deformation. The problem was solved by two approaches: process simulation and subsequent experimental verification. FEM with deviation of 4,1 % for processing Inconel 939 with the preheating of 400 °C was achieved. Based on the experiment, a suitable base plate preheating temperature of 100 °C was determined to reduce the deformation and residual stresses. By processing Inconel 939 using preheating temperatures of 100 °C and 400 °C, mechanical properties comparable to those of standard components processed by SLM technology from Inconel 939 after heat treatment were achieved. These results offer the potential for significant reductions in overall production time and costs associated with manufacturing Inconel 939.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting: A manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal*. 2012, roč. 9, č. 2, s. 33–38. ISSN 1613-7728.
- [2] KEMPEN, K.;VRANCKEN, B.; THIJS, L.; BUIS, S.; VAN HUMBREECK, J.;KRUTH, J. P. Lowering thermal gradients in Selective Laser Melting by pre-heating the baseplate. In: . B.m.: University of Leuven (KU Leuven) Department of Mechanical Engineering, 2013, s. 400.
- [3] MERCELIS, Peter a Jean Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, roč. 12, č. 5, s. 254–265. ISSN 13552546.
- [4] ZHOU, Xin, Xihe LIU, Dandan ZHANG, Zhijian SHEN a Wei LIU. Balling phenomena in selective laser melted tungsten. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, roč. 222, s. 33–42. ISSN 09240136.
- [5] SCHULDT, Steven J., Jeneé A. JAGODA, Andrew J. HOISINGTON a Justin D. DELORIT. *A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments*. B.m.: Elsevier B.V. 1. květen 2021. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:
- [6] ROSSINI, N. S., M. DASSISTI, K. Y. BENYOUNIS a A. G. OLABI. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*. 2012, roč. 35, s. 572–588. ISSN 02641275.
- [7] SHUAI, Li, Qingsong WEI, Yusheng SHI, Jie ZHANG a Li WEI. Micro-crack formation and controlling of Inconel625 parts fabricated by selective laser melting. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2016*. 2016, s. 520–529.
- [8] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014, roč. 1, s. 77–86. ISSN 22148604.
- [9] HARRISON, Neil J. Selective Laser Melting of Nickel Superalloys : solidification , microstructure and material response. *The University of Sheffield*. 2016, č. October.
- [10] MALÝ, M. *Experimentální komora pro testování speciálních materiálů technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,. 2017
- [11] ALI, Haider, Hassan GHADBEIGI a Kamran MUMTAZ. Processing Parameter Effects on Residual Stress and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018, roč. 27, č. 8, s. 4059–4068. ISSN 15441024.
- [12] PARK, Jung Hyun, Gyung Bae BANG, Kee-Ahn LEE, Yong SON, Won Rae KIM a Hyung Giun KIM. Effect on microstructural and mechanical properties of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting with rescanning by low energy density. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, roč. 10, s. 785–796. ISSN 22387854.

- [13] KANAGARAJAH, P., F. BRENNE, T. NIENDORF a H. J. MAIER. Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading. *Materials Science and Engineering A*. 2013, roč. 588, s. 188–195. ISSN 09215093.
- [14] LI, Shuai, Qingsong WEI, Yusheng SHI, Chee Kai CHUA, Zicheng ZHU a Danqing ZHANG. Microstructure Characteristics of Inconel 625 Superalloy Manufactured by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Science and Technology*. 2015, roč. 31, č. 9, s. 946–952. ISSN 10050302.
- [15] GMBH, Simufact. Tutorial simufact additive. nedatováno, s. 1–75. ISSN 1573-2509.
- [16] PAPADAKIS, Loucas, Dimitrios CHANTZIS a Konstantinos SALONITIS. On the energy efficiency of pre-heating methods in SLM/SLS processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 95, č. 1–4, s. 1325–1338. ISSN 14333015.
- [17] LIU, Qi, Yoann DANLOS, Bo SONG, Baicheng ZHANG, Shuo YIN a Hanlin LIAO. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, roč. 222, s. 61–74. ISSN 09240136.
- [18] SAXENA, Subham. *IN-939 Superalloy for Aerospace Applications*. 2018. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/in-939-superalloy-aerospace-applications-shubham-saxena>
- [19] POYRAZ, Özgür a Melih Cemal KUŞHAN. Residual stress-induced distortions in laser powder bed additive manufacturing of nickel-based superalloys. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*. 2019, roč. 65, č. 6, s. 343–350. ISSN 00392480.
- [20] LINDECKE, Peter Nils Johannes, Heiko BLUNK, Jan Philip WENZL, Mauritz MÖLLER a Claus EMMELMANN. Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. *Procedia CIRP*. 2018, roč. 74, s. 53–58. ISSN 22128271.
- [21] SLM SOLUTIONS. Material Data Sheet Ni-Alloy IN939. nedatováno, s. 5–8.
- [22] PAGAC, Marek, Jiri HAJNYS, Radim HALAMA, Tariq ALDABASH, Jakub MESICEK, Lukas JANCAR a Jan JANSA. Prediction of model distortion by fem in 3d printing via the selective laser melting of stainless steel aisi 316l. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, roč. 11, č. 4, s. 1–16. ISSN 20763417.
- [23] MIRKOOHI, Elham, Steven Y. LIANG, Hong Chuong TRAN, Yu Lung LO, You Cheng CHANG a Hung Yu LIN. Mechanics modeling of residual stress considering effect of preheating in laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021, roč. 5, č. 2. ISSN 25044494.
- [24] SHAIKH, Abdul Shaafi. Development of a γ' Precipitation Hardening Ni-Base Superalloy for Additive Manufacturing. *Thesis*. 2018, č. July, s. 102.
- [25] CHANG, Shih Hsien, Shih Chin LEE, Tzu Piao TANG a Hsin Hung HO. Influences of soaking time in hot Isostatic Pressing on strength of inconel 718 superalloy. *Materials Transactions*. 2006, roč. 47, č. 2, s. 426–432. ISSN 13459678.

- [26] PARK, Jung Hyun, Gyung Bae BANG, Kee Ahn LEE, Yong SON, Yeong Hwan SONG, Byoung Soo LEE, Won Rae KIM a Hyung Giun KIM. Effect of Preheating Temperature on Microstructural and Mechanical Properties of Inconel 718 Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals and Materials International*. 2022, č. 0123456789. ISSN 20054149.
- [27] KUMAR, Pankaj, Jano FARAH, Javed AKRAM, Chong TENG, Jon GINN a Mano MISRA. Influence of laser processing parameters on porosity in Inconel 718 during additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, roč. 103, č. 1–4, s. 1497–1507. ISSN 14333015.
- [28] KANAGARAJAH, P., F. BRENNE, T. NIENDORF a H. J. MAIER. Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading. *Materials Science and Engineering A*. 2013, roč. 588, s. 188–195. ISSN 09215093.
- [29] Metodiky hodnocení výzkumných organizací a programů účelové podpory výzkumu , vývoje a inovací schválené usnesením vlády. Č.j.: 26822/2017-OMP. 2017.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

h	hodina
t	čas
T	teplota
SLM	Selective laser melting
LPBF	Laser powder bed fusion
IN-939	Inconel 939
TGM	Temperature Gradient Mechanism
MC	Metal-carbon
GB	Grain boundary
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
CT	Počítačová tomografie
HIP	Hot Isostatic Pressing

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Poškození podpůrných struktur vlivem vysokých vnitřních napětí	17
Obr. 2-2 Proces vzniku zbytkových napětí vlivem strmých teplotních gradientů [2]	18
Obr. 2-3 Metody měření zbytkových napětí [6]	19
Obr. 2-4 Vytištěné vzorky z nástrojové oceli M2 s teplotou předehřevu základové desky 90 °C (vlevo), 150 °C (uprostřed) a 200 °C (vpravo)	20
Obr. 2-5 Vliv rychlosti skenování, teploty předehřevu a remeltingu na výslednou relativní hustotu vzorků [2]	20
Obr. 2-6 Tvrdost vzorků H2 vyrobených pomocí technologie SLM oproti konvenčnímu způsobu výroby [2]	21
Obr. 2-7 Seznam procesních parametrů [8, 10]	22
Obr. 2-8 Vliv jednotlivých kombinací výkonu laseru a expoziční doby na rychlost ochlazování a výsledná zbytková napětí [11]	23
Obr. 2-9 Vliv jednotlivých kombinací výkonu laseru a expoziční doby na výsledné mechanické vlastnosti vzorků [12]	23
Obr. 2-10 Porovnání výsledných zbytkových napětí s využitím remeltingu o síle (5, 10, 20) % hustoty energie původního skenování [12]	24
Obr. 2-11 Mikrostruktura vzorků: a) v as-built stavu b) vzorek vyrobený technologií SLM po tepelném zpracování, c) vzorek vyrobený pomocí odlévání [13]	25
Obr. 2-12 Monotónní křivky napětí a deformace pro IN-939 [13]	26
Obr. 2-13 Zig-zag vzor vznikající po hranici zrn (GB = hranice zrn)	27
Obr. 4-1 Schéma řešení diplomové práce	32
Obr. 4-2 Schéma experimentální komory předehřevu [10]	33
Obr. 4-3 Experimentální komora předehřevu [10]	34
Obr. 4-4 Zkouška předehřevu experimentální komory	35
Obr. 4-5 Časový vývoj teploty předehřevu stavební platformy pro teplotu předehřevu 400 °C	35
Obr. 4-6 Stavba kostek a single-track 3D návarů	36
Obr. 4-7 Zkušební geometrie	37
Obr. 4-8 Zkušební geometrie s označením jednotlivých nosníků	38

Obr. 4-9 Stavba vzorků na tahovou zkoušku s využitím různých geometrií podpůrných struktur	39
Obr. 4-10 Geometrie lopatky rotoru	39
Obr. 4-11 Stavba vzorků pro tahovou zkoušku	40
Obr. 4-12 Částice prášku IN-939 (zvětšení: 2500)	40
Obr. 5-1 Výsledky CT snímkování – rozložení póru včetně jejich velikosti průměru	42
Obr. 5-2 Ukázka omezení měření pórovitosti použitím technologie CT.....	43
Obr. 5-3 Binární obraz vyleštěného vzorku a náhled plochy měření relativní hustoty	44
Obr. 5-4 Snímek nevhodného vzorku 3D návaru číslo 26	46
Obr. 5-5 Snímek metalografických výbrusů 3D návarů (nevhodné vzorky č. 26 a 27 - první dva zleva)	46
Obr. 5-6 Závislost šířky 3D návaru na hustotě energie a výkonu laseru pro teplotu předehřevu 200 °C	47
Obr. 5-7 Závislost šířky 3D návaru na hustotě energie a výkonu laseru pro teplotu předehřevu 400 °C	47
Obr. 5-8 Snímek mikrostruktury vzorku tisknutého s teplotou předehřevu 200 °C.....	48
Obr. 5-9 Detailní snímek mikrostruktury materiálu zpracovaného s teplotou předehřevu 400 °C	49
Obr. 5-10 Snímek nezpracovaného materiálu využitého při stavbě s teplotou předehřevu 400 °C (zvětšení: 500)	51
Obr. 5-11 Rozdělení zkušební tělesa na samotné těleso (šedá barva) podpory (žlutá barva) a stavební platformu (modrá barva).....	52
Obr. 5-12 Konečno-prvková síť simulace	52
Obr. 5-13 Výsledná simulovaná deformace pro teplotu předehřevu 100 °C po odříznutí lamel (zkušební těleso je stále uchyceno ke stavební platformě, která je v obrázku potlačena)..	54
Obr. 5-14 Výsledky simulací procesu.....	55
Obr. 5-15 Zarovnání CAD modelu se síťovým modelem ze skenování	56
Obr. 5-16 Výsledky deformace zkušební tělesa s teplotou předehřevu 400 °C	56
Obr. 5-17 Výsledky deformace zkušební tělesa s teplotou předehřevu 200 °C	57
Obr. 5-18 Výsledky deformace zkušební tělesa s teplotou předehřevu 100 °C	57
Obr. 5-19 Výsledky deformace zkušební tělesa s teplotou předehřevu 22 °C.....	58
Obr. 5-20 Výsledky deformací tištěných nosníků	59

Obr. 5-21 Výsledky zkoušky tahem vybraných vzorků.....	60
Obr. 6-1 Porovnání výsledků simulací a experimentů.....	63

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Rešeršní dotazy a počet výsledků.....	16
Tab. 2 Procesní parametry použité při tisku [7].....	22
Tab. 5-1 Výsledky měření relativní hustoty technologií CT	43
Tab. 5-2 Výsledky měření relativních hustot kostek	44
Tab. 5-3 Výsledky měření drsnosti povrchu vzorků	45
Tab. 5-4 Výsledky měření tvrdosti vzorků	45
Tab. 5-5 Vliv teploty předehřevu na šířku tavné lázně.....	49
Tab. 5-6 Chemické složení prášku před a po stavbě s teplotou předehřevu základové desky 200 °C a 400 °C.....	50
Tab. 5-7 Procesní parametry vstupující do simulace.....	53
Tab. 5-8 Výsledky deformací jednotlivých simulovaných nosníků	54
Tab. 5-9 Výsledky deformací tištěných nosníků	58
Tab. 5-10 Výsledky tahových zkoušek (průměrné hodnoty všech měření).....	60
Tab. 6-1 Srovnání mechanických vlastností IN-939 po tepelném zpracování uváděných výrobcem [21] s výsledky dosaženými předehřevem základové desky	64

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Seznam jednotlivých 3D návarů a jejich procesních parametrů

Číslo vzorku	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mms⁻¹]	Hustota energie [Jmm²]
1	100	100	20,0
2	100	200	10,0
3	100	300	6,7
4	100	400	5,0
5	100	500	4,0
6	200	150	26,7
7	200	200	20,0
8	200	300	13,3
9	200	400	10,0
10	200	500	8,0
11	200	600	6,7
12	200	700	5,7
13	200	800	5,0
14	300	250	24,0
15	300	300	20,0
16	300	400	15,0
17	300	500	12,0
18	300	600	10,0
19	300	700	8,6
20	300	800	7,5
21	300	900	6,7
22	300	1000	6,0

Číslo vzorku	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mms⁻¹]	Hustota energie [Jmm²]
23	300	1100	5,5
24	400	300	26,7
25	400	400	20,0
26	400	500	16,0
27	400	600	13,3
28	400	700	11,4
29	400	800	10,0
30	400	900	8,9
31	400	1000	8,0
32	400	1100	7,3
33	400	1200	6,7
34	400	1300	6,2
35	275	700	7,9
36	275	760	7,2
37	275	800	6,9
38	150	400	7,5
39	150	700	4,3
40	100	350	5,7