

Vliv tepelného zpracování na schopnost dokončování 3D tištěných vnitřních kovových struktur

Jakub Zlámal

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jakub Zlámal
Osobní číslo:	T23650
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv tepelného zpracování na schopnost dokončování 3D tištěných vnitřních kovových struktur

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii zabývající se řešenou tematikou.
- Návrh a výroba zkušebních vzorků.
- Provedení tepelného zpracování zkušebních vzorků.
- Měření tvrdosti zkušebních vzorků

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. TOTTEN, George E. (ed.), [2007]. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. Second edition. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis, Taylor & Francis Group. ISBN 9780849384554.
2. MACHEK, Václav, 2011. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 9788001046838.
3. MILEWSKI, John O., 2017. *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. Springer Series in Materials Science. Cham: Springer International Publishing. Dostupné z: <https://doi.org/9783319582054>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hanzlík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

V této bakalářské práci byl analyzován vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tištěných kovových struktur vyrobených metodami DMLS a ADAM. Byly použity nástrojové oceli 1.2709 a 1.2344, které byly podrobeny specifickým druhům tepelného zpracování, jako je precipitační vytvrzení a žíhání. Mechanické vlastnosti zkušebních těles byly hodnoceny pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti, přičemž byla sledována vtisková tvrdost, Vickersova tvrdost, modul pružnosti, hloubka vtisku a deformační práce. Výsledky potvrdily významný vliv tepelného zpracování na změnu mechanických parametrů a tím i poukázaly na vhodnost materiálů pro dokončovací operace vnitřních kanálků aditivně vyráběných tvarových dutin.

Klíčová slova: aditivní výroba, tepelné zpracování, DMLS, ADAM, tvrdost, nástrojové oceli

ABSTRACT

In this bachelor's thesis, the influence of heat treatment on the mechanical properties of 3D-printed metallic structures produced by the DMLS and ADAM methods was analyzed. Tool steels 1.2709 and 1.2344 were used and subjected to specific types of heat treatment, such as precipitation hardening and annealing. The mechanical properties of the samples were evaluated by instrumented hardness testing, monitoring parameters including indentation hardness, Vickers hardness, elastic modulus, indentation depth, and deformation work. The results confirmed a significant impact of heat treatment on the alteration of mechanical parameters and thus on the suitability of materials for the finishing operations of internal channels in additively manufactured cavities.

Keywords: additive manufacturing, heat treatment, DMLS, ADAM, hardness, tool steels

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Hanzlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a podporu během celého zpracování práce.

Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za pomoc s měřením hodnot v praktické části mé práce.

Poděkování patří také firmám TECRON s.r.o. za výrobu vzorků technologií ADAM a společnosti INNOMIA a.s. za výrobu vzorků technologií DMLS, čímž významně přispěly k realizaci praktické části této bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ROZDĚLENÍ OCELÍ.....	13
1.1 DĚLENÍ PODLE CHEMICKÉHO SLOŽENÍ	13
1.1.1 Nelegované oceli	14
1.1.2 Legované oceli	15
1.2 NÁSTROJOVÉ OCELI PRO ADITIVNÍ TECHNOLOGIE.....	16
1.2.1 Kovové prášky	17
1.2.2 Nástrojová ocel H13 (1.2344)	18
1.2.3 Nerezová ocel AISI 316L (1.4401)	18
1.2.4 Legovaná ocel Maraging 300 (1.2709)	19
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ	20
2.1 ZÁKLADNÍ DRUHY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ A JEJICH VLIV NA MIKROSTRUKTURU KOVŮ	20
2.1.1 Kalení	20
2.1.2 Popouštění	22
2.1.3 Žihání	24
2.2 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	26
2.2.1 Nitridace	26
2.2.2 Cementace	27
2.2.3 Hot Isostatic Pressing (HIP)	28
2.3 VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA MIKROSTRUKTURU KOVŮ VYRÁBĚNÝCH ADITIVNÍMI TECHNOLOGIEMI	29
2.3.1 Zlepšení mechanických vlastností (pevnost, tvrdost) teplem	29
2.3.2 Homogenizace mikrostruktury aditivních kovových materiálů	30
2.3.3 Kombinované procesy a jejich efekt na mikrostrukturu	31
3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY PRO KOVOVÉ MATERIÁLY	32
3.1 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ ADITIVNÍ VÝROBY DLE ASTM F42	32
3.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)	33
3.1.2 Binder jetting (BJ).....	33
3.1.3 Directed Energy Deposition (DED)	34
3.1.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	35
3.1.5 Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM).....	36
3.1.6 Srovnání metod DMLS a ADAM	37
3.2 CHARAKTERISTIKY ADITIVNĚ VYRÁBĚNÝCH SOUČÁSTÍ.....	39
3.2.1 Mechanické vlastnosti a drsnost povrchu	39
3.2.2 Vnitřní a povrchové vady	40
3.2.3 Srovnání konvenčních a aditivních technologií výroby	40
4 DOKONČOVACÍ OPERACE VNĚJŠÍCH A VNITŘNÍCH 3D TIŠTĚNÝCH STRUKTUR	41

4.1	BROUŠENÍ A LEŠTĚNÍ	42
4.1.1	Broušení.....	42
4.1.2	Leštění	42
4.2	NEKONVENČNÍ DOKONČOVÁNÍ VNITŘNÍCH STRUKTUR	43
4.2.1	Abrasive Flow Machining (AFM).....	43
4.2.2	Elektrochemické leštění	45
5	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	46
5.1	STATICKE METODY	46
5.1.1	Rockwellova zkouška (HRC, HRB, HRF)	46
5.1.2	Brinellova zkouška (HB).....	48
5.1.3	Vickersova zkouška (HV)	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
6	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	52
7	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZKUŠEBNÍ MATERIÁL	53
7.1	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	53
7.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	54
8	NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY.....	56
8.1	VTISKOVÁ TVRDOST	56
8.2	VICKERSOVA TVRDOST.....	57
8.3	MODUL PRUŽNOSTI (YOUNGŮV MODUL)	59
8.4	HLOUBKA VTISKU.....	60
8.5	DEFORMAČNÍ PRÁCE.....	61
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	63
9.1	VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	63
9.2	KORELACE MEZI MECHANICKÝMI VELIČINAMI	64
9.3	VLIV MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ NA DOKONČOVACÍ OPERACE	64
10	ZÁVĚR.....	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77

ÚVOD

Aditivní výroba kovových materiálů je v posledních letech uznávána jako velice perspektivní výrobní metoda, umožňující realizaci tvarově složitých konstrukcí, jejichž výroba konvenčními metodami by byla obtížná nebo ekonomicky nevýhodná. Významnou oblastí zájmu se stává ovlivnění výsledných vlastností výrobků prostřednictvím řízeného tepelného zpracování, jehož účelem je snížení vnitřních pnutí, odstranění porozity a homogenizace mikrostruktury. Tím je dosaženo vyšší kvality mechanických vlastností a spolehlivosti vyráběných součástí.

V této bakalářské práci bylo cílem analyzovat vliv dvou druhů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z materiálů 1.2709 a 1.2344, vyrobených metodami DMLS a ADAM. Výběr tématu byl proveden s ohledem na rostoucí požadavky na přesné a kvalitní formy s konformním chlazením v oblasti vstřikování plastů. Konformní chladicí kanálky mají komplexní geometrii, která je velice náročná na výrobu konvenčními technologiemi a stejně tak problematické jsou následné dokončovací operace těchto tvarových dutin. Cílem této práce bylo přispět k lepšímu pochopení vztahu mezi tepelným zpracováním, mechanickými vlastnostmi a možnostmi dokončování vnitřních struktur.

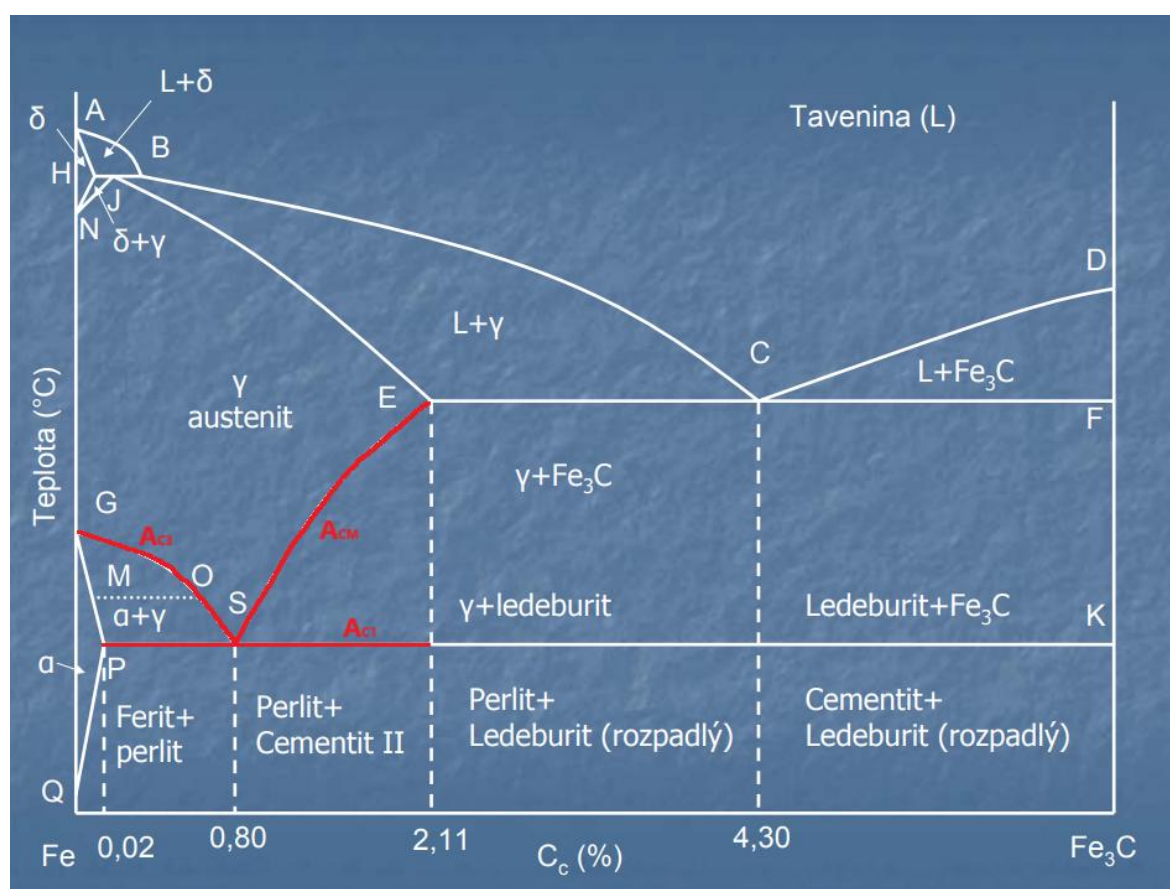
Teoretická část práce shrnuje poznatky o dělení a vlastnostech ocelí, základních principech tepelného a chemicko-tepelného zpracování kovů, principech aditivních technologií, metodách povrchových úprav a na závěr i metodách měření tvrdosti. V praktické části bylo realizováno experimentální měření tvrdosti, modulu pružnosti, hloubky vtisku a deformační práce, přičemž výsledky byly analyzovány z hlediska změn vlastností v závislosti na zvoleném způsobu tepelného zpracování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ OCELÍ

Oceli jsou považovány za jedny z nejpoužívanějších materiálů v téměř všech stěžejních odvětvích průmyslu nebo stavebnictví. Zejména díky široké škále použití a vlastností jako jsou například houževnatost, tvrdost, pevnost, teplotní odolnost, korozivzdornost atd.

Ocel je slitina železa s uhlíkem a dalšími legujícími prvky a nečistotami, přičemž obsah uhlíku nepřesahuje v oceli více než 2,11 %. Různé vlastnosti ocelí jsou dosaženy díky různému složení slitiny a následné tepelné či chemické úpravě, v závislosti na dané aplikaci a požadovaným vlastnostem. [1]



Obrázek 1 Rovnovážný binární diagram Fe- Fe_3C [2]

1.1 Dělení podle chemického složení

Chemické složení hraje významnou roli. Základní kategorizace ocelí je určována obsahem uhlíku a dalších legujících prvků, přičemž každá skupina má výrazně odlišné vlastnosti a druh využití. V této kapitole je stručně popsáno základní rozdělení ocelí a jejich vlastností.

1.1.1 Nelegované oceli

Nelegované oceli obsahují převážně železo a uhlík, přičemž obsah legujících prvků je zanedbatelný. Mechanické vlastnosti těchto ocelí závisí hlavně na obsahu uhlíku. Jsou rozděleny na:

- Nízkouhlíkové oceli (do 0,3 % C) – měkké oceli s dobrou tvárností a svařitelností, díky čemuž jsou využívány pro výrobu konstrukčních profilů, nosníků a pro stavební aplikace. [3]



Obrázek 2 Trubky z nízkouhlíkové oceli [5]

- Středně uhlíkové oceli (0,3–0,6 % C) – mají zvýšenou pevnost a odolnost proti opotřebení v porovnání s nízkouhlíkovými oceli, jsou používány v automobilovém průmyslu nebo pro ozubená kola a hřídele. [3]



Obrázek 3 Ozubené kolo ze středně uhlíkové oceli [6]

- Vysokouhlíkové oceli (nad 0,6 % C) – je dosaženo vysoké tvrdosti a pevnosti díky vysokému obsahu uhlíku, který také umožňuje dobrou prokalitelnost. Uplatnění je nacházeno ve výrobě řezných nástrojů nebo ložisek. [3]



Obrázek 4 Ložisko
z vysokouhlíkové oceli
[7]

1.1.2 Legované oceli

Legované oceli jsou obohaceny o legující prvky, které významně a pozitivně ovlivňují vlastnosti oceli. Zvyšují pevnost, tvrdost, teplotní odolnost a snižují opotřebení. Mezi základní legující prvky patří mangan, křemík, chrom, molybden, nikl. Dvě základní skupiny jsou rozlišovány podle obsahu legujících prvků:

- Nízkolegované oceli (do 5 % legujících prvků) – využívané pro aplikace, kde požadujeme lepší mechanické vlastnosti, než kterých jsme schopni dosáhnout použitím nelegovaných ocelí. Stále je však zachována ekonomická výhodnost v porovnání s vysokolegovanými oceli. Používají se při konstrukci tlakových lahví, parních kotlů a pružin. [3]



Obrázek 5 Parní kotel z nízkolegované oceli [8]

- Vysokolegované oceli (nad 5 % legujících prvků) – díky legujícím prvkům je dosaženo vlastností jako korozivzdornost, žáruvzdornost, houževnatost při nízkých teplotách apod. Uplatnění těchto vlastností se využívá ve speciálních aplikacích. Např. v chemickém průmyslu v korozivním prostředí nebo pro díly vystavené extrémním teplotním a zátěžovým podmínkám. Jedná se také o nejdražší ocelové slitiny s náročnější zpracovatelností. [3]



Obrázek 6 Potrubí z korozivzdorné vysokolegované oceli [9]

1.2 Nástrojové oceli pro aditivní technologie

Materiály používané v aditivní výrobě, jako jsou nástrojové oceli, jsou považovány za klíčové pro zajištění specifických vlastností finálního dílu, např. vstřikovací formy. Splněním požadavků zmíněných níže je dosaženo zvýšení efektivity práce a snížení frekvence výměny či oprav náradí. Mezi základní požadované vlastnosti patří:

- **Vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení** – aby forma zvládla co největší počet cyklů vstřikování, musí se zabránit deformacím způsobeným opakovaným kontaktem vstřikovaného plastu pod vysokým tlakem. Mechanické poškození může nastat při manipulaci nebo výměně formy. [4]
- **Tepelná vodivost** – dobrá tepelná vodivost je klíčovou vlastností pro rychlé a kvalitní chlazení vstřikovaného dílu. Tím se zkrátí čas vstřikovacího cyklu a zvýší efektivita výroby. [4]
- **Dobrá zpracovatelnost (svařitelnost)** – oceli pro 3D tisk musí být charakterizovány dobrými vlastnostmi při tavení i ochlazování a jejich zpracování musí být umožněno ve formě prášku. Dobrá svařitelnost snižuje riziko praskání forem a také porozitu, která negativně ovlivňuje kvalitu formy, její životnost a drsnost povrchu. [4]

- **Tvarová a strukturní stabilita za vysokých teplot** – forma je během vstřikovacího procesu vystavena neustálým změnám teplot. Materiál formy musí zůstat strukturně stabilní i při změnách teplot, aby si zachoval mechanické vlastnosti a tvarovou přesnost. [4]

1.2.1 Kovové prášky

Aditivní technologie, jako SLM nebo DLMS, využívají jemné kovové prášky jako vstupní materiál. Pro dobrý výsledek aditivní výroby musí být splněna určitá kritéria pro prášky:

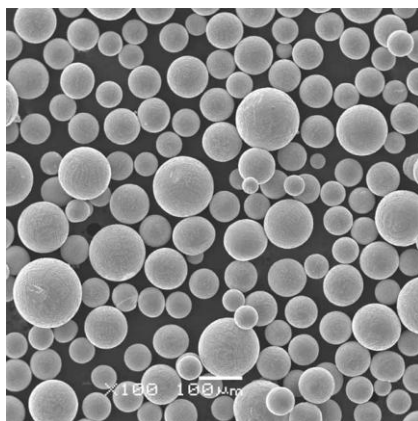
- **Distribuce velikosti zrn** – pro homogenní vrstvení během tisku se velikost částic zpravidla pohybuje v rozmezí několika desítek mikronů. Pro prášek H13 od dodavatele Metal 3dp je velikost částic od 10 do 45 μm . Rozměr částic závisí na druhu prášku a výrobci, což ovlivňuje kvalitu povrchu a mechanické vlastnosti výsledného výrobku. [10]
- **Chemickou čistotu** – oxidační vrstvy na povrchu prášku a přítomnost nečistot negativně ovlivňují mechanické vlastnosti výrobku. [10]
- **Tvar částic** – hladký sférický prášek zajišťuje optimální tok a redukuje tření mezi částicemi. [10]



Obrázek 7 Různé druhy kovových prášků pro aditivní výrobní technologie [11]

1.2.2 Nástrojová ocel H13 (1.2344)

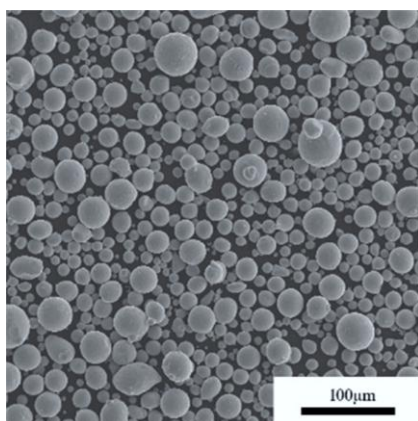
Je to legovaná chrom-molybden-vanadová ocel. Vykazuje výborné vlastnosti odolnosti proti tepelné únavě a teplotním šokům. Také je vysoce houževnatá, dobře kalitelná a lešitelná do jemné povrchové úpravy. Díky těmto vlastnostem je ocel H13 vhodná pro 3D tisk. Pevnost v tahu je 1900 MPa. [10]



Obrázek 8 Mikrostruktura
prášku oceli H13 [10]

1.2.3 Nerezová ocel AISI 316L (1.4401)

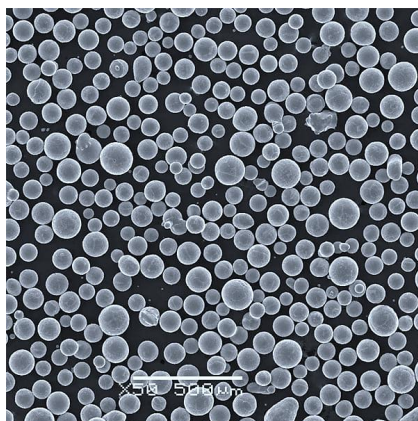
Jedná se o nerezovou chrom-nikl-molybdenovou ocel s austenitickou strukturou vyznačující se dobrou svařitelností a odolností proti štěrbinové i důlkové korozi. Korozivzdornost je zajištěna přidáním 16-18 hm. % chromu a 2-3 hm. % molybdenu. Teplotní odolnost až do 900 °C a pevnost v tahu 620 MPa. [12]



Obrázek 9 Mikrostruktura
prášku oceli AISI 316L [12]

1.2.4 Legovaná ocel Maraging 300 (1.2709)

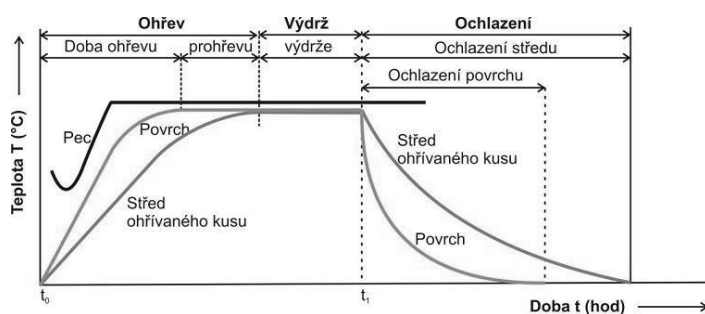
Legovaná nikl-kobalt-molybden-titanová ocel typická vysokou pevností, houževnatostí, svařitelností, dobrou lomovou houževnatostí a rozměrovou stabilitou. Pevnost v tahu je 2068 MPa. [13]



Obrázek 10 Mikrostruktura
prášku z oceli Maraging 300
[13]

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ

Tepelné zpracování je definováno jako soubor přesně řízených procesů, při kterých jsou kovy zahřívány a následně ochlazovány za předem definovaných podmínek jako teplota, okolní médium, rychlost a délka ochlazování apod. Výsledná mikrostruktura závisí na složení materiálu, zejména na legujících prvcích a nečistotách. Cílem tepelného zpracování je optimalizace mechanických a fyzikálních vlastností materiálu. Lze ovlivnit tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, tvárnost, tažnost a v neposlední řadě i snížit vnitřní pnutí vzniklé předchozí tepelnou úpravou.



Obrázek 11 Schéma tepelného zpracování [14]

Vzhledem k aditivní výrobě je tepelné zpracování obzvláště podstatné, protože 3D tištěné kovové struktury mají kvůli výrobnímu procesu rychlého tavení a chladnutí materiálu odlišné vlastnosti, než kterých je dosahováno při konvenčních metodách výroby. Nežádoucí vlastnosti jako vysoké vnitřní pnutí, porozita a nežádoucí fáze vzniklé při tisku kovu jsou redukovány tepelnou úpravou a výsledná struktura je také podstatně více homogenní. Více k této problematice je popsáno v kapitole 3.2.

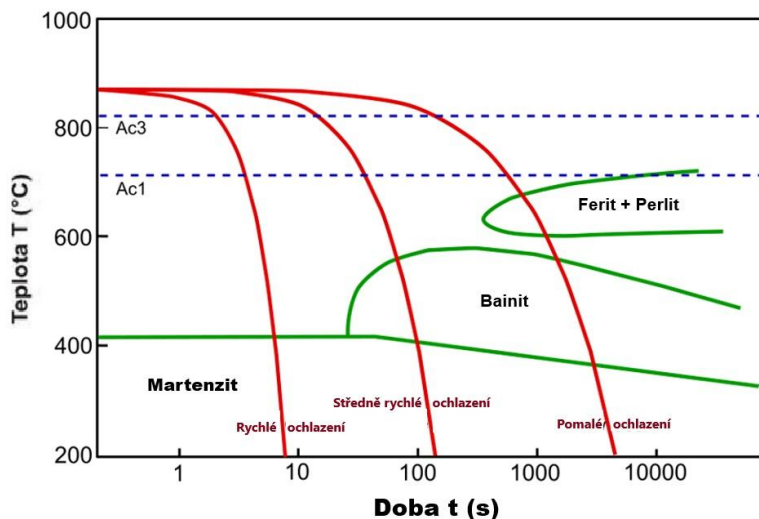
2.1 Základní druhy tepelného zpracování a jejich vliv na mikrostrukturu kovů

Každý z níže uvedených postupů a míra transformace mikrostruktury se může lišit v závislosti na teplotách, časech ohřevu, výdrže a ochlazení nebo použitých atmosférách či prostředích. Procesy jsou popsány s ohledem na účel a na to, jak je ovlivněna mikrostruktura či změny fází.

2.1.1 Kalení

Kalení je základním druhem tepelného zpracování, při kterém je zvyšována tvrdost a pevnost materiálu. Změny v mikrostruktuře jsou dosaženy přeměnou austenitu na martenzit nebo

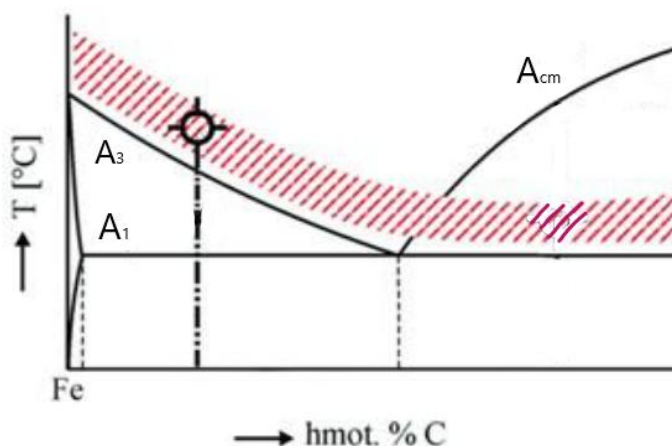
bainit. Po kalení běžně následuje popouštění kvůli velkému vnitřnímu pnutí způsobenému přeměnou fází v mikrostruktuře. Obecně se ocel považuje za dobře kalitelnou, když obsah uhlíku přesahuje 0,3 %. [15]



Obrázek 12 Diagram anizotermického rozpadu austenitu [16]

Martenzitické kalení

Přeměna feriticko-perlitické struktury na austenitickou strukturu je způsobena zahřátím materiálu a výdrží na austenitizační teplotě. Materiál je následně ochlazen v chladicím médiu. Tím může být voda, olej nebo vzduch, a to v závislosti na požadované intenzitě ochlazování. Čím rychleji je materiál ochlazen, tím větší podíl extrémně tvrdé martenzitické fáze se nachází v struktuře, ale současně se zvyšuje riziko praskání a deformací. Tato metoda kalení je vhodná pro strojní součásti, u nichž je požadována maximální tvrdost a odolnost proti opotřebení. Tedy nože, nástroje nebo formy. U podeutektoidních ocelí je kalicí teplota 30 až 50 °C nad A_3 . Pro nadeutektoidní oceli platí stejné teplotní rozmezí, ovšem nad teplotní křivkou A_1 (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). [15]



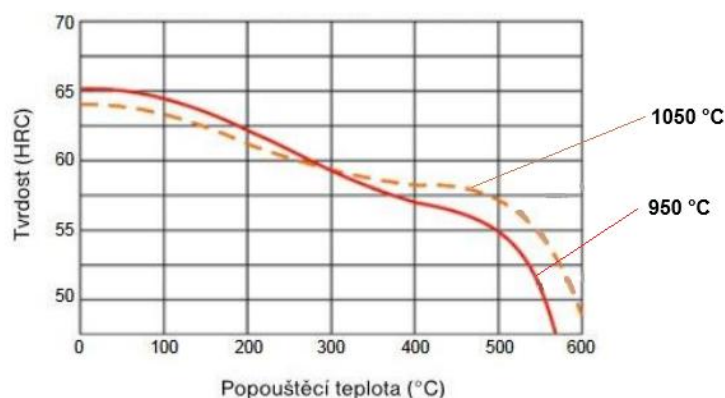
Obrázek 13 Pásmo kalících teplot [2]

Bainitické kalení

Bainitické kalení je procesem podobným martenzitickému kalení, přičemž ochlazování je zastaveno na izotermické teplotě (200 až 500 $^{\circ}\text{C}$) a udržuje se na ní dostatečně dlouho pro přetvoření austenitu na bainit. Poté se ochlazování dokončí. Bainit je charakterizován menší tvrdostí než austenit, ale vyšší houževnatostí a odolností proti lomu při dynamickém zatížení. Je využíváno pro dynamicky zatěžované součástky vystavované rázům, např. pružiny. [15]

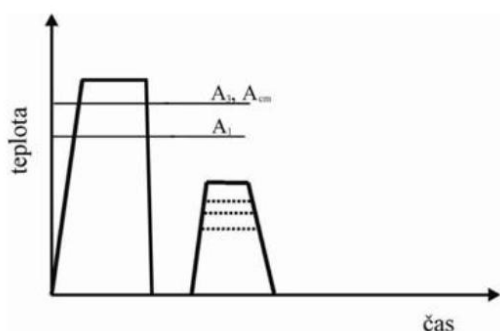
2.1.2 Popouštění

Popouštění je nezbytnou operací po martenzitickém kalení, při kterém je rychlým ochlazením a přeměnou austenitu na martenzit v materiálu zanecháno vysoké vnitřní pnutí a vysoká křehkost. Při popouštění jsou mechanické vlastnosti přizpůsobovány podle požadované aplikace. Čím vyšší je teplota popouštění, tím více je snížena původní tvrdost součásti (viz Obrázek 14). [15]



Obrázek 14 Popouštěcí diagram pro nástrojovou ocel X210Cr12 [17]

Kombinace kalení a následného popouštění se nazývá zušlechťování. Pro větší přehlednost byly tyto dvě operace popsány odděleně.



Obrázek 15 Schéma zušlechťování [2]

Během popouštění je dosaženo ohřevu oceli pod kritickou teplotou (zpravidla pod A_1 – viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Následné výdrži na dané teplotě, kdy jsou vysráženy jemné karbidy a přerozdělen uhlík v mikrostruktuře. Je dosaženo relaxace materiálu, čímž je mírně snížena tvrdost, ale podstatně zvýšena houževnatost a odolnost proti lomu materiálu. Teplota a doba popouštění ovlivňují výslednou změnu tvrdosti a houževnatosti. Popouštění se tedy dělí do následujících druhů:

Nízkoteplotní popouštění (150 až 250 °C)

Při těchto nízkých teplotách nejsou výrazné změny v martenzitické struktuře, ani vzniku nových fází. Může docházet pouze k mírnému vysrážení karbidů $Fe_2.4C$, čímž se stabilizuje martenzitická struktura. Odstraněno je pouze nejvyšší vnitřní pnutí, čímž je zachována vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení získaná kalením. Materiál je méně náchylný k praskání. Vhodné pro razníky, střižnice a řezné nástroje. [15]

Středně teplotní popouštění (250 až 500 °C)

Částečná přeměna martenzitu vede k vytvoření směsi feritu a jemných karbidů cementitu (Fe_3C). Čímž je zvýšena houževnatost a zachována vysoká tvrdost (ovšem menší než u nízkoteplotního popouštění). Využíváno u dynamicky zatěžovaných strojních součástí vystavovaných cyklickému zatížení nebo u ozubených kol. [15]

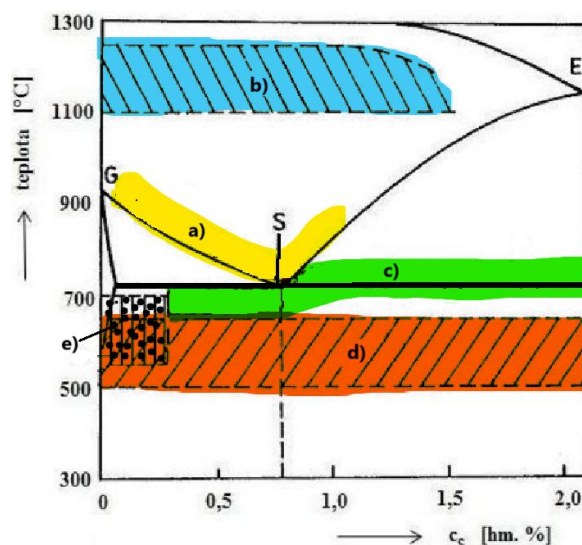
Vysokoteplotní popouštění (500 až 650 °C)

Při zahřátí na takto vysokou teplotu je proměněn martenzit na směs feritu a rovnoměrně dispergovaných karbidů cementitu. Výsledkem je materiál s vysokou houževnatostí (vlivem feritu) na úkor tvrdosti, kterou ale do jisté míry zajišťují karbidy. Používáno u součástí vystavovaných vysokému mechanickému nebo tepelnému namáhání např. pružin nebo lopatek turbín. [15]

2.1.3 Žihání

Žihání je podobně jako popouštění proces zahřátí materiálu na určitou teplotu, následná výdrž na teplotě a poté pomalé ochlazení. Je využíváno k odstranění vnitřního pnutí. Dále k homogenizaci a odstranění vad mikrostruktury. Nebo ke zvýšení obrobitelnosti a tvárnosti. Z toho důvodu se dá považovat i za přípravnou operaci před obráběním.

Rovnovážný stav mikrostruktury bez přítomnosti nežádoucích fází nebo vad je dosažen žiháním. Jelikož je spektrum využití žihání poměrně široké, jsou v této kapitole popsány především základní typy žihání (viz Obrázek 16). [18]



Obrázek 16 Pásma žihacích teplot [2]

Žihání s překrystalizací

Žihání s překrystalizací způsobuje výrazné změny v mikrostruktuře. Je dosaženo přeměny feriticko-perlitické struktury na austenit a následnému růstu nových zrn. Výsledkem je zvýšení homogenity chemického složení materiálu.

- **Normalizační žihání** – Slouží k zjemnění austenitického hrubého zrna, které vzniká při velmi pomalém ochlazování oceli při výrobě nebo předchozí tepelné úpravě. Austenizace je dosaženo zahřátím o 30 až 50 °C nad teplotní křivku A_3 u podeutektoidních ocelí a nad teplotní křivku A_{CM} u nadeutektoidních ocelí. Po výdrži na dané teplotě, a následnému ochlazení na vzduchu se vytváří jemnozrnná a rovnoměrná struktura tvořená feritem a případně perlitem, a to v závislosti na chemickém složení oceli. Jemnozrnná struktura zvyšuje houževnatost a pevnost oceli. [18]
- **Homogenizační žihání** – Účelem je homogenizovat (rovnoměrně vyrovnat) nestejnorodost chemického složení pomocí difuze. Materiál se zahřeje na velmi vysokou teplotu (až 1250 °C) a udržuje se zde několik hodin. Čím vyšší je teplota, tím rychleji difuzní proces probíhá. Poté následuje pomalé chladnutí. Výsledkem vyšší homogenity struktury jsou rovnoměrné mechanické vlastnosti materiálu. Vznikají však okuje vlivem oxidace a dojde ke zhrubnutí zrn austenitu. Z toho důvodu po homogenizačním žihání následuje normalizační žihání. Uplatnění nachází především u odlitků a rozměrově větších dílů před dalším zpracováním. [18]

Žihání bez překrystalizace

Jak je patrné z názvu, růst nových zrn není pozorován. Strukturní změny jsou prováděny a nerovnovážné fáze jsou rozkládány. Žihání je prováděno primárně pod teplotní křivkou A_1 .

- **Žihání naměkko** – Účelem je snížit tvrdost materiálů pro jeho další úpravu. Zahřátím těsně pod teplotu A_1 u konstrukčních ocelí je vyvolán růst vrstev cementitu v perlitické struktuře. Dojde ke změně lamelárního perlitu na globulární perlit. Výsledná struktura je lépe obrobitelná a tvářitelná. U legovaných ocelí se teplota zahřátí pohybuje mírně nad křivkou A_1 . [18]

- **Žihání ke snížení pnutí** – Slouží ke snížení vnitřních pnutí bez výraznějších změn v mikrostruktuře. Pomalu zahříváme na teplotu 500 až 650 °C u konstrukčních ocelí a následně se vyrovnají teploty v celém průřezu. Poté je materiál pomalu ochlazen, aby nevznikly nové vnitřní pnutí. Čím více legujících prvků ocel obsahuje, tím vyšší je teplota žihání. Používá se pro svařence, odlitky a obrobky. [18]
- **Rekrystalizační žihání** – Používá se po tváření za studena, kdy je způsobeno zpevnění materiálu a ztráta plasticity vlivem deformačního zpevnění. Zpevnění je odstraněno zahřátím na teplotu 550 až 700 °C. [18]

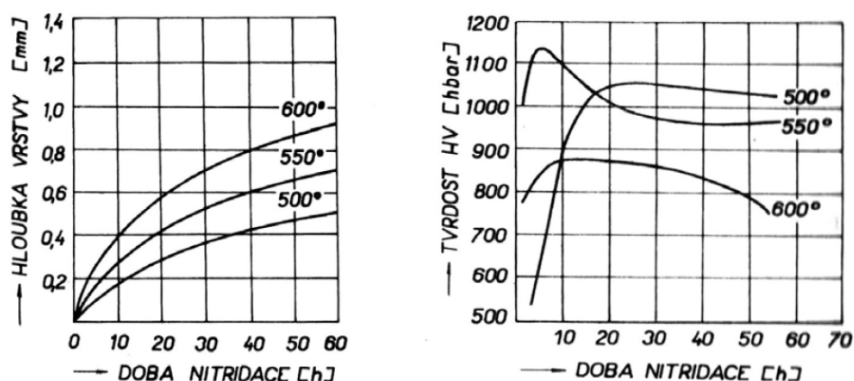
2.2 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování je kombinací difuzního nasycování povrchové vrstvy součásti s tepelným zpracováním. Výrazně zvyšuje odolnost proti opotřebení, tvrdost a korozivzdornost. Bez negativního vlivu na houževnatost materiálu.

Nejčastěji používanými procesy jsou nitridace a cementace, při nichž je povrch součásti nasycován dusíkem nebo uhlíkem, jak plyne z názvu operací. Dalším významným procesem pro aditivní výrobu je horké izostatické lisování, které homogenizuje mikrostrukturu a odstraňuje vady povrchu. [4]

2.2.1 Nitridace

Nitridace je chemicko-tepelné zpracování, při kterém je nasycována povrchová vrstva oceli dusíkem, za účelem zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení a korozi. Díky difuzi atomů dusíku do materiálu, při relativně nízkých teplotách (500 až 600 °C) vzniknou tvrdé nitridy. Tvarové deformace nejsou pozorovány a je zachována rozměrová stabilita výrobku. Nitridace je často aplikována u vysokolegovaných ocelí obsahujících chrom, vanad nebo molybden, jelikož tyto legující prvky podporují vznik tvrdých nitridů. Typicky jsou nitridovány například ozubená kola, klikové hřídele, vstřikovací formy nebo nástroje podléhající vysokému namáhání. [19]



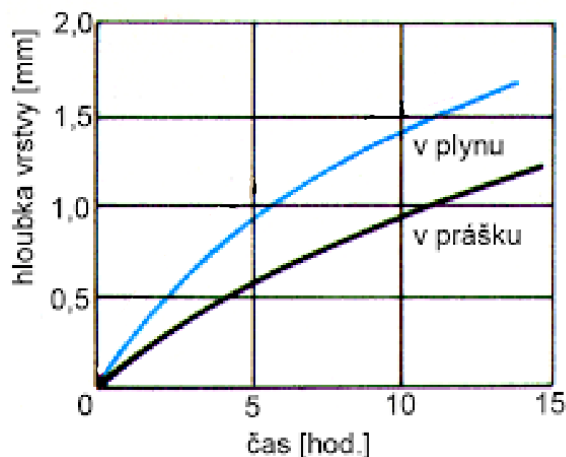
Obrázek 17 Hloubka nitridační vrstvy a tvrdost v závislosti na čase [20]

Podle použité technologie dělíme nitridaci na:

- **Iontovou nitridaci** – Proces je prováděn za sníženého tlaku v plazmatu. Plazma zvyšuje efektivitu difuze atomů dusíku do povrchové vrstvy materiálu a dobře se v ní kontroluje celý proces. [19]
- **Plynnou nitridaci** – Probíhá ve čpavku (NH_3), díky jehož disociaci se dusík difunduje do povrchu materiálu. Není tak efektivní jako Iontová nitridace. [19]
- **Nitridaci v solných lázních** – Probíhá v roztavených solích, které přímo slouží jako zdroj dusíku. [19]

2.2.2 Cementace

Cementace je také zařazována do skupiny chemicko-tepelného zpracování a stejně jako u nitridace je způsobena difuze žádaného prvku do povrchové vrstvy materiálu. V tomto případě se jedná o uhlík. Vzniká velmi tvrdý a odolný povrch, přičemž jádro materiálu si zachová pružnost a houževnatost, kterou mělo před touto úpravou. Cementace je většinou prováděna před zušlechťováním, aby bylo dosaženo optimálních vlastností, tedy tvrdého povrchu a houževnatého jádra. Uplatnění má podobné jako nitridace. Obecně se používá u strojních součástí s nízkým obsahem uhlíku (0,1 až 0,2 %) podléhajících vysokému dynamickému zatěžování. [19]



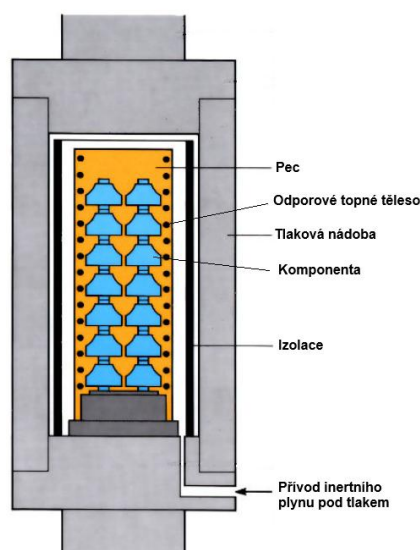
Obrázek 18 Rychlost růstu cementační vrstvy podle prostředí [20]

Přední metody cementace zahrnují:

- **Cementaci v tuhém karburizátoru** – Proces probíhá v nádobách naplněných dřevěným uhlím nebo jiným karburizátorem, který je zdrojem uhlíku pro difuzi. [19]
- **Plynnou cementaci** – Realizována v peci, kde se nachází uhlovodíky, například metan, který zajišťuje difundaci uhlíku do povrchové vrstvy. Lepší rovnoměrnost nasycení povrchu uhlíkem než u předchozí metody. [19]
- **Nízkotlakou cementaci** – Probíhá ve vakuu, kde jsou dávkovány uhlíkaté plyny. Tím je zaručena vysoká rovnoměrnost nasycení povrchové vrstvy a také je zajištěna minimální oxidace. [19]

2.2.3 Hot Isostatic Pressing (HIP)

Horké izostatické lisování je pokročilý proces tepelného zpracování, při kterém jsou součásti vystaveny kombinaci vysoké teploty (900 až 1200 °C) a izostatického tlaku vyvolanému inertním plynem v peci. Slouží k homogenizaci mikrostruktury a odstranění vad jako je porozita, což je u aditivně vyráběných dílů velice důležité. Vysoký tlak uzavírá póry v materiálu a tím i zvyšuje jeho hustotu. Přičemž vysoká teplota podporuje difuzi v mikrostruktuře, odstraňuje vnitřní pnutí a umožní rekonstrukci zrn. Výsledkem je zvýšená pevnost a houževnatost. [21]



Obrázek 19 Schéma pece pro HIP [22]

HIP je často využíván pro speciální aplikace, kde je kladem důraz na spolehlivost a kvalitu součástek jako např. ve zdravotnictví, letectví a kosmonautice. Ovšem v kontextu aditivní výroby je tento druh tepelného zpracování velice zásadní pro dosažení optimálních vlastností a v dnešní době je nedílnou součástí aditivní výroby kovových materiálů. [21]

2.3 Vliv tepelného zpracování na mikrostrukturu kovů vyráběných aditivními technologiemi

Tepelné zpracování je zásadním procesem pro optimalizaci mechanických a fyzikálních vlastností kovových součástí vyráběných aditivními technologiemi. Metody, jako je žíhání, popouštění, stárnutí nebo jejich kombinace, výrazně přispívají ke zlepšení vlastností a prodloužení životnosti materiálů. Tato kapitola je zaměřena na klíčové vlivy tepelného zpracování v kontextu specifických problémů, které vznikají při aditivní výrobě kovů. Podrobnější rozbor vlastností a mikrostruktury 3D tištěných kovových struktur je uveden v Kapitole 3.2. [23]

2.3.1 Zlepšení mechanických vlastností (pevnost, tvrdost) teplem

Stárnutí je proces tepelného zpracování, při kterém jsou při střední teplotě vysráženy jemné intermediální fáze, například Ni_3 . Významné zvýšení pevnosti a tvrdosti materiálu je dosaženo při zachování jeho houževnatosti. Méně odolné fáze jako je zbytkový austenit se transformují na martenzitickou strukturu, čímž je zajištěna vyšší mechanická stabilita.

Pro konkrétní případ je uvedena maragingová ocel (Maraging 300) vyrobená metodou SLM, pro kterou bylo zaznamenáno zvýšení pevnosti v tahu o více než 40 % a současně zvýšení tvrdosti o téměř 70 %. Tato zlepšení bylo nejvýznamnější po využití procesu stárnutí a činí materiál vhodným pro aplikace, kde je důležitá odolnost vůči únavovému lomu. [23]

Tabulka 1 Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti oceli Maraging 300 [23]

Pevnost v tahu před vytvrzením	1165 MPa
Pevnost v tahu po vytvrzení	2050 MPa
Nárůst pevnosti	$\approx 40\%$
Tvrdost před vytvrzením	35–36 HRC
Tvrdost po vytvrzení	53–55 HRC
Nárůst tvrdosti	$\approx 71\%$

2.3.2 Homogenizace mikrostruktury aditivních kovových materiálů

Homogenizační žíhání se používá pro odstranění segregací legujících prvků a rovnoměrnější rozložení chemického složení materiálu. Ohřátím materiálu na vysokou teplotu jsou podpořeny difuzní procesy a snížena anisotropie, tedy rozdílnost mechanických vlastností v různých směrech zatěžování. Anisotropie je vlastnost materiálů, při které se jejich fyzikální nebo mechanické vlastnosti liší v závislosti na směru měření. [24]

U austenitických ocelí, jako je AISI 316L, byla díky homogenizačnímu žíhání zvýšena celková tažnost o zhruba 12 % a došlo ke snížení anisotropie o více než 41 %. [24]

Tabulka 2 Vliv homogenizačního žíhání na austenitickou ocel
AISI 316L [24]

Celková tažnost před homogenizací	50%
Celková tažnost po homogenizaci	56%
Nárůst tažnosti	$\approx 12\%$
Anizotropie před homogenizací	46%
Anizotropie po homogenizaci	27%
Snížení anizotropie	$\approx 41\%$

2.3.3 Kombinované procesy a jejich efekt na mikrostrukturu

Kombinace kalení a nitridace nebo HIP s následným popouštěním, jsou velice účinné pro značné zlepšení vlastností aditivně vyráběných komponent. Kalení vytváří pevnou martenzitickou strukturu a následná nitridace zvýší povrchovou tvrdost, což zlepší odolnost proti opotřebení. Kombinace HIP a popouštění stabilizuje mikrostrukturu, odstraní vady a zlepší odolnost vůči cyklickému zatížení. [25]

U komponent, jako jsou vstřikovací formy, je vhodné kombinovat metody tepelné úpravy, protože se prodlužuje životnost komponent a zvyšuje jejich spolehlivost v náročných průmyslových podmínkách. [25]

3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY PRO KOVOVÉ MATERIÁLY

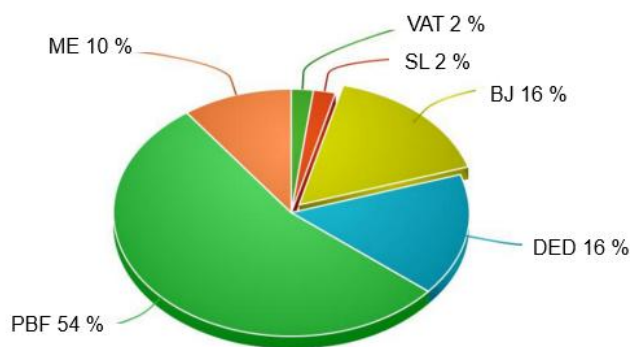
Aditivní technologie pro výrobu kovů jsou považovány za dynamicky se rozvíjející odvětví výroby, při kterém je umožněna tvorba komplexních tvarů postupným nanášením vrstev materiálů. Oproti konvenčním metodám výroby, u kterých je běžně odebírán materiál z polotovaru, výrobek je vytvářen pomocí aditivní technologie na základě dat z 3D modelu. Z toho důvodu jsou eliminovány komplikace s výrobou forem, výrobních přípravků a nástrojů. Což umožňuje vysokou flexibilitu designu a tvaru s možností vytváření vhodných vnitřních struktur a také je dosaženo minimalizace odpadního materiálu. Uplatnění nachází v téměř všech odvětvích průmyslu jako je automobilový a letecký průmysl, k tvorbě nástrojů a forem nebo ve zdravotnictví.



Obrázek 20 Ilustrační výrobky vytvořené aditivní technologií [26]

3.1 Rozdělení technologií aditivní výroby dle ASTM F42

Technologie aditivní výroby jsou rozděleny do několika základních kategorií podle způsobu zpracování materiálu. Každá z metod přináší specifické výhody a je využívána pro různé aplikace v závislosti na požadovaných mechanických vlastnostech, složitosti tvaru a rozměrové přesnosti. [27]



Obrázek 21 Trh aditivní výroby kovů v roce 2021 [28]

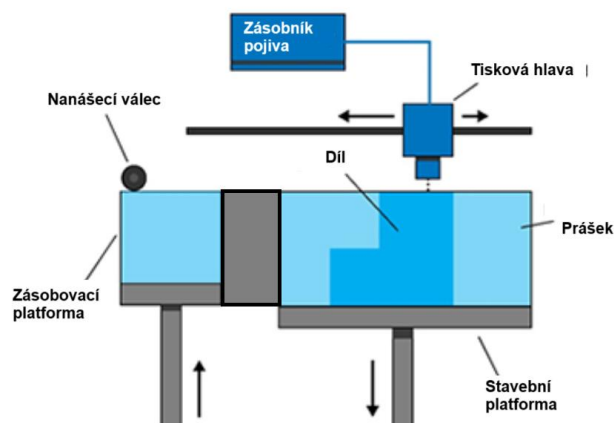
3.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Energetický paprsek je využíván při této technologii ke spékání nebo tavení kovového prášku nanášeného na stavební platformu. Jedná se o nejvíce využívanou metodu zpracování kovů aditivními technologiemi a v roce 2021 bylo touto technologií pokryto více než polovina trhu. (viz Obrázek 21). Detailně je tato metoda popsána v Kapitole 3.1.4. [27]

Základními technologiemi spadajícími do této kategorie jsou Selektivní laserové tavení (SLM), Přímé kovové laserové spékání (DMLS) a Tavení laserovým paprskem (EBM).

3.1.2 Binder jetting (BJ)

Pojivo je tryskáno na vrstvu kovového prášku, vrstva je stmelena a proces je opakován, dokud není vytvořena kompletní geometrie. Následně je přebytečný prášek odsán a recyklován pro další použití. Pojivo je odstraněno spékáním v peci a struktura je spečena a homogenizována z kovového prášku. [27]

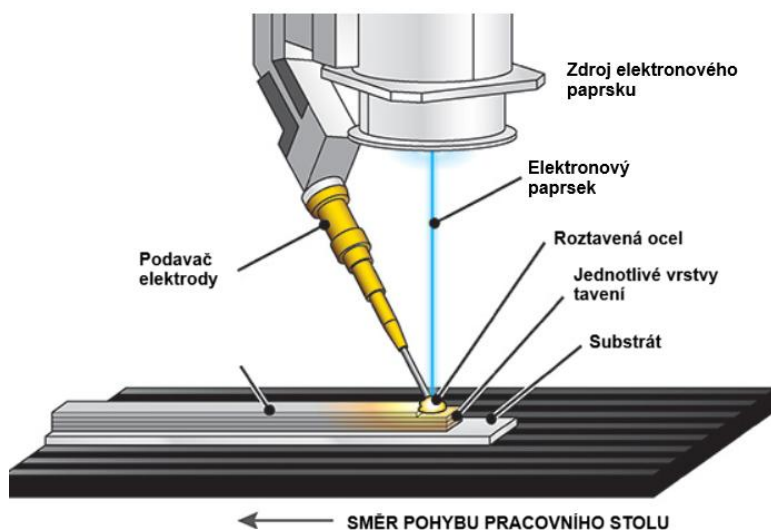


Obrázek 22 Schéma procesu BJ [29]

Tato technologie se využívá pro sériovou výrobu kovových dílů a vyniká vysokým rozlišením tisku.

3.1.3 Directed Energy Deposition (DED)

Silné energetické zdroje jako laser, elektronový paprsek nebo oblouk jsou využívány k roztavení kovového prášku nebo drátu, které jsou nanášeny za účelem oprav, tvorby nových geometrií nebo nanášení povlaků. Proces je velice podobný svařování a využití nachází jak pro výrobu dílů, tak primárně pro opravy již existujících komponent, například drahých dílů v leteckém či automobilovém průmyslu. Často je kombinován s CNC obráběním, protože tento hybridní 3D tisk je rychlejší a levnější než odlévání či kování. [27]

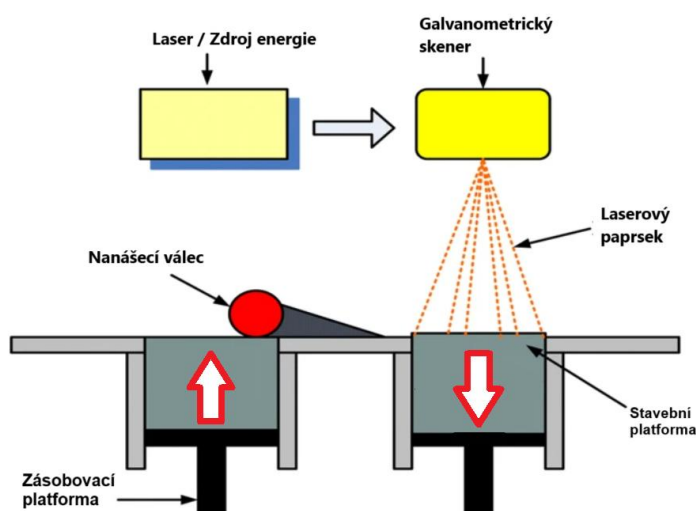


Obrázek 23 Schéma metody DED [30]

Podkategorie DED jsou například prášková laserová energetická depozice, drátěná aditivní výroba, studený nástřik nebo depozice drátovým elektronovým paprskem.

3.1.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Přímé kovové laserové spékání je považováno za jednu z nejpoužívanějších metod aditivní výroby kovů, patří do kategorie PBF a podobně jako Selective Laser Melting (dále jen SLM) funguje na principu postupného nanášení vrstev kovového prášku a jeho spékání na stavební platformě pomocí laserového paprsku. Tisk probíhá v uzavřené komoře s řízenou atmosférou tvořenou argonem či dusíkem za účelem stabilizace procesu spékání a minimalizace oxidace materiálu vystavenému vysoké teplotě. [27]



Obrázek 24 Schéma procesu DMLS [31]

Na stavební platformu je ze zásobovací platformy pomocí nanášecího válce či čepele nanášena vrstva kovového prášku o tloušťce 20 až 100 μm , v závislosti na používaném materiálu a požadované přesnosti. Na stavební platformu je laserový paprsek naveden pomocí systému zrcadel, galvanometrického skeneru, podle přesně definované trajektorie a zajistí spečení či roztavení práškové vrstvy. Po dokončení tavení jedné vrstvy se stavební platforma posune směrem dolů o výšku tavené vrstvy a opět je nanášena další vrstva prášku. Tento cyklus se opakuje do kompletního vytvoření součástky. [27]

Touto technologií lze dosáhnout složitých geometrických tvarů a při tisku malých tloušťek vrstev i vysoké míry detailu. Vytvářené díly dosahují hustoty až 99,9 % s jemnozrnnou mikrostrukturou. Ovšem vlivem teplotních gradientů během procesu tavení

a chladnutí je v materiálu způsobena anisotropie mechanických vlastností. Po dokončení tisku je tedy nutné očistit výrobek od přebytečného prášku a pomocí tepelného zpracování optimalizovat mechanické vlastnosti, odstranit anisotropii a pórovitost vzniklou během tisku. Popřípadě vlivem dokončovacích operací zlepšit povrchové vlastnosti výrobku. [27]

Technologie DMLS a SLM mohou být na první pohled vnímány jako totožné, avšak liší se způsobem spojování kovového prášku. U metody DMLS jsou zpracovávány slitiny obsahující více legujících prvků s rozdílnými teplotami tavení, přičemž dochází pouze k částečnému spékání částic. Tento proces může vést ke vzniku jemné porozity a ke zhoršení mechanických vlastností výsledného dílu. Naproti tomu u technologie SLM, která je určena pro jednosložkové slitiny s jednotnou teplotou tavení, dochází k úplnému roztavení částic. Tím je dosaženo téměř 100% hustoty materiálu a výrazně lepších mechanických vlastností.

3.1.5 Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

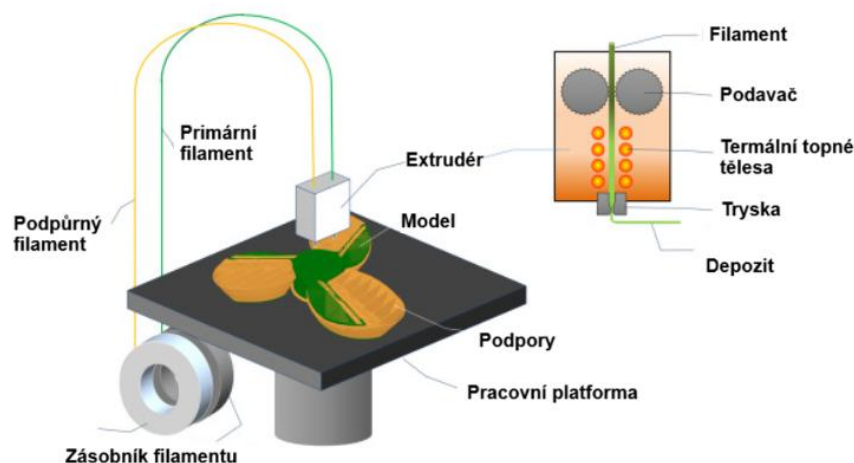
Aditivní výroba pomocí atomizace patří do kategorie Material Extrusion (ME). Jedná se o moderní metodu 3D tisku kovových materiálů. První zmínky o této technologii jsou z roku 2017, kdy společnost Markforged, představila tiskárnu Metal X, jenž využívá tuto technologii. ADAM je založena na technologii vstřikování kovů, která se již používá delší dobu a existuje pro ni široká škála slitin, které jsou vhodné právě i pro ADAM. Díl je vyráběn z kovového prášku spojeného polymerním pojivem. Po tisku je polymerní pojivo odstraněno a čistě kovová struktura je vytvořena pomocí slinování. Jedná se o velmi efektivní způsob výroby složitých dílů při zachování nízkých nákladů, s vysokou variabilitou použitelných materiálů. [32]



Obrázek 25 Jednotlivé kroky procesu ADAM [33]

Na stavební platformu tiskárny je pomocí trysky nanášena tenká vrstva (50 až 200 μm) směsi kovového prášku s pojivem. Tento proces tisku je principem velice podobný typickému 3D tisku metodou FDM. Materiál je přiváděn z cívky do trysky ve formě

filamentu a na rozdíl od technologie U DMLS není způsobeno spékání částic, ale pouze vytváření požadovaného tvaru vrstvením vláken. [32]



Obrázek 26 Schéma principu materiálové extruze [34]

Po dokončení tisku nejsou u dílu dosaženy požadované mechanické vlastnosti a je v něm obsaženo polymerní pojivo, které slouží pouze k dočasnému spojení směsi. Následně je prováděn proces slinování, při kterém je polymerní pojivo odstraněno. Současně nastane smrštění a spečení kovové struktury, čímž dojde ke zvýšení hustoty dílu. Toto smrštění je nutné kompenzovat před začátkem tisku pomocí zvětšení 3D modelu o stejné procenta, jaká je míra smrštění pro daný materiál. [32]

Touto technologií je umožněna výroba komplexních tvarů s různorodou vnitřní strukturou vzhledem k požadovanému použití. Výhodou je zejména použití širokého spektra materiálů, které se již využívají u vstřikování kovů. Dále nízká nákladovost výroby, především při použití „farmy“ tiskáren, kdy se redukuje náklady spojené se slinováním výrobku. Stejně jako u ostatních aditivních technologií je vhodné použít další tepelné zpracování a dokončovací operace pro zlepšení mechanických a povrchových vlastností. [35]

3.1.6 Srovnání metod DMLS a ADAM

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se neustále rozvíjejí za cílem snížit výrobní náklady, zlepšit mechanické vlastnosti a zlepšit efektivitu výroby. Každá technologie má své výhody a nevýhody, přičemž slouží k jiným účelům dle velikosti série, požadovaným vlastnostem, či ceně.

Při metodě DMLS je laserový paprsek využíván k tavení kovového prášku po vrstvách, čímž vznikají výrobky s vysokou hustotou a dobrými mechanickými vlastnostmi. U metody ADAM je využíván kovový filament obsahující práškový kov v polymerním pojivu. ADAM nabízí jednodušší a cenově dostupnější řešení vhodné zejména pro prototypování a menší výrobní série s nižšími mechanickými vlastnostmi.

Počáteční investice a náklady na provoz jsou stěžejním rozdílem pro obě metody. DMLS vyžaduje vysoké investiční náklady (500 000 – 1 000 000 USD) na hardware, především kvůli využívanému laseru, nutnosti ochranné atmosféry, či zařízením na dokončovací operace. Metoda ADAM využívá například systém Metal X, jenž má podstatně nižší počáteční náklady (130 000 USD včetně potřebného vybavení), jednodušší provoz, menší nároky na bezpečnost a nižší spotřebu energie. [36]

Z hlediska komplexity provozu je DMLS náročnější na obsluhu, jelikož pracuje s volným práškem, což sebou přináší mnoho komplikací, jako nutnost kontrolovaného prostředí nebo bezpečnostní opatření proti vdechnutí prášku či jeho kontaminaci. Déle je třeba provádět složitější dokončovací operace. ADAM naproti tomu využívá kovový prášek ve filamentu, což podstatně usnadňuje práci či manipulaci s materiálem. [37]

V oblasti efektivity spotřeby materiálu jsou u DMLS zaznamenávány mírné ztráty, jelikož část kovového prášku nelze po tisku recyklovat. ADAM využívá kontinuální filament s kovovým práškem, tudíž jsou ztráty materiálu minimální. Obě metody sice vyžadují dokončovací operace, avšak u DMLS je tento proces složitější, jelikož se v materiálu vyskytuje velké množství zbytkového napětí a deformací. U ADAM se provádí primárně odstranění polymerního pojiva a následné slinování. [36]

Tabulka 3 Porovnání metod DMLS a ADAM

Kritérium	DMLS	ADAM
Princip	Laserové spékání kovového prášku	Extruze kovového prášku s polymerem, následné slinování
Hustota materiálu	≈ 99,9 %	95–98 %
Mechanické vlastnosti	Vyšší pevnost, nízká pórovitost	Mírně nižší pevnost, vyšší pórovitost
Přesnost a povrchová úprava	Vysoká, Ra 3–10 μm	Nižší, Ra 15–25 μm
Náklady na výrobu	Vysoké	Nižší
Aplikace	Vysoce zatěžované díly, letectví, zdravotnictví	Prototypy, nižší mechanické nároky

3.2 Charakteristiky aditivně vyráběných součástí

Aditivní výroba představuje moderní přístup k tvorbě součástí se složitou geometrií. Přináší sebou ovšem i výzvy spojené s mechanickými vlastnostmi, kvalitou povrchu a efektivitou sériovosti výroby. Mikrostruktura součástí je ovlivněna samotným výrobním procesem a parametry tisku, kvůli čemuž je nutno součásti následně tepelně zpracovávat (viz Kapitola 2) a také provést dokončovací operace (viz Kapitola 4).

3.2.1 Mechanické vlastnosti a drsnost povrchu

Mechanické vlastnosti jsou odlišné pro každou metodu aditivní výroby, avšak obecně je charakteristické, že součásti jsou vyznačovány vysokou tvrdostí a pevností na úkor vysoké křehkosti, v důsledku vnitřního pnutí a porozity. Anizotropie, tedy rozdílné mechanické vlastnosti v různých směrech zatížení, je taktéž častým jevem pro součásti vyráběné aditivně. Všechny tyto negativní vlastnosti se dají do velké míry odstranit. Více k tomuto tématu je popsáno v Kapitole 2.3.

Po výrobě je drsnost povrchu součástí podstatně vyšší než u součástí vyrobených konvenčními technologiemi a funkčnost komponent může být negativně ovlivněna. Obzvláště když je požadováno lícování součástí nebo nízké tření některých povrchů. Hodnota drsnosti se pohybuje v rozmezí 5–20 μm, přičemž drsnost povrchu lze dle potřeby snižovat pomocí dokončovacích operací, které jsou popsány v Kapitole 4. [37]

3.2.2 Vnitřní a povrchové vady

Nejčastější typy defektů, které se objevují u aditivní výroby kovů, jsou eliminovány pomocí tepelného zpracování a dokončovacích operací a jsou následující:

- Porozita – dutiny jsou vytvářeny ve vnitřní struktuře součásti vlivem nedokonalého slinování prášku nebo zachycením plynů během procesu tavení. Tyto vady mají negativní vliv na mechanické vlastnosti součásti. [37]
- Drsnost povrchu – popsáno v Kapitole 3.2.1.
- Zbytkové napětí – je způsobeno rozdílnou rychlostí ochlazování v různých místech součásti (okraje a hrany chladnou rychleji než jádro). Zbytkové napětí způsobuje deformace součásti či praskání dílu. [37]
- Nekonzistentní mikrostruktura – vzniká v důsledku nehomogenního tuhnutí a způsobuje nežádoucí změny pro mechanické vlastnosti. [37]

3.2.3 Srovnání konvenčních a aditivních technologií výroby

Mezi konvenční metody jsou zahrnovány například obrábění, kování či lití. V porovnání s konvenčními technologiemi je aditivní výroba kovů využívána především pro výrobu složitých dílů a prototypů. Konvenční technologie jsou využívány pro velkosériovou výrobu.

Tabulka 4 Tabulka srovnání konvenčních a aditivních výrobních technologií [26]

Kritérium	Aditivní výroba	Konvenční výroba
Geometrická složitost	Umožňuje tvorbu složitých tvarů bez nutnosti použití forem nebo speciálních nástrojů	Omezená složitost dle dostupných forem a nástrojů
Materiálová efektivita	Minimální odpad, materiál je využit pouze tam, kde je potřeba	Vysoké ztráty materiálu, zejména při obrábění
Mechanické vlastnosti	Možná anizotropie, přítomnost vad, nutnost dodatečné úpravy	Stabilní vlastnosti díky homogenní struktuře
Rychlost výroby	Krátká doba pro prototypování, ale pomalejší pro sériovou výrobu	Efektivní pro velkosériovou výrobu
Povrchová kvalita	Vyšší drsnost povrchu, nutnost dokončovacích operací	Lepší povrchová kvalita po obrábění

4 DOKONČOVACÍ OPERACE VNĚJŠÍCH A VNITŘNÍCH 3D TIŠTĚNÝCH STRUKTUR

Dokončovací operace jsou považovány za podstatnou část výroby u aditivní výroby kovů. Povrchy vyráběné aditivně mají zpravidla vyšší drsnost a povrchové mikro defekty. Kvůli tomu nesplňují požadované vlastnosti pro správnou funkčnost forem. Z toho důvodu se musí aplikovat některé dokončovací operace, které dělíme na mechanické, chemické, tepelné a povlakové operace. Téma tepelného zpracování již bylo popsáno v předchozí kapitole, tudíž je tato kapitola zaměřena na ostatní metody. Dokončovací operace jsou dále členěny podle povahy opracovávaného povrchu na metody vnějších a vnitřních ploch, přičemž zvláštní důraz je kladen na dokončování vnitřních kanálků, jejichž opracování bývá technicky náročné. Důraz je kladen na průtočné lapování, které je používáno pro dokončování konformních chladicích kanálků u vstřikovacích forem vyráběných aditivně.

Správně zvolené a provedené dokončovací operace prodlužují životnost forem vyráběných aditivně a zajišťují jejich bezporuchovou funkci během výroby, což vede ke stabilnímu a efektivnímu chodu výrobního procesu. Povrchové nerovnosti jsou redukovány a mikro defekty jsou odstraněny. A u chladicích kanálků snižuje tření chladicího média při současném zlepšení tepelné výměny mezi médiem a formou. Tyto požadované vlastnosti snižují dobu vstřikovacích cyklů, čímž u velkosériové výroby zvyšují efektivitu práce. Kromě zvýšení efektivit přispívají dokončovací operace také ke snížení nákladů na údržbu a prodlužují intervaly mezi jednotlivými opravami forem.



Obrázek 27 Srovnání aditivně vyrobené součásti před a po dokončování [38]

Cílem této kapitoly je poskytnout přehled metod dokončovacích operací používaných u forem vyráběných aditivně. Nejprve jsou popsány mechanické metody a kapitola je zakončena chemickými úpravami a povlakováním.

4.1 Broušení a leštění

Broušení a leštění představují klíčové metody dokončování povrchů aditivně vyráběných součástí a umožňují snížení hladkosti a drsnosti povrchu, které ovlivňují funkčnost formy a výslednou kvalitu povrchu vyráběné součásti.

4.1.1 Broušení

Broušení je používáno stejně jako obrábění pro odstranění nerovností vzniklých při tisku formy nebo k dosažení požadované drsnosti. Výsledná drsnost povrchu je ovlivněna typem použitého brusného kotouče, segmentu či pásu o různých drsnostech. Nejčastěji jsou pro výrobu brusných nástrojů používány zrna oxidu hlinitého, karbidu křemíku nebo diamanty, přičemž volba závisí na tvrdosti broušeného povrchu a druhu materiálu. Při broušení s hrubšími zrny lze dosáhnout drsnosti 1–2 μm , zatímco u jemného broušení až 0,4 μm . [39]



Obrázek 28 Sada brusných nástrojů [39]

4.1.2 Leštění

Leštění je běžně prováděno po broušení a je zaměřeno na dosažení vysoké hladkosti a lesklého vzhledu. Proces zahrnuje nanášení past s abrazivními částicemi na povrch pomocí leštících kotoučů nebo hadrových pásů. Jako abrazivní částice jsou používány například oxidy železa nebo chromu. A jejich volba závisí stejně jako u broušení na požadované drsnosti a leštěném materiálu. Při leštění jsou dosahovány drsnosti až 0,4 μm , což odpovídá požadavkům pro optické povrchy nebo v našem případě vstřikovací formy. [39]



Obrázek 29 Sada leštících kotoučů a vosků [41]

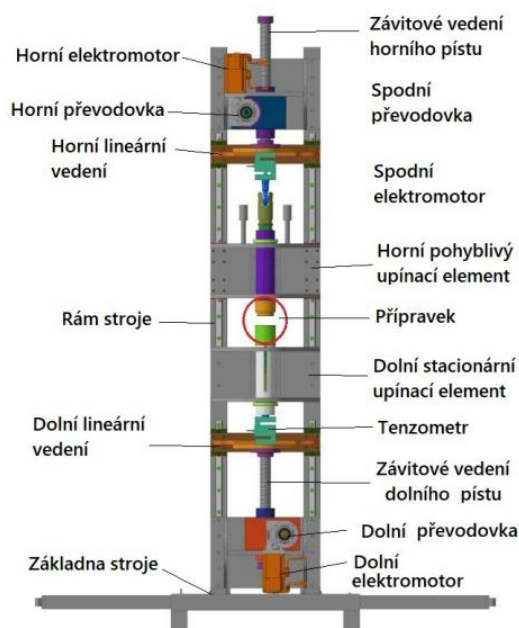
Kombinace broušení a leštění má pozitivní vliv na životnost formy, zlepší její odolnost vůči opotřebení a minimalizuje efekt povrchových vad na funkčnost výrobku. U aditivní výroby kovů jsou tyto operace obzvláště přínosné, jelikož srovnají nerovnosti vzniklé nanášením jednotlivých vrstev při tisku. [39]

4.2 Nekonvenční dokončování vnitřních struktur

Dokončování vnitřních struktur je náročné z hlediska špatné přístupnosti a složitosti geometrie. Jako je tomu například u konformních chladících kanálků vstřikovacích forem. Z toho důvodu se využívají některé nekonvenční metody dokončování, které umožňují dokončovat vnitřní struktury o složitých geometriích.

4.2.1 Abrasive Flow Machining (AFM)

Abrázivní honování, či lapování je proces dokončovacích operací, který využívá abrazivního média protlačovaného pod tlakem. AFM je využíváno pro dokončování kanálků konformního chlazení u vstřikovacích forem, vstřikovacích trysek a složitých dutin v automobilovém a leteckém průmyslu. [44]



Obrázek 30 Schéma zařízení pro AFM [45]

Při procesu je abrazivní médium na bázi elastomerové matrice s abrazivním pojivem protlačováno skrze dokončovanou dutinu (viz Obrázek 30). Protlačování probíhá buď jednosměrně nebo oběma směry. Podle tvrdosti povrchu a požadované drsnosti se volí typ abrazivních částic (např. oxid hlinitý nebo karbid křemíku). Viskozita matrice může být taktéž variabilní podle složitosti dutiny, tak aby se vždy přizpůsobila tvaru kanálku a docházelo k rovnoměrnému obrušování povrchu. Obráběná součást se upne do speciálního zařízení, které obsahuje zásobníky abrazivního média a hydraulické pracovní válce, které dodávají médiu kinetickou energii. Typicky se tlak pohybuje v rozmezí 7-70 MPa, přičemž hodnota závisí na složitosti geometrie a požadované intenzitě opracování. [44]



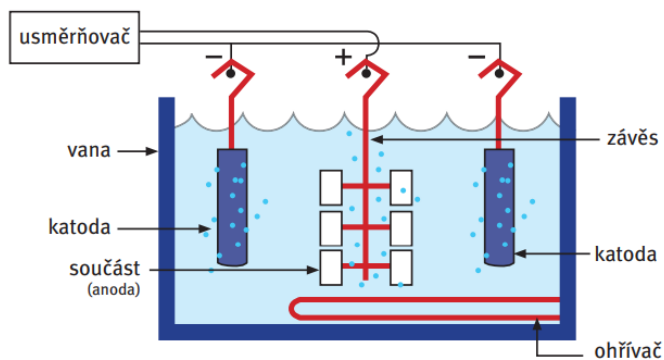
Obrázek 31 AFM medium MV50 [46]

Optimalizací procesních parametrů jako je primárně rychlost posuvu pístu, jsou dosahovány drsnosti až 0,1-0,4 μm . Pro lepší drsnost je třeba využívat nižšího tlaku a většího počtu cyklů. Což je ovšem více časově náročné. [44]

V rámci této práce byla měřena tvrdost tepelně zpracovaných zkušebních těles sloužících k dokončování touto metodou. Drsnost těchto kanálků má vliv na tření mezi chladicím médiem a efektivitu výměny tepla. Což značně ovlivňuje spolehlivost vstřikovací formy a její pracovní takt.

4.2.2 Elektrochemické leštění

Tato metoda je založena na principu elektrolytické polarizace. Obrobek je ponořen do lázně s elektrolytem, kde se po přivedení elektrického proudu stává anodou. Začne docházet k rozpouštění materiálu na jeho povrchu, čímž se vytvoří hladký povrch a odstraní nerovnosti. Jako elektrolytické médium jsou využívány roztoky kyseliny sírové nebo fosforečné s kombinací organických inhibitorů pro rovnoměrnější úběr materiálu. Elektrolytické leštění dosahuje velmi nízkých drsností 0,05-0,2 μm a kromě hladkého povrchu vytváří i pasivní vrstvu, která chrání díl proti korozi. [47]



Obrázek 32 Schéma elektrochemického leštění [47]

5 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Tvrlost je klíčovou mechanickou vlastností kovových materiálů. Má vliv na další vlastnosti jako je pevnost, odolnost proti opotřebení, či obrobiteľnosť. Hlavní využití nachází měření tvrdosti v praxi pro ověření účinnosti tepelného zpracování, kontrolu kvality materiálu a predikci mechanického chování při zatížení.

Tvrlost není absolutní fyzikální veličina, ale závisí na podmínkách a metodě měření. Různé metody mohou poskytovat odlišné výsledky a je tedy důležité zvolit správnou metodu pro specifický materiál. Pro dosažení přesných výsledků je třeba dodržovat správný postup měření na zkalibrovaných zařízeních.

Existuje mnoho metod měření tvrdosti, které se liší principem nebo oblastí použití. A jsou vhodné pro různé tloušťky a typy materiálů. Obecně tyto metody dělíme na statické a dynamické.

5.1 Statické metody

Při statických vnikacích metodách měření tvrdosti je indenter vtlačován do povrchu součásti při konstantním zatížení. Tvrlost je stanovena na základě velikosti vtisku indentoru do zkušebního tělesa a vyhodnocován je odpor materiálu proti vniknutí indentoru. Do této kategorie jsou zahrnuty různé metody lišící se zatížením a tvarem indentoru. V této kapitole jsou popsány pouze základní metody.

5.1.1 Rockwellova zkouška (HRC, HRB, HRF)

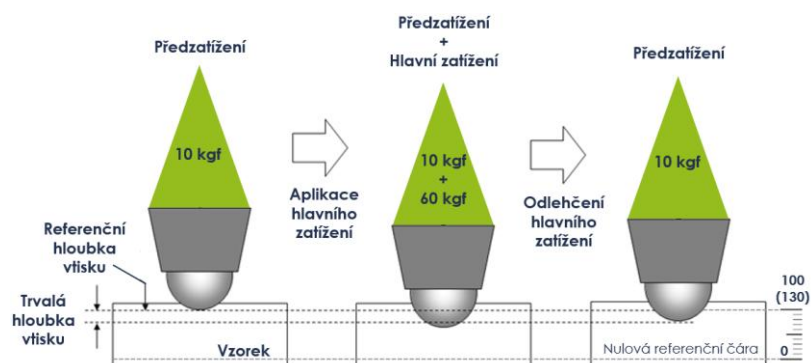
Při Rockwellově zkoušce tvrdosti je tvrlost stanovena na základě hloubky vtisku indentoru po aplikaci definované zátěže. Díky jednoduchosti a opakovatelnosti měření je tato metoda široce využívána v průmyslu. Zejména pro měření konstrukčních a nástrojových ocelí. Metoda je definovaná normou ČSN EN ISO 6508-1. [48]

V závislosti na typu měřeného materiálu se využívají různé zatížení a typy indenterů. Pro tvrdé materiály, jako jsou nástrojové a kalené oceli, je využíván diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Zatímco pro měkčí materiály je používána ocelová kulička. Rozdělení do základních stupnic znázorňuje

Tabulka 5 Stupnice Rockwellovy zkoušky [50]

Stupnice	Indentor	Celkové zatížení [kgf]	Celkové zatížení [N]	Použití
HRC (Rockwell C)	Diamantový kužel (120°)	150	1471	Tvrdé materiály (kalené oceli, nástrojové oceli)
HRB (Rockwell B)	Ocelová kulička (1,588 mm)	100	981	Středně tvrdé materiály (konstrukční oceli, mosaz, bronz)
HRF (Rockwell F)	Ocelová kulička (1,588 mm)	60	588	Velmi měkké kovy (hliník, měď)
HRG (Rockwell G)	Ocelová kulička (2,5 mm)	150	1471	Litina, silně měkké až střední tvrdosti
HRE (Rockwell E)	Ocelová kulička (3,175 mm)	100	981	Měkké materiály s vysokou tažností (měď, slitiny hliníku)

Měření probíhá ve dvou krocích. Nejprve je aplikováno předběžné zatížení 10kgf (kilogram-force), jenž odpovídá gravitačnímu zatížení pomocí 98,1 N. Toto zatížení eliminuje vliv povrchových nerovností a zajistí kontakt indentoru s materiálem. Poté je přidáno hlavní zatížení, jenž způsobí trvalý vtisk a po odlehčení je měřena hloubka vtisku, jenž je přímo úměrná tvrdosti materiálu. Tvrdost je přímo odečítána ze stupnice přístroje bez nutnosti dalších výpočtů či manuálních měření. [49]



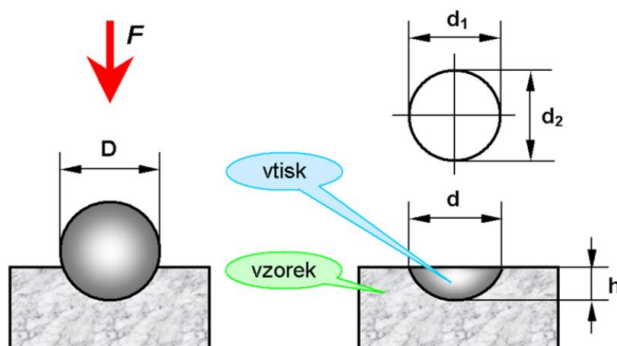
Obrázek 33 Princip měření metodou Rockwell [50]

Hlavní výhodou této metody je rychlost měření, jednoduchost provedení a možnost přímého výpočtu tvrdosti bez nutnosti optického měření, jak je tomu u jiných metod. Další výhodou je minimální poškození zkušebního tělesa. Je tedy možné měřit přímo na hotovém

výrobku. Nevýhodou je nepřesnost měření u tenkých těles a vysoká citlivost na špatnou povrchovou úpravu měřené plochy. [49]

5.1.2 Brinellova zkouška (HB)

Při Brinellově zkoušce tvrdosti je ocelová nebo tvrdokovová kulička vtlačována do povrchu zkoušeného materiálu, pod definovaným zatížením. Zkouška je definována normou ČSN EN ISO 6506-1. [48]



Obrázek 34 Schéma zkoušky dle Brinella [50]

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D^2 \cdot (1 - \sqrt{1 - d^2/D^2})} \quad (1)$$

Tvrlost je vypočítávána na základě průměrné hodnoty vtisku d, jenž je aritmetickým průměrem opticky naměřeného průměru v diagonálních směrech. Tato metoda je využívána pro měkčí až středně tvrdé materiály, jako jsou konstrukční oceli, měděné a ocelové slitiny. Použité zatížení se pohybuje v rozmezí 1–3000 kgf, přičemž závisí na typu materiálu a průměru kuličky. [49]

Tabulka 6 Příklady stupnice Brinellovy zkoušky [52]

Označení tvrdosti HBW (wolframkarbidová kulička)	Průměr kuličky [mm]	Zkušební zatížení [kgf]	Zkušební zatížení [N]	Typ materiálu
HBW 10/1000	10	1000	9810	Konstrukční a nástrojové oceli
HBW 5/750	5	750	7355	Nelegované a nízkolegované oceli

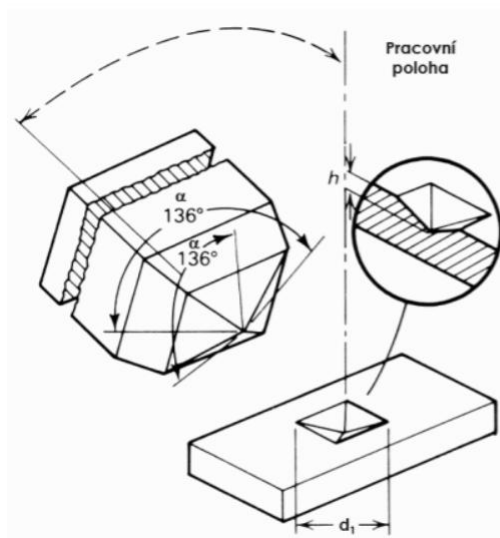
HBW 2,5/187,5	2,5	187,5	1839	Měkké kovy
---------------	-----	-------	------	------------

Hlavní výhodou metody je jednoduchost měření a schopnost měřit heterogenní materiály a materiály s hrubozrnnou mikrostrukturou, u nichž by jiné metody vykazovaly nepřesnou tvrdost kvůli lokálním změnám tvrdosti podle typu zrna, které se nachází v místě obtisku. [49]

Mezi nevýhody patří časová náročnost způsobená nutností optického vyhodnocení průměru vtisku a nevhodnost pro velmi tvrdé materiály, u kterých by mohlo dojít k deformaci indentoru. Dalším nevhodným zkušebním tělesem jsou tenké vzorky, protože by mohlo dojít k jeho prohnutí. I přes tyto nevýhody je Brinellova metoda hojně využívána ve strojírenství, obzvlášť pro vyhodnocování odlitků a konstrukčních prvků. [49]

5.1.3 Vickersova zkouška (HV)

Další ze statických zkoušek tvrdosti je Vickersova zkouška. Tato metoda je využívána pro široké spektrum materiálů, včetně velmi tenkých vrstev a mikrostruktur. Definována je normou ČSN EN ISO 6507-1. [48]



Obrázek 35 Detail na vnikací těleso Vickersovy metody [53]

Princip měření je založen na vlačování diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholových úhlem 136° do povrchu materiálu pod předem definovaným zatížením.

Následně jsou opticky měřeny diagonály, ze kterých se vypočítá aritmetický průměr, jenž je označen d . Následně se vypočítá tvrdost dle Vickerse HV dle následujícího vztahu. [49]

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2} \quad (2)$$

Měření lze provádět pro makrotvrdost (HV) nebo mikrotvrdost (mikroHV), což umožňuje širší spektrum aplikací, například pro lokální analýzu povrchové vrstvy. Zatížení se pohybuje v rozmezí 0,01 až 100 kgf, v závislosti na použití (viz

Tabulka 7). [49]

Tabulka 7 Rozdělení Vickersovy metody [53]

Typ zkoušky	Zatížení [kgf]	Zatížení [N]	Použití
MakroHV	1–100	9,81–981	Běžné kovy, konstrukční materiály
MikroHV	0,01–1	0,098–9,81	Tenčí vrstvy, pájené spoje, mikrostruktury

Vickersova zkouška je charakterizována vysokou přesností a univerzálností. Výsledky jsou dobře reprodukovatelné díky konstantnímu poměru mezi silou a plochou vtisku. Další výhodou je možnost měření mikrostruktur, svarových spojů nebo tenkých povlaků. [49]

Mezi nevýhody patří časová náročnost a nutnost vyhodnocení optickými metodami, které vyžadují další laboratorní vybavení. Přesnost je ovlivňována kvalitou povrchu zkušebního tělesa, což ovlivňuje správné optické vyhodnocení výsledků. I přes tyto nevýhody je Vickersova metoda široce využívána v analýze mikrostruktur a metalurgii, kde je kladen důraz na detailní analýzu. [49]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V praktické části bakalářské práce bylo provedeno měření s cílem stanovit vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti zkušebních těles vyrobených aditivní technologií, metodou DMLS a ADAM. Jako vstupní materiál byly zvoleny dva druhy nástrojové oceli vhodné pro 3D tisk, u kterých bylo zkoumáno, jakým způsobem se mění jejich vlastnosti vlivem tepelného zpracování.

Bakalářská práce se zabývá následujícími úkoly:

- Vypracování literární studie zabývající se řešenou tematikou
- Návrh a výroba zkušebních těles
- Provedení tepelného zpracování zkušebních těles
- Měření tvrdosti zkušebních těles

7 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZKUŠEBNÍ MATERIÁL

7.1 Měření mechanických vlastností

Pro vyhodnocení mechanických vlastností zkušebních těles byla využita instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI v mikro-oblasti, jenž umožňuje detekovat okamžitou hloubku vtisku a hodnotu zatížení, včetně dalších vlastností materiálu.

Zkoušky byly provedeny na zařízení Micro-Combi Tester od společnosti CSM Instruments, který se nachází na Ústavu výrobního inženýrství, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.



Obrázek 36 Zařízení Micro-Combi Tester [54]

Vnikacím tělískem byl čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° a na každém tělese bylo provedeno měření 9 krát.

Podmínky zkoušky:

- Použité zatížení – 5 N.
- Výdrž při zatížení – 12 s.
- Rychlost zatížení a odtížení – 10 N/min.

7.2 Zkušební tělesa

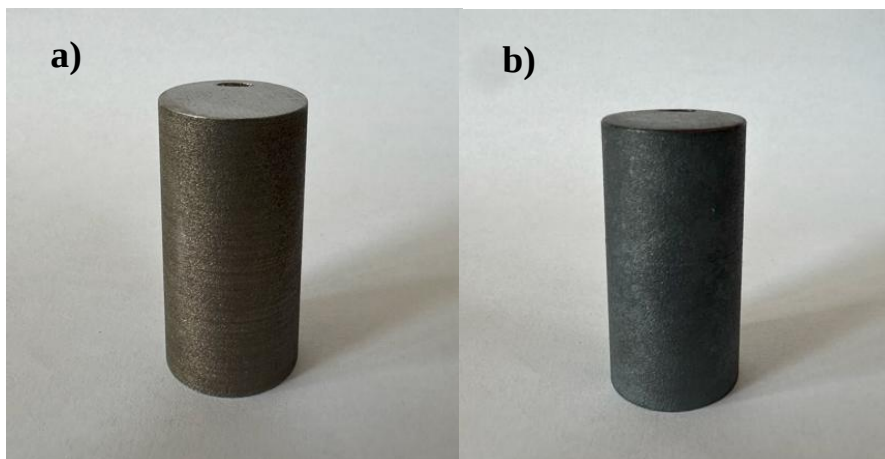
Pro experimentální část byly připraveny celkem 4 zkušební tělesa ze dvou druhů nástrojových ocelí. Prvním z nich byla maragingová ocel 1.2709, zpracovaná metodou DMLS (viz 3.1.4) společností INNOMIA a.s. Druhým použitým materiálem byla ocel 1.2344, též známá pod názvem H13, zpracovaná metodou ADAM (viz. 3.1.5) firmou TECRON s.ro.

Zkušební tělesa byla připravena ve tvaru válce s vnitřní dutinou simulující kanálek konformního chlazení vstřikovacích forem. Kanálek neměl vliv na měření a byl určen k jiným experimentálním účelům.

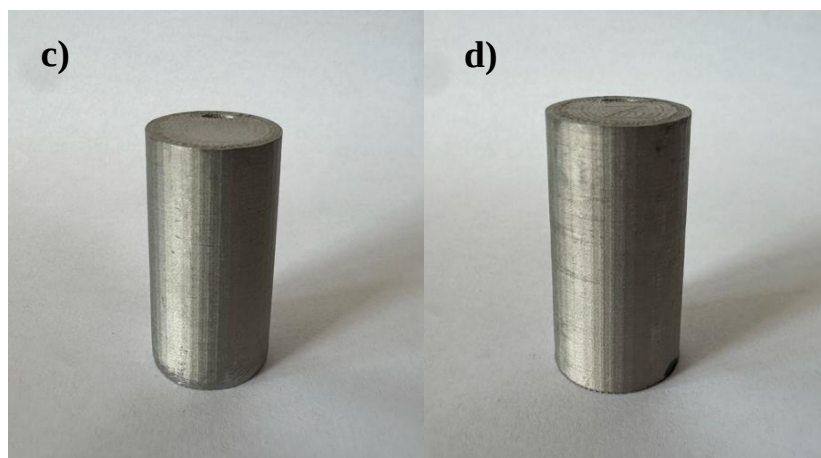
Podrobné podmínky tisku ani následného tepelného zpracování nebyly ze strany dodavatelů poskytnuty.

Výsledné kombinace zkušebních těles a tepelného zpracování jsou následující:

- Ocel 1.2709 bez tepelného zpracování.
- Ocel 1.2709 po precipitačním vytvrzování.
- Ocel 1.2344 bez tepelného zpracování.
- Ocel 1.2344 po žíhání.



Obrázek 37 ocel 1.2709 a) bez tepelného zpracování b) po precipitačním vytvrzování



Obrázek 38 ocel 1.2344 c) bez tepelného zpracování d) po
žíhání

8 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny statisticky a prezentovány formou průměrných hodnot jednotlivých parametrů a směrodatných odchylek. Tyto hodnoty byly dále graficky znázorněny a výsledky byly interpretovány s důrazem na porovnání jednotlivých stavů s cílem vyhodnotit vliv tepelného zpracování na sledované vlastnosti. Vyhodnocením výsledků a vlivu tepelného zpracování se zabývá následující Kapitola 9.

Vyhodnocení proběhlo pro následující parametry:

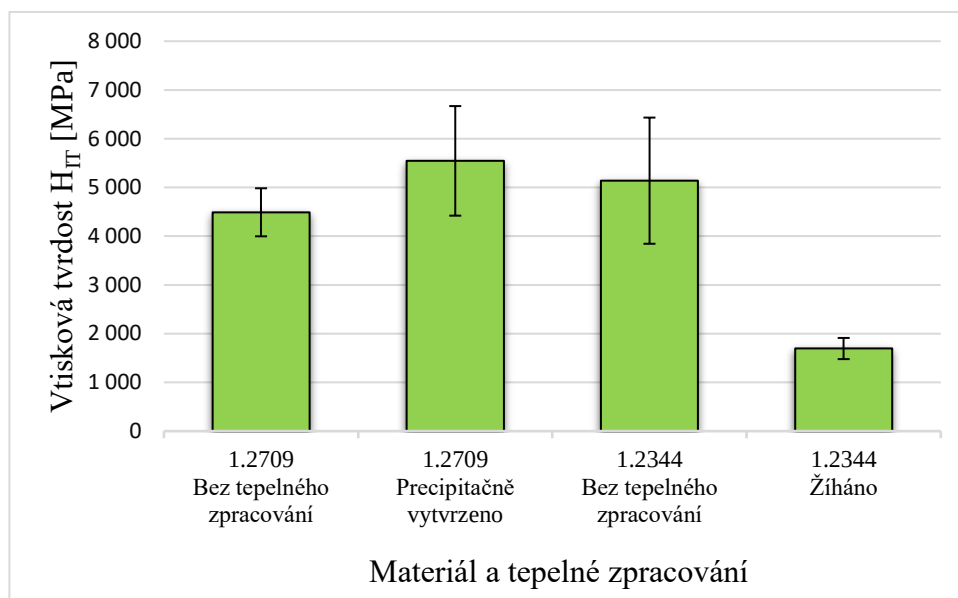
- Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa]
- Vickersova tvrdost H_{VIT} [HV]
- Vtiskový modul E_{IT} [GPa]
- Hloubka vtisku h_m [nm]
- Deformační práce W_{el} , W_{pl} , W_{celk} [nJ]

8.1 Vtisková tvrdost

Výsledky měření vtiskové tvrdosti jsou uvedeny v Tabulce 8 a graficky znázorněny na Obrázku 40.

Tabulka 8 Průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti a směrodatné odchylky měření

Materiál a tepelné zpracování	1.2709 Bez tepelného zpracování	1.2709 Precipitačně vytvrzeno	1.2344 Bez tepelného zpracování	1.2344 Žiháno
H_{IT} [MPa]	4490,0	5545,1	5138,8	1694,7
σ_{HIT} [MPa]	492,9	1124,1	1294,7	217,2



Obrázek 39 Grafické srovnání vtiskové tvrdosti

Z měření vyplývá, že nejvyšší naměřené průměrné hodnoty byly dosaženy u zkušebních těles z materiálu 1.2709 po precipitačním vytvrzování. Průměrná hodnota H_{VT} tohoto tělesa dosáhla 5 545,1 MPa. Naopak nejnižší hodnota byla zaznamenána u zkušebního tělesa z oceli 1.2344 po žihání, a to pouze 1 694,7 MPa.

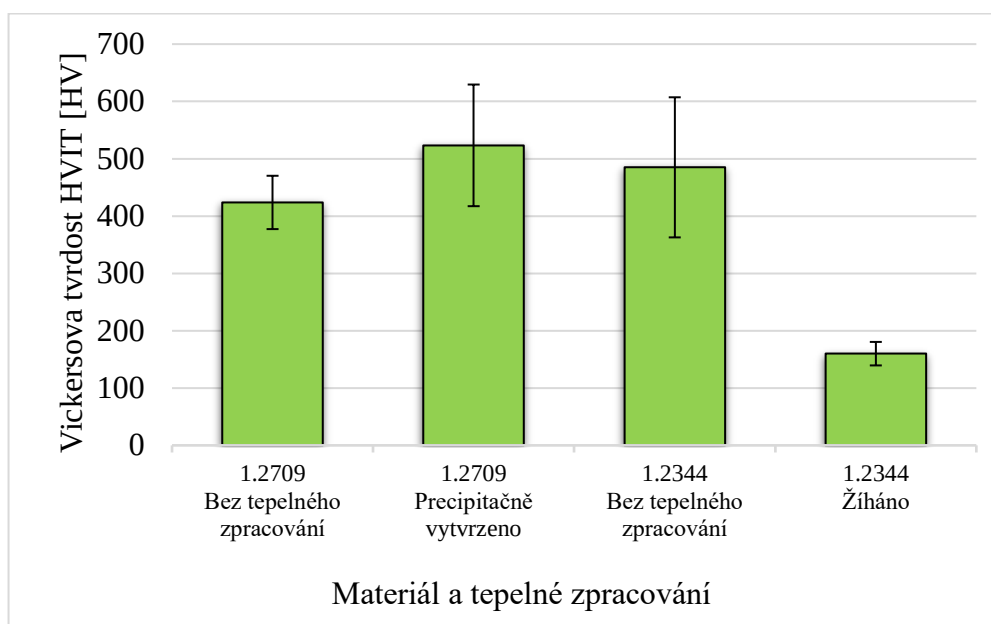
U zkušebního tělesa stejného materiálu byly získány rozdílné hodnoty vtiskové tvrdosti v závislosti na jejich stavu a mikrostruktuře. Naměřené hodnoty byly doplněny o směrodatnou odchylku. Rozdíly ve směrodatných odchylkách byly patrné mezi různými materiálovými stavy, přičemž některé tělesa vykazovaly větší rozptyl hodnot, zatímco u jiných byl rozptyl výrazně menší. V závislosti na velikosti naměřené hodnoty.

8.2 Vickersova tvrdost

V této části byly zaznamenány hodnoty Vickersovy tvrdosti (H_{VT}). Výsledky měření jsou shrnuty v Tabulce 9 a graficky znázorněny na Obrázku 41.

Tabulka 9 Průměrné hodnoty Vickersovy tvrdosti a směrodatné odchylky měření

Materiál a tepelné zpracování	1.2709 Bez tepelného zpracování	1.2709 Precipitačně vytvrzeno	1.2344 Bez tepelného zpracování	1.2344 Žiháno
H_{VIT} [HV]	423,8	523,4	485,0	160,0
$\sigma_{H_{VIT}}$ [HV]	46,5	106,1	122,2	20,5



Obrázek 40 Grafické srovnání Vickersovy tvrdosti

Nejvyšší průměrná hodnota Vickersovy tvrdosti byla naměřena u tělesa 1.2709 po precipitačním vytvrzování a činila 523,4 HV. Nejnižší hodnota byla zjištěna u tělesa 1.2344 po žihání, s průměrnou hodnotou 160,0 HV.

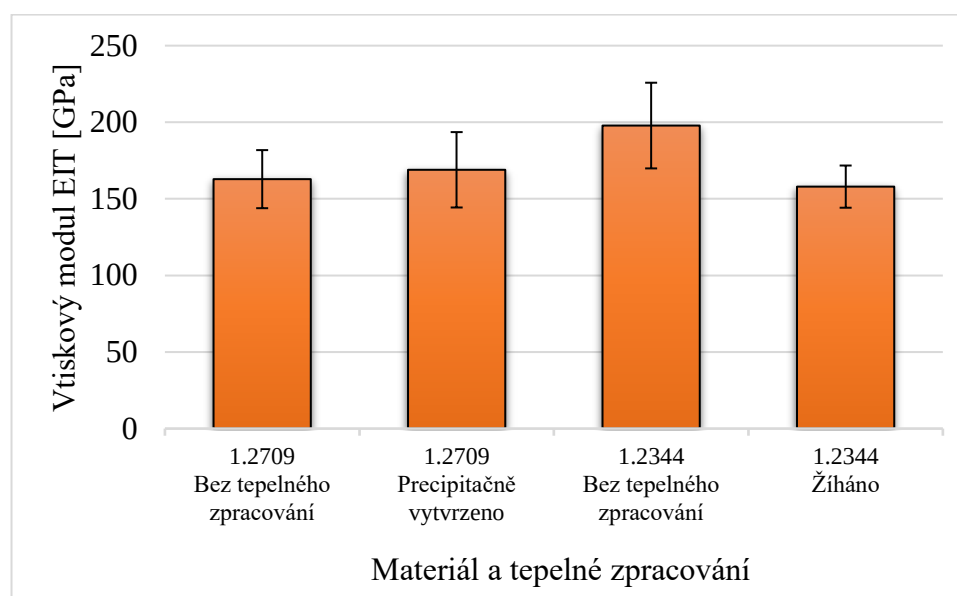
Průběh naměřených hodnot Vickersovy tvrdosti vykazuje obdobný trend jako u hodnot vtiskové tvrdosti H_{IT} uvedených v předchozí kapitole. U jednotlivých těles byly zaznamenány rozdíly v závislosti na stavu materiálu, přičemž sledované hodnoty byly doplněny o směrodatné odchylky.

8.3 Modul pružnosti (Youngův modul)

Průměrné hodnoty vtiskového modulu (E_{IT}) byly uvedeny v Tabulce 10 a znázorněny na Obrázku 42.

Tabulka 10 Průměrné hodnoty modulu pružnosti a směrodatné odchylky měření

Materiál a tepelné zpracování	1.2709 Bez tepelného zpracování	1.2709 Precipitačně vytvrzeno	1.2344 Bez tepelného zpracování	1.2344 Žiháno
E_{IT} [GPa]	162,8	168,9	197,8	158,0
σ_{EIT} [GPa]	18,9	24,6	28,0	13,8



Obrázek 41 Grafické srovnání modulu pružnosti

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla zaznamenána u zkušebních těles 1.2344 bez tepelného zpracování, kde E_{IT} činil 197,8 GPa. Nejnižší průměrná hodnota byla naměřena u zkušebního tělesa 1.2344 po žihání, a to 158,0 GPa.

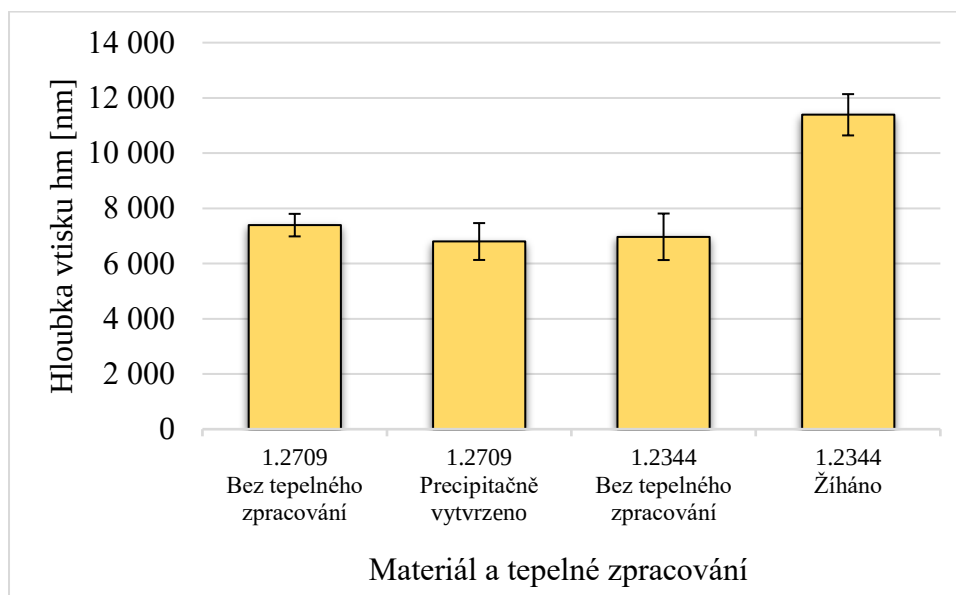
U jednotlivých stavů materiálů byly zaznamenány rozdíly v hodnotách modulu E_{IT} , přičemž u zkušebních těles z materiálu 1.2344 mělo tepelné zpracování výraznější efekt na změnu modulu pružnosti. Naměřené hodnoty byly doplněny o příslušné směrodatné odchylky.

8.4 Hloubka vtisku

V této části byly zaznamenány maximální hodnoty hloubky vtisku (h_m). Výsledky měření jsou shrnuty v Tabulce 11 a graficky znázorněny na Obrázku 43.

Tabulka 11 Průměrné hodnoty hloubky vtisku a směrodatné odchylky měření

Materiál a tepelné zpracování	1.2709 Bez tepelného zpracování	1.2709 Precipitačně vytvrzeno	1.2344 Bez tepelného zpracování	1.2344 Žiháno
h_m [nm]	7390,8	6797,1	6968,0	11386,9
σ_{h_m} [nm]	408,4	667,5	842,7	747,9



Obrázek 42 Grafické srovnání hloubky vtisku

Nejmenší hloubka vtisku byla naměřena u zkušebního tělesa 1.2709 po precipitačním vytvrzování, kde činila 6 797,1 nm. Nejvyšší průměrná hodnota hloubky vtisku byla zaznamenána u zkušebního tělesa 1.2344 po žihání s hodnotou 11 386,9 nm.

Naměřené hodnoty byly doplněny o směrodatné odchylky, které se mezi jednotlivými zkušebními tělesy lišily.

8.5 Deformační práce

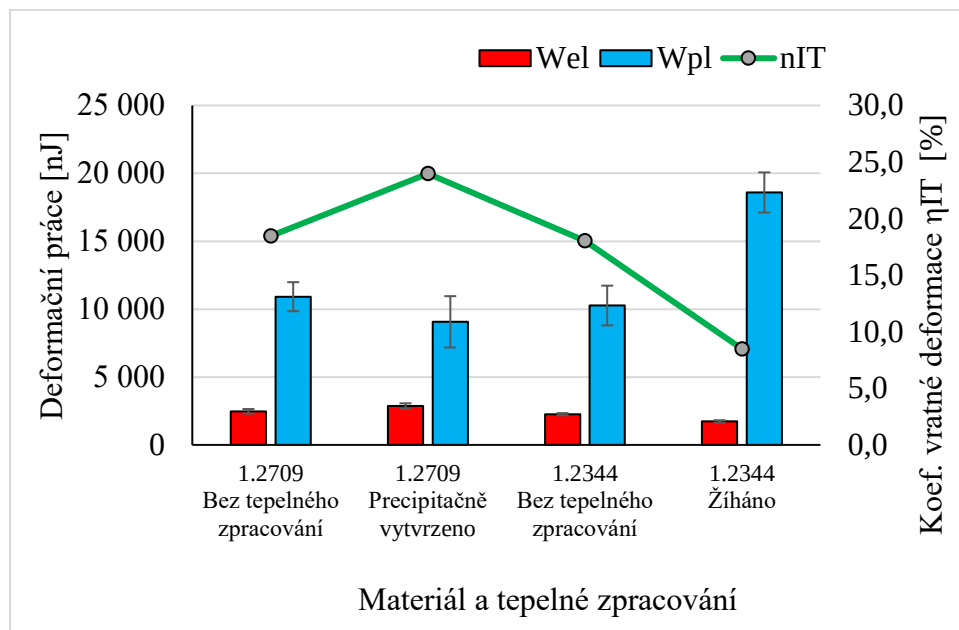
V této části byly vyhodnoceny hodnoty deformační práce elastické, plastické a celkové deformace, při zatěžování zkušebních těles. Celková deformační práce byla určena jako součet elastické a plastické složky. Současně byl vypočítán koeficient vratné deformace η_{IT} , který udává poměr mezi elastickou a celkovou deformační prací. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 12 a znázorněny graficky na Obrázku 44. Vzorce použité pro výpočet W_{celk} a η_{IT} jsou uvedeny níže:

$$W_{celk} = W_{el} + W_{pl} \quad (3)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{el}}{W_{celk}} \cdot 100 \quad (4)$$

Tabulka 12 Průměrné hodnoty deformační práce a směrodatné odchylky měření

Materiál a tepelné zpracování	1.2709 Bez tepelného zpracování	1.2709 Precipitačně vytvrzeno	1.2344 Bez tepelného zpracování	1.2344 Žíháno
W_{el} [nJ]	2473,2	2859,0	2259,9	1725,2
σ_{wel} [nJ]	168,8	202,7	80,6	89,4
W_{pl} [nJ]	10917,2	9064,2	10266,0	18593,0
σ_{pl} [nJ]	1068,3	1891,5	1463,4	1479,9
W_{celk} [nJ]	13390,4	11923,2	12525,9	20318,2
η_{IT} [%]	18,5	24,0	18,0	8,5



Obrázek 43 Grafické srovnání deformační práce a koef. vratné deformace

Nejvyšší průměrná hodnota celkové deformační práce W_{celk} byla zaznamenána u zkušebního tělesa 1.2344 po žihání, a to 20 318,2 nJ. Nejnižší hodnota celkové deformační práce byla zjištěna zkušebního tělesa 1.2709 po precipitačním vytvrzování, kde činila 11 923,2 nJ.

U jednotlivých zkušebních těles se hodnota koeficientu vratné deformace η_{IT} pohybovala v rozmezí od 8,5 % do 24,0 %.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě naměřených dat z Kapitoly 8 byly analyzovány změny mechanických vlastností zkušebních těles v závislosti na tepelném zpracování. Pozornost byla věnována vývoji vtiskové a Vickersovy tvrdosti, hloubce vtisku, modulu pružnosti, deformační práci a koeficientu vratné deformace.

9.1 Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Výsledky vtiskové tvrdosti (H_{IT}) ukázaly, že u maragingové oceli 1.2709 došlo po precipitačním vytvrzování k nárůstu tvrdosti o přibližně 23,5 % oproti stavu bez tepelného zpracování. Tento nárůst byl způsoben tvorbou jemných precipitačních fází, které zpevnilly matici materiálu a zvýšily odpor proti pohybu dislokací. Naproti tomu u nástrojové oceli 1.2344 došlo po žíhání k poklesu H_{IT} o více než 67 %, což odpovídá rozpadu martenzitické struktury a tvorbě feriticko-perlitické mikrostruktury.

Vickersova tvrdost (H_{VIT}) vykazovala velice podobný trend jako vtisková tvrdost. U materiálu 1.2709 po vytvrzení bylo dosaženo zvýšení H_{VIT} o 23,5 %, zatímco u žíhané oceli 1.2344 byl pokles až o 67 %.

Hloubka vtisku (h_m) byla inverzně úměrná tvrdosti materiálu. U materiálu 1.2709 se po vytvrzení hloubka vtisku snížila o 8 %, zatímco u 1.2344 po žíhání došlo k nárůstu o 63 %. Z těchto výsledků vyplývá, že mezi hloubkou vtisku a tvrdostí materiálu existuje negativní korelace.

Vtiskový modul pružnosti (E_{IT}) u oceli 1.2344 bez tepelného zpracování dosahoval nejvyšší hodnoty a to 197,8 GPa. Po žíhání došlo ke snížení modulu na 158,0 GPa, tedy o 20 %. Pokles vtiskového modulu pružnosti E_{IT} po žíhání o přibližně 20 % odráží snížení tuhosti materiálu v důsledku rozkladu martenzitické struktury a nárůstu podílu feritických složek. Materiál po tepelném zpracování vykazuje vyšší schopnost elastické deformace a menší odpor proti elastickému zatížení.

Dále byly sledovány parametry deformační práce a koeficientu vratné deformace η_{IT} . Nejvyšší hodnota celkové deformační práce W_{celk} byla naměřena u oceli 1.2344 po žíhání, a to 20 318,2 nJ, zatímco nejnižší hodnota byla zaznamenána u oceli 1.2709 po precipitačním vytvrzování, kde činila 11 923,2 nJ. Tento vývoj odráží zvýšenou schopnost plastické deformace žíhaného materiálu a vyšší odolnost proti plastické deformaci u vytvrzeného materiálu.

Koeficient vratné deformace η_{IT} dosahoval nejvyšších hodnot u vytvrzené maragingové oceli 1.2709 (24 %), což svědčí o vyšší elasticitě a schopnosti materiálu akumulovat pružnou energii. Naopak nejnižší η_{IT} (8,5 %) byl zaznamenán u žíhané oceli 1.2344, kde převažovalo plastické chování nad elastickým.

9.2 Korelace mezi mechanickými veličinami

Dosažené výsledky ukazují na úzkou vzájemnou souvislost mezi sledovanými mechanickými parametry. Tvrdost (H_{IT} , H_{VIT}) vykazovala negativní korelaci s hloubkou vtisku (h_m), přičemž vyšší hodnoty tvrdosti odpovídaly menší hloubce vtisku, což lze přičíst vyššímu odporu materiálu vůči plastické deformaci. Podobný vztah se projevil mezi tvrdostí a celkovou deformační prací W_{celk} , kdy materiály s nižší tvrdostí akumulovaly větší množství energie v plastické deformaci.

Koeficient vratné deformace η_{IT} souvisel s tvrdostí tak, že vyšší tvrdost odpovídala vyšším hodnotám η_{IT} , což značí větší podíl elastické složky deformace. Modul pružnosti E_{IT} po žíhání vykazoval pokles, který lze spojit jak se změnami mikrostruktury, tak se snížením tvrdosti a nárůstem plastické složky deformace. Tato vzájemná provázanost mechanických veličin odráží komplexní charakter změn, ke kterým v důsledku tepelného zpracování dochází – ať už na úrovni mikrostruktury, nebo mechanické odezvy materiálu.

9.3 Vliv mechanických vlastností na dokončovací operace

V rámci této práce byla analyzována mechanická odezva různě tepelně zpracovaných zkušebních těles za účelem předběžného posouzení jejich vhodnosti pro dokončovací operace, zejména metodou Abrasive Flow Machining (AFM), která může být následně aplikována při úpravách vnitřních konformních chladicích kanálků vstřikovacích forem.

Mechanické vlastnosti zkušebních těles zásadně ovlivňují proces AFM. Tvrdší materiály, reprezentované vytvrzenou maragingovou ocelí 1.2709, vykazují vyšší odolnost proti plastické deformaci a nižší celkovou deformační práci. V důsledku toho lze očekávat pomalejší abrazivní úběr materiálu během procesu AFM, což přispívá k dosažení vyšší rozměrové stability konformních kanálků. Vyšší hodnota koeficientu vratné deformace η_{IT} rovněž naznačuje schopnost materiálu pružně odolávat lokálním tlakům abrazivního média, což napomáhá zachování přesné geometrie.

Naopak u žíhaných zkušebních těles z oceli 1.2344, u nichž byla zjištěna nižší tvrdost, vyšší hloubka vtisku a vyšší celková deformační práce, je předpokládáno, že budou během AFM podléhat intenzivnějšímu úběru materiálu. Nižší hodnota η_{IT} zde naznačuje větší plastickou deformaci povrchu při působení abrazivního média. Tento stav umožňuje rychlejší a efektivnější odstranění povrchových nerovností, avšak při nedostatečné kontrole procesu může dojít k nežádoucímu nadměrnému úběru a deformaci geometrie kanálků.

Z těchto výsledků vyplývá, že výběr vhodného stavu materiálu před dokončovací operací by měl být optimalizován podle požadavků na rychlost opracování a požadovanou přesnost kanálků. Pro přesné a stabilní formy je vhodné využít vytvrzené stavy, zatímco pro urychlené hrubé opracování mohou být výhodné měkčí stavy po žíhání.

10 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byl analyzován vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti nástrojových ocelí 1.2709 a 1.2344 vyráběných aditivními technologiemi. Byly sledovány změny vtiskové tvrdosti, Vickersovy tvrdosti, modulu pružnosti, hloubky vtisku, deformační práce a koeficientu vratné deformace v závislosti na stavu tepelného zpracování.

Výsledky ukázaly, že precipitační vytvrzení maragingové oceli 1.2709 vedlo ke zvýšení tvrdosti, pružnosti a odporu proti plastické deformaci, zatímco žíhání nástrojové oceli 1.2344 způsobilo pokles tvrdosti a zvýšení plasticity materiálu. Byla potvrzena korelace mezi tvrdostí, hloubkou vtisku, deformační prací a koeficientem vratné deformace, přičemž změny těchto veličin odrážely zásadní změny v mikrostruktuře materiálů.

Předběžná interpretace mechanických vlastností v souvislosti s metodou Abrasive Flow Machining naznačuje, že tvrdší vytvrzené stavy by mohly být vhodnější pro přesnější a stabilnější dokončování konformních chladicích kanálků, zatímco měkčí žíhané stavy pravděpodobně umožňují rychlejší, ale méně kontrolovaný úběr materiálu. Tyto závěry je však třeba dále experimentálně ověřit.

Na základě získaných výsledků se doporučuje pro dosažení vysoké rozměrové stability a odolnosti proti opotřebení volit vytvrzené stavy materiálů. Pro aplikace, kde je klíčová efektivita dokončování a rychlé odstranění materiálu, jsou vhodnější měkčí žíhané stavy.

Závěrem lze konstatovat, že správnou volbou tepelného zpracování lze významně ovlivnit nejen mechanické vlastnosti, ale i efektivitu a kvalitu dokončovacích operací aditivně vyráběných kovových součástí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. Online. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1. [cit. 2024-11-19].
- [2] VĚCHET, Stanislav a NĚMEC, Karel. Stanislav a NĚMEC, Karel. Tepelné zpracování ocelí: Martenzitické kalení, Online.In: SlidePlayer. C2024. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/mattech/01_Materialem%20letem%20svetem.pdf. [cit. 2024-12-03].
- [3] CALLISTER, William D. a RETHWISCH, David G. Materials science and engineering: an introduction. Online. 10th edition. Hoboken, NJ: Wiley, [2020]. ISBN 978-1-119-45391-8. Dostupné z: <https://doi.org/MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING>. [cit. 2024-11-21].
- [4] HANDBOOK COMMITTEE, ASM. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys: Volume 1 : properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. Online. Volume 1. Materials Park: ASM International, 1990. ISBN 978-1-62708-161-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>. [cit. 2024-11-21].
- [5] Co je to trubka z nízkouhlíkové oceli a její použití. Online. In: Yi Zeng. 2024. Dostupné z: <https://cz.yzpipes.com/info/what-is-low-carbon-steel-pipe-and-its-use-95843408.html>. [cit. 2024-12-03].
- [6] Automobilová převodovka čelní ozubené kolo. Online. In: Jingong Gear. Dostupné z: <https://cz.jinggonggear.com/gear/truck-gear/automotive-transmission-spur-gear.html>. [cit. 2024-12-03].
- [7] Dvouřadé kuličkové ložisko 3206 A-2RS1. Online. In: SKF. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-3206%20A-2RS1>. [cit. 2024-12-03].
- [8] Parní kotle: Universal UL-S. Online. In: Bosch. © Bosch Termotechnika s.r.o. 2025. Dostupné z: <https://www.bosch-industrial.com/cz/cs/ocs/prumyslove-kotle/parni-kotle-669471-c/>. [cit. 2025-02-05].
- [9] Korozivzdorné oceli a jejich použití v oblasti technického zařízení budov. Online. In: Topenářské instalace. 2014. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/korozivzdorne-oceli-a-jejich-pouziti-v-oblasti-technickeho-zarizeni-budov-detail-5207>. [cit. 2024-12-03].

- [10] METAL 3DP. Kompletní průvodce práškem H13. Online. In: Metal 3DP. Dostupné z: <https://met3dp.com/cz/produkt/a-comprehensive-guide-to-h13-powder/>. [cit. 2024-12-01].
- [11] Powders for Additive Manufacturing. Online. In: Splat Solutions. Dostupné z: <https://www.splatsolutions.co.in/powders-additive-manufacturing/>. [cit. 2024-12-03].
- [12] 316L Stainless Steel Powder. Online. In: Metal 3DP. Dostupné z: <https://met3dp.sg/product/316l-stainless-steel-powder/>. [cit. 2024-12-03].
- [13] Maraging Steel 300 Powder. Online. In: Metal 3DP. Dostupné z: <https://met3dp.com/product/maraging-steel-300-powder-20240201/>. [cit. 2024-12-03].
- [14] Tepelné zpracování po svařování: Anotace oblasti. Online. In: Elektronický učebnice. © 2025. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/tepelne-zpracovani-po-svarovani>. [cit. 2025-02-17].
- [15] TOTTEN, George E. Steel Heat Treatment. Online. Second Edition. Portland, Oregon, USA: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 9780429133411. Dostupné z: https://www.academia.edu/29967062/Steel_Heat_Treatment_Metallurgy_And_Technologies_pdf. [cit. 2024-12-03].
- [16] MINAMOTO, Satoshi; TSUKAMOTO, Susumu; KASUYA, Tadashi; WATANABE, Makoto a DEMURA, Masahiko. Prediction of continuous cooling transformation diagram for weld heat affected zone by machine learning. Online. Science and Technology of Advanced Materials: Methods. 2022, roč. 2, č. 1, s. 402-415. ISSN 2766-0400. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/27660400.2022.2123262>. [cit. 2025-02-17].
- [17] Nástrojové oceli pro práci za studena: Böhler K100. Online. In: Bohler. © 2025. Dostupné z: <http://www.bohler.cz/czech/files/downloads/K100.pdf>. [cit. 2025-02-17].
- [18] HANDBOOK COMMITTEE, ASM. ASM Handbook, Heat Treating of Tool Steels. Online. Volume 4. Materials Park: ASM International, 1991. ISBN 0-87170-379-3. Dostupné z: <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%204.pdf>. [cit. 2025-02-17].
- [19] BHADESHIA, Harshad a HONEYCOMBE, Robert. Steels: Microstructure and Properties: microstructure and properties. Online. Fourth edition. Amsterdam,

- [Netherlands]: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100272-8. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=4775700>. [cit. 2024-11-21].
- [20] Chemicko tepelné zpracování: Nitridování. Online. In: Strojářská bible. © 2025. Dostupné z: <https://www.strojarskabible.cz/chemicko-tepelne-zpracovani/>. [cit. 2025-02-17].
- [21] DEBROY, T.; WEI, H.L.; ZUBACK, J.S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.W. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Online. *Progress in Materials Science*. 2018, roč. 92, ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>. [cit. 2024-11-28].
- [22] ZHANG, Lai-Chang; CHEN, Liang-Yu a WANG, Liqiang. Surface Modification of Titanium and Titanium Alloys: Technologies, Developments, and Future Interests. Online. In: *Advanced Engineering Materials*. 2020. ISSN 1438-1656. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adem.201901258>. [cit. 2025-02-17].
- [23] WALTER, Jan. Vliv parametrů tepelného zpracování na strukturu a vlastnosti nástrojové oceli 1.2709 připravené 3D tiskem. Online, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/96932>. [cit. 2024-11-28].
- [24] IM, Yong-Deok; KIM, Kyung-Hoon; JUNG, Kyung-Hwan; LEE, Young-Kook a SONG, Kuk-Hyun. Anisotropic Mechanical Behavior of Additive Manufactured AISI 316L Steel. Online. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019, roč. 50, č. 4, s. 2014-2021. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05139-7>. [cit. 2024-11-28].
- [25] LALEH, Majid; SADEGHI, Esmail; REVILLA, Reynier I.; CHAO, Qi; HAGHDADI, Nima et al. Heat treatment for metal additive manufacturing. Online. *Progress in Materials Science*. 2023, roč. 133. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101051>. [cit. 2024-11-28].
- [26] Fintek: Additive manufacturing parts. Online. In: Fintek. © 2025. Dostupné z: <https://www.fintek.co.uk/additive-manufactured-parts/>. [cit. 2025-03-29].

- [27] GIBSON, Ian; ROSEN, David a STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies. Online. In: . 2015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>. [cit. 2025-02-18].
- [28] YAKOUT, Mostafa; ELBESTAWI, M.A. a VELDHUIS, Stephen C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. Online. In: Solid State Phenomena. 2018, s. 1-14. ISSN 1662-9779. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>. [cit. 2025-02-18].
- [29] Additive Manufacturing Research Group: Binder Jetting. Online. In: Loughborough University. © 2025. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>. [cit. 2025-02-08].
- [30] Metal 3D Printing: Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM®). Online. In: Sciaky. © 2025. Dostupné z: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing>. [cit. 2025-02-08].
- [31] NANDY, Jyotirmoy; SARANGI, Hrushikesh a SAHOO, Seshadev. A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. Online. Lasers in Manufacturing and Materials Processing. 2019, roč. 6, č. 3, s. 280-316. ISSN 2196-7229. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00094-y>. [cit. 2025-02-08].
- [32] GALATI, Manuela a MINETOLA, Paolo. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Online. In: Materials. 2019. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12244122>. [cit. 2025-02-18].
- [33] Your Complete Guide to Metal 3D Printing with Markforged: ADAM: Atomic Diffusion Additive Manufacturing. Online. In: ExBuild. © 2025. Dostupné z: https://www.exbuild.com/complete-guide-to-metal-3d-printing#the_markforged_metal_3d_printing_process. [cit. 2025-02-08].
- [34] BOTTINI, Luana; BOSCHETTO, Alberto; VENIALI, Francesco a GAUDENZI, Paolo. Additive manufacturing for CubeSat structure fabrication. Online. Next Generation CubeSats and SmallSats. 2023, s. 153-180. ISBN 9780128245415. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824541-5.00025-X>. [cit. 2025-02-08].

- [35] What is Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)?: ADAM Advantages and Disadvantages. Online. In: Markforged. ©2025. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-atomic-diffusion-additive-manufacturing-adam>. [cit. 2025-02-18].
- [36] Markforged vs. DMLS: A Cost Analysis [@Markeforged]. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=dvCGHgftNIg>. [cit. 2025-02-10].
- [37] Dostupnější 3D tisk kovů. Online. In: Průmyslové spektrum. 2019. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dostupnejsi-3d-tisk-kovu>. [cit. 2025-02-10].
- [38] Why You Need to Include 3D Printing Post Processing Into Your Manufacturing Process? Online. In: ActonFinishing. 2021. Dostupné z: <https://actonfinishing.madeinthemidlands.com/news/why-you-need-to-include-3d-printing-post-processing-into-your-manufacturing-process>. [cit. 2025-02-08].
- [39] MARINESCU, Ioan D.; HITCHINER, M. P.; UHLMANN, Eckart; ROWE, W. B. a INASAKI, Ichiro. Handbook of machining with grinding wheels. Online. Second edition. Boca Raton, [2016]. ISBN 9780429171055. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482206708>. [cit. 2025-02-18].
- [40] Diama: Brusné kotouče. Online. In: Diama. © 2009-2013. Dostupné z: <https://www.diama.cz/vyrobky.html>. [cit. 2025-02-18].
- [41] Leštící sada pro zpracování oceli. Online. In: ENGELBERT STRAUSS S.R.O. Strauss. Dostupné z: <https://www.strauss.com/cz/cs/hrubovaci-kotouce-lestici-kotouce/lestici-sada-pro-zpracovani-oceli-10-dilna-7185140-5514300-0.html>. [cit. 2025-02-18].
- [42] DAVIDSON, David A. Vibratory finishing: Versatile, effective, and reliable. Online. In: Metal Finishing. 2008, s. 30-34. ISSN 00260576. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(08\)80123-7](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(08)80123-7). [cit. 2025-02-18].
- [43] Omílací tělíska a kompoundy: Keramická a plastová omílací tělíska. Online. In: <https://technostroj.cz/omilaci-stroje/omilaci-teliska-a-kompoundy/>. © 2021. Dostupné z: <https://technostroj.cz/omilaci-stroje/omilaci-teliska-a-kompoundy/>. [cit. 2025-02-18].
- [44] Abrasive Flow Machining: EXTRUDE HONING AFM. Online. In: Extrude Hone. © 2013-2022. Dostupné z: <https://www.extrudehone.com/products/abrasive-flow-machining-afm/>. [cit. 2025-02-08].

- [45] HANZLIK, JAN; VANEK, JIRI; KOTLANOVA, BARBORA; KOCAK, MICHAL; OVSÍK, MARTIN et al. AFM-BASED MACHINE DESIGN FOR FINISHING INJECTION MOLDING TOOLS. Online. MM Science Journal. 2024, roč. 2024, č. 3. ISSN 18031269. Dostupné z: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_06_2024015. [cit. 2025-02-08].
- [46] HAN, Sangil; SALVATORE, Ferdinando; RECH, Joël a BAJOLET, Julien. Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM). Online. Precision Engineering. 2020, roč. 64, s. 20-33. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.006>. [cit. 2025-02-08].
- [47] KOSMAČ, Alenka. Elektrolitické leštění korozivzdorných ocelí. Online. Sv. 11. Brusel, Belgie: Euro Inox, 2009. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf. [cit. 2025-02-08].
- [48] Zkoušky tvrdosti a metody měření tvrdosti. Online. In: Zwick Roel. © 2025. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkousky-tvrdosti/>. [cit. 2025-02-18].
- [49] DIETER, George Ellwood. Mechanical metallurgy. Online. 3rd ed. McGraw-Hill series in materials science and engineering. New Delhi: McGraw-Hill Education (India) Private Limited, c1986. ISBN 978-1-259-06479-1. Dostupné z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/mh023/85018229.html>. [cit. 2025-02-18].
- [50] DVOŘÁK, JD. Metodiky a normy: Metoda Rockwell - zkouška tvrdosti dle ČSN EN ISO 6508. Online. In: JD Dvořák, s.r.o. © 2018. Dostupné z: <https://www.jddvorak.cz/metoda-rockwell-iso-6508#:~:text=Norma%20%C4%8CSN%20EN%20ISO%206508,sm%C4%9Bru%20k olm%C3%A9m%20k%20povrchu%20vzorku..> [cit. 2025-02-18].
- [51] Zkoušky tvrdosti: Statické zkoušky tvrdosti. Online. In: Elektronická učebnice. © 2025. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/staticke-zkousky>. [cit. 2025-02-18].
- [52] DVOŘÁK, JD. Metodiky a normy: Metoda Brinell. Online. In: JD Dvořák, s.r.o. © 2018. Dostupné z: <https://www.jddvorak.cz/metoda-brinell-iso-6506>. [cit. 2025-02-18].

- [53] DVOŘÁK, JD. Metodiky a normy: Metoda Vickers. Online. In: JD Dvořák, s.r.o. © 2018. Dostupné z: <https://www.jddvorak.cz/metoda-vickers>. [cit. 2025-02-18].
- [54] Zařízení pro měření mikrotvrdosti CSM Instruments – Micro-Combi Tester. Online. In: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. © 2025. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/o-fakulte/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/vedaavyzkum/pristrojovevybaveni/zarizenipromerenimikrotvrdosticsminstrumentsmicrocombitester/>. [cit. 2025-04-21].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rovnovážný binární diagram Fe-Fe ₃ C [2]	13
Obrázek 2 Trubky z nízkouhlíkové oceli [5]	14
Obrázek 3 Ozubené kolo ze středně uhlíkové oceli [6]	14
Obrázek 4 Ložisko z vysokouhlíkové oceli [7]	15
Obrázek 5 Parní kotel z nízkolegované oceli [8]	15
Obrázek 6 Potrubí z korozivzdorné vysokolegované oceli [9]	16
Obrázek 7 Různé druhy kovových prášků pro aditivní výrobní technologie [11].....	17
Obrázek 8 Mikrostruktura prášku oceli H13 [10]	18
Obrázek 9 Mikrostruktura prášku oceli AISI 316L [12].....	18
Obrázek 10 Mikrostruktura prášku z oceli Maraging 300 [13]	19
Obrázek 11 Schéma tepelného zpracování [14].....	20
Obrázek 12 Diagram anizotermického rozpadu austenitu [16]	21
Obrázek 13 Pásmo kalících teplot [2]	22
Obrázek 14 Popouštěcí diagram pro nástrojovou ocel X210Cr12 [17]	23
Obrázek 15 Schéma zušlechťování [2]	23
Obrázek 16 Pásmo žíhacích teplot [2].....	24
Obrázek 17 Hloubka nitridační vrstvy a tvrdost v závislosti na čase [20].....	27
Obrázek 18 Rychlost růstu cementační vrstvy podle prostředí [20]	28
Obrázek 19 Schéma pece pro HIP [22].....	29
Obrázek 20 Ilustrační výrobky vytvořené aditivní technologií [26]	32
Obrázek 21 Trh aditivní výroby kovů v roce 2021 [28]	33
Obrázek 22 Schéma procesu BJ [29]	34
Obrázek 23 Schéma metody DED [30].....	34
Obrázek 24 Schéma procesu DMLS [31]	35
Obrázek 25 Jednotlivé kroky procesu ADAM [33]	36
Obrázek 26 Schéma principu materiálové extruze [34].....	37
Obrázek 27 Srovnání aditivně vyrobené součásti před a po dokončování [38].....	41
Obrázek 28 Sada brusných nástrojů [39]	42
Obrázek 29 Sada leštících kotoučů a vosků [41]	43
Obrázek 30 Schéma zařízení pro AFM [45]	44
Obrázek 31 AFM medium MV50 [46]	44
Obrázek 32 Schéma elektrochemického leštění [47]	45
Obrázek 33 Princip měření metodou Rockwell [50]	47
Obrázek 34 Schéma zkoušky dle Brinella [50].....	48

Obrázek 35 Detail na vnikací těleso Vickersovy metody [53]	49
Obrázek 36 Zařízení Micro-Combi Tester [54]	53
Obrázek 37 ocel 1.2709 a) bez tepelného zpracování b) po precipitačním vytvrzování	54
Obrázek 38 ocel 1.2344 c) bez tepelného zpracování d) po žíhání	55
Obrázek 39 Grafické srovnání vtiskové tvrdosti	57
Obrázek 40 Grafické srovnání Vickersovy tvrdosti	58
Obrázek 41 Grafické srovnání modulu pružnosti	59
Obrázek 42 Grafické srovnání hloubky vtisku	60
Obrázek 43 Grafické srovnání deformační práce a koef. vratné deformace	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti oceli Maraging 300 [23]	30
Tabulka 2 Vliv homogenizačního žíhání na austenitickou ocel AISI 316L [24].....	31
Tabulka 3 Porovnání metod DMLS a ADAM	39
Tabulka 4 Tabulka srovnání konvenčních a aditivních výrobních technologií [26].....	40
Tabulka 5 Stupnice Rockwellovy zkoušky [50]	47
Tabulka 6 Příklady stupnice Brinellovy zkoušky [52].....	48
Tabulka 7 Rozdělení Vickersovy metody [53]	50
Tabulka 8 Průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti a směrodatné odchylky měření.....	56
Tabulka 9 Průměrné hodnoty Vickersovy tvrdosti a směrodatné odchylky měření.....	58
Tabulka 10 Průměrné hodnoty modulu pružnosti a směrodatné odchylky měření.....	59
Tabulka 11 Průměrné hodnoty hloubky vtisku a směrodatné odchylky měření.....	60
Tabulka 12 Průměrné hodnoty deformační práce a směrodatné odchylky měření.....	61

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Fe	železo
C	uhlík
Fe ₃ C	cementit (karbid železa)
H13	nástrojová ocel (číslo materiálu 1.2344)
AISI 316L	druh nerezové oceli (1.4401)
Maraging 300	maragingová ocel (1.6358)
SLM	Selective Laser Melting (selektivní laserové tavení)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (přímé kovové laserové spékání)
ADAM	Diffusion Additive Manufacturing
HIP	Hot Isostatic Pressing (horké izostatické lisování)
ASTM F42	norma ASTM pro aditivní výrobu
PBF	Powder Bed Fusion (tavení v práškovém loži)
BJ	Binder Jetting (pojivový tisk)
DED	Directed Energy Deposition (cílená depozice energie)
EBM	Electron Beam Melting (tavení elektronovým paprskem)
AFM	Abrasive Flow Machining (abrazivní honování)
H _{IT}	vtisková tvrdost (Instrumented Hardness Test)
H _V	Vickersova tvrdost (Hardness Vickers)
H _{VIT}	Vickersova tvrdost stanovená instrumentovanou metodou
E _{IT}	vtiskový modul pružnosti (Indentation Elastic Modulus)
h _m	maximální hloubka vtisku
W _{el}	elastická (vratná) složka deformační práce
W _{pl}	plastická složka deformační práce
W _{celk}	celková deformační práce
η _{IT}	koeficient vratné deformace

DSI	Depth Sensing Indentation (instrumentovaná zkouška tvrdosti)
GPa	gigapascal (jednotka modulu pružnosti)
MPa	megapascal (jednotka tvrdosti)
nJ	nanojoule (jednotka práce)

