

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled a analýza nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě

Overview and analysis of tool materials used in additive manufacturing

AUTOR: David Stárek
STUDIJNÍ PROGRAM: B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Vladislav Andronov

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stárek** Jméno: **David** Osobní číslo: **483380**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přehled a analýza nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě

Název bakalářské práce anglicky:

Overview and analysis of tool materials used in additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou 3D tisku.
2. Rešerše dostupných nástrojových materiálů používaných v oblasti 3D tisku.
3. Porovnání mechanických vlastností vybraných materiálů.
4. Shrnutí výsledků a závěrečné vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

Aktuální dostupné materiály firem ConceptLaser, EOS, Renishaw, SLM, Triumph TURK, Christoph, Horst ZUNKO, Christin AUMAYR, Harald LEITNER a Marianne KAPP. Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte [online]. 2019, 164(3), 112-116 [cit. 2021-03-22]. ISSN 0005-8912. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-019-0835-z

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vladislav Andronov, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Vladislav Andronov
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma: „Přehled a analýza nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vladislava Andronova, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

Podpis:

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší dostupných nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě. V teoretické části této práce je popsána technologie kovového 3D tisku, detailněji je zde představena technologie DMLS, pro kterou se nástrojové materiály uvedené v této práci hlavně využívají. Dále v rešeršní části práce jsou popsány benefity 3D tisku nástrojů a nářadí oproti konvenční výrobě a jsou zde zmapovány dostupné nástrojové materiály použitelné pro aditivní výrobu. Praktická část práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností materiálu Uddeholm Heatvar a porovnáním naměřených hodnot s hodnotami získanými z rešeršní části. V závěru praktické části je vytvořen ucelený přehled získaných informací o nástrojových materiálech z rešeršní části a praktické části. Tento ucelený přehled může posloužit expertům z odborné oblasti a přinést povědomí o nových, pro někoho ještě neobjevených materiálech, využitelných pro výrobu nářadí a nástrojů.

Klíčová slova:

Aditivní výroba, 3D tisk, DMLS, benefity 3D tisku, nástrojová ocel, Uddeholm Heatvar, mechanické zkoušky, přehled nástrojových materiálů

Abstract

This bachelor thesis deals with a search of available tool materials used in additive manufacturing. The theoretical part of this work describes the technology of metal 3D printing, more detailed is the DMLS technology, for which the tool materials mentioned in this work are mainly used. Furthermore, the research part of the thesis describes the benefits of 3D printing of tools over conventional production and maps the available tool materials usable for additive production. The practical part of the work deals with the investigation of the mechanical properties of the material Uddeholm Heatvar and the comparison of the measured values with the values obtained from the research part. At the end of the practical part, a comprehensive overview of the obtained information about tool materials from the research part and the practical part is created. This comprehensive overview can serve experts in the field and bring awareness to new, for some not yet discovered materials, usable for the production of tools and instruments.

Keywords

Additive manufacturing, 3D printing, DMLS, benefits of 3D printing, tool steel, Uddeholm Heatvar, mechanical tests, overview of tool materials

Poděkování

Především bych tímto chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Vladislavu Andronovovi za vedení práce, jeho ochotu a konzultování práce i v nelehké době pandemie.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítovi Novákovi za pomoc při realizaci mechanických zkoušek pro praktickou část.

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost během celé doby studia.

Obsah

Úvod	10
1. Seznámení s problematikou 3D tisku.....	11
1.1. 3D tisk kovů	11
1.1.1. Technologie Lasem beam melting (LBM)/ Direct metal laser sintering (DMLS).....	12
1.2. Postprocessing aditivně vyrobených nástrojů	14
1.2.1. Tepelné zpracování.....	14
1.2.2. Chemicko-tepelné úpravy	15
1.3. Orientace 3D tisku.....	16
2. Benefity 3D tisku ve výrobě nástrojů a nářadí	18
2.1. Konformní chlazení.....	18
2.1.1. Porovnání konvenčního a konformního chlazení.....	19
2.2. Odlehčené struktury	20
2.3. Hybridní stavba.....	21
3. Rešerše dostupných nástrojových materiálů.....	23
3.1. Požadavky na nářadí a materiál	23
3.2. Ocel 1.2709	24
3.2.1. Porovnání mechanických vlastností 1.2709.....	24
3.3. Ocel 1.2344	28
3.3.1. Porovnání mechanických vlastností 1.2344.....	29
3.4. Böhler W360 AMPO	32
3.4.1. Mechanické vlastnosti Böhler W360 AMPO.....	33
3.5. Uddeholm AM Corrax.....	34
3.5.1. Porovnání mechanických vlastností Uddeholm AM Corrax.....	35
3.6. Böhler M789 AMPO	39
3.6.1. Porovnání mechanických vlastností Böhler M789 AMPO.....	39
3.7. Ocel 17-4PH	41
3.7.1. Porovnání mechanických vlastností 17-4PH.....	41
3.8. Uddeholm Heatvar.....	43
3.8.1. Porovnání mechanických vlastností Uddeholm Heatvar.....	43
4. Praktická část.....	47
4.1. Zkouška tahem.....	48

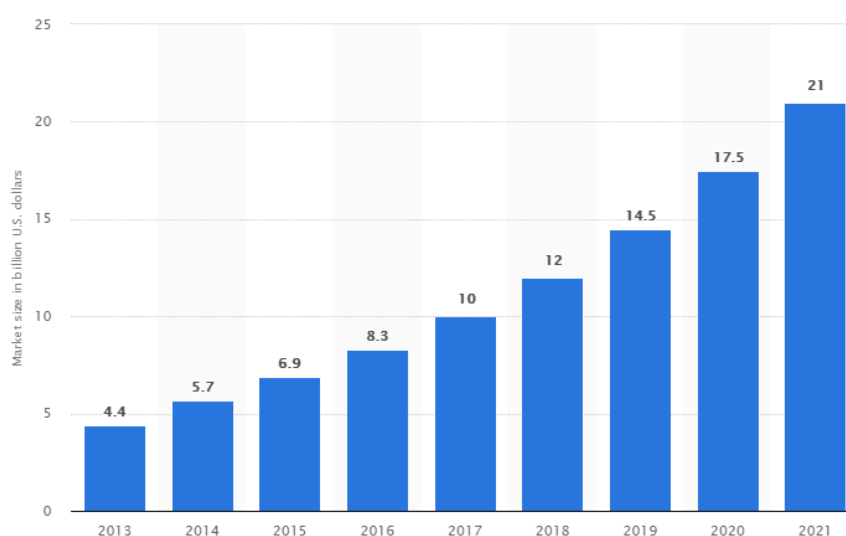
4.1.1.	Zkušební tělesa.....	49
4.1.2.	Naměřené hodnoty	50
4.1.3.	Analýza lomových ploch.....	51
4.2.	Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy.....	53
4.2.1.	Zkušební tělesa.....	54
4.2.2.	Naměřené hodnoty	55
4.2.3.	Analýza lomových ploch.....	56
4.3.	Porovnání mechanických vlastností s hodnotami získanými rešetřící... 58	
4.4.	Přehled materiálů.....	59
	Závěr	62

Seznam zkratek

ASTM	American society for testing materials
3D	3-dimensional
RP	Rapid prototyping
CAD	Computer-aided desing (počítačem řízené projektování)
AM	Additive manufacturing (aditivní výroba)
IT	Information technology
LBM	Laser beam melting
DMLS	Direct metal laser sintering
MS	Maraging steel
SLM	Selective laser melting
TZ	Tepelné zpracování
CVD	Chemical vapor deposition
PVD	Physical vapor deposition
PN	Plazmová nitridace
HPDC	High pressure die casting
DP	Diplomová práce
HIP	Hot isostatic pressing
BP	Bakalářská práce
ČVUT	České vysoké učení technické

Úvod

Aditivní výroba se stává stále více rozšířenou a oblíbenější technologií napříč různými průmysly. Již se můžeme setkat s použitím těchto technologií v odvětvích jakou je lékařství, kosmonautika, letectví, stavebnictví a v neposlední řadě strojírenství. Na své popularitě získala díky nesporným výhodám oproti tradičním technologiím, výhodám jako jsou rychlost výroby prototypů, tvorba tvarově složitých součástí, výroba odlehčených struktur, variabilita materiálů a jiné.



Obrázek 1 - Velikost celosvětového trhu 3D tisku zhodnocena v bilionech dolarů [1]

Obrázek 1 jasně potvrzuje rostoucí trend využití 3D tisku, hodnota celého trhu od roku 2013 do dnešního dne stoupla o 16,6 bilionu dolarů. Tato statistika je důkazem toho, že je aditivní výroba skvělá alternativa konvenčních metod, zvláště pokud vývoj strojů, materiálů a jiných parametrů spojených s 3D tiskem bude pokračovat. [1]

Škála tisknutelných materiálů je obrovská, můžeme tisknout materiály jako plasty, kovy, keramiky, beton, sklo a spoustu dalších. Velmi specifickou skupinou materiálů pro 3D tisk jsou nástrojové materiály, které se nejčastěji využívají pro tisk forem a nástrojů s nimi spojenými. Tématem nástrojových materiálů se zabývá tato bakalářská práce, měla by čtenáři ujasnit problematiku nástrojových materiálů, seznámit ho s nabídkou trhu a poskytnout shromážděné informace.

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši dostupných nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě, provést analýzu materiálů získaných v rešerši, provést mechanické zkoušky nové nástrojové oceli a následně je vyhodnotit. Závěrečným cílem práce je zpracování tabulkového přehledu nástrojových materiálů používaných v oblasti 3D tisku.

1. Seznámení s problematikou 3D tisku

ASTM definoval aditivní výrobu jako „proces spojování materiálů k výrobě objektů z dat 3D modelu“. [2] Aditivní výroba je termín pro to, co se dříve nazývalo Rapid prototyping, a co se zjednodušeně popisuje jako 3D tisk.

V 80. letech minulého století se aditivní výroba dostala do popředí hlavně v oddělení leteckého průmyslu, převážně kvůli rychlé výrobě prototypů. V mnoha případech šlo o ušetření finančních prostředků a měsíců práce na vývoji zařízení, protože prototypy nebylo nutné obrábět konvenčními metodami. V těchto letech bylo nalezeno spoustu nových aplikací pro využití aditivních technologií. [3]

Samotný termín RP je v praxi využíván pro výrobu prototypů určených k prezentaci dílů, potažmo výrobě dílu před finálním vydáním nebo komercializací. Je tedy vyroben prototyp nebo základní model, od kterého se odráží další vývoj konečného výrobku. V oblastech managementu a IT se výraz RP využívá k popisu procesu vývoje obchodních a softwarových řešení po částech, což umožňuje testovat nápady a poskytovat zpětnou vazbu již během procesu vývoje.

Vzhledem ke zlepšení kvality výstupů se 3D tiskárny začali využívat pro výrobu konečných výrobků, proto byla zavedena nová terminologie aditivní výroba (additive manufacturing). Základním principem aditivní výroby je přímá výroba dílů, bez nutnosti plánování dalších procesů, z třírozměrného modelu vytvořeného pomocí systému CAD. Podstatou 3D tisku je přidávání materiálů po vrstvách, každá vrstva je průřez původního CAD modelu, čím tenčí vrstva bude, tím bude přesnější výsledný díl. Hlavní rozdíly mezi stroji pro aditivní výrobu jsou materiály, které můžeme použít, technologie nanášení vrstev a způsob, jakým jsou tyto vrstvy spojeny. Tyto faktory určují přesnost konečného dílu, materiálové vlastnosti, rychlost tisku, velikost pracovního prostoru a celkové náklady, jak na proces tisku, tak na stroj. [2, 3]

1.1. 3D tisk kovů

Nejčastěji používaným zdrojem materiálu aditivní výroby kovů je prášek nebo drát, který se selektivně taví zdrojem tepla a zpevňuje se při následném ochlazení, aby vznikla výsledná součást. V posledních letech 3D tisk přitáhl velikou pozornost díky výhodám, jako je skoro neomezená svoboda designu, rychlá tvorba prototypů a nízké hmotnosti struktur. Díky pokroku technologie se zlepšila hustota a kvalita dílů. Mezi mnoha aditivními technologiemi jen hrstka dokáže vyrábět kovové součásti, které splňují požadavky aplikací v průmyslovém oddělení. [2, 4]

Samotné technologie se v zásadě liší dle původního stavu materiálové suroviny, podle vazebného mechanismu mezi spojovanými vrstvami, podle objemu výroby a jiných faktorů. Nejčastějšími technologiemi aditivní výroby kovů jsou Laser beam melting (tavení pomocí laserového paprsku), Electron beam melting (tavení pomocí elektronového paprsku) a Laser metal deposition (laserové práškové navařování). V literatuře se můžeme setkat i s jinými názvy pro tyto technologie, různorodé pojmenování je způsobeno hlavně patentováním jednotlivých názvů. [4]

Norma ISO/ASTM 52900:2015 [5] rozděluje aditivní výrobu podle technologie nanášení a spojování materiálu. Normu by měla v dohledné době nahradit její aktualizovaná verze ISO/ASTM FDIS 52900.

Rozdělení dle ISO/ASTM 52900:2015:

- Binder jetting (Tryskání pojiva)
- Directed energy deposition (Přímé nanášení energií)
- Material extrusion (Vytlačování materiálu)
- Material jetting (Tryskání materiálu)
- Powder bed fusion (Slinování prášku v loži)
- Sheet lamination (Laminace plátů)
- Vat photopolymerization (3D tisk fotopolymerizací)

Z tohoto rozdělení je pro tuto práci stěžejní odvětví Powder bed fusion, protože prášky nástrojových ocelí se nejčastěji zpracovávají technologiemi, které do ní spadají. Další kapitola se zabývá právě technologií LBM/DMLS.

1.1.1. Technologie Lasem beam melting (LBM)/ Direct metal laser sintering (DMLS)

Proces, při kterém se prášek v loži v tenkých vrstvách, typická tloušťka je (20-60) μm , natavuje pomocí počítačem řízeným laserovým paprskem. Kovový prášek je dodáván buď to násypkou, nebo je zajišťován zásobníkem. Pro rovnoměrné rozložení prášku se používá nivelační přístroj, nebo zarovnávací lišta. Pomocí galvanizovaného zrcátka je laserový paprsek s výkonem mezi 20 W a 1 KW směřován rychlostí až 15 m/s k práškové vrstvě. Lasery využívané při této technologii jsou především vláknové lasery s režimem kontinuálních vln, které vyzařují blízké infračervené záření o vlnové délce (1060-1080) nm. Podle průřezu samotného dílu je prášek selektivně taven laserovým paprskem v rovině X a Y, při překročení teploty tání materiálu se prášek úplně roztaví v místech určených průřezem modelu a tvoří vrstvu dílu. [4, 6]

Objemová energie přiváděná do práškové vrstvy způsobuje nejen roztavení materiálu, ale také se dostane do okolí natavované vrstvy v důsledku vedení tepla. Objemová energie se vypočítá dle vzorce:

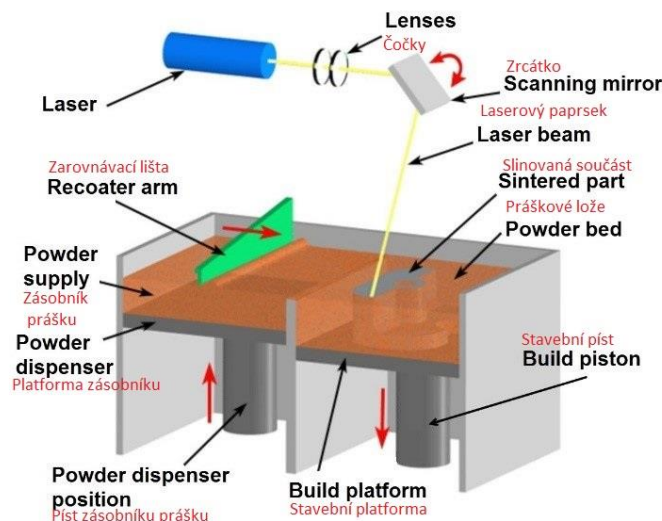
$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} [J \cdot mm^{-3}]$$

kde $P [W]$ je nominální výkon laseru, $v [mm/s]$ je rychlost laseru, $h [mm]$ je šrafovací vzdálenost a $t [mm]$ je tloušťka vrstvy. [4]

Po dokončení vrstvy se lože posune níže a nanese se nová vrstva prášku a znovu probíhá proces selektivního tavení laserem. Samotný proces tedy vlastně spočívá v třech jednoduchých krocích opakujících se dokola, a to:

- nanesení vrstvy prášku
- selektivní tavení laserem
- tuhnutí taveniny

Po dokončení tisku dílu můžeme neroztavený zbylý prášek znovu použít.



Obrázek 2: LBM/DMLS-3D schéma technologie [7]

Často jsou součásti připevněné k stavební desce pomocí tzv. nosných podpor, ty jsou nezbytné k odvodu tepla a fixaci dílů, zejména pro podepření převislých ploch. Pro úplnou finalizaci dílu je nutné podpory odstranit. Krom podpory lze deformace snížit i jinými způsoby, např. předehřátím stavební desky, tím docílíme snížení teplotních rozdílů ve vrstvách dílu, a tedy i snížení napětí. Proces se provádí v uzavřené komoře, do které se přivádí inertní plyn, obsah zbytkového kyslíku je menší než 0,1 %. Nejčastější inertní plyny používané u této technologie jsou dusík, nebo argon. Inertní plyn přivádíme z více důvodů, předcházíme tím nežádoucím reakcím mezi práškem kovu a okolním prostředím, dále inertním plynem zabraňujeme rozšiřování dýmů z natavování. [4]

1.2. Postprocessing aditivně vyrobených nástrojů

1.2.1. Tepelné zpracování

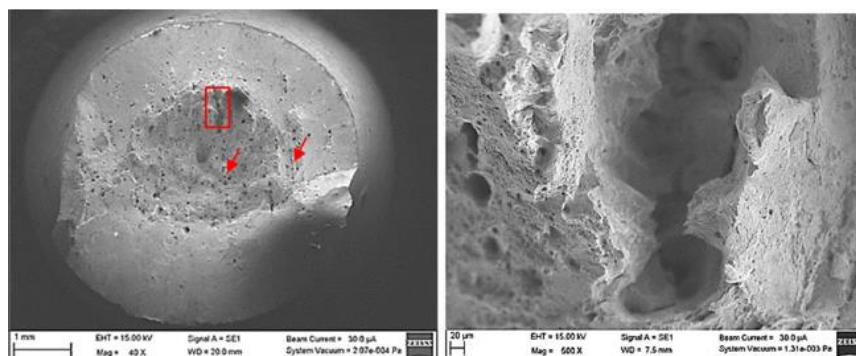
Pro dosažení požadovaných mechanických a chemických vlastností je velmi často nutné nástrojové oceli tepelně zpracovávat. Při tepelném zpracování materiálu dochází k přeměně struktury v tuhém stavu. Tepelně zpracované oceli jsou tvrdší, pevnější a odolnější. Mezi nejčastěji používané druhy tepelného zpracování tisknutých nástrojových ocelí patří žíhání a stárnutí (například často používaná ocel MS1 - angl. Maraging steel, maraging je zkratka pro martensite aging v překladu martenzitická stárnutí). Mezi méně často používané tepelné zpracování patří kalení, potažmo kalení s následným popouštěním.

Yasa et al. [8] zkoumali mikrostrukturu a mechanické vlastnosti martenzitické oceli CL50WS od společnosti Concept Laser (ekvivalentně značené jako DIN 1.2709, nebo X3NiCoMoTi 18-9-5). V této studii byl testován účinek stárnutí s různými časy a teplotami na vzorky vyrobené pomocí technologie SLM. Bylo zjištěno, že stárnutí vedlo ke zvýšení tvrdosti a pevnosti srážením intermetalických sloučenin. Mezní pevnost v tahu se zvýšila o 70 %, zatímco tvrdost se zvýšila o 45 %. Je však třeba poznamenat, že prodloužení při přetržení je výrazně nižší, hodnota se snížila z původních 13,3 % na 1,6 % po stárnutí oceli. Pokud jde o fraktografii, lomové plochy po Charpyho testech při pokojové teplotě odhalily, že u stárnutého vzorku nedošlo téměř k žádné boční expanzi.

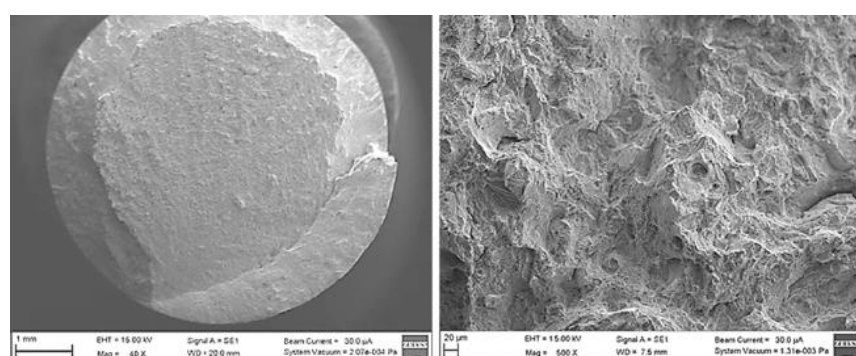
Podobné výsledky byly získány Tanem et al. [9], zabývali se mechanickými vlastnostmi martenzitické oceli 18Ni-300 tisknuté pomocí technologie SLM. Vzorky byly stárnuty při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin. Testy prokázaly, že se tvrdost vzorku zvýšila z původních 35-36 HRC na 51-55 HRC. Mez pevnosti v tahu se zvýšila z 1165 MPa na 2014 MPa, zatímco prodloužení degradovalo z hodnoty 12,44 % na 3,28 %, kvůli snížené houževnatosti vlivem tepelného zpracování. Morfologií bylo prokázáno, že stárnuté vzorky prokazují křehký lom.

Hrbáčková et al. [10] analyzovali vysokopevnostní ocel MS1 (1.2709) žíhanou při teplotě 850 °C s výdrží 1 hodiny, stárnutou při teplotě 480 °C po dobu 3 hodin a poté chlazenou vzduchem. Také zkoumali hliníkovou slitinu AlSi₃Mg žíhanou pro snížení pnutí při teplotě 300 °C při výdrží 2 hodin. Cílem práce bylo sledovat změnu mechanických vlastností a mikrostruktury po TZ výrobků AM. Testované prášky byly od firmy EOS. Napětí na mezi kluzu u MS1 po tepelném zpracování se zvýšilo o 58 %, maximální pevnost v tahu o 61 % a prodloužení oceli bylo sníženo o 4,1 %. Tvrdost vzrostla o 181 HV5. Fraktografie ukázala, že všechny přetržené vzorky měly tvárný lom. Porozita

MS1 se nijak výrazně nezměnila. Mikrostruktura MS1 se změnila z dendritické struktury na mikrostrukturu s karbidy vyloučenými na hranicích zrn.



Obrázek 3- Mikroskopický snímek přetrženého povrchu žíhaného vzorku [11]



Obrázek 4- Mikroskopický snímek přetrženého povrchu stárnutého vzorku [11]

Na Obrázek 3 a Obrázek 4 je výrazně vidět vliv tepelného zpracování na druh lomu přetrženého vzorku. Šipky na Obrázek 3 ukazují na řetězec důlků žíhané součásti.

1.2.2. Chemicko-tepelné úpravy

Provádí se za účelem zlepšení provozního výkonu nástroje, ať už se jedná o odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi, tribologické vlastnosti, životnost nástroje a jiné. Povlakování pomocí metod CVD (chemická depozice z plynné fáze), PVD (fyzikální depozice z plynné fáze) nebo PN (plazmová nitridace) patří mezi ty nejznámější a nejpoužívanější.

Asnafi [12] ve studii testoval vzorky z oceli AM Corrax od společnosti Uddeholm. Vzorky byly podrobeny korozním testům, testování solným postřikem a cyklické polarizaci. Vzorky byly povrchově ošetřeny PVD povlaky-TiN, CrN a DLC (uhlík podobný diamantu) při teplotách pod 450 °C. Dva vzorky byly ošetřeny plazmovou nitridací, první z nich byl ošetřen nitridací vhodnou pro konvenční oceli (ve studii označeno jako PN1) a druhý byl ošetřen nitridací vhodnou pro nerezové oceli (označeno jako PN2). Testy dokázaly, že odolnost proti korozi je velmi vysoká a odolnosti povlaků se dají shrnout takto:

$$\text{PN2} > \text{CrN} > \text{TiN} > \text{DLC} > \text{PN1}$$

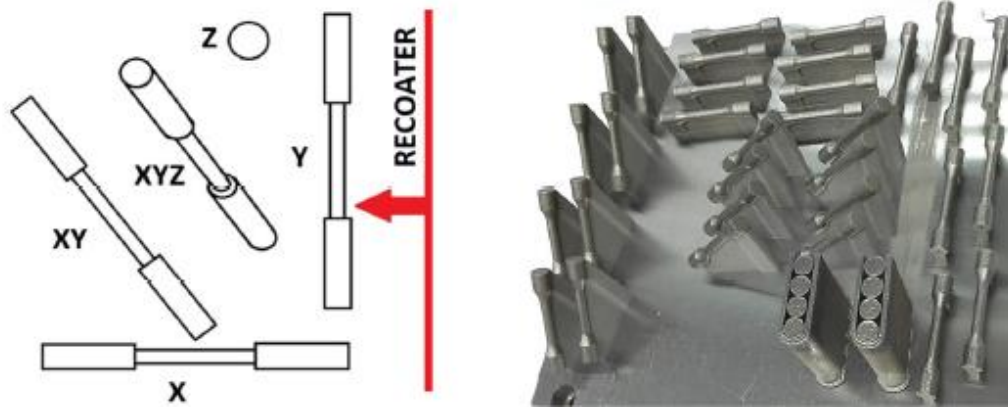
1.3. Orientace 3D tisku

Volba orientace součásti na tiskové podložce má přímý vliv na to, jak přesná bude reprodukce součásti původních CAD dat. Orientace má také vliv na čas tisku, pokud bychom například tiskli válec, který bude postaven na podložce, bude čas tisku delší, než kdyby válec na podložce ležel a tiskly se vrstvy průřezu obdélníku. To je zapříčiněno tím, že u většiny strojů trvá proces vrstvení déle. Orientace dílu ve stroji může ovlivnit přesnost dílu. Vzhledem k tomu, že mnoho dílů může mít podél několika os složité prvky, nemusí existovat ideální orientace pro konkrétní díl. Kromě toho může být důležitější zachovat geometrii některých prvků ve srovnání s ostatními. Orientace dílu má vliv i na další faktory, jako jsou například potřeba podpor, nebo povrchová úprava oblastí (snažíme se, aby důležité povrchy nebyly v kontaktu s nosnými konstrukcemi). [3, 13]



Obrázek 5- Vliv orientace tisku na kvalitu dílu a rozměrovou přesnost [14]

Monkova et al. [11] ve své studii použili dvě tiskárny, EOS M290 a EOS M280, hlavním rozdílem mezi nastavenými parametry byl výkon laseru. Vzorky byly vytištěny v různých orientacích v pracovním prostoru stroje. Orientace tisku jednotlivých vzorků je zobrazena na Obrázek 6. Zkoumání vlivu orientace na vlastnosti vzorků bylo vyhodnoceno tak, že nejvýhodnější nastavením orientace je kombinace YZ. Tepelně nezpracované vzorky byly podrobeny morfologii lomu, kde bylo zjištěno, že vykazují velmi tvárný lom. Bylo vyzpozorováno, že vzorky tištěné a žíhané na jednom pracovišti a testované na jiném (po 4 měsících) vykazovali odlišné výsledky, mez kluzu se snížila o 100 MPa. Autoři tvrdí, že je to způsobeno přirozeným stárnutím. Proces žíhání má pozitivní vliv na tažnost vzorků tištěných ve všech směrech. Vytvrzené vzorky vykazovali nižší tažnost, křehčí lom a dle předpokladů vyšší Youngův modul cca o 20-30 GPa než vzorky tepelně nezpracované. Nejlepších hodnot meze kluzu u vytvrzených vzorků dosahovali díly tištěné v poloze X a Y.

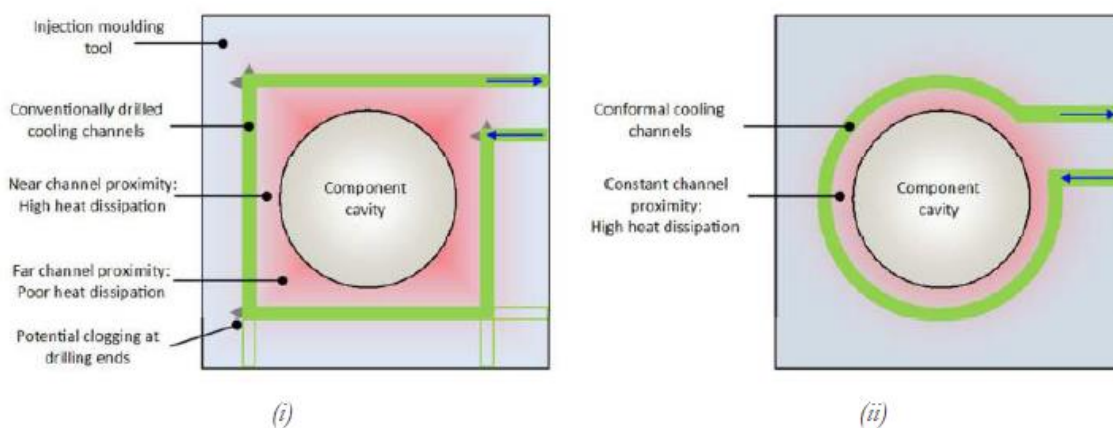


Obrázek 6- Orientace vzorků ve studii Monkova et al. [11]

2. Benefits 3D tisku ve výrobě nástrojů a nářadí

2.1. Konformní chlazení

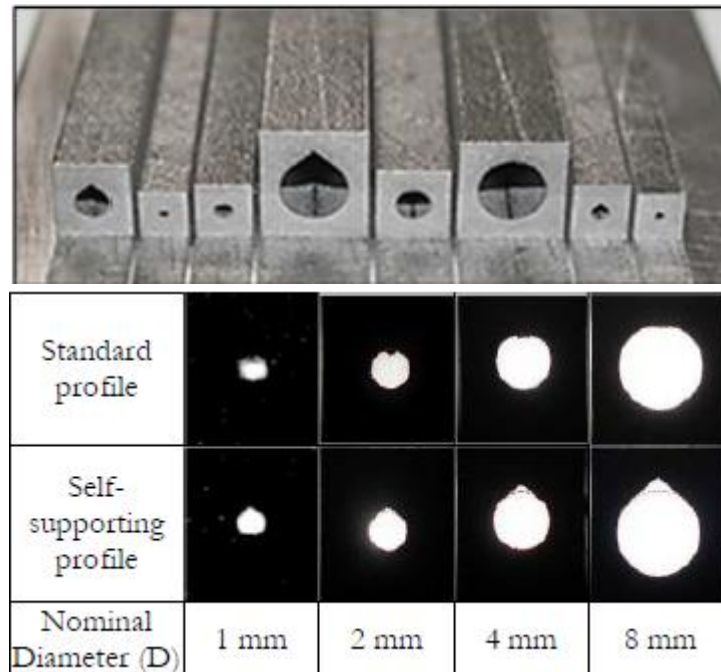
Technologie konformního chlazení byla poprvé představena profesorem Sachsem roku 1997 na konferenci Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF). Chladicí systém vstřikovacích forem přímo ovlivňuje jak produktivitu, délku doby cyklu, tak i finální kvalitu dílu. Ve srovnání s konvenčními vrtanými chladicími kanály, kde samotná technologie vrtání výrazně omezuje svojí lineární povahou schopnost přizpůsobit kanál obrysu dutiny formy, mají konformní kanály současně zlepšit účinnost chlazení, ale i jeho rovnoměrnost. Konformní chladicí systém je však velmi obtížné vyrobit pomocí konvenčních metod, tudíž se pro součásti s konformním chlazením využívá technologií 3D tisku. Samotná účinnost chladicího systému je zvláště závislá na charakteristikách chladicího kanálu, jako je blízkost k dutině formy, plocha průřezu, délka, trasa a drsnost povrchu. Nedokonalosti v blízkosti chladicích kanálů má za následek nerovnoměrný odvod tepla, což vede k prodloužení doby cyklu, deformaci součásti, vnitřnímu pnutí a snížení životnosti nástroje z důvodu tepelného namáhání. Technologie 3D tisku umožňuje geometrickou flexibilitu těchto chladicích systémů, například dovoluje tisk různých průřezů chladicího kanálu, nejen průřezu kruhového. [15, 16]



Obrázek 7-i) konvenčně vrtané chlazení, ii) konformní chlazení [16]

Aby bylo možné realizovat tisk konformního chlazení je nutné si nejprve kvantifikovat vlastnosti vyrobiteľnosti a kvalitu drsnosti kanálů. Tisk válcových průřezů kanálů může vést k destrukci geometrie nebo vysoké drsnosti povrchu kvůli přítomnosti obloukových segmentů, které mají mělký úhel sklonu vzhledem ke konstrukční platformě. Těmto mělkým úhlům se zpravidla snažíme vyvarovat, nebo se jim alternativně lze vyhnout začleněním vrcholu do profilu kruhového průřezu. Pokud se taková alternativní úprava použije, je nutné brát zřetel na její vliv na proudění chladicí kapaliny a konstrukční vlastnosti součásti v důsledku zavedení ostrých rohů. Specifikace drsnosti

povrchu chladícího kanálu je nutná kvůli souvisejícímu vlivu na tlakové ztráty a vlastnosti přenosu tepla. [16]



Obrázek 8- Řešení mělkého úhlu pomocí zavedení vrcholu [16]

2.1.1. Porovnání konvenčního a konformního chlazení

Berger et al. [17] zkoumali, jak zefektivnit chladící proces u formy vstřikovaného dílu. Při porovnávání více druhů chladících způsobů formy, se jako nejúčinnější metoda chlazení prokázalo chlazení pomocí konformních kanálů. Celkový čas cyklu dokázali zkrátit o 10 s.

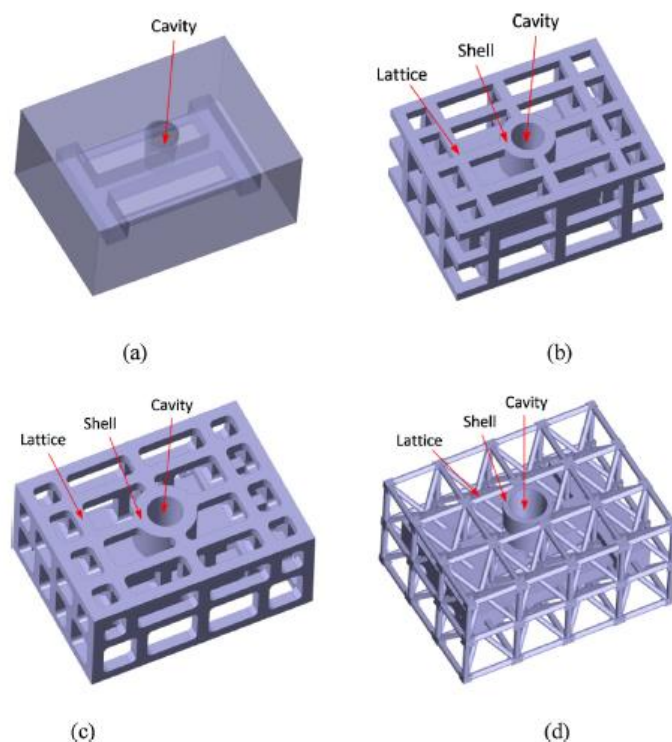
Armillotta et al. [18] v experimentální studii navrhli formu s konformním chlazením vyrobiteľnou pomocí aditivních technologií. Byl navržen blok formy pomocí simulací a vytisknut pomocí technologie SLM. Tento blok byl využit při výrobě vzorků odlitku ze slitiny zinku, kde nahradil blok s konvenčními chladícími kanály. Byly testovány různé kombinace procesů, aby se co nejlépe využil zlepšený chladící výkon. Výsledky dokazují, že konformní chlazení zlepšuje povrchovou kvalitu odlitků, kvůli vyšší a rovnoměrnější rychlosti chlazení. Dalšími výhodami jsou zkrácení doby chlazení a zmenšení pórovitosti. Nástroj byl testován ve výrobě, kde forma podstoupila 2000 cyklů a vytisknutá vložka neprojevila žádné známky poškození.

Z předložených studií se dá jasně prokázat, že užití konformního chlazení má velmi přínosný užitek, dochází k snížení doby cyklu, rovnoměrnější rychlosti chlazení a ke zlepšení kvality vstřikovaného dílu.

2.2. Odlehčené struktury

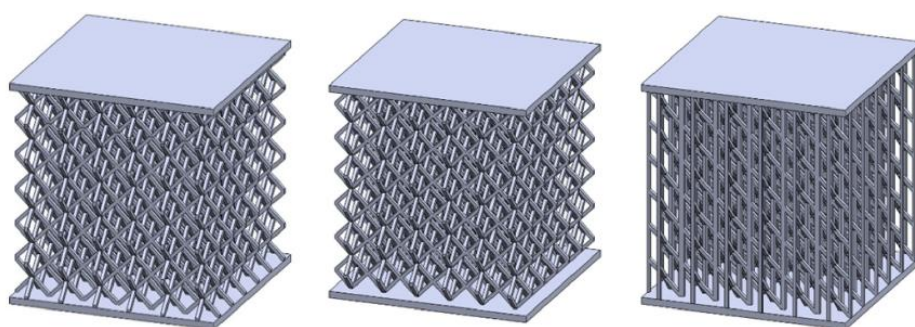
Velikým benefitem aditivní výroby je schopnost vyrábět složité vnitřní geometrie, včetně odlehčených struktur, které nejsou kompatibilní s tradičními způsoby výroby. Odlehčené struktury (anglicky Lattice structures) nabízejí jedinečné funkční vlastnosti, mezi které patří vysoká měrná pevnost, tuhost, odstranění zanášených částí, řízení přenosu tepla, tlumení a absorpce mechanické energie. Odlehčené struktury vykazují sníženou tepelnou vodivost ve srovnání s pevnými materiály, což umožňuje výrobu vstřikovacích forem se zvýšenou kontrolou přenosu tepla. Umožnění toku chladiva skrze odlehčenou strukturu může poskytnout příležitost ke zvýšení rozptylu tepla do chladicího média. Použitím takových struktur dochází k úspoře materiálu, ale i času tisku. Struktury obsahující velké buňky poskytují vyšší pružnost než struktury s menšími buňkami. [16, 19]

Kang et al. [20] experimentálně navrhli formu pro odlitky, která byla vyrobena pomocí aditivních technologií. Zavedli opatření pro rovnoměrnější chlazení formy a lepší cirkulaci chladicího média. Těmi opatřeními byly využití odlehčených struktur a použití konformního chlazení. Taktéž porovnávali tři různé odlehčené struktury testováním pomocí tlakové zkoušky. Experimentální výsledky odhalily, že nový design pískových forem ušetřil nejméně 60 % písku a zkrátil dobu setřásání nejméně o 20 %.

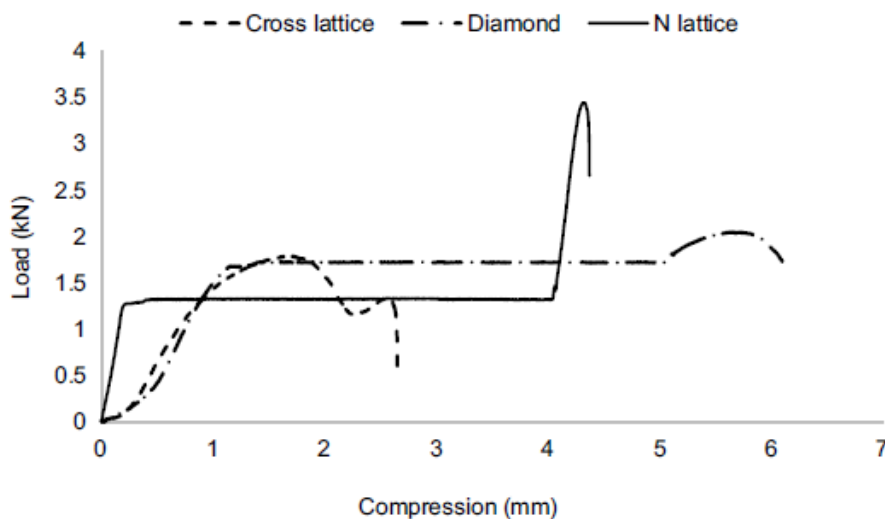


Obrázek 9- Design formy pro odlitky, (a) běžná forma, (b) odlehčená forma 1, (c) odlehčená forma 2, (d) odlehčená forma 3 [20]

Brooks et al. [21] ve své studii zkoumali efektivitu využití kombinace konformního chlazení a aplikace odlehčených struktur. Pro svůj experiment navrhli tři různé odlehčené struktury, které poté testovali tlakovou zkouškou. Mechanické testování struktury ukázalo, že se výrazně mění kompresní charakteristika. Nejkonstantnější charakteristiky dosáhla struktura křížová, na Obrázek 10 první zleva, na Obrázek 11 označena jako cross lattice. Výsledky virtuální studie vstřikování plastu ukázaly pozitivní výsledky využití této kombinace, a to snížení doby chlazení o 26,34 % oproti běžným chladicím kanálkům. V závěru bylo zhodnoceno použití konvenčních výrobních metod na výrobu vložek pro chlazení forem jako velmi nedostatečné, kvůli velmi omezenému designu součásti.



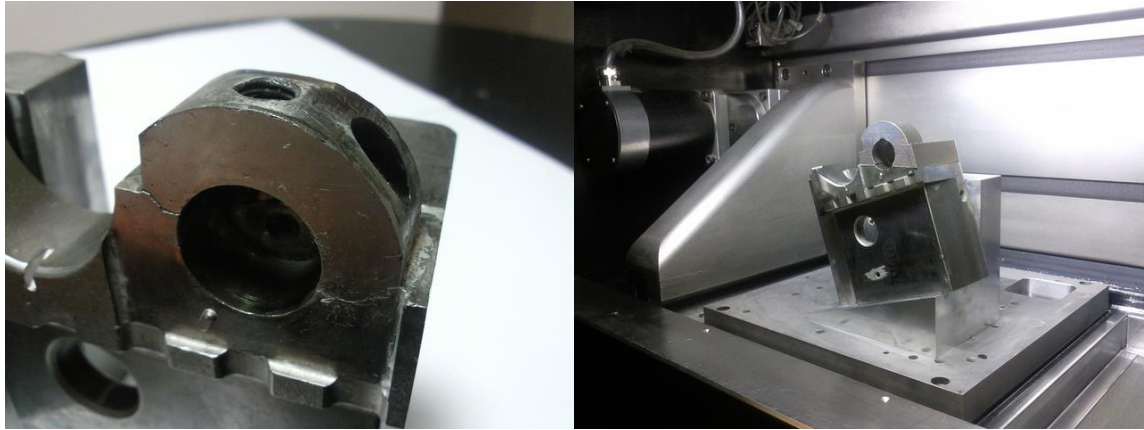
Obrázek 10- Testované struktury, zleva-křížová, diamantová a N struktura [21]



Obrázek 11- Výsledky tlakové zkoušky odlehčených struktur [21]

2.3. Hybridní stavba

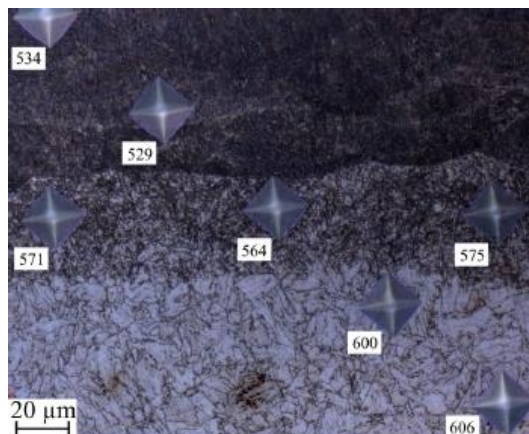
Jedním z důvodů využití hybridní stavby je vysoká cena a dispozice pouze omezeného množství vysokopevnostních ocelí, proto jsou pravidelně nahrazovány konvenčními nástrojovými oceli (1.2311, 1.2343, apod.) v hybridních stavbách. U hybridních nástrojů se základní část vyrábí konvenčními technologiemi, zatímco část určená pro konformní chlazení se vyrábí vrstvou po vrstvě technologií DMLS.



Obrázek 12- Využití technologie hybridní stavby pro opravu poškozené formy [22]

V optimálním případě má základna a aditivně vyráběná část stejné chemické složení. Kvalita takzvané přechodové zóny, což je část oddělující základnu a tištěnou část, má výrazný vliv na životnost v provozu hybridního nástroje. Aby se zabránilo lokálnímu opotřebení, nemůže se tvrdost přechodové zóny výrazně lišit od tvrdosti homogenních částí. [23]

Hatos et al. [23] se zabývali zkoumáním vlastností materiálů u hybridně vyrobených nástrojů. Testovali kombinace materiálů MS1-W722 a MS1-1.2343. Cílem bylo zjistit vliv různých tepelných zpracování na vlastnosti takto hybridně vyrobených nástrojů. U každého nástroje použili jiné tepelné zpracování, těmi byly stárnutí, kalení, kalení s následným dvojitým popouštěním, nitrocementování a nitridace. Dle očekávání zjistili, že tištěná MS1 má větší porositu než konvenčně vyrobené materiály. Studie dokázala, že stárnutí vysokopevnostní oceli a kalení vysokopevnostní oceli mají stejný vliv na její tvrdost. Potvrdila se teze, že nižší odolnost povrchu vzorků z MS1 v porovnání se vzorky z W722 je způsobena z důvodu vyšší porosity. Výsledky studie dokazují, že použitím nitrocementování velmi efektivně zvýšíme odolnost proti opotřebení hybridních nástrojů.



Obrázek 13- Mikrostruktura stárnuté hybridní stavby MS1-W722 (W722 dole, MS1 nahoře, přechodová zóna uprostřed) čísla značí výsledky tvrdosti HV0,3 [23]

3. Rešerše dostupných nástrojových materiálů

3.1. Požadavky na nářadí a materiál

U forem využívaných pro vysokotlaké lití hliníkových dílů (HPDC) je momentálním trendem zvyšování složitosti designu dílů, snižování hmotnosti a zvětšování velikostí dílů, zejména pro automobilový průmysl. Tyto faktory kladou zvýšení nároků na výkon nástrojů používaných pro HPDC. Primárním požadavkem na tištěné nástroje je zlepšení tepelného managementu v porovnání s konvenčně vyrobenými nástroji. Mezi další požadavky patří zvýšení kvality vyrobených dílů, zlepšení životnosti nástrojů, kde se jedná zejména o mechanické vlastnosti nástrojů, nebo kvalitu struktury tištěných dílů. Dále se využitím aditivně vyrobených nástrojů snažíme dosáhnout snížení doby cyklu vstřikování, zvýšení produktivity a snížení nákladů v poměru na jeden vyrobený díl. Samotné vložky forem musí odolávat poměrně nepříznivým podmínkám zapříčiněným vlivem vysokých rozdílů teplot. Materiál musí být navržen tak, aby dokázal odolávat rozdílům tepelných gradientů a vysokým napětím. Volba materiálu má veliký vliv na konečný výkon nástroje.

Studie potvrzují, že je důležité použít systémový, konstrukční a procesní přístup a jako kritérium výběru mít efektivní design. Cílem efektivního návrhu by vždy mělo být zlepšení efektivity a zvýšení výkonu nástroje v provozu, tj. kratší doba cyklu, vyhnutí se zastavení, zlepšení kvality dílů, maximalizace efektivity výroby aj. Zatímco primárními cíli návrhů jsou vysoká účinnost a vysoký výkon v provozu, použití efektivních návrhů povede také k odlehčení nástrojů. [12]

U nástrojů pro HPDC je třeba se vyhnout těmto poruchám [12]:

- Kontrola tepla v důsledku tepelné únavy
- Eroze-mechanické opotřebení, zejména v důsledku rychlosti taveniny
- Koroze kovů v důsledku chemické interakce mezi Al a nástrojovou ocelí (např. vysoký obsah Ni)
- Prasknutí v důsledku mechanického přetížení formy
- Vysoké pórovitosti-špatné vedení teploty, které vede k zvýšení zmetkovitosti
- Roztavená slitina se nataví na formu
- Prasknutí chladicího kanálu-vysoké napětí ve formě na základě špatně navržené konstrukce chladicího kanálu

Asnafi [12] v experimentu dokázal, že vyloučením zmíněných poruch použitím vhodně zvoleného materiálu se zkrátí doba cyklu minimálně o 2,5 % a dojde k zmenšení množství zmetků o 3,4 %. Současně došlo k navýšení životnosti nástroje minimálně o 150 %.

3.2. Ocel 1.2709

Jedná se o martenzitický ocelový prášek, který je určen k vytvrzení pomocí procesu stárnutí. Podle evropské normy je prášek označen jako ocel 1.2709, podle DIN X3NiCoMoTi 18-9-5, dále se můžeme setkat s označením firem EOS MS1, Renishaw M300, Sandvik 18Ni-300, Böhler W722 AMPO a jiné. Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a po tepelném zpracování procesem stárnutí dosahuje vynikající tvrdosti a pevnosti.

Díly vyrobené z tohoto ocelového prášku lze po dokončení tisku snadno obrobit a lze je i dodatečně vytvrdit na tvrdost vyšší než 50 HRC při teplotě 490 °C stárnutím po dobu 6 hodin. Materiálový list firmy EOS udává, že se díly z tohoto prášku dají, jak v pouze vytištěném stavu, tak i v tepelně zpracovaném stavu, obrábět, elektroerozivně obrábět, svařovat, leštit a povlakovat v případě potřeby. Vzhledem k tomu, že se díly tisknou po vrstvách, mají následně určitou anizotropii, kterou lze snížit nebo odstranit vhodným tepelným zpracováním. [24]

Tabulka 1-Chemické složení prášku 1.2709 [24]

1.2709	Chemické složení										
Prvek	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al	P	S	Cr
Obsah [%]	max. 0,03	max. 0,1	max. 0,1	17-19	4,5-5,2	max. 0,8	8,5-9,5	max. 0,1	max. 0,01	max. 0,01	max. 0,5

3.2.1. Porovnání mechanických vlastností 1.2709

Datový list firmy EOS [24] uvádí mechanické vlastnosti pro tisknuté díly bez tepelného zpracování vytisknuté na stroji EOS EOSINT M 280-400 W. Hustota ocelového prášku 1.2709 je 8,0-8,1 g/cm³.

Thermal properties of parts

	As built	After age hardening [2]
Thermal conductivity	typ. 15 ± 0.8 W/m°C typ. 104 ± 6 Btu in/(h ft² °F)	typ. 20 ± 1 W/m°C typ. 139 ± 7 Btu in/(h ft² °F)
Specific heat capacity	typ. 450 ± 20 J/kg°C typ. 0.108 ± 0.005 Btu/(lb °F)	typ. 450 ± 20 J/kg°C typ. 0.108 ± 0.005 Btu/(lb °F)
Maximum operating temperature		approx. 400 °C approx. 750 °F

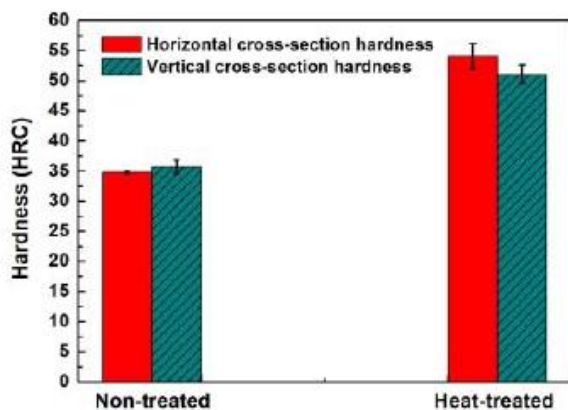
Obrázek 14- Tepelné vlastnosti EOS MS1 [24]

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F) [8]

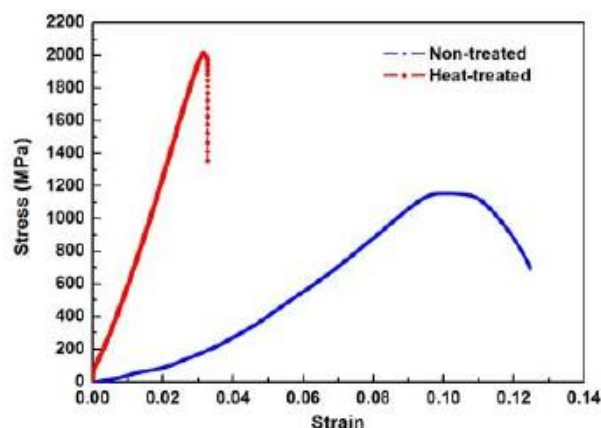
As built	
Tensile strength [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1200 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 150 MPa typ. 160 ± 22 ksi
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 1xx ± 22 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 930 ± 150 MPa typ. 145 ± 22 ksi
Elongation at break [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. (12 ± 4) %
- in vertical direction (Z)	x
Modulus of elasticity [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 150 ± 25 GPa typ. 22 ± 4 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 140 ± 25 GPa typ. 20 ± 4 Msi
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC

Obrázek 15- Mechanické vlastnosti EOS M1 [24]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.1., Tan et al. [9] analyzovali vzorky, které byly tepelně zpracovány, a to stárnutím při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin. Vzorky byly tisknuty na stroji EOS M290 s výkonem laseru 400 W s přehřátím podložky na 40 °C. Po TZ byla zkoumána mikrostruktura povrchové vrstvy a mechanické vlastnosti. Tvrdost vzrostla z rozsahu (35-36) HRC na (51-55) HRC, maximální pevnost v tahu vzrostla z 1165 MPa na 2014 MPa, tažnost se snížila z 12,44 % na 3,28 %. Tištěné vzorky měli po obrobení poměrně nízkou drsnost povrchu, a to 4,16 μm pro horizontální povrchy a 4,79 μm pro vertikální povrchy.



Obrázek 16- Graf tvrdosti před a po TZ analyzovaných vzorků z 1.2709 [9]



Obrázek 17- Závislost tahového napětí na TZ analyzovaných vzorků z 1.2709 [9]

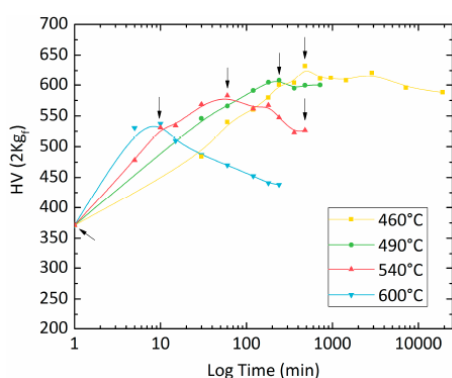
Casati et al. [25] zkoumali vzorky tisknuté technologií SLM z oceli 18-Ni 300 na stroji společnosti Renishaw AM250 s výkonem laseru 200 W, byl proveden výzkum mikrostrukturálního chování a mechanických vlastností stárnutých vzorků. Díky rychlému ochlazení není po stárnutí nutné další tepelné zpracování. Bylo dokázáno, že množství zbytkového austenitu je úměrné tepelným a časovým podmínkám procesu stárnutí. Hlavním důvodem dobrých výsledků pevnosti v tahu a tažnosti jsou zpevňovací mechanismy. Autoři otestovaly pět různých kombinací časů a teplot stárnutí, sledovali, jaký dopad tepelné zpracování bude mít na vzorky. U tepelně nezpracovaného vzorku vyšla mez kluzu 914,9 MPa, mez pevnosti v tahu 1187,6 MPa a prodloužení 6,14 % viz. Obrázek 18. Zkoumaný prášek dodala firma Sandvik Osprey LTD, vyráběný plynovou atomizací.

Condition	γ -Fe Fraction (%)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
as built	11.38 (1.02)	914.9 (12.5)	1187.6 (10.4)	6.14 (1.33)
460 °C 8 h	15.55 (0.73)	1956.8 (43.3)	2017.1 (57.7)	1.51 (0.20)
490 °C 4 h	16.12 (0.57)	1793.3 (96.5)	1814.6 (95.1)	1.20 (0.13)
540 °C 1 h	17.17 (0.68)	1870.3 (53.8)	1956.9 (54.2)	2.07 (0.32)
540 °C 8 h	21.30 (0.77)	1545.9 (103.1)	1655.5 (87.5)	1.77 (0.05)
600 °C 10 min	17.15 (0.68)	1557.2 (140.4)	1659.1 (119.4)	1.60 (0.09)

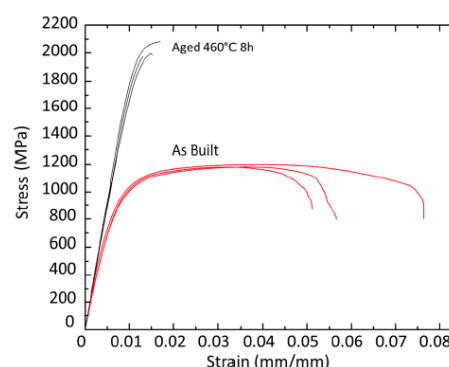
Obrázek 18- Mechanické vlastnosti 1.2709 v závislosti na TZ studie Casati et al. [25]

Výsledky mechanických zkoušek potvrzují tvrzení výrobce prášku, že nejlepší nastavení parametrů procesu stárnutí je teplota 490 °C s výdrží 6-10 hodin. [26] Autoři měli parametry mírně upravené, a to tak, že proces probíhal při teplotě 460 °C po dobu 8 hodin, dosáhli výsledné tvrdosti 625 HV, napětí na mezi kluzu 1956,8 MPa, mezi pevnosti v tahu 2017,1 MPa a prodloužení 1,51 %. Výsledky vyhovují parametrům, které udává výrobce prášku, pouze prodloužení autorům článku vyšlo řádově nižší, než výrobce udává.

Na Obrázek 19 a Obrázek 20 autoři zobrazují závislosti mechanických vlastností na parametrech procesu stárnutí. Obrázek 19 vystihuje závislost tvrdosti podle Vickerse při nastavení zatížení 2 kg.



Obrázek 19- Závislost tvrdosti na parametrech procesu stárnutí 1.2709 [25]



Obrázek 20- Porovnání tahové zkoušky pro stav bez TZ a pro stav po stárnutí 1.2709 [25]

Andronov [27] ve své diplomové práci analyzoval prášek CL50WS, což je ekvivalent 1.2709, kterou porovnával s konvenčně vyrobenou ocelí 1.2709 dodanou firmou Böhler. Sedm vzorků pro tahovou zkoušku a čtyři vzorky pro rázovou zkoušku byly tisknuty ve vertikální orientaci vůči podložce, dalších sedm vzorků pro rázovou zkoušku bylo tisknuto v horizontální orientaci. Tisk probíhal na stroji M2 Cusing od výrobce ConceptLaser. Autor měl za požadavek vzorky tepelně vytvrdit na tvrdost 51 HRC, k tomu použil tepelné zpracování pomocí stárnutí, kde materiál ohříval rychlostí 100 °C/hod na teplotu 530 °C, na které setrval 6 hodin. Konvenčně vyrobená tělesa zpracoval obdobně, materiál ohřál na 540 °C s výdrží 3 hodin. Autor provedl měření drsnosti, kde vyhodnotil, že orientace tisku a směr měření minimálně ovlivňují hodnotu výsledné drsnosti. Dále byla provedena zkouška rázem v ohybu dle normy ČSN ISO 148-1:2010 a tahová zkouška dle normy DIN EN ISO 6892-1. Horizontálně tisknuté vzorky dosahovaly hodnoty vrubové houževnatosti 16 J/cm², vzorky tisknuté vertikálně a vzorky konvenčně vyrobené dosahovaly hodnoty 15 J/cm². Aritmetické průměry výsledků autorovi studie jsou zaneseny v Tabulka 2.

Tabulka 2- Mechanické vlastnosti 1.2709 DP Andronov [27]

1.2709	DP Andronov [27]		
	Horizontální tisk	Vertikální tisk	Konvenční výroba
Rp _{0,2} [MPa]	-	1789	1739
Rm [MPa]	-	1847	1844
A [%]	-	4,19	8,4
Tažnost při max. zatížení A _g [%]	-	0,55	1,79
Vrbová houževnatost [J/cm ²]	15	16	15

Rozdíl vrubové houževnatosti u vertikálně tisknutých vzorků, vzorků horizontálně vytisknutých a konvenčně vyrobených je téměř zanedbatelný. Nejpatrnější rozdíl mezi tiskem a konvenční výrobou lze spatřit u hodnot tažností, kde u celkové tažnosti hodnota konvenčně vyrobených vzorků je 2x větší a u tažnosti při maximálním zatížení dokonce až 3x větší.

Tabulka 3- Analýza 1.2709

1.2709 s TZ	Hodnoty udávané (naměřené)			
	EOS [24]	Tan et al. [9]	Casati et al. [25]	DP Andronov [27]
Tvrdość [HRC]	53	51-55	56	51
R _{p0,2} [MPa]	2013 ±16	1915	1956,8	1789
R _m [MPa]	2094 ±7	2014	2017,1	1847
A [%]	5,2 ±0,8	3,28	1,51	4,19
Ra [µm]	5	4,16-4,79	-	3,6
Vrubová houževnatost [J/cm ²]	10	-	-	16

Hodnoty získané ve výzkumu Tan et al. [9] se mírně liší od těch, které udává výrobce. Napětí na mezi pevnosti a napětí na mezi kluzu z experimentu Casati et al. [25] jsou mírně rozdílné od údajů výrobce, získaná hodnota prodloužení se s výrobcem neshoduje. Hlavním důvodem tohoto rozdílu je použití slabšího laseru o výkonu 200 W. S předpokladem, že by byl užit stejný výkon laseru jako použil výrobce, se dá předpokládat, že by v experimentu dosáhli stejných hodnot. Dalším vlivným parametrem může být upravení tepelného zpracování autory experimentů. Rozdíl v mezi kluzu a mezi pevnosti u DP Andronov [27] je způsoben hlavně tím, že tepelné zpracování bylo nastaveno za cílem dosáhnout tvrdosti 51 HRC, a ne maximální pevnosti.

3.3. Ocel 1.2344

Díly z nástrojové oceli 1.2344 jsou známé pro svoji vysokou tvrdost kombinovanou s dobrou tažností. Díky legujícím prvkům lze pomocí selektivního tavení dosáhnout výborných vlastností materiálu. Prášek 1.2344 se primárně využívá pro aditivní výrobu forem a nástrojů. Díky jeho charakteristickým vlastnostem je prášek vhodný pro použití v místech, která jsou vystavena silnému namáhání, protože odolává oděru při vysokém namáhání. Materiál vykazuje téměř homogenní strukturu, následným tepelným zpracováním lze vlastnosti dílů upravit tak, aby vyhovovaly požadavkům. [28]

Bohužel tento materiál není tak snadno tisknutelný jako např. ocelový prášek 1.2709. Tato nevýhoda je způsobena poměrně vysokým obsahem uhlíku v oceli, to vede k problémům, jako jsou vnitřní vady, pórovitost a tepelné

praskliny. Tisk 1.2344 si vyžaduje složité nastavení parametrů, jako je výhřev komory, což neposkytuje každý stroj. [29]

Ocel je známá také pod označením H13, podle evropské normy X40CrMoV5-1 a dalšími firemními označeními jako Böhler W302 a další.

Tabulka 4-Chemické složení prášku 1.2344 [28]

1.2344	Chemické složení								
Prvek	C	Cr	Mn	Mo	Ni+Cu	P	S	Si	V
Obsah [%]	0,32-0,45	4,75-5,50	0,20-0,60	1,10-1,75	0,75	0,03	0,03	0,80-1,25	0,80-1,20

3.3.1. Porovnání mechanických vlastností 1.2344

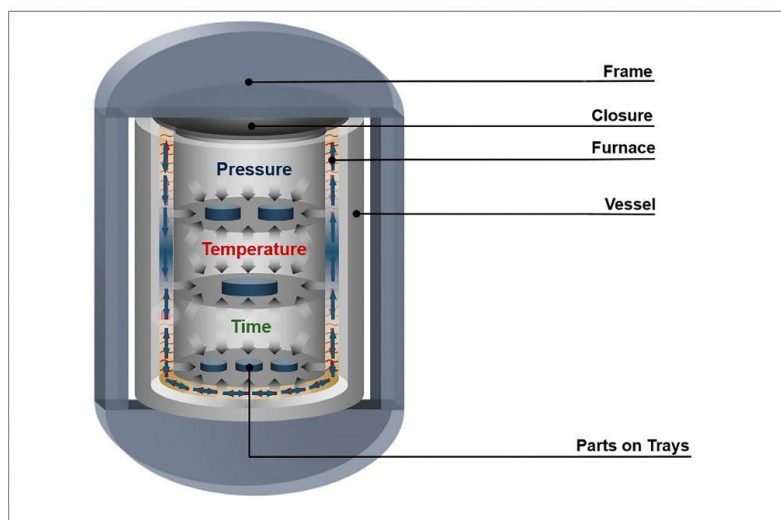
Firma SLM solutions nabízí ocelový prášek 1.2344 s velikostí částic 10-45 μm a přibližnou hustotou 8 g/cm^3 . Výsledky mechanických vlastností vycházejí z testování vzorků tisknutých na strojích firmy SLM o výkonu laseru 400 W, tloušťka vrstvy byla 30 μm . Testy byly provedeny na tisknutých vzorcích bez tepelného zpracování a na vzorcích, které byly podrobeny tepelnému zpracování. Tím bylo žíhání při teplotě 750 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 2 hodin, následovaného austenitizací při teplotě 1050 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 minut a kalením do ohřátého oleje (zhruba 60 $^{\circ}\text{C}$). Po kalení byly vzorky okamžitě dvakrát popuštěny při teplotě 300 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 2,5 hodiny s mezistupňovým ochlazením na pokojovou teplotu. [28]

Tabulka 5-Mechanické vlastnosti 1.2344 udávané výrobcem [28]

1.2344	SLM Solutions [28]		
	Poloha tisku:	As built (bez TZ)	Vzorky s TZ
Rm [MPa]	Horizontální	1244 \pm 106	1719 \pm 239
	Vertikální	1360 \pm 86	1720 \pm 99
Rp _{0,2} [MPa]	Horizontální	987 \pm 39	1528 \pm 32
	Vertikální	-	-
A [%]	Horizontální	2	4
	Vertikální	1	9
Z [%]	Horizontální	-	14
	Vertikální	-	16
E [GPa]	Horizontální	203 \pm 23	-
	Vertikální	-	-

Åsberg et al. [30] zkoumali vliv tepelného zpracování na mikrostrukturu, porositu a mechanické vlastnosti aditivně vyrobených vzorků z oceli H13. Vzorky byly upraveny do tří různých modifikací:

- Žíhané ke snížení pnutí (SR)
- Žíhané ke snížení pnutí+ kalené+ popouštěné (SR+HT)
- Žíhané ke snížení pnutí + HIP (Izostatické lisování za tepla) + kalené+ popouštěné (SR+HIP+HT)



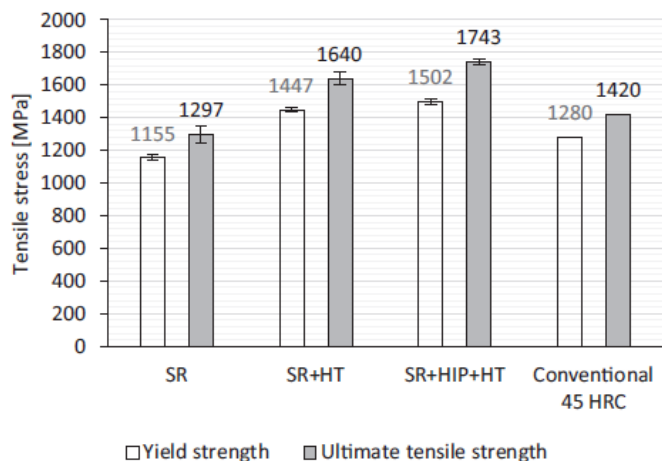
Obrázek 21- Izostatické lisování za tepla (HIP) [31]

Bylo vypořádováno, že se austenitická struktura po procesu austenitizace při teplotě kalení přeměnila. U vzorků SR+HT a SR+HIP+HT byla pozorována mikrostruktura podobná konvenční, ale jemnější. Elektronová mikroskopie ukázala, že vzorky SR a SR+HT neprošly dostatečným fúzním procesem, což vedlo k velickému rozptylu u pozorování prodloužení při tahové zkoušce. Aplikace HIP vedla k nejvyšším hodnotám pevnosti a snížila pórovitost.

Prášek, který byl použit na tisk vzorků byl pořízen od Carpenter Powder Products AB, chemické složení udávané firmou souhlasí s chemickým složením prášku od SLM. Autoři vzorky tiskly na stroji SLM 125 HL se stavebním prostorem 125x125x125 mm a vybaveným jedním vláknovým laserem o výkonu 400 W. Tisk probíhal v argonové atmosféře.

Výsledky měření tvrdosti dopadly dle předpokladu, nejtvrdší byly vzorky SR+HIP+HT a nejmenší tvrdost prokazovaly vzorky SR. U všech vzorků, nehledě na tepelné zpracování byl naměřen stejný Youngův modul pružnosti v rozmezí 191-199 GPa. Hodnoty meze pevnosti a meze kluzu v tahu jsou patrné z grafické závislosti na Obrázek 22, pro porovnání byla přiložena závislost konvenčně zpracované oceli H13 při tvrdosti 45 HRC. Z Obrázek 23 je patrné, že vzorky byly tisknuty ve vertikální poloze, na to je třeba brát ohled při porovnávání výsledků

s hodnotami od výrobce. Výsledky mechanických zkoušek a sledování porosity jsou sledovány v Tabulka 6, jak už bylo zmíněno, hodnota prodloužení u vzorků, které byly izostaticky lisovány dosahuje lepších výsledků, díky potlačení efektu nedostatečné difuze.



Obrázek 22- Graf výsledků mezi pevností a mezi kluzu prášku H13 [30]

Obrázek 23- Orientace vzorků při tisku z prášku H13 [30]

Tabulka 6- Mechanické vlastnosti a porosita 1.2344 studie Äsberg et al. [30]

1.2344	Äsberg et al. [30]		
	SR	SR+HT	SR+HIP+HT
Porosita-střed [%]	0,07 ±0,16	0,11 ±0,08	0,005 ±0,001
Porosita-okraje [%]	0,12 ±0,06	0,16 ±0,18	0,02 ±0,03
Tvrđost [HV ₂₀]	428 ±3,1	511 ±4,7	562 ±4,5
Youngův modul [GPa]	199 ±1,5	190 ±1,9	191 ±3,5
A [%]	4,2 ±3,0	3,3 ±1,6	6,6 ±0,6
R _m [MPa]	1297	1640	1743
R _{p0,2} [MPa]	1155	1447	1502

Kubíková [32] ve své Bakalářské práci dělala experimentální analýzu různě tepelně zpracovaných vzorků z oceli H13. Zkoumala mechanické a chemické vlastnosti materiálu. Provedla zkoušku tahem, Charpyho zkoušku, zkoušky tvrdosti a chemickou analýzu. Vzorky testovala ve stavu:

- As-built,
- žíhané+kalené+2xpopouštěné (TZ1)
- pouze žíhané (TZ2).

Orientace nastavení tisku byla 90° vůči podložce. Pro porovnání svých výsledků používala mechanické vlastnosti konvenčně vyrobené oceli, ty pro analýzu nebudou využity.

Tabulka 7- Mechanické vlastnosti H13 BP Kubíková [32]

1.2344	BP Kubíková [32]		
TZ	As-build	TZ1	TZ2
R _{p0,2} [MPa]	1207,8 ±358,6	1105 ±16,4	-
R _m [MPa]	1854,6 ±164	1313,6 ±15,2	-
A [%]	4,14 ±1,99	5,28 ±1,33	-
Vrubová houževnatost [J/cm ²]		20,2	10,2
Tvrdość [HRC]	59	40	48

Tabulka 8- Analýza 1.2344

1.2344 s TZ	Hodnoty udávané (naměřené)		
	SLM Solutions [28]	Äsberg et al. [30]	Kubíková [32]
Tvrdość [HRC]	-	50	59
R _{p0,2} [MPa]	1528 ±32	1447	1207,8 ±358,6
R _m [MPa]	1720 ±99	1640	1854,6 ±164
A [%]	9	3,3 ±1,6	4,14 ±1,99
E [GPa]	-	190 ±1,9	-

Porovnání výsledků není ideální, vzhledem k mírně odlišným podmínkám nastaveným při procesu tepelného zpracování součástí. Taktéž výrobce neuvádí hodnotu meze kluzu pro výtisky, které byly tisknuty ve vertikální orientaci, takže porovnávaná hodnota je nepřesná. Důvod nižší tažnosti jsem již zmínil výše. Kubíková udává, že vzorky se po tisku zakalily vlivem velkého rozdílu teplot. Pro porovnání jsem vybral vzorky bez tepelného zpracování, protože dosahují nejlepších mechanických vlastností. Kubíková použila stejné TZ jako při použití konvenčních vzorků, proto vzorky nedosahují příznivých výsledků mechanických zkoušek.

3.4. Böhler W360 AMPO

Böhler W360 AMPO je práškový ekvivalent nástrojové oceli W360 ISOBLOC. Materiál svým chemickým složením patří do skupiny ocelí vhodných pro práci za tepla. Po vytvrzení a popuštění může W360 AMPO dosáhnout tvrdosti až 57 HRC s velmi dobrými houževnatými vlastnostmi. Materiál je charakterizován vysokou odolností proti opotřebení, tepelnou odolností a houževnatostí. Nejčastěji se používá pro aplikace na tisk součástí s konformním chlazením pro tlakové lití, dále jako ochranná vrstva proti opotřebení u jiných materiálů, nebo pro opravy pomocí navařování. Tisk W360 AMPO musí probíhat za zvýšených teplot nad 200 °C kvůli speciálnímu složení slitiny. [33]

Tabulka 9- Chemické složení prášku W360 AMPO [33]

W360 AMPO	Chemické složení						
Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co
Obsah [%]	0,5	0,2	0,25	4,5	3	0,55	max. 0,1

3.4.1. Mechanické vlastnosti Böhler W360 AMPO

Výrobce udává dosažitelné mechanické vlastnosti vzorků z W360 AMPO po tepelném zpracování. Materiál dosahuje poměrně vysoké tvrdosti až 57 HRC, pevnosti v tahu 1970-2010 MPa a napětí na mezi kluzu 1500-1670 MPa. Vzorky testované výrobcem byly tisknuty na dvou různých strojích, s tím, že se lišili v teplotě předehřevu a to 230 °C a 400 °C (výrobce neudává přesný model).

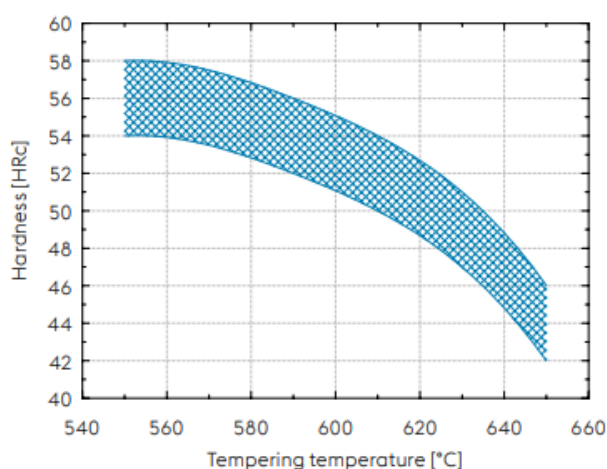
Tensile strength (Rm)	Yield strength (Rp _{0,2})	Elongation (%)	Hardness	Toughness (ISO V)
1970 – 2010 MPa	1500 – 1670 MPa	6.6 – 8.1	55 – 57 HRC	8 – 14 J

Obrázek 24- Mechanické vlastnosti W360 AMPO po TZ udávané výrobcem [33]

Doporučené tepelné zpracování [33]:

- Žíhání ke snížení pnutí- 690 °C v neutrální atmosféře/výdrž na teplotě 1-2 hodiny/pomalé ochlazování v peci.
- Kalení- 1050 °C/olejová nebo vakuová pec/výdrž na kalící teplotě po dobu 15-20 min/ochlazení ve vodě.
- Popouštění-nejméně dvakrát na teplotu určenou podle chtěné výsledné tvrdosti z Obrázek 25/pomalé ohřátí na teplotu/výdrž po dobu 1,5 hodiny pro jeden cyklus.

Výsledky mechanických vlastností jsou nejen závislé na tepelném zpracování, ale přímo závisí i na tiskových parametrech.



Obrázek 25- Závislost teploty popouštění na tvrdosti W360 AMPO

V jiném materiálovém listu firmy Böhler [34] zaměřeného na W360 AMPO je zmíněno, jak zacházet s designem u nástrojů pro HPDC, následně tiskové strategie určené pro jejich materiál. Böhler W360 AMPO byl vytvořen jako prémiový materiál přímo určený pro tisk dílů pro HPDC. Při vývoji byl kladen důraz, aby v těchto aplikacích předčil tradiční oceli jako 1.2709, 1.2343 ESR (H11) a 1.2344 ESR (H13). Opět jsou zde zmíněné největší přednosti tohoto materiálu, jako vysoká houževnatost, vysoká odolnost proti mechanickému a tepelnému opotřebením a poměrně vysoká tvrdost, která se výrobcem doporučuje v rozmezí (48-56) HRC. Další část se zaměřuje na praktické využití materiálu a porovnání s konvenčně vyrobenými díly.

Material	Hot temp. toughness	Hot temp. wear resistance
1.2343	★★★★☆	★★
1.2344	★★★	★★★
1.2709	★★★	☆☆
BÖHLER W360 AMPO	★★★★	★★★★★

Obrázek 26- Porovnání W360 AMPO s konvenčně používanými materiály [34]

BÖHLER grade	DIN No	Achievable hardness [HRC]	Hot temperature toughness	Hot temperature wear resistance
BÖHLER W300 ISOBLOC®	1.2343	52	★★★★☆	★★
BÖHLER W302 ISOBLOC®	1.2344	52	★★★	★★★
BÖHLER W722 AMPO	1.2709	54	★★★	☆☆
BÖHLER W360 AMPO	patent	57	★★★★	★★★★★

Obrázek 27- Porovnání W360 AMPO s ostatními ocelmi Böhler [33]

Obrázek 26 a Obrázek 27 jasně vypovídá o prémiovosti ocelového prášku W360 AMPO. Obrázky vystihují jeho kvalitu pro užití v tepelně náročných oblastech.

3.5. Uddeholm AM Corrax

Jedná se o nerezovou ocel, která je přímo určená pro aditivní výrobu. Materiál oplývá jedinečnou sadou vlastností, což z něj činí konečnou volbu pro nástroje, kde je vyžadována vynikající odolnost proti korozi v kombinaci

s vysokou tvrdostí. Díky těmto vlastnostem je materiál dokonale vhodný pro použití na nástroje pro formy pro plasty (injection moulding). Korozní odolnost je také výhodná při implementaci komplikovaných konvenčních návrhů chlazení kvůli minimalizovanému riziku ucpání chladících kanálů. Snadné zpracování pomocí aditivních technologií je způsobeno velmi příznivým chemickým složením, díky kterému materiál také dosahuje vynikajících mechanických vlastností. Mezi konkrétní příklady využití materiálu Corrax určitě patří vstřikovací formy pro korozivní plasty, protlačovací formy, letecké díly a další. [35]

Výhody v porovnání s ostatními nástrojovými oceli:

- Flexibilní tvrdost v rozsahu 36-50 HRC-dosažena procesem stárnutí v intervalu teplot 425-600 °C
- Tvarová stabilita během procesu stárnutí
- Snadná leštitelnost
- Vynikající odolnost proti korozi
- Možnost využití jak v práškovém loži, tak pro navařování

Tabulka 10- Chemické složení prášku AM Corrax [35]

Uddeholm AM Corrax	Chemické složení						
Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al
Obsah [%]	0,03	0,3	0,3	12	9,2	1,4	1,6

3.5.1. Porovnání mechanických vlastností Uddeholm AM Corrax

Společnost prášek dodává ve velikosti 20-50 μm , taktéž udává hodnotu hustoty při teplotě 20 °C 7700 kg/m³, hodnoty modulů pružnosti při teplotách 20 °C, 200 °C a 400 °C vzorků, které byly stárnuté na tvrdost 48 HRC. U těchto vzorků byly také sledovány koeficienty tepelné roztažnosti a tepelná vodivost (viz. Tabulka 11).

Tabulka 11- Fyzikální vlastnosti Uddeholm AM Corrax [35]

Corrax	Uddeholm [35]		
Teplota	20 °C	200 °C	400 °C
Hustota [kg/m ³]	7700	-	-
Modul pružnosti [MPa]	200 000	190 000	170 000
Koeficient tepelné roztažnosti	-	11,7x10 ⁻⁶	12,3x10 ⁻⁶
Tepelná vodivost [W/m C°]	-	18	21

Materiálový list poskytuje informace o mechanických vlastnostech v pěti různých stavech:

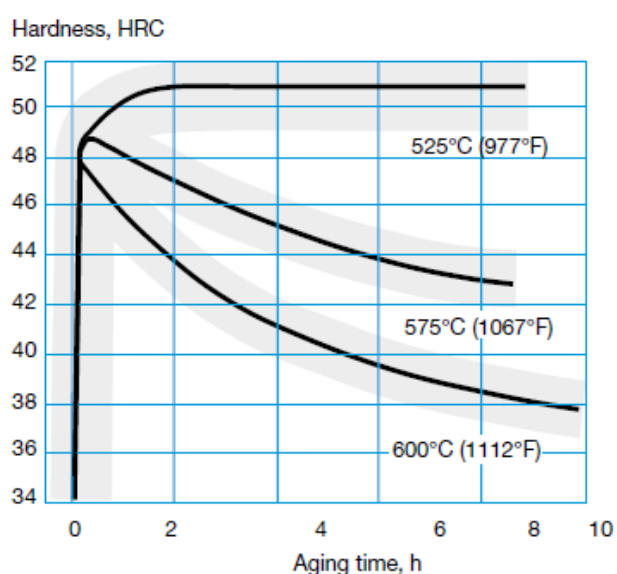
- As built-po tisku bez TZ, 34 HRC
- Žíhaný pro snížení pnutí- 34 HRC
- Stárnutý na 40 HRC
- Stárnutý na 46 HRC
- Stárnutý na 50 HRC

Tabulka 12- Mechanické vlastnosti materiálu Uddeholm AM Corrax [35]

Corrax	Uddeholm [35]				
	As build	Žíhaní	Stárnutí na 40 HRC	Stárnutí na 46 HRC	Stárnutí na 50 HRC
R _{p0,2} [MPa]	760	700	1000	1400	1600
R _m [MPa]	1 150	1 100	1 200	1500	1700
A [%]	16	15	16	11	10
Pevnost v tlaku [MPa]	900	900	1300	1600	1800

Odolnost vůči korozi Uddeholm AM Corrax plně odpovídá konvenčně vyráběnému Corraxu. Uddeholm AM Corrax odolá většině korozivních plastů a zředěných kyselin. Materiál vykazuje lepší odolnost proti koroznímu praskání napětím než standartní kalitelné korozivzdorné oceli.

Pro získání těchto mechanických vlastností je doporučeno společností Uddeholm použít tepelné zpracování pomocí stárnutí. Pro určení teploty a času stárnutí byla experimentálně získána grafická závislost, viz. Obrázek 28.



Obrázek 28- Graf stárnutí Uddeholm AM Corrax [35]

Corrax lze poměrně snadno tisknout na většině strojů s technologií práškového lože. Pro dosažení optimálního stavu materiálu je nutné správně nastavit parametry tisku, materiálový list nabízí příklady ideálního nastavení parametrů pro čtyři různé stroje.

Tabulka 13- Doporučené parametry pro tisk Uddeholm AM Corrax pro vybrané tiskárny [35]

	SLM 280	Trumpf 1000	EOS M290	Concept-laser M2
Tloušťka vrstvy [μm]	30	20	30	30
Výkon laseru [W]	200	155	170	130
Rychlost [mm/s]	720	814	1250	150
Vzdálenost vrstvy [mm]	0,12	0,07	0,1	0,1
Strategie tisku	Stripes (pásky)	Šachovnice	Stripes (pásky)	Stripes (pásky)
Teplota podložky	Není nutné	Není nutné	Není nutné	Není nutné

Záměrem studie Oikonomou et al. [36] bylo porovnat vlastnosti a mikrostrukturu konvenčně vyrobené nástrojové oceli a nástrojové oceli tištěné technologií SLM. Testovaným materiálem byla precipitačně vytvrditelná ocel Uddeholm AM Corrax. Pro lepší kvalitu výsledků byly vzorky tisknuty na dvou tiskárnách, TruPrint1000 a EOS M290. Výsledky meze pevnosti v tahu a meze kluzu v tahu byly naměřeny srovnatelné v porovnání s konvenčně vyrobenými vzorky. Vlivem různých výkonů laserů (200 W a 400 W) byly mezi vzorky naměřené poměrně velké rozdíly u rázové houževnatosti a tažnosti, autor tvrdí, že je to způsobeno mírou spečení prášku. Vzorky byly tištěny ve dvou polohách (horizontálně a vertikálně), rázová houževnatost a tažnost byla naměřena lepší u horizontálně tištěných vzorků, mez pevnosti a mez kluzu v tahu je srovnatelná u obou poloh.

Testované vzorky byly podrobeny tepelnému zpracování. Prvně byly ohřáty na teplotu 850 °C s výdrží 30 minut, poté byly stárnuty při teplotě 525 °C po dobu čtyř hodin a ochlazeny na pokojovou teplotu. Tvrdost vzorků se zvýšila z původních 35 HRC na 50 HRC.

Tabulka 14- Mechanické vlastnosti Uddeholm AM Corrax studie Oikonomou et al. [36]

Corrax	Oikonomou et al. [36]		
	Poloha tisku:	Vzorky z TruPrint1000	Vzorky z EOS M290
Rázová houževnatost [J/cm ²]	Vertikální	6,22 ±0,53	18,70 ±2,16
	Horizontální	11,17 ±0,68	22,06 ±2,54
R _m [MPa]	Vertikální	1667 ±7	1701 ±4
	Horizontální	1624 ±13,7	1653 ±6
R _{p0,2} [MPa]	Vertikální	1595 ±12	1640 ±12
	Horizontální	1518 ±14,2	1560 ±18
A [%]	Vertikální	1,7 ±0,6	8,6 ±0,3
	Horizontální	3,68 ±1,3	9,7 ±0,3

Tabulka 15- Analýza Uddeholm AM Corrax

Corrax s TZ na 50 HRC	Hodnoty udávané (naměřené)		
	Uddeholm [35]	Oikonomou et al. (TruPrint1000) [36]	Oikonomou et al. (EOS M290) [36]
Tvrdość [HRC]	50	50	50
R _{p0,2} [MPa]	1600	1595 ±12	1640 ±12
R _m [MPa]	1700	1667 ±7	1701 ±4
A [%]	10	1,7 ±0,6	8,6 ±0,3
Pevnost v tlaku [MPa]	1800	-	-
Rázová houževnatost [J/cm ²]	-	6,22 ±0,53	18,70 ±2,16

Pro analýzu byly použity údaje udávané výrobcem pro tepelné zpracování na 50 HRC. Bohužel výrobce neudává, v jaké poloze vzorky tiskl, ale vzhledem k hodnotám mechanických vlastností odhaduji tisk ve vertikální poloze, tudíž jsem pro analýzu vybral ze studie taktéž výsledky vzorků tisknutých vertikálně. Meze pevnosti a meze kluzu odpovídají údajům, které tvrdí výrobce. Naopak u prodloužení je rozdíl v hodnotách poměrně markantní, autoři studie udávají jako příčinu tohoto rozdílu míru spečení prášku u vzorků tisknutých na TruPrint1000. Jinou příčinou by mohlo být špatné nastavení tiskových parametrů, nebo rozdílné tepelné zpracování než to, které výrobce prášku doporučuje.

3.6. Böhler M789 AMPO

Tento prémiový prášek vynalezený společností Böhler kombinuje mechanické vlastnosti oceli 1.2709 a korozní odolnost oceli 17-4PH. Lze snadno tisknout bez přehřívání podložky a dosahuje tvrdosti 52 HRC po tepelném zpracování. Materiál také vykazuje vynikající leštitelnost, což z něj činí ideální volbu pro výrobu nástrojů s konformním chlazením, nebo pro aplikace kde je nutná vysoká tvrdost a odolnost proti korozi. [37, 38]

Prášek je prodáván ve dvou velikostech, 15-45 μm a 45-90 μm .

Tabulka 16- Chemické složení prášku Böhler M789 AMPO [38]

Böhler M789 AMPO	Chemické složení						
Prvek	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Co
Obsah [%]	<0,02	12,2	10	1	0,6	1	-

3.6.1. Porovnání mechanických vlastností Böhler M789 AMPO

Výrobce doporučuje tepelné zpracování v podobě:

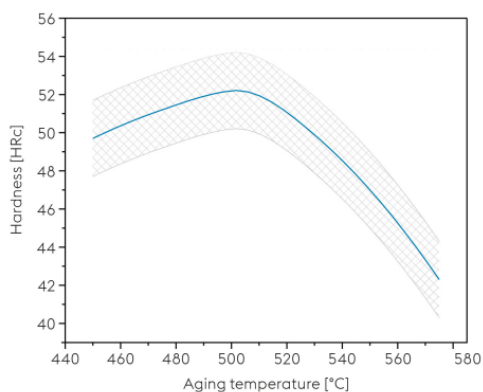
- Žihání při teplotě 1000 °C s výdrží jedné hodiny
- Ochlazení vzduchem na pokojovou teplotu
- Stárnutí při teplotě 500 °C po dobu 3 hodin a ochlazení vzduchem

Samotná závislost tvrdosti HRC na teplotě a podmínkách stárnutí je vidět na Obrázek 29, ze závislosti je patrné, že nejlepších hodnot tvrdosti dosáhne materiál při stárnutí v intervalu teplot 500-510 °C.

Tabulka 17- Mechanické vlastnosti Böhler M789 AMPO [37]

Böhler M789 AMPO	Böhler [37]
	Stárnutí na 52 HRC
R _m [MPa]	1850 ±50
R _{p0,2} [MPa]	1720 ±50
A [%]	6 ±2
Tvrdost [HRC]	52 ±1

Obrázek 30 porovnává kvalitu materiálu Böhler M789 AMPO s jinými produkty firmy Böhler. Do porovnání byly zařazeny parametry jako je tvrdost materiálu v HRC, odolnost proti korozi, nebo odolnost proti opotřebení.



Obrázek 29- Závislost teploty stárnutí na výsledné tvrdosti Böhler M789 AMPO [37]

BÖHLER grade	DIN No	Achievable hardness [HRC]	Corrosion resistance	Wear resistance
BÖHLER M310 ISOPLAST	1.2083	50	★★	★★★★★
BÖHLER M300	1.2316	30	★★★	★★
BÖHLER W722 AMPO	1.2709	50 - 54	-	★★★★
BÖHLER N700 AMPO	1.4542	40	★★★★	★★
BÖHLER M789 AMPO	patent pending	52	★★★★★	★★★★

Obrázek 30- Porovnání Böhler M789 AMPO s vybranými materiály Böhler [38]

Tian et al. [39] ve své studii zkoumali mechanické vlastnosti a mikrostrukturu, aditivně vyrobených vzorků z ocelového prášku Böhler M789 AMPO. Elektronovou mikroskopií byl detekován růst zrna s dendritickou strukturou u as-built vzorků. Pro zjištění mechanických vlastností byly provedeny zkoušky tahem, Charpyho zkouška a měření tvrdosti. Mechanické vlastnosti byly zkoumány v as-built stavu a tepelné zpracovaném stavu. Použitým tepelným zpracováním bylo žíhání při teplotě 1000 °C po dobu jedné hodiny a stárnutí při teplotě 500 °C po dobu 2 hodin. Naměřené hodnoty mechanických vlastností jsou zaznamenány v Tabulka 18.

Tabulka 18- Mechanické vlastnosti Böhler M789 AMPO studie Tian et al. [39]

Böhler M789 AMPO	Tian et al. [39]	
	As-built	TZ
R _{p0,2} [MPa]	843 ±17	1714 ±13
R _m [MPa]	1019 ±17	1798 ±4
A [%]	16 ±2	9 ±2
Tvrdost [HRC]	31,3 ±1,4	52,4 ±0,7
Rázová houževnatost [J/cm ²]	14,3 ±6	11 ±2

Tabulka 19-Analýza Böhler M789 AMPO

M789 AMPO s TZ	Hodnoty udávané (naměřené)	
	Böhler [37]	Tian et al. [39]
Tvrdost [HRC]	52 ±1	52,4 ±0,7
R _{p0,2} [MPa]	1720 ±50	1714 ±13
R _m [MPa]	1850 ±50	1798 ±4
A [%]	6 ±2	9 ±2
Rázová houževnatost [J/cm ²]	10 ±4	11 ±2

Hodnoty naměřené v experimentu Tian et al. [39] se shodují s těmi, které uvádí výrobce, autoři experimentu zkrátily dobu stárnutí o jednu hodinu, a i přes to mechanické vlastnosti souhlasí.

3.7. Ocel 17-4PH

Jde o martenzitickou vytvrditelnou niklovou ocel, díky svým legurám má tento materiál vynikající odolnost proti korozi. Je snadno tisknutelný i bez předehřevu podložky. Po tepelném zpracování pomocí procesů žíhání a stárnutí dosahuje tvrdosti až 43 HRC. Díly vyrobené z tohoto ocelového prášku je možné následně obrobit, otryskat a leštit v as-built stavu, ale i v tepelně zpracovaném stavu. Tento materiál je široce používán v leteckém, chemickém, petrochemickém a strojírenském průmyslu. Materiál nabízí vynikající kombinaci odolnosti proti korozi a dobrých mechanických vlastností zaručených při teplotách do 320 °C. [40, 41, 42]

Tabulka 20- Chemické složení prášku 17-4PH [41]

17-4PH	Chemické složení								
Prvek	C	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	P	S	Nb+Ta
Obsah [%]	0,07	15-17,5	3-5	3-5	1	1	0,04	0,03	0,15-0,45

Označení materiálu dle EN je 1.4542, také se můžeme setkat s firemními označeními jako je například Böhler N700 AMPO.

3.7.1. Porovnání mechanických vlastností 17-4PH

Nejpřesnější údaje o mechanických vlastnostech tohoto ocelového prášku nabízí materiálový list firmy SLM Solutions, kde byly testovány vzorky tištěné ve vertikální a horizontální poloze. Také nabízí hodnoty mechanických zkoušek pro tisk ve dvou různých tloušťkách vrstvy, a to 30 μm a 50 μm. V Tabulka 21 jsou výsledky mechanických zkoušek pro vzorky s tloušťkou vrstvy 30 μm.

Tabulka 21- Mechanické vlastnosti prášku 17-4PH udávané výrobcem [41]

17-4PH	SLM Solutions [41]		
	Poloha tisku:	As-built	TZ
R _m [MPa]	Horizontální	987 ±22	1359 ±9
	Vertikální	931 ±45	1308 ±88
R _{p0,2} [MPa]	Horizontální	517 ±27	1024 ±11
	Vertikální	506 ±25	1091 ±27
A [%]	Horizontální	26 ±2	16 ±2
	Vertikální	28 ±2	14 ±6
Z [%]	Horizontální	56 ±2	27 ±10
	Vertikální	56 ±8	26 ±17
E [GPa]	Horizontální	171 ±28	154 ±5
	Vertikální	154 ±19	182 ±4

Materiálové listy firmy EOS a firmy SLM Solutions doporučují stejné tepelné zpracování:

- Žíhání při teplotě 1040 °C po dobu 30 minut
- Ochlazení vzduchem pod teplotu 32 °C
- Stárnutí při teplotě 480 °C po dobu 1 hodiny
- Ochlazení vzduchem znovu pod teplotu 32 °C

Ve studii Turk et al. [43] jsou zkoumány různé vysokopevnostní oceli s ohledem na typické vlastnosti prášku, jako je sférická schopnost, mikrostruktura a mechanické vlastnosti. V experimentální části byly zkoumány tři martenzitické oceli od firmy Böhler, W722 AMPO, N700 AMPO a M789 AMPO. Všechny materiály odpovídají předpokladům odpovídajícím výrobcí. Autoři hodnotí oc. M789 AMPO jako velmi vhodnou pro případy, když je potřeba mechanických vlastností W722 AMPO a korozivzdornosti N700 AMPO. Vzorky z N700 AMPO neboli 17-4PH byly žíhány při teplotě 1038 °C po dobu 30 minut a poté stárnuty při teplotě 496 °C po dobu 4 hodin. Tisk proběhl na stroji SLM280 firmy SLM Solutions s výkonem laseru 250 W a tloušťkou vrstvy 30 μm . V závěru studie bylo zmíněno, že všechny tři materiály odpovídají údajům dle výrobce, bohužel konkrétní hodnoty N700 AMPO ve studii nebyly zmíněny.

Hu et al. [44] v experimentu dělali výzkum aditivně vyrobených vzorků z oceli 17-4PH. Výzkum zahrnoval vliv jednotlivých parametrů zpracování na hustotu a mikrotvrdoost, také zahrnoval vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti. Bylo dokázáno, že rychlost laseru a tloušťka vrstvy mají významný vliv na výskyt pórů. Materiál byl dodán firmou Hengji Powder Technology China. Vzorky byly tisknuty na stroji firmy SLM s výkonem laseru 200 W. Na vzorcích byla provedena zkouška tahem. Vzorky byly žíhány při teplotě 1040 °C po dobu 30 minut a stárnuty při teplotě 550 °C po dobu 4 hodin.

Tabulka 22- Mechanické vlastnosti 17-4PH studie Hu et al. [44]

17-4PH	Hu et al. [44]	
	As-built	TZ
Rp _{0,2} [MPa]	634-666	1027-1032
Rm [MPa]	1104-1106	1089-1123
A [%]	20,5-21,3	14,7-16,6

V experimentu Hu et al. [44] autorům vyšla mez kluzu v tahu a prodloužení vyhovující údajům, které udává výrobce. Mez pevnosti v tahu byla o více jak 200 MPa nižší, než výrobce udává, to může být způsobeno nedostatečným spečením prášku vlivem nízkého výkonu laseru, nebo tepelným zpracováním, které neodpovídá přesně tomu, co výrobce prášku doporučuje.

Tabulka 23- Analýza 17-4PH

17-4PH	Hodnoty udávané (naměřené)	
	SLM Solutions [41]	Hu et al. [44]
Rp _{0,2} [MPa]	1024 ±11	1027-1032
Rm [MPa]	1359 ±9	1089-1123
A [%]	16 ±2	14,7-16,6
Z [%]	27 ±10	-
E [GPa]	154 ±5	-

3.8. Uddeholm Heatvar

Společnost Uddeholm vynalezla nový materiál vhodný pro aplikace při vysokotlakém lití hliníku. Při výzkumu se společnost zaměřila hlavně na dva požadavky, a to na dobrou tisknutelnost a dobré vlastnosti pro použití v HPDC. Jedná se o precipitačně vytvrditelnou vysokopevnostní ocel. Materiál má vynikající vlastnosti jako je vysoká tvrdost a pevnost za tepla, odolnost proti korozi, odolnost proti tepelné únavě, odolnost proti opotřebení, vysoká odolnost proti zpětnému rázu atd. Heatvar je primárně určený pro tisk technologiemi v práškovém loži. [45, 46]

Bohužel společnost Uddeholm doposud nezveřejnila oficiální materiálový list týkající se informací o vlastnostech materiálu. Materiálem se zabývá několik dohledatelných studií a pro rozšíření informací o mechanických vlastnostech a mikrostruktuře i tato práce.

Tabulka 24- Chemické složení prášku Uddeholm Heatvar [45]

Uddeholm Heatvar	Chemické složení						
Prvek	C	Co	Mo	Cr	Ni	P	S
Obsah [%]	0,02	12	8	5	2	0,002	0,002

3.8.1. Porovnání mechanických vlastností Uddeholm Heatvar

Autoři Chadha et al. [47] se ve své studii zabývají zkoumáním materiálu Uddeholm Heatvar. Vzorky testovali ve třech stádiích, přímo po tisku, tepelně zpracované žíháním a tepelně zpracované stárnutím. Obsah molybdenu ve slitině při tisku zapříčinil vznik tzv. Lavesovy fáze, ta se rozpustila během procesu stárnutí, kde se vytvořily precipitáty Fe₂Mo. Po stárnutí při teplotě 630 °C po dobu 4 hodin slitina dosahovala maximální pevnosti v tahu 1980 MPa a tvrdosti 52 HRC. Dalším testovaným vzorkem byl díl tepelně zpracovaný při teplotě 950 °C po dobu 0,5 h, bylo dosaženo zlepšení tažnosti na 15 % z pouhých 4 % a maximální pevnosti v tahu na 1369 MPa. Také bylo prozkoumáno, že při vystavení teplotě 620 °C po dobu 100 hodin, klesne slitině

Heatvar tvrdost pouze z 52 HRC na 50 HRC, na základě toho autor tvrdí, že je slitina vhodná pro použití v tepelně nepříznivých podmínkách.

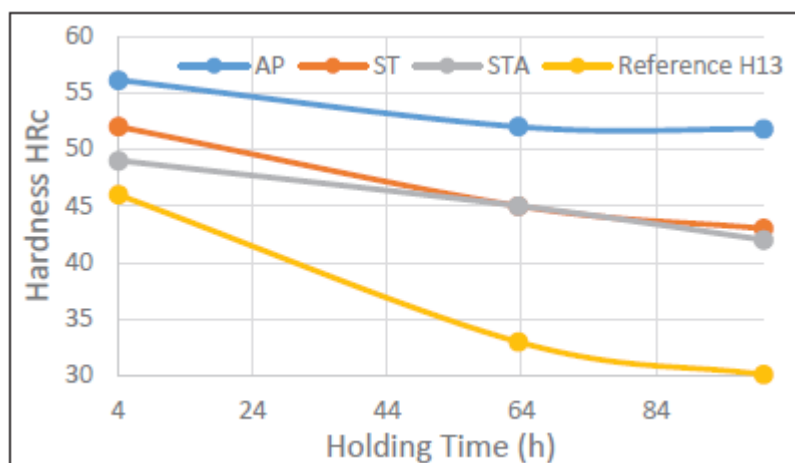
Tisknutý prášek byl dodán přímo společností Uddeholm a byl vyroben plynovou atomizací s rozměry 15-45 μm . Vzorky byly tisknuty na stroji EOS M290 s výkonem 200-250 W a tloušťkou vrstvy 30 μm . Autoři provedli zkoušku tahem, zkoušku tvrdosti a Charpyho zkoušku. As-built vzorky a vzorky po procesu stárnutí projevovaly křehký lom, naopak žíhané vzorky prokázaly lom houževnatý.

Tabulka 25- Mechanické vlastnosti Uddeholm Heatvar studie Chadha et al. [47]

Uddeholm Heatvar	Chadha et al. [47]		
TZ	As-build	Žíhání	Stárnutí
R _{p0,2} [MPa]	1165 ±12	1156 ±12	1660 ±18
R _m [MPa]	1190 ±16	1369 ±18	1980 ±20
A [%]	4 ±1	15 ±1	2 ±1
Tvrdost [HRC]	35 ±1	41 ±1	52 ±2

Práce autorů Kvarned et al. [48] pojednává o charakteristice materiálu Uddeholm Heatvar. Byly otestovány výborné vlastnosti oceli při vysokých teplotách. Bylo zjištěno, že Heatvar má odolnost proti chemické korozi, způsobené kontaktem mezi nástrojem a taveninou, velmi podobnou konvenčně vyrobené oceli H13. Heatvar vykazoval dobrou odolnost proti tepelné únavě po tepelném zpracování žíháním a po úpravě žíháním a stárnutím. Při zkoumání mikrostruktury vzorky vykazovaly velmi nízkou hustotu trhlin. Autoři na vzorcích provedli zkoušku tvrdosti podle Rockwella a zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy odpovídající normě ISO 148-1:2016. Byly zkoumány vzorky v as-built stavu, vzorky žíhané při teplotě 950 °C po dobu 1 hodiny a vzorky žíhané za stejných podmínek a poté stárnuté při teplotě 630 °C po dobu 4 hodin. Autoři zvolili tisk v horizontální orientaci vůči podložce.

Ve studii byla také otestována životnost materiálu při vysoké teplotě 600 °C, vzorky této teplotě byly podrobeny 100 hodin a následně byla ozkoušena tvrdost. Autoři degradaci tvrdosti porovnali s konvenční ocelí H13, viz. Obrázek 31. Vzorky v as-built stavu jsou značené jako AP, vzorky v žíhaném stavu značeny jako ST a vzorky po stárnutí jako STA.



Obrázek 31- Porovnání degradace tvrdosti při práci za tepla-Heatvar a H13 [48]

Bohužel ve studii nebyla provedena tahová zkouška. Tabulka 26 obsahuje výsledky zkoušek rázem v ohybu a zkoušek tvrdosti pro všechny tři zpracování vzorků.

Tabulka 26- Mechanické vlastnosti Uddeholm Heatvar studie Kvarned et al. [48]

Uddeholm Heatvar	Kvarned et al. [48]		
TZ	As-build	Žíhání	Žíhání+Stárnutí
Tvrdost [HRC]	39	41	48
Vrubová houževnatost [J/cm ²]	15,4	15	7

Johansson [46] ve své diplomové práci zkoumal mikrostrukturu, pórovitost, hustotu a tvrdost tisknutých vzorků z ocelového prášku Uddeholm Heatvar. Vzorky prokázaly velmi vysokou hodnotu relativní hustoty okolo 99 %, od této hodnoty se odvíjela pórovitost, která byla velmi nízká. Tvrdost autor zkoumal na tělesech tisknutých s tloušťkou vrstvy 40 a 50 μm . Mírně lepších výsledků dosahovaly ty vzorky s tloušťkou 50 μm . Testované vzorky byly v as-built stavu.

Tabulka 27- Měření tvrdosti Uddeholm Heatvar DP Johansson [46]

Uddeholm Heatvar	DP Johansson [46]	
Tloušťka vrstvy	40 μm	50 μm
Tvrdost [HRC]	40,8-43,6	42,7-46,9

Autor předpokládá, že vyšší tvrdost tepelně nezpracovaných vzorků je způsobena vyšší hustotou objemové energie, nebo použitím nevyhřáté podložky.

Tabulka 28- Analýza Uddeholm Heatvar (rešerše)

Heatvar	Hodnoty udávané (naměřené)		
	Chadha et al. [47]	Kvarned et al. [48]	DP Johansson (bez TZ) [46]
Tvrдость [HRC]	52 ±2	48	40,8-46,9
R _{p0,2} [MPa]	1660 ±18	-	-
R _m [MPa]	1980 ±20	-	-
A [%]	2 ±1	-	-
Rázová houževnatost [J/cm ²]	-	7	-

Hodnoty získané rešerší nejsou ideální, protože studie Chadha et al. [47] a Kvarned et al. [48] vzorky tepelně zpracovávaly, zatímco Johansson [46] ve své diplomové práci tepelné zpracování nedělal. Povědomí o výsledcích tahových vlastností si je možné udělat pouze ze studie Chadha et al. [47], protože ostatní autoři tahovou zkoušku nedělali. Poměrně zajímavé jsou výsledky tvrdosti v DP Johanssona [46], protože naměřil tvrdost jednoho vzorku 46,9 HRC bez tepelného zpracování, tato hodnota se blíží hodnotě 48 HRC, které dosáhli ve své studii Kvarned et al. [48] s tepelně zpracovanými vzorky.

Rozšíření analýzy tohoto materiálu se práce bude věnovat v dalších kapitolách, kde budou analyzovány vlastní výsledky tahové zkoušky a zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy pro tento materiál.

4. Praktická část

Tato část práce navazuje na kapitolu 3.8. a její podkapitoly a bude zaměřena na zpracování mechanických zkoušek materiálu Uddeholm Heatvar. Získání hodnot o tomto materiálu bude použito pro rozšíření mechanických vlastností v závěrečném přehledu, který bude navazovat jako kapitola 4.4. Znalost těchto mechanických vlastností může být v budoucnu použita pro aplikace na nástrojích, kde poslouží pro představu, jak se materiál bude chovat pod působením sil.

Pro analýzu materiálu bude provedena zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu metodou Charpy. K dispozici je 12 vzorků, kde 6 z nich poslouží pro zkoušku tahem a 6 pro Charpyho zkoušku. Bylo použito tepelné zpracování, které doporučil výrobce prášku. Vzorky mají dvě různé tepelné zpracování, a to v podobě:

První postup TZ

- Ohřev na 950 °C s dvoufázovým předehevem na 350 °C a 750 °C
- Žihání při teplotě 950 °C po dobu 1 hodiny
- Ochlazení v peci do 100 °C
- Ochlazení na vzduchu z 100 °C na pokojovou teplotu

Druhý postup TZ

- Žihání při teplotě 950 °C po dobu 30 minut, dvoufázový předehev na 350 °C a 750 °C
- Ochlazení v peci do 100 °C, dochlazení na vzduchu
- První vytvrzení-Ohřev na teplotu 630 °C s výdrží na teplotě 2 hodiny
- Ochlazení vzduchem na pokojovou teplotu
- Druhé vytvrzení-Ohřev na teplotu 630 °C s výdrží na teplotě 2 hodiny
- Ochlazení vzduchem na pokojovou teplotu



Obrázek 32- Žíhané vzorky (vlastní archiv)



Obrázek 33- Vytvrzené vzorky (vlastní archiv)

Ačkoliv norma pro zkoušku tahem ČSN EN ISO 6892-1 a norma pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy ČSN EN ISO 148-1:2017 stanovují minimální počet vzorků 5 kusů, v práci z ekonomických důvodů byly k dispozici pouze od každého zpracování a pro každou zkoušku 3 vzorky.

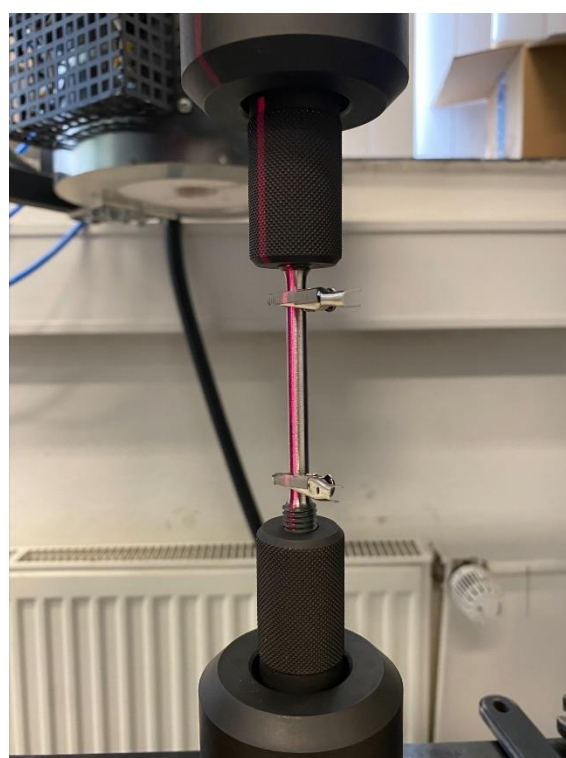
4.1. Zkouška tahem

Jedná se o statickou zkoušku, která spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče narůstající tahovou silou většinou až do úplného přetržení testovaného vzorku. Cílem zkoušky je zjistit pevnost a charakteristiku plasticity materiálu. V průběhu zkoušky je zaznamenávána závislost zatěžující síly na prodloužení, prodloužení zkušební tyče zařízení sleduje pomocí extenzometru neboli průtahoměru. Sestavený diagram může mít dvě podoby, první z těchto podob je závislost síla-prodloužení, druhým je tzv. smluvní diagram, kde se zaznamenává závislost napětí-deformace. Zkouška je realizována pro získání hodnot jako napětí na mezi kluzu, napětí na mezi pevnosti, celkové prodloužení materiálu, kontrakce, Youngův modul pružnosti aj. [49]

Pro zkoušku bylo využito zařízení LabTest 5.100SP1 na Ústavu strojírenské technologie na fakultě strojní ČVUT, zkouška proběhla podle normy DIN EN ISO 6892-1.



Obrázek 34- Použitý trhačí stroj (vlastní archiv)



Obrázek 35- Detail upnutí vzorku (vlastní archiv)

Na Obrázek 35 jsou vidět závitové upínací čelisti pro vzorky typu B podle DIN EN ISO 6892-1.

Příklad nastavení parametrů stroje je zobrazen na Obrázek 36.

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	$h = 1 \text{ mm}$; $m = 1 \text{ g}$
Zadání délek:	$L_e = 49,78 \text{ mm}$; $L_c = 50 \text{ mm}$; $L_0 = 50 \text{ mm}$
Zkušební rychlosti:	$V_0 = 1,5 \text{ mm/min}$; $V_1 = 1,5 \text{ mm/min}$
Přepínací body:	$F_0 = 100 \text{ N}$
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 85000 N; $dF = 85 \%$

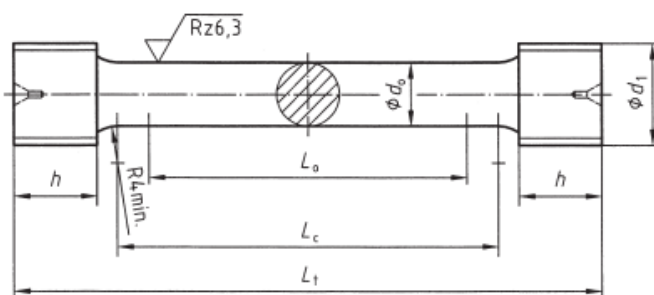
Obrázek 36- Nastavení parametrů pro vytvrzený vzorek č.1 (vlastní archiv)

4.1.1. Zkušební tělesa

Tvary a rozměry zkušebních tyčí jsou dány normami. Vzorky byly vyrobeny podle normy DIN 50125-2, které se používají pro testování ve ŠKODA AUTO a.s. Tyče mají na místech uchycení závit a norma je označuje jako typ B (viz. Obrázek 37 a 38). [50]



Obrázek 37- Fotka zkušební tyče pro zkoušku tahem (vlastní archiv)



Obrázek 38- Výkres zkušební tyče pro zkoušku tahem [50]

Pro realizaci zkoušky tahem je k dispozici 6 vzorků, 3 z nich byly vyžihány a 3 z nich byly vytvrzeny. Žíhané vzorky budou dále v práci označovány jako Ž1, Ž2, Ž3 a vzorky vytvrzené jako V1, V2 a V3. Zkušební tyče byly průměru 6 mm.

4.1.2. Naměřené hodnoty

Získané hodnoty ze zkoušky tahem jsou zaznamenány v Tabulka 29, zaznamenanými údaji jsou smluvní mez kluzu, smluvní mez pevnosti, celková tažnost a Youngův modul pružnosti. Teplota okolního vzduchu v průběhu měření byla 20 °C.

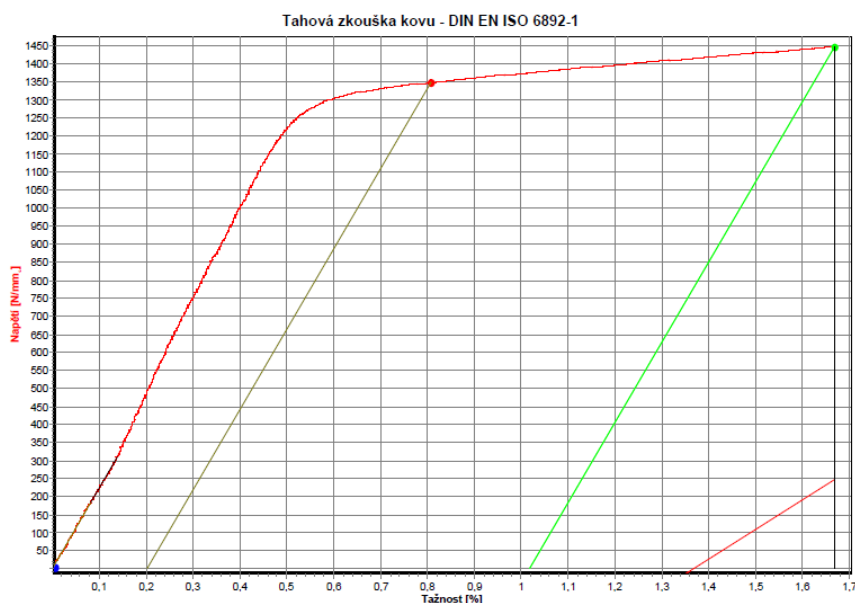
Tabulka 29- Výsledky zkoušky tahem

Uddeholm Heatvar	Vlastní práce					
	Ž1	Ž2	Ž3	V1	V2	V3
R _{p0,2} [MPa]	1017	1061	950	1348	1304	1258
R _m [MPa]	1310	1322	1315	1448	1318	1484
A [%]	3,6	2,71	3,36	1,02	0,28	2,22
E [GPa]	216,92	209,59	217,5	222,7	221,78	207,47

Mezi získanými hodnotami tahovou zkouškou si můžeme všimnout mírných rozdílů, zvláště u hodnot prodloužení. Pro eliminaci chyb a upřesnění hodnot pro závěrečné zhodnocení je nutné zavést aritmetický průměr a jeho směrodatnou odchylku.

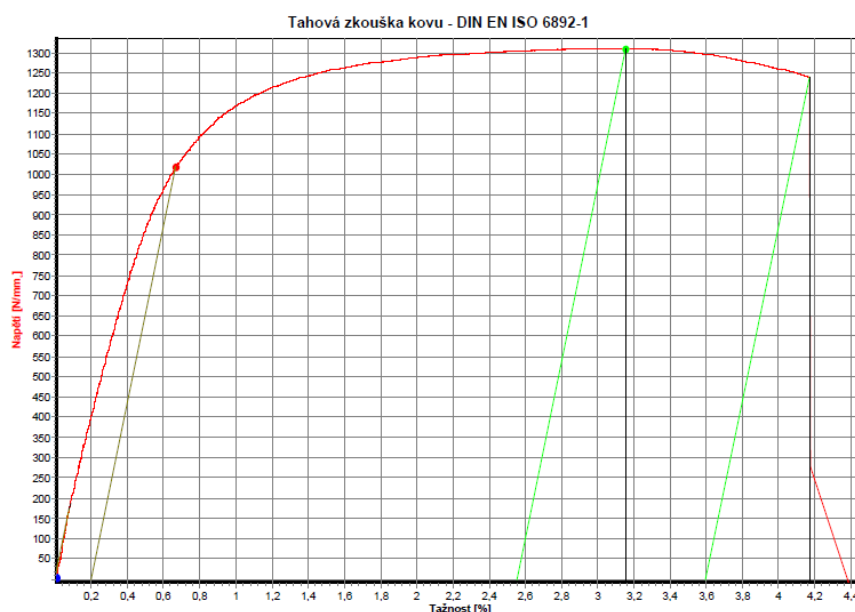
Tabulka 30- Aritmetické průměry výsledků zkoušky tahem

Uddeholm Heatvar	Vlastní práce	
	APŽ	APV
∅R _{p0,2} [MPa]	1009,3 ±45,6	1303,3 ±36,7
∅R _m [MPa]	1315,7 ±4,9	1416,7 ±71,3
∅A [%]	3,22 ±0,38	1,17 ±0,80
∅E [GPa]	214,67 ±3,60	217,32 ±6,97



Obrázek 39- Tahový diagram vzorku V1 (vlastní archiv)

Z Obrázek 39 je patrný průběh tahové zkoušky u vzorku V1. U vzorku se výrazně neprojevila mez kluzu, kde přechází materiál do plastické deformace. Diagramy vzorků V2 a V3 mají velmi podobnou charakteristiku, křivky deformace jsou pouze posunuté. Všechny žíhané vzorky projevily téměř stejnou křivku závislosti napětí na deformaci, stejně jako vzorky vytvrzené projevily nevýraznou mez kluzu. Vzhledem k vyšší houževnatosti nejsou křivky tak lineární viz. Obrázek 40.



Obrázek 40- Diagram tahové zkoušky vzorku Ž1 (vlastní archiv)

4.1.3. Analýza lomových ploch

Pro analýzu lomové plochy vzorku byl vybrán vzorek V2 kvůli výrazné pórovitosti a z žíhaných vzorek Ž2, protože během zkoušky tahem projevily nejnižší tažnost a má nejviditelnější změnu průměru v místě přetržení, tzv. krček.



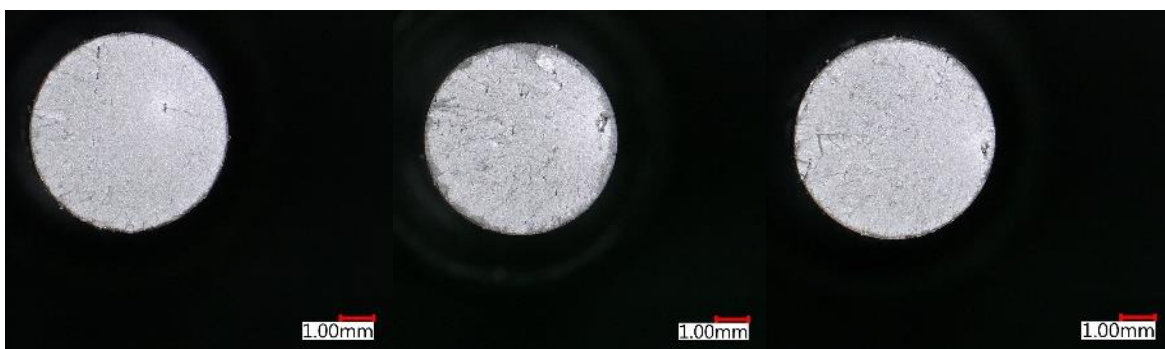
Obrázek 41- Přetržený vzorek V2 (vlastní archiv)



Obrázek 42- Přetržený vzorek Ž2 (vlastní archiv)

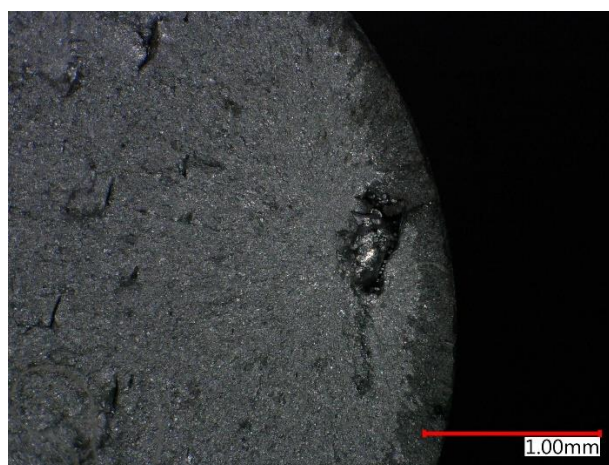
Taktéž je zajímavé sledovat, kde k přetržení došlo. U všech vytvrzených vzorků došlo k přetržení v oblasti blízké středu vzorku, naopak u všech žíhaných vzorků došlo k přetržení v oblasti měřené délky v blízkosti čelistí. Příčina míst přetržení bude z největší pravděpodobnosti souviset s houževnatostí vzorků.

Pro detailnější prozkoumání struktury materiálu přetržených vzorků byly pořízeny mikroskopické snímky na digitálním mikroskopu Keyence VHX-6000.



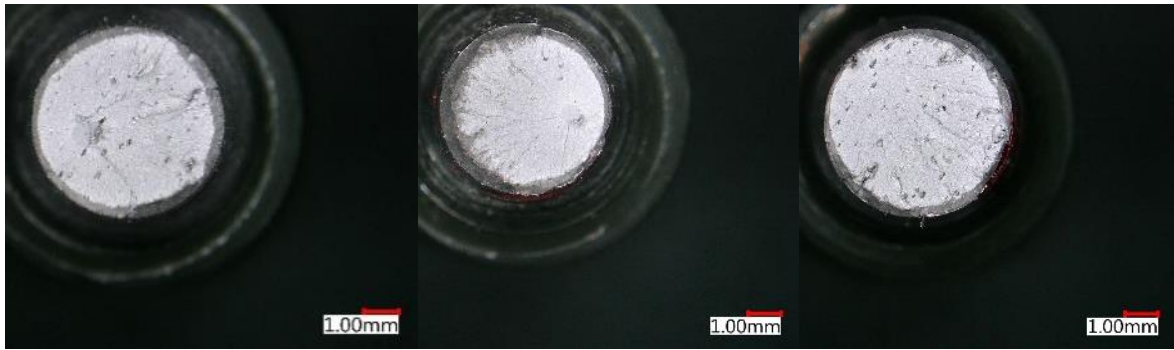
Obrázek 43- Mikroskopické snímky zleva V1, V2, V3 zoom 20x (vlastní archiv)

Na snímku vzorku V2 je vidět stopa porosity, která se nachází na pravé straně vzorku při pohledu na Obrázek 43. Detailnější snímek porosity lze vidět na Obrázek 44.



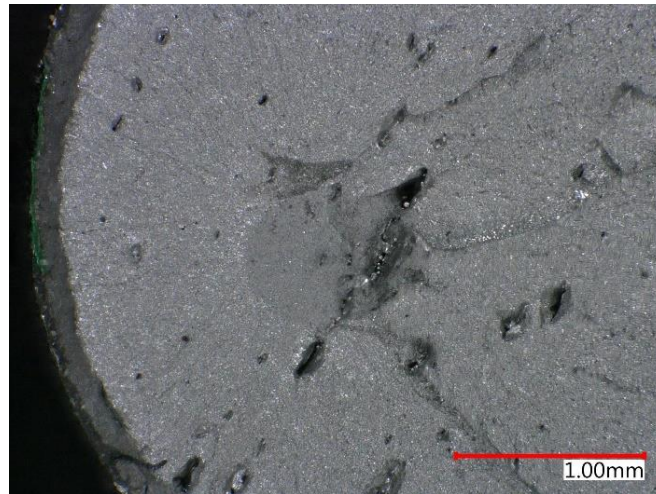
Obrázek 44- Mikroskopický snímek V2 zoom 200x (vlastní archiv)

Právě vzorek zobrazený na Obrázek 44 dosáhl téměř identické meze kluzu a meze pevnosti v tahu, což bude nejpravděpodobněji způsobeno právě vnitřní vadou. Vada může být zapříčiněna nedostatečným spečením prášku nebo nedokonalým uložením prášku v loži při tisku.



Obrázek 45- Mikroskopické snímky zleva Ž1, Ž2 a Ž3 zoom 20x (vlastní archiv)

Všechny žíhané vzorky při zkoušce projevily minimální tvorbu krčku, nejvýraznější krček se projevil na vzorku Ž2. U vzorku Ž1 se opět po přetrhnutí objevila vnitřní vada v podobě pórů, detailnější snímek na poměrně rozměrově veliký pór je zobrazen na Obrázek 46.



Obrázek 46- Mikroskopický snímek Ž1 zoom 100x (vlastní archiv)

4.2. Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Pomocí této dynamické zkoušky zjišťujeme hodnotu rázové houževnatosti. Jedná se o destruktivní zkoušku, kde zkušební těleso opatřené vrubem zpravidla tvaru V, případně U, je umístěno na podpěrách vrubem otočeným směrem od místa úderu a je přeraženo kladivem opatřeným břitem. Před zkouškou je nutné změřit výšku a šířku pod vrubem, tyto údaje budou použity pro dopočítání plochy a pro výsledné dopočítání vrubové houževnatosti. Při samotné zkoušce se totiž odečítá absorbovaná energie [J] daného materiálu. Vrbová houževnatost se následně dopočítá z vzorce [49]:

$$KCV = \frac{KV}{S} [J/cm^3]$$

Zkouška byla provedena dle normy ČSN ISO 148-1:2017. Pro zkoušku bylo použito kladivo s energií 150 J. Zkouška byla provedena v laboratoři Ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT.



Obrázek 47- Použité Charpyho kladivo
(vlastní archiv)

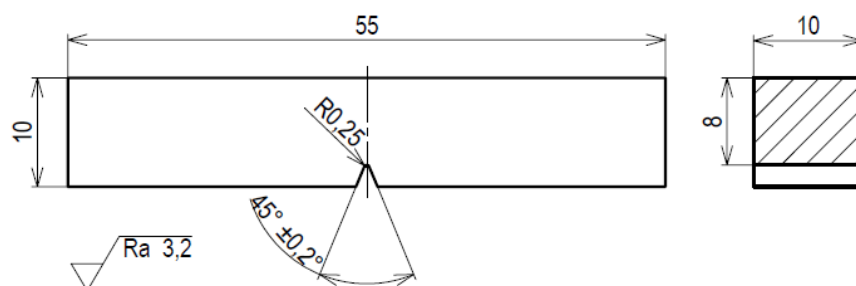


Obrázek 48- Detail nastavení vzorku
(vlastní archiv)

Na Obrázek 47 jde vidět rázové kladivo pro provedení Charpyho zkoušky. Obrázek 48 zobrazuje detail uložení vzorku pro zkoušku, z fotky je patrné natočení vrubu při zkoušce.

4.2.1. Zkušební tělesa

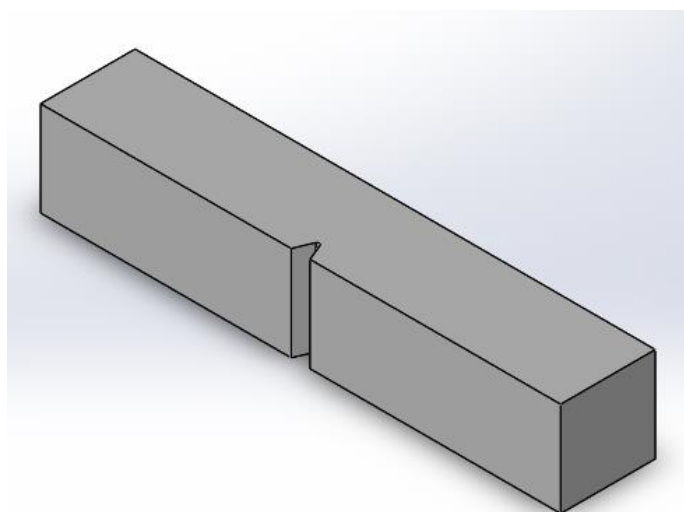
Pro zkoušku byly vyrobeny standardní tělesa dle normy ČSN ISO 148-1:2017 s vrubem V. Pro zkoušku je znovu k dispozici 6 vzorků, z nich byly 3 vyžihány a 3 vytvrzeny. Dále v práci budou žíhané vzorky označovány jako Ž01, Ž02, Ž03 a vzorky vytvrzené budou označeny jako V01, V02, V03.



Obrázek 49- Výkres zkušební vzorku pro Charpyho zkoušku [49]

Norma předepisuje, že vzorky musí být obrobeny na drsnost Ra 3,2 μm , dále norma předepisuje šířku profilu 5, 7,5 nebo 10 mm. Na Obrázek 50 jde vidět

pohled na 3D model zkušební vzorku. V vrub musí mít zaoblení kvůli poloměru nástroje. Při nastavení stejných podmínek, bude nárazová práce u vrubu V vždy menší než u vrubu U, je to způsobeno koncentrací napětí.



Obrázek 50- 3D model zkušební vzorku Charpyho zkoušky (vlastní archiv)

4.2.2. Naměřené hodnoty

Získané hodnoty ze zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy jsou zaznamenány v Tabulka 31. Hodnoty rázové houževnatosti jsou dopočítány podle vzorce zmíněného v kapitole 4.2. Teplota okolního vzduchu, a tedy i vzorků byla naměřena 20 °C.

Tabulka 31- Výsledky zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy

Uddeholm Heatvar	Vlastní práce					
	ŽO1	ŽO2	ŽO3	VO1	VO2	VO3
Tloušťka vzorku a [mm]	9,93	9,93	9,88	9,94	9,93	9,94
Výška vzorku b [mm]	9,93	9,93	9,93	9,94	9,93	9,94
Vrub v [mm]	2	2	2	2	2	2
Výška pod vrubem v_1 [mm]	7,93	7,93	7,93	7,94	7,93	7,94
Plocha pod vrubem [cm ²]	0,7874	0,7874	0,7835	0,7892	0,7874	0,7892
KV [J]	6	4,5	4	2,5	2,5	2,5
KCV [J/cm ²]	7,62	5,71	5,11	3,17	3,17	3,17

Hodnota výšky pod vrubem v_1 byla dopočítána jako rozdíl výšky vzorku b a hloubky vrubu v . Plocha pod vrubem byla dopočítána jako součin výšky pod vrubem v_1 a tloušťky vzorku a , protože pro dopočítání hodnoty KCV je potřeba

znát rozměr plochy v cm², byl tento součin vydělen 100. Protože výsledky vrubové houževnatosti u žíhaných vzorků se mírně liší, je nutné použít pro tyto hodnoty zavedení aritmetického průměru, který pomůže eliminovat chyby měření (viz. Tabulka 32).

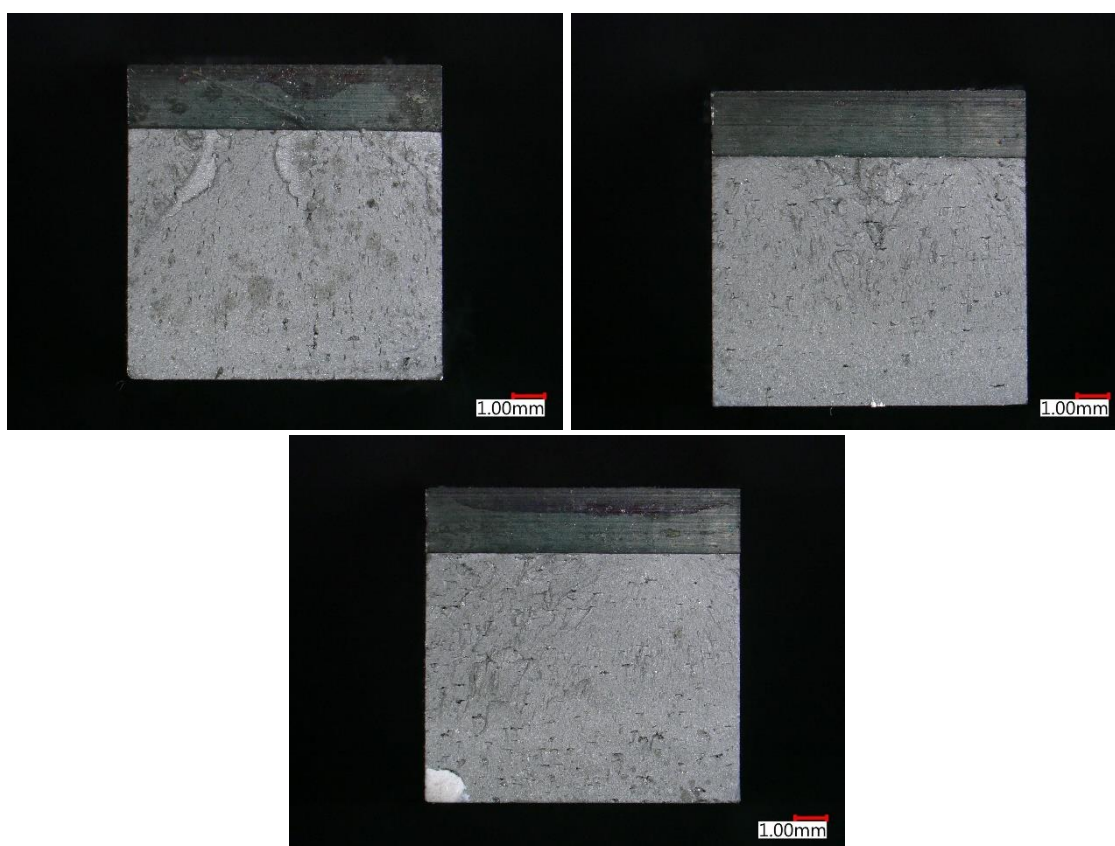
Tabulka 32- Aritmetické průměry zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy

Uddeholm Heatvar	Vlastní práce	
	APŽO	APVO
∅KCV [J/cm ²]	6,15 ±1,1	3,17 ±0,01

Výsledky budou využity v kapitole 4.3 pro porovnání s hodnotami získanými rešerší.

4.2.3. Analýza lomových ploch

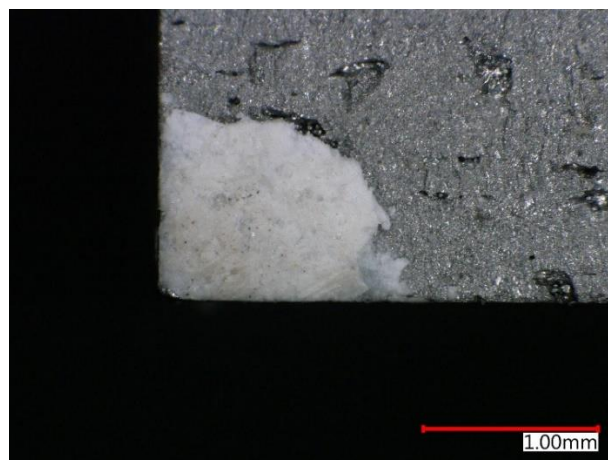
Tato analýza slouží převážně pro určení druhu lomu po zkoušce metodou Charpy. Mikroskopické snímky ze zařízení Keyence VHX-6000 budou dále využity pro zkoumání vnitřních vad materiálu.



Obrázek 51- Mikroskopické snímky zleva VO1, VO2, dole VO3 zoom 20x (vlastní archiv)

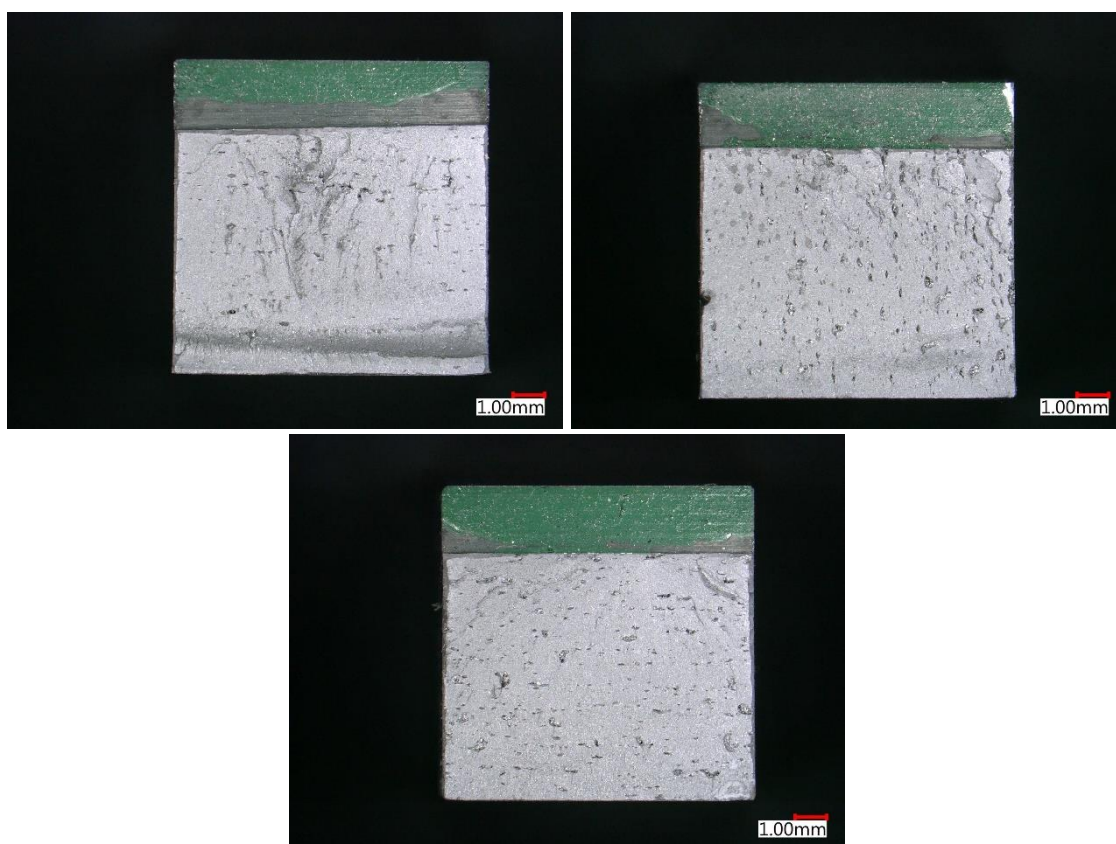
Obrázek 51 zobrazuje snímky z mikroskopu přeražených vytvrzených vzorků. Ze snímků se dá jasně určit, že se u vytvrzených vzorků jedná o křehký lom. Na snímcích jsou vidět typické znaky pro tento druh lomu, jako jsou viditelné krystalky a neprojevení změny tvaru po přeražení. Na vzorcích jde

vidět znovu projevení vady materiálu v podobě pórů. U tělesa VO3 se v levém dolním rohu projevila vada materiálu, bylo nutné ji blíže analyzovat a pořídit detailnější snímek viz. Obrázek 52.



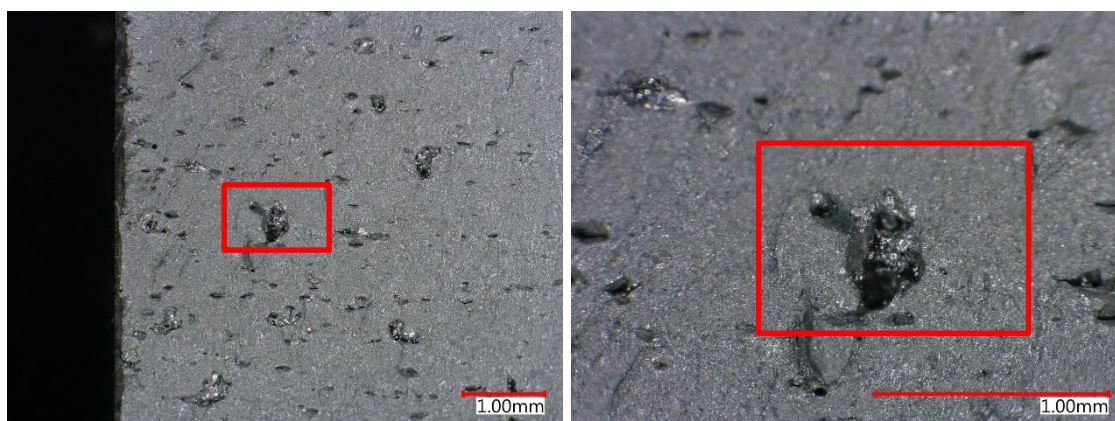
Obrázek 52- Mikroskopický snímek VO3 zoom 100x (vlastní archiv)

Nejspíše se jedná o určitou nehomogenitu materiálu, protože roh má naprosto jiný vzhled a povrch než zbytek odlomené plochy. Zajímavé je, že takováto vada neměla žádný vliv na výslednou hodnotu vrubové houževnatosti.



Obrázek 53- Mikroskopické snímky zleva Ž01, Ž02 dole Ž03 zoom 20x (vlastní archiv)

Při pohledu na lomové plochy na Obrázek 53 lze poměrně jasně tvrdit, že se jedná o křehký lom. U součástí nedošlo k žádné výrazné změně tvaru součástí, pouze u vzorku Ž01 je na spodní části vidět mírné projevení houževnatosti materiálu. Vzorky nevykázaly žádné výrazné změny rozměrů po přeražení.



Obrázek 54- Mikroskopické snímky Ž03 zoom 50x a 150x (vlastní archiv)

Protože u vzorku Ž03 byla naměřena nejmenší nárazová práce, a tedy dopočítána i nejmenší hodnota vrubové houževnatosti, bylo nutné se na tento vzorek detailněji zaměřit a pořídit snímky s větším přiblížením. Při přiblížení na jeden z větších pórů jsou vidět nespečené kuličky materiálu, což byla nejspíše hlavní příčina nízké naměřené hodnoty nárazové práce.

4.3. Porovnání mechanických vlastností s hodnotami získanými rešerší

Naměřené a dopočtené hodnoty budou porovnány s hodnotami mechanických vlastností získaných ve studii Chadha et al. [47] a studii Kvarned et al. [48], DP Johanssona [46] v porovnání nebude využito, protože autor dělal analýzu tepelně nezpracovaného materiálu.

Tabulka 33- Analýza Uddeholm Heatvar (rešerše+ praktická část)

Heatvar	Hodnoty udávané (naměřené)		
	Chadha et al. [47]	Kvarned et al. [48]	Vlastní práce
Tvrдость [HRC]	52 ±2	48	47-48
R _{p0,2} [MPa]	1660 ±18	-	1303,3 ±36,7
R _m [MPa]	1980 ±20	-	1416,7 ±71,3
A [%]	2 ±1	-	1,17 ±0,8
Rázová houževnatost [J/cm ²]	-	7	3,17 ±0,01
E [GPa]	-	-	217,32±6,97

Hodnoty získané vlastní prací se poměrně rozcházejí s těmi, které naměřili autoři studií. Bohužel pro podrobnější analýzu a skutečné určení mechanických vlastností by bylo potřeba získání mnohem více dat, která momentálně nejsou k dispozici. Rozdíl získaných dat by neměl být způsoben nastavením tepelného zpracování, to bylo dodrženo dle doporučení výrobce, stejně jako nastavení dodrželi autoři studií. Jako nejpravděpodobnější příčina rozdílů mechanických vlastností se jeví přítomnost nedokonalostí v podobě pórů u vzorků vlastní studie, které byly pozorovány po přerušení zkušebních vzorků.

Vzhledem k rozporu získaných hodnot budou do závěrečného přehledu zakomponována data získané studií Chadha et al. [47] a vlastní studie. Pro přesné určení mechanických vlastností materiálu bude do budoucna nutné provést více zkoušek a analýz.

4.4. Přehled materiálů

Tyto přehledy obsahují informace o materiálech získaných v rešeršní části. V Tabulka 34 jsou zobrazeny hlavní legující prvky každého prášku, ty jsou poslopně srovnány stejně jako v kapitole 3.

V Tabulka 35 jsou zpracovány mechanické vlastnosti materiálů, vždy byly vybrány nejlepší dosažitelné hodnoty udávané výrobcem, popřípadě doplněné informacemi ze studií, pokud se jednalo o stejně zpracované vzorky. Chybějící informace jsou v polích proškrtnuty, bohužel je neudává výrobce a nebyly zpracovány žádnou studií.

Jak již bylo zmíněno výše, pro materiál Uddeholm Heatvar byly do Tabulka 35 zavedeny výsledky vlastní práce a výsledky studie Chadha et al. [47] Bylo to nutné, protože ani jedny hodnoty nejsou potvrzeny jinou studií.

Tabulka 34- Přehled materiálů: chemické složení

Materiál	Chemické složení [%]													
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al	P	S	Cr	V	Cu	Nb+Ta
1.2709 [24]	max. 0,03	max. 0,1	max. 0,1	17-19	4,5- 5,2	max. 0,8	8,5- 9,5	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,5	-	-	-
1.2344 [28]	0,32- 0,45	0,80- 1,25	0,2- 0,6	0,75	1,10- 1,75	-	-	-	0,03	0,03	4,75- 5,5	0,8- 1,2	0,75	-
W360 AMPO [33]	0,5	0,2	0,25	-	3	-	max. 0,1	-	-	-	4,5	0,55	-	-
AM Corrax [35]	0,03	0,3	0,3	9,2	1,4	-	-	1,6	-	-	12	-	-	-
M789 AMPO [38]	max. 0,02	-	-	10	1	1	-	0,6	-	-	12,2	-	-	-
17-4PH [41]	0,07	1	1	3-5	-	-	-	-	0,04	0,03	15- 17,5	-	3-5	0,15- 0,45
Heatvar [45]	0,02	-	-	2	8	-	12	-	0,002	0,002	5	-	-	-

Tabulka 35- Přehled materiálů: mechanické vlastnosti

Materiál	Orientace tisku	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]		Prodloužení [%]		Tvrdost [HRC]		Rázová houževnatost [J/cm ²]	
		As-built	Po TZ	As-built	Po TZ	As-built	Po TZ	As-built	Po TZ	As-built	Po TZ
1.2709 [24]	Horizontální	1100 ±100	2013 ±16	1200 ±100	2094 ±7	12 ±4	5,2 ±0,8	33-37	53	-	10
1.2344 [28, 30]	Horizontální	987 ±39	1528 ±32	1244 ±106	1719 ±239	2	4	-	50	-	-
W360 AMPO [33]	-	-	1500- 1670	-	1970- 2010	-	6,6-8,1	-	55-57	-	8-14
AM Corrax [35, 36]	Vertikální	760	1600	1150	1700	16	10	34	50	-	6,22- 18,70
M789 AMPO [37, 39]	-	843 ±17	1720 ±50	1019 ±17	1850 ±50	16 ±2	6 ±2	31,3 ±1,4	52 ±1	14,3 ±6	10 ±4
17-4PH [41]	Horizontální	517 ±27	1024 ±11	987 ±22	1359 ±9	26 ±2	16 ±2	-	43	-	-
Heatvar (Chadha et al. [47])	-	-	1660 ±18	-	1980 ±20	-	2 ±1	-	52 ±2	-	-
Heatvar (vlastní studie)	-	-	1303,3 ±36,7	-	1416,7 ±71,3	-	1,17 ±0,8	-	47-48	-	3,17 ±0,01

Závěr

V teoretické části byla popsána technologie 3D tisku a její rozdělení, konkrétněji byla definována technologie Direct metal laser sintering patřící do skupiny Powder bed fusion (dle ISO/ASTM 52900:2015), která je nejčastěji využívána pro zpracování nástrojových ocelí používaných v aditivní výrobě. Dále se teoretická část zaměřila na parametry ovlivňující výslednou kvalitu a mechanické vlastnosti dílu jako je tepelné zpracování, chemicko-tepelné úpravy a orientace vůči podložce při tisku. Pro tyto parametry byly vyhledány odborné publikace, z kterých se dají vyvodit závěry jako nejvhodnější poloha tisku pro dosažení nejlepších mechanických vlastností, jaké tepelné zpracování použít pro aditivně zpracované nástrojové oceli nebo které povlaky použít pro tisknuté součásti pro dosažení nejlepší odolnosti proti korozi. Následně byly popsány benefity 3D tisku a důvody proč je využít pro aplikace na nástroje a formy, jedním ze zmíněných benefitů byla technologie konformního chlazení, která byla porovnána s konvenčně vyrobeným chlazením a opět byly k tématice nalezeny odborné publikace, které se problémem zabývaly. Došlo k vyvození výsledků, že použitím konformního chlazení může dojít k zkrácení vstřikovacího cyklu v řádech desítek sekund a prodloužení životnosti nástroje. Jako další benefity 3D tisku byly popsány použití odlehčených struktur, vedoucí k odlehčení dílu nebo ušetření materiálu a technologie hybridní stavby, která se například využívá k opravě porušené formy.

Poslední kapitola rešerše byla nejvíce stěžejní z teoretické části pro tuto práci. Představila problematiku nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě a její největší představitele, které se v praxi běžně používají. Jejich mechanické vlastnosti byly porovnány s hodnotami pořízenými z odborných studií. Hlavním zástupcem této kategorie ocelí je bezpochyby prášek 1.2709, který má výborné mechanické vlastnosti jako je mez pevnosti v tahu 2094 MPa při tvrdosti 53 HRC po tepelném zpracování. Firmy jako Böhler nebo Uddeholm se tento materiál snaží předčit svými modifikovanými prášky, některé z nich byly v kapitole 3 popsány také. Jako poslední materiál byl popsán prášek Uddeholm Heatvar, který společnost navrhla speciálně pro užití při vysokotlakém lití hliníku. K materiálu bylo nalezeno několik odborných studií, které zkoumaly jeho mechanické vlastnosti, chemické složení nebo chování při práci za tepla. Tato část rešerše byla využita v praktické části pro tvorbu přehledu nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě.

Praktická část se zabývala zkoumáním mechanických vlastností těles vyrobených z prášku Uddeholm Heatvar. Pro analýzu materiálu byly zhotoveny vzorky pro zkoušku tahem probíhající dle normy DIN EN ISO 6892-1 a zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy podle normy ČSN ISO 148-1:2017. Vzorky byly zpracovány dvěma různými způsoby tepelného zpracování, první pouze

žiháním na tvrdost 40 HRC, druhé žiháním a vytvrzením na tvrdost 47-48 HRC. Pro přesnější analýzu materiálu by bylo vhodné mít k dispozici větší množství vzorků, ale to z ekonomických důvodů nebylo možné. Ze zkoušky tahem lze konstatovat, že tepelné zpracování má veliký vliv na hodnotu prodloužení materiálu, ta byla naměřena $3,22 \pm 0,38$ % pro žíhané vzorky a $1,17 \pm 0,80$ % pro vzorky vytvrzené. Rozdíly v mezi pevnosti a mezi kluzu v tahu nejsou tak markantní, vytvrzené vzorky dosahovaly meze pevnosti $1416,7 \pm 71,3$ MPa a žíhané pouze o 100 MPa méně, tedy $1315,7 \pm 4,9$ MPa. Naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu byly naměřeny téměř identické. Ze zkoušky rázem v ohybu byla zjištěna hodnota vrubové houževnatosti KCV žíhaných vzorků $6,15 \pm 1,1$ J/cm² a vytvrzených dílů $3,17 \pm 0,01$ J/cm². Na přeražených vzorcích byl vyhodnocen druh lomu jako křehký. Při zkoumání lomových ploch bylo zjištěno, že materiál vykazuje nedokonalosti ve formě pórů. Následně došlo k porovnání naměřených hodnot s těmi získanými v teoretické části. Hodnoty se výrazně neshodovaly, proto byly do přehledu zaneseny výsledky praktické části i výsledky studie Chadha et al. [47] V závěru byl vytvořen ucelený tabulkový přehled všech nalezených nástrojových materiálů používaných v aditivní výrobě. Do přehledů byly zakomponovány informace o chemickém složení a mechanických vlastnostech nástrojových ocelí.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

Seznam použité literatury

- [1] MLITZ, Kimberly. 3D printing market size worldwide. *Statista* [online]. 2021 [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>
- [2] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2021-6-15]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
- [3] GIBSON, Ian a David ROSEN. *ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES*. Second edition. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [4] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, 117, 371-392 [cit. 2021-7-12]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019
- [5] ISO/ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing — General principles — Terminology*. ISO, 2015.
- [6] PŘIBYL, Petr. Aditivní výroba v kostce, aneb: vyznáte se v AM? *Techmagazin* [online]. Tech Media Publishing, 2019 [cit. 2021-7-12]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47364>
- [7] MARREY, Mallikharjun, Ehsan MALEKIPOUR, Hazim EL-MOUNAYRI a Eric J. FAIERSON. A Framework for Optimizing Process Parameters in Powder Bed Fusion (PBF) Process Using Artificial Neural Network (ANN). *Procedia Manufacturing* [online]. 2019, 34, 505-515 [cit. 2021-7-14]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2019.06.214
- [8] KEMPEN, K., E. YASA, L. THIJS, J.-P. KRUTH a J. VAN HUMBEECK. Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia* [online]. 2011, 12, 255-263 [cit. 2021-6-15]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.033
- [9] TAN, Chaolin, Kesong ZHU, Xin TONG, Yushan HUANG, Jing LI, Wenyong MA, Fuhai LI a Tongchun KUANG. Microstructure and Mechanical Properties of 18Ni-300 Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. In: *Proceedings of the 2016 6th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2016)* [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2016, 2016, s. - [cit. 2021-6-15]. ISBN 978-94-6252-249-7. Dostupné z: doi:10.2991/icadme-16.2016.66

- [10] HRBÁČKOVÁ, T, T SIMSON, J KOCH a G WOLF. The effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of additively manufactured components. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **461** [cit. 2021-6-15]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/461/1/012026
- [11] MONKOVA, Katarina, Ivana ZETKOVA, Ludmila KUČEROVÁ, Miroslav ZETEK, Peter MONKA a Milan DAŇA. Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. *Archive of Applied Mechanics* [online]. 2019, **89(5)**, 791-804 [cit. 2021-6-15]. ISSN 0939-1533. Dostupné z: doi:10.1007/s00419-018-1389-3
- [12] ASNAFI, Nader. Tool and Die Making, Surface Treatment, and Repair by Laser-based Additive Processes. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* [online]. 2021, **166(5)**, 225-236 [cit. 2021-6-15]. ISSN 0005-8912. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-021-01113-2
- [13] EVANS, Justin. How Does Part Orientation Affect 3D Printing? *3D beginners* [online]. 08.04.2021 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: <https://www.3dbeginners.com/how-does-part-orientation-affect-3d-printing/>
- [14] REDWOOD, Ben. How does part orientation affect a 3D print? *HUBS* [online]. [cit. 2021-7-11]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>
- [15] WANG, Li, Qing Song WEI, Peng Ju XUE a Yu Sheng SHI. Fabricate Mould Insert with Conformal Cooling Channel Using Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, **502**, 67-71 [cit. 2021-6-15]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.502.67
- [16] MAZUR, Maciej, Martin LEARY, Matthew MCMILLAN, Joe ELAMBASSERIL a Milan BRANDT. SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2016, **22(3)**, 504-518 [cit. 2021-6-15]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-06-2014-0075
- [17] BERGER, Gerald R., David ZORN, Walter FRIESENBICHLER, Franz BEVC a Christian J. BODOR. Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2019, **59(s2)**, E180-E188 [cit. 2021-6-15]. ISSN 00323888. Dostupné z: doi:10.1002/pen.25024

- [18] ARMILLOTTA, Antonio, Raffaello BARAGGI a Simone FASOLI. SLM tooling for die casting with conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **71**(1-4), 573-583 [cit. 2021-6-15]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-013-5523-7
- [19] BRØTAN, Vegard, Olav Åsebø BERG a Knut SØRBY. Additive Manufacturing for Enhanced Performance of Molds. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **54**, 186-190 [cit. 2021-6-15]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.05.074
- [20] KANG, Jinwu, Haolong SHANGGUAN, Chengyang DENG, Yongyi HU, Jihao YI, Xiang WANG, Xiaochuan ZHANG a Tao HUANG. Additive manufacturing-driven mold design for castings. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **22**, 472-478 [cit. 2021-6-15]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.04.037
- [21] BROOKS, Hadley a Kevin BRIGDEN. Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, **11**, 16-22 [cit. 2021-6-15]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2016.03.004
- [22] Opravy forem. *Innomia* [online]. eStudio [cit. 2021-7-14]. Dostupné z: <http://www.old.innomia.cz/sluzby/opravy-forem#doprava>
- [23] Surface Modification and Wear Properties of Direct Metal Laser Sintered Hybrid Tools Used in Moulds. *Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2018, **64**(2) [cit. 2021-6-15]. ISSN 00392480. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2017.4942
- [24] EOS. *EOS MaragingSteel MS1*. 2014.
- [25] CASATI, Riccardo, Jannis LEMKE, Ausonio TUISSI a Maurizio VEDANI. Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting. *Metals* [online]. 2016, **6**(9) [cit. 2021-6-23]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met6090218
- [26] SANDVIK. *OSPREY® 18NI300-AM MARAGING STEEL FOR ADDITIVE MANUFACTURING*. 2019.
- [27] ANDRONOV, Vladislav. *Využití technologie DMLS při výrobě forem a nástrojů*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT.
- [28] SLM SOLUTIONS. *Material Data Sheet Tool steel 1.2344/ A681 H13/ H13*. Lübeck, Německo.

- [29] LO, Arlene. FARSOON SUCCESSFULLY ADAPTS H13 TOOL STEEL FOR DMLS ADDITIVE MANUFACTURING. *3D Printing Industry* [online]. Farsoon Technologies, 19.08.2019 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/farsoon-successfully-adapts-h13-tool-steel-for-dmls-additive-manufacturing-160363/>
- [30] ÅSBERG, M., G. FREDRIKSSON, S. HATAMI, W. FREDRIKSSON a P. KRAKHMALOV. Influence of post treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **742**, 584-589 [cit. 2021-6-30]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2018.08.046
- [31] Hot Isostatic Pressing: Improving quality and performance in AM parts production. *METAL AM* [online]. [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/hot-isostatic-pressing-improving-quality-and-performance-in-3d-printing/>
- [32] KUBÍKOVÁ, Kristýna. *Využití technologie 3D tisku k výrobě metalurgického nářadí*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. TUL.
- [33] BÖHLER. *Böhler W360 AMPO*. 2018.
- [34] BÖHLER. *FROM CONCEPT TO COMPONENT*. Düsseldorf, Germany, 2020.
- [35] UDDEHOLM, Uddeholm. *Uddeholm AM Corrax*. 2. vydání. 2017.
- [36] OIKONOMOU, Christos, Seshendra KARAMCHEDU, Stefan HEINO a Johnny SJÖSTRÖM. Material Properties and Quality Considerations for Tool Steels Made with AM Technology. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* [online]. 2017, **162**(5), 188-191 [cit. 2021-7-6]. ISSN 0005-8912. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-017-0591-x
- [37] BÖHLER. *Fe-based Alloys- Böhler M789 AMPO*. 2020.
- [38] BÖHLER. *Böhler M789 AMPO- Gas atomized powder for additive manufacturing*.
- [39] TIAN, Yuan, Robert PALAD a Clodualdo ARANAS. Microstructural evolution and mechanical properties of a newly designed steel fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **36** [cit. 2021-7-11]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101495
- [40] EOS. *EOS StainlessSteel 17-4PH*. 2017.
- [41] SLM SOLUTIONS. *Stainless Steel 17-4PH / 1.4542 / A564*.

- [42] Böhler N700 AMPO. *Böhler- edestahl* [online]. 2021 [cit. 2021-7-6]. Dostupné z: <https://www.boehler-edelstahl.com/en/products/n700ampo/>
- [43] TURK, Christoph, Horst ZUNKO, Christin AUMAYR, Harald LEITNER a Marianne KAPP. Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* [online]. 2019, **164**(3), 112-116 [cit. 2021-7-11]. ISSN 0005-8912. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-019-0835-z
- [44] HU, Zhiheng, Haihong ZHU, Hu ZHANG a Xiaoyan ZENG. Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel. *Optics & Laser Technology* [online]. 2017, **87**, 17-25 [cit. 2021-7-11]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2016.07.012
- [45] UDDEHOLM ADDITIVE MANUFACTURING. *VOM PULVER ZUM BAUTEIL*. Voestalpine, 2019.
- [46] JOHANSSON, Kenny. *Process and microstructure development of a LPBF produced maraging steel*. Karlstad, 2020. Diplomová práce. Vysoká škola v Karlstadu.
- [47] TIAN, Yuan, Kanwal CHADHA, Sang Hoon KIM a Clodualdo ARANAS. Strengthening mechanisms in a heatvar hot work tool steel fabricated by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2021, **805** [cit. 2021-7-12]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2021.140801
- [48] KVARNED, Anders, Christos OIKONOMOU a Sofia BRORSON. UDDEHOLM HEATVAR®: A NEW AM MATERIAL WITH EXCELLENT HIGH-TEMPERATURE PROPERTIES FOR DEMANDING HOT WORK APPLICATIONS. *Metal Additive Manufacturing Conference*. Orebro, 2020, , 207-214.
- [49] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [50] *DIN 50125: Test pieces for tensile testing of metallic materials*. Německo, 2004.