

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0719270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

3D tištěné nástrojové oceli pro výrobu forem pro tlakové lití zinku

Autor: Matouš HORA
Vedoucí práce: prof. Ing. Ludmila KUČEROVÁ Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Matouš HORA**
Osobní číslo: **S20B0133P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**
Téma práce: **3D tištěné nástrojové oceli pro výrobu forem pro tlakové lití zinku**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rešerše současného stavu
 - 2.1. Nástrojové oceli pro lící formy
 - 2.2. Aditivní výroba nástrojových ocelí pro lící formy
 - 2.3. Tepelné zpracování konvenčních a tištěných nástrojových ocelí
3. Experimentální program
 - 3.1. Popis použitého materiálu a vybavení
 - 3.2. Tepelné zpracování
 - 3.3. Mikrostrukturní analýzy
 - 3.4. Mechanické vlastnosti
4. Shrnutí a diskuse výsledků
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

HENTSCHEL, O., et al. Processing of AISI H11 Tool Steel Powder Modified with Carbon Black Nanoparticles for the Additive Manufacturing of Forging Tools with Tailored Mechanical Properties by Means of Laser Metal Deposition (LMD). *Metals*. 2018, 8 (9), 2018, <https://doi.org/10.3390/met8090659>.

CASATI, R., et al. Microstructure and mechanical behavior of hot-work tool steels processed by Selective Laser Melting. *Materials Characterization*. 2018, 137, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.015>.

HUBER, F., et al, Laser beam melting and heat-treatment of 1.2343 (AISI H11) tool steel – microstructure and mechanical properties. *Material Science and Engineering A*. 2019, , 742,2019, pp. 109-115. [10.1016/j.msea.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.001).

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Bystrianský, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval, za možnost podílet se na zajímavém projektu Trend FW03010323: Výzkum a vývoj tvarových forem z vytvrditelných ocelí pro lití zinkových slitin při aplikaci moderních technologií aditivní výroby, tepelného zpracování, povrchových úprav a numerických simulací.

Děkuji prof. Ing. Ludmile Kučerové, Ph.D. a Ing. Martinu Bystrianskému, Ph.D. za pečlivé vedení. Panu PhDr. Ladislavu Třískovi děkuji, za pomoc při přípravě vzorků, provedení tepelného zpracování a měření tvrdosti zkušebních vzorků. Děkuji i ostatním členům Regionálního technologického institutu v Plzni, za skvělou spolupráci a pomoc při tvorbě této práce. Zvláštní poděkování patří i mým blízkým, za obrovskou podporu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|-------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Hora | Jméno Matouš | |
| STUDIJNÍ PROGRAM | B0719270013 Strojní inženýrství | | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Kučerová Ph.D. | Jméno Ludmila | |
| PRACOVÍŠTĚ | ZČU - FST – KMM | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | 3D tištěné nástrojové oceli pro výrobu forem pro tlakové lití zinku | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KMM | ROK ODEVZD. | 2023 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 74 | TEXTOVÁ ČÁST | 40 | GRAFICKÁ ČÁST | 34 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|--|---|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Výzkum zaměřený na nalezení optimálních podmínek tepelného zpracování komponent, zhotovených 3D tiskem oceli H11. Cílem tepelného zpracování je přiblížení se mechanickým vlastnostem materiálů konvenčně vyráběných forem. Účelem díla je zdokonalení výrobních procesů licích forem a možností oprav opotřebovaných licích forem. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | tepelné zpracování, martenzit, 3D tisk, tvrdost, pevnost, mikrostruktura |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | |
|--------------------------|---|---|
| AUTHOR | Surname Hora | Name Matouš |
| STUDY PROGRAMME | B0719270013 Mechanical Engineering | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Kučerová Ph.D. | Name Ludmila |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KMM | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | 3D printed tool steels for the production of zinc die-casting molds | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KMM | SUBMITTED IN | 2023 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 74 | TEXT PART | 40 | GRAPHICAL PART | 34 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|--|--|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS, AND CONTRIBUTIONS | Research aimed at finding optimal conditions for heat treatment of components made by 3D printing of H11 steel. Heat treatment aims to approach the mechanical properties of conventionally manufactured mold materials. The work aims to improve the production processes of casting molds and the possibility of repairing worn casting molds. |
| KEYWORDS | heat treatment, martensite, 3D printing, hardness, strength, microstructure |

Obsah

| | |
|---|----|
| Zadání BP | 2 |
| Přehled použitých zkratk a symbolů..... | 9 |
| Seznam obrázků | 10 |
| Seznam tabulek | 11 |
| 1 Úvod..... | 12 |
| 2 Rešerše současného stavu..... | 13 |
| 2.1 Nástrojové oceli pro lící formy | 13 |
| 2.1.1 Materiály forem používané v současné době | 13 |
| 2.1.2 Kritéria pro kvalitní formu | 13 |
| 2.1.3 Opotřebenění formy | 13 |
| 2.1.4 Chemické složení zkoumaného materiálu..... | 15 |
| 2.1.5 Odlévaný materiál Zn..... | 15 |
| 2.1.6 Konvenčně zpracovaný materiál | 16 |
| 2.2 Aditivní výroba nástrojových ocelí pro lící formy | 21 |
| 2.2.1 Aditivní výroba | 21 |
| 2.2.2 Efektivita AM..... | 23 |
| 2.2.3 Hmotnost AM dílů | 23 |
| 2.2.4 Vady AM..... | 23 |
| 2.3 Tepelné zpracování konvenčních a tištěných nástrojových ocelí | 24 |
| 2.3.1 Základní poznatky o TZ ocelí | 24 |
| 2.3.2 Doporučované parametry konvenčního TZ..... | 25 |
| 2.3.3 Materiál po zpracování AM | 28 |
| 2.3.4 Porovnání procesů | 32 |
| 3 Experimentální program..... | 33 |
| 3.1 Popis použitého materiálu a vybavení..... | 33 |
| 3.2 Tepelné zpracování | 34 |
| 3.2.1 Volba TZ | 34 |
| 3.2.2 Návrh experimentu..... | 35 |
| 3.3 Mikrostrukturní analýzy | 37 |
| 3.3.1 Mikroskopie – po TZ..... | 37 |
| 3.4 Mechanické vlastnosti | 40 |
| 3.4.1 Zkouška tvrdosti – po TZ..... | 42 |
| 3.4.2 Tahová zkouška – po TZ..... | 44 |
| 4 Diskuse výsledků..... | 48 |
| 5 Závěr..... | 50 |
| 6 Reference..... | 51 |

Přehled použitých zkratk a symbolů

| | |
|----------------|--|
| AM | 3D tisk (Additive manufacturing) |
| DED | Řízená depozice energie (Directed energy deposition) |
| LBM | Tavení laserovým paprskem (Laser beam melting) |
| L-PBF | Laserová prášková fúze (Laser powder bed fusion) |
| M _f | Martenzit finish |
| M _s | Martenzit start |
| SLM | Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting) |
| TZ | Tepelné zpracování |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Abrasivní opotřebení | 14 |
| Obr. 2: Nalepování | 14 |
| Obr. 3: Oxidace a chemická interakce | 14 |
| Obr. 4: Tvorba trhlin od tepelné únavy | 14 |
| Obr. 5: Diagram konvenčního TZ H11 | 17 |
| Obr. 6: Martenzitická struktura | 17 |
| Obr. 7: Diagram kalení H11 | 18 |
| Obr. 8: Diagram teploty popouštění vůči tvrdosti H11 | 18 |
| Obr. 9: Diagram teploty popouštění vůči tvrdosti H11 | 19 |
| Obr. 10: Diagram teploty temperování vůči pevnosti v tahu H11 | 20 |
| Obr. 11: Optimalizovaná součást zhotovená metodou AM | 21 |
| Obr. 12: Odlehčení metodou AM..... | 23 |
| Obr. 13: Základní TZ | 24 |
| Obr. 14: Příklad IRA diagramu | 25 |
| Obr. 15: Proces vakuového žíhání oceli H13 | 26 |
| Obr. 16: Proces ohřevu H13 ve vakuové peci před kalením..... | 26 |
| Obr. 17: Křivka ochlazování oceli H13 při kalení | 27 |
| Obr. 18: Doporučované hodnoty teploty žíhání | 27 |
| Obr. 19: Doporučované hodnoty teploty kalení | 28 |
| Obr. 20: Doporučované hodnoty teploty popouštění | 28 |
| Obr. 21: Charakteristické mikrostruktury | 29 |
| Obr. 22: Diagram závislosti tvrdosti na teplotě temperování H11 a L-H11 | 30 |
| Obr. 23: Vliv popouštěcí teploty na tvrdost a lomovou houževnatost H11 | 30 |
| Obr. 24: Tahová zkouška materiálu H13 | 31 |
| Obr. 25: Série 9 – 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod | 33 |
| Obr. 26: H11-2-200x-3..... | 37 |
| Obr. 27: H11-8-200x-2..... | 37 |
| Obr. 28: H11-2-1000x-3 | 38 |
| Obr. 29: H11-8-1000x-3 | 38 |
| Obr. 30: 2-5000x-1 | 38 |
| Obr. 31: 8-5000x-1 | 38 |
| Obr. 32: 7-5000x-4..... | 39 |
| Obr. 33: H11-4-1000x-1 | 39 |
| Obr. 34: H11-3-1000x-2..... | 39 |
| Obr. 35: H11-5-1000x-3 | 39 |
| Obr. 36: H11-9-200x-2..... | 40 |
| Obr. 37: H11-3-50x-1..... | 40 |
| Obr. 38: Rázová houževnatost po TZ..... | 41 |
| Obr. 39: 450°C 4 / hod..... | 41 |
| Obr. 40: 620°C 4 / hod | 41 |
| Obr. 41: Naměřená data HV10..... | 42 |
| Obr. 42: Očekávaná a skutečná HV10..... | 43 |
| Obr. 43: Naměřená data $R_{p0,2}$, R_m [MPa]..... | 44 |
| Obr. 44: Naměřená data A [%]..... | 45 |
| Obr. 45: Zkušební tělesa 500°C / 4 hod | 45 |
| Obr. 46: Lom zkušební tělesa 500°C / 4 hod..... | 45 |
| Obr. 47: Zkušební tělesa 620°C / 4 hod | 46 |
| Obr. 48: Lom zkušební tělesa 620°C / 4 hod | 46 |
| Obr. 49: Porovnání průměrných hodnot $R_{p0,2}$, R_m a A vybraných vzorků | 47 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Složení H11 v porovnání s H13 | 15 |
| Tab. 2: Odlévaný materiál – zinek | 16 |
| Tab. 3: Porovnání důsledků procesů | 32 |
| Tab. 4: Zkušební tělesa pro příslušné TZ | 33 |
| Tab. 5: Návrh TZ | 36 |

1 Úvod

Cílem práce je podílet se na inovaci ve výrobě forem pro tlakové lití zinku. Formy vyráběné konvenčními metodami jsou běžně používané, avšak metody 3D tisku mohou být cestou, jak vyrábět tvarově komplexnější, složitější a nestandardní tvary dutin forem. Technologie 3D tisku dále představuje zajímavou možnost pro provádění oprav již vyrobených licích forem.

V případě uvažované technologie 3D tisku dochází k tvorbě komponent nanášením materiálu ve vrstvách. Soudržnost je zajištěna účinkem působení laseru. 3D tisk je vhodný pro tvorbu složitých tvarů. Nevýhodou je, že teplo, vnesené do materiálu zhotovovaného tělesa prostřednictvím laseru, způsobuje vnitřní pnutí, které je nutné odstranit či minimalizovat. Za tímto účelem bude proveden návrh tepelného zpracování (dále značeno TZ) 3D vytištěného zkušebního materiálu. Navržené TZ bude následně na zkušebním materiálu provedeno a experimentálně tak bude zjištěno, jaký skutečný vliv bude mít navržené TZ na zkoumaný materiál.

Licí formy, které se v současné době používají jsou již řadu let inovovány a jsou ověřené. Proto bude jedním z cílů práce zjištění parametrů mechanických vlastností a struktury materiálů konvenčně vyráběných forem. Dalším cílem bude zjistit, jaké děje ovlivňují trvanlivost formy a jaké mechanické parametry umožňují zvýšení trvanlivosti zhotovené formy. Také bude prozkoumán proces, kterým se licí formy konvenčně tepelně zpracovávají. Tyto informace budou použity jako orientační podklady pro návrh TZ zkoumaného materiálu.

Předmětem návrhu TZ je materiál H11, chrommolybdenová ocel. Předpokládaný odlévaný materiál pro formy vyrobené z oceli H11 je zinek. Pro určení mechanických vlastností těles zhotovených metodou 3D tisku bude provedena analýza již provedených studií tohoto materiálu. Získané informace budou sloužit jako předpokládané výchozí hodnoty mechanických vlastností před tepelným zpracováním.

Hlavním cílem práce je navrhnout takového TZ, které povede k nejbližšímu možnému přiblížení mechanických vlastností a struktury zkoumaného materiálu k parametrům konvenčně vyráběných forem, nebo k jejich překonání.

K ověření účinku TZ budou použity tahové zkoušky a zkoušky tvrdosti. Dále bude provedena metalografická analýza za účelem zjištění výsledné mikrostruktury zkoumaného materiálu. Návrh TZ bude považován za úspěšný, pokud dojde k přiblížení původních hodnot k hodnotám konvenčně připravovaných materiálů.

2 Rešerše současného stavu

K návrhu odpovídajícího řešení je zásadní porozumět zkoumanému tématu. Z toho důvodu se nyní zaměříme na zkoumaný materiál, konvenční i aditivní metody tvorby licích forem a dalších podstatných aspektů, které mohou ovlivnit řešení této problematiky.

2.1 Nástrojové oceli pro licí formy

Jedním z nejdůležitějších parametrů, které je nutné zohlednit, je použitý materiál. Každý se chová jinak a každý má jiné vlastnosti. Věnujme se nyní materiálům konvenčně využívaným při zpracovávání licích forem a důvodům, proč jsou používány.

2.1.1 Materiály forem používané v současné době

V současné době se provádí tlakové odlévání zinku do forem připravovaných konvenčními metodami, jako je kování či lisování. Obvykle se ke konstrukci forem využívají martenzitické oceli s vysokou mikročistotou. Někdy se ze specializovaného materiálu dělají pouze tvarové vložky a zbytek formy je tvořen levnější ocelí, což umožňuje úsporu značného množství finančních prostředků. U konvenčně vyráběných forem je hodnota tvrdosti obvykle 42 až 52 HRC [1, 2].

2.1.2 Kritéria pro kvalitní formu

Forma pro tlakové lití je nástroj určený k transformaci tvaru roztaveného materiálu do tvaru požadovaného. Plocha dutiny formy je vystavována tepelnému působení materiálu, jehož licí teplota často přesahuje hodnotu 200°C. Následně dochází k ochlazení roztaveného materiálu v dutině formy.

Vnášené teplo je nutné z formy odvádět, aby nedošlo k její destrukci. Za tímto účelem musí mít materiál pro výrobu forem nejen vhodné mechanické vlastnosti, ale také velmi dobré vlastnosti termofyzikální, jako vedení tepla, rozměrovou stálost a nízkou teplotní roztažnost. Optimální mechanické vlastnosti zpravidla zajišťuje následné TZ.

Děj odlévání výrobků vede k namáhání formy tepelnými šoky a působení tlaku na plochu dutiny formy. Změny teplot uvnitř forem jsou natolik významné, že mohou přímo ovlivnit trvanlivost licí formy. Proto se u licích forem zohledňuje tepelná únava. Odolnost proti tepelné únavě je vyšší u materiálů s vyšší tvrdostí než u materiálů o tvrdosti nižší. Je nutné zajistit, aby tvrdost formy byla dostatečná, aby doba, kdy materiál odolává účinkům tepelné únavy, byla maximální.

Tvrdost formy je také významná pro dlouhodobé udržení tvarové a geometrické přesnosti formy, a tím i dosažení dlouhodobé přesnosti výroby. Dalším významným požadavkem je nízká cena. Ta zahrnuje například cenu samotného materiálu, ale také náklady na zpracování, které mohou být značné. Cílem je náklady minimalizovat [1, 3].

2.1.3 Opotřebení formy

V průběhu procesu odlévání dochází ke kontaktu roztaveného materiálu se stěnami dutiny formy. Následuje popis nejčastějších nežádoucích účinků tohoto působení.

Abrazivní opotřebení

K tomuto opotřebení dochází důsledkem otírání materiálu o povrch formy, jde o proces obušování materiálu. Důsledkem je znehodnocování geometrických a rozměrových charakteristik formy, což jsou zásadní parametry formy pro tvorbu kvalitních výrobků. Se zvyšujícím se opotřebením, viz obr. 1 dochází k tvorbě méně a méně přesných výrobků [4].



Obr. 1: Abrazivní opotřebení [4]

Nalepování

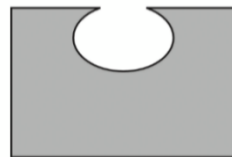
Některé materiály mohou mít tendenci k ulpívání a následnému přilnutí k povrchu dutiny formy, viz obr. 2. Takto přilnutý materiál je nutné odstranit, aby nezpůsobil vměstek u budoucího výrobku. Dalším problémem je, že v případě odstraňování nalepeného materiálu může dojít k vytržení části materiálu formy a tím k jejímu znehodnocení [4].



Obr. 2: Nalepování [4]

Chemická interakce

Některé materiály jsou náchylné ke korozi, viz obr. 3. Tento jev je možné eliminovat provedením lití ve vakuu. Problémem může být také chemická reakce materiálu formy s odlévaným materiálem, může dojít například k oduhličení [4].



Obr. 3: Oxidace a chemická interakce [4]

Tvorba trhlin

Povrch dutiny formy je velmi namáhán cyklickým působením vysokých teplot. Tyto výkyvy mohou vést k tvorbě mikrotrhlin od takzvané tepelné únavy, viz obr. 4. Někdy se formy navrhují právě na základě požadované doby trvanlivosti na tepelnou únavu [4].



Obr. 4: Tvorba trhlin od tepelné únavy [4]

2.1.4 Chemické složení zkoumaného materiálu

Jako u všech materiálů, i u zkoumaného materiálu H11, jsou mechanické vlastnosti primárně určeny jeho chemickým složením. Chemické složení oceli H11, neboli 1.2343, spolu se složením H13 je uvedeno v následující tabulce, viz tab. 1.

Tab. 1: Složení H11 v porovnání s H13 [5, 6]

| Materiál | C [%] | Cr [%] | Mo [%] | V [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| AISI H11 | 0,33-0,41 | 4,80-5,50 | 1,10-1,50 | 0,30-0,50 | 0,80-1,20 | 0,25-0,50 | max 0,03 | max 0,02 |
| AISI H13 | 0,3–0,45 | 4,7–5,5 | 1,3–1,7 | 0,8–1,2 | 0,8–1,2 | 0,2–0,5 | max 0,03 | max 0,03 |

Z průzkumu vyplynulo, že materiál H11 má složení velmi podobné jako materiál H13. Materiál H13 obsahuje větší množství vanadu než H11, více než dvojnásobné. Množství ostatních prvků v těchto materiálech je téměř identické, z toho důvodu se tyto materiály chovají velmi podobně. Jelikož se tyto materiály téměř neliší, je možné při návrhu TZ vycházet z dostupných informací o H11 i H13. O materiálu H13 je však známo značně víc informací než o materiálu H11. Při navrhování TZ budou tedy využita i data získaná z výzkumů materiálu H13.

Mimo jiné, v oceli H11 je vysoký podíl karbidotvorných prvků. V materiálu je vysoký podíl chromu, molybdenu a vanadu. Tyto prvky mají velký význam, protože jejich přítomnost vede k dosažení vyšší tvrdosti a prokalitelnosti zkoumaného materiálu. Tyto prvky navíc zvyšují austenitizační teplotu, protože karbidy jsou stabilní i za vysokých teplot. To také způsobuje vyšší odolnost materiálu vůči popouštění.

Velkou výhodou chromu a molybdenu je, že podporují zvýšení prokalitelnosti a hodnotu pevnosti. Molybden je schopen tvořit stabilnější karbidy než chrom. Mo má větší vliv na odolnost proti popouštění než Cr. Částečně proto, že oddaluje nástup popouštěcí křehkosti, a v nitridovaných ocelích také proto, že tvoří stabilní nitridy.

Mangan, podobně jako prvky křemík, fosfor a síra, je normálně přítomný v oceli ve stopovém množství. Pokud je Mn přidán záměrně, zvyšuje prokalitelnost a pevnost v tahu. Ocel je poté však mnohem citlivější na přehřátí a popouštěcí křehkost [1, 7, 8].

2.1.5 Odlévaný materiál Zn

Jelikož různé odlévané materiály mají různé vlastnosti, předpokládejme, že účinky roztaveného materiálu na stěnu formy se mohou odlišovat v závislosti na konkrétním odlévaném materiálu. Za tímto účelem byla provedena analýza vlastností plánovaného odlévaného materiálu, zinku, viz tab. 2.

Tab. 2: Odlévaný materiál – zinek [9, 10, 11]

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Zinek | |
| Chemická značka | Zn |
| Protonové číslo | 30 |
| Teplota tání | 419,58°C |
| Teplota varu | 907°C |
| Hustota | 7,14 g cm ³ |
| Modul pružnosti ve smyku | 43 GPa |
| Modul pružnosti v tahu | 108 GPa |

Pro konstrukci formy je zásadní hodnota teploty vtačovaného odlévaného materiálu. Uvažujme, že teplota roztaveného kovu, který bude vtačován do dutiny formy, bude blízká hodnotě teploty tání zinku.

2.1.6 Konvenčně zpracovaný materiál

Cílem práce je přiblížení se k hodnotám mechanických vlastností konvenčně vyráběných forem, nebo dosáhnout lepších, v této části budou uvedeny dosahované vlastnosti konvenčně vyráběných forem, respektive materiálu, z něž se vyrábí.

Legované oceli pro práci za tepla

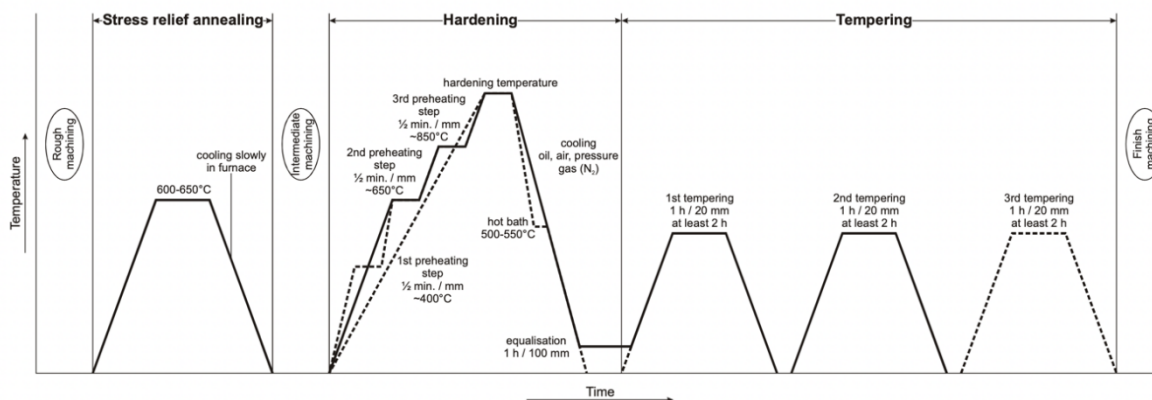
Legované oceli pro práci za tepla vyžadují vysokou odolnost proti deformaci, odolnost proti tepelné únavě, odolnost proti erozi za pracovních teplot a ořezuvzdornost. Obsah uhlíku je 0,3 % až 0,6 %. Legované oceli jsou legovány molybdenem až do 3,00 %, vanadem až do 1,10 % a chromem až do 5,50 %. Pro použití za účelem výroby licích forem se používají materiály o obsahu 5 % Cr, 1,4 % Mo a 1 % Si. Dále jsou používány na výrobu forem pro tlakové lití mosazi, lehkých kovů a pro nástroje na protlačování lehkých kovů a mědi [1, 12, 13].

Fyzikální a technologické vlastnosti

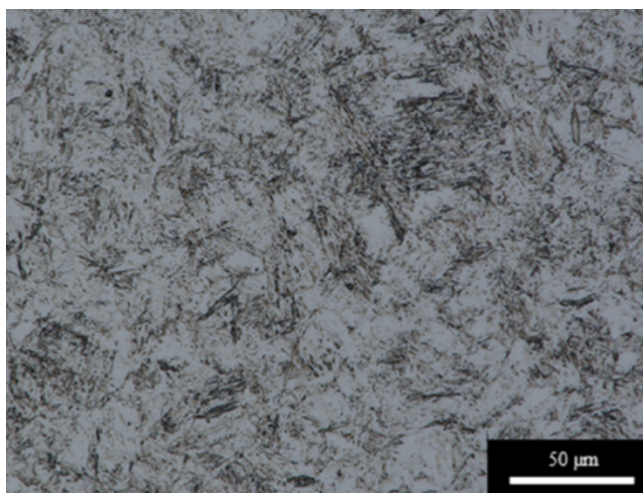
Fyzikální a technologické vlastnosti mají pravděpodobně největší význam na potenciální použitelnost zhotovené formy. Tyto vlastnosti totiž rozhodují o schopnosti materiálu čelit podmínkám, jímž bude forma vystavena. V případě tlakových licích forem lze očekávat namáhání vysokými tlaky, materiálem o vysoké teplotě. V následujících kapitolách budou uvedeny fyzikální a technologické vlastnosti pro zkoumaný konvenčně zpracovaný materiál.

- Struktura

Mikrostruktura nástrojových ocelí se skládá ze strukturních složek, stav mikrostruktury je závislý na konkrétním případě TZ. Obvyklé TZ je znázorněno na obr. 5 – bude dále prozkoumáno. Typicky je mikrostruktura tvořena martenzitem, který je znázorněn na obr. 6, zbytkovým austenitem a karbidy [14].



Obr. 5: Diagram konvenčního TZ H11 [15]



Obr. 6: Martenzitická struktura [16]

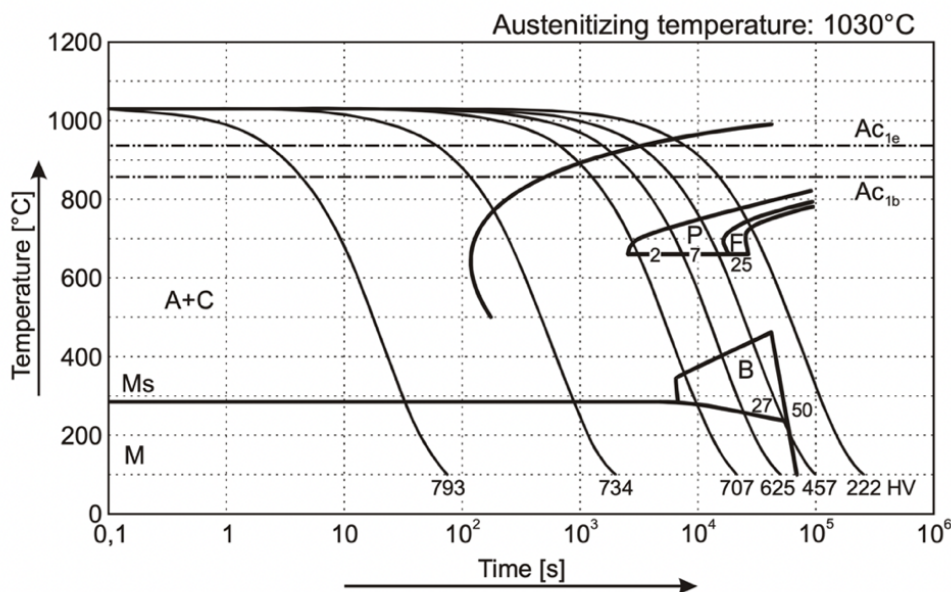
Martenzit je charakteristická struktura kalených materiálů, vzniká v případě dostatečně rychlého ochlazení materiálu z austenitizační teploty pod teplotou M_s . Pod teplotou M_f již další martenzit nevzniká. Martenzitická struktura je skvělá pro aplikace, kde je nutná vysoká tvrdost materiálu. Nevýhodou této struktury je, že materiál o této struktuře je zpravidla křehký a může mít tendenci k praskání. Ke snížení křehkosti lze použít proces popouštění [16].

- Tvrdost

Tvrdost zadaného materiálu se dle materiálového listu, v případě vzorku kaleném z kalící teploty $1\ 025 \pm 25^\circ\text{C}$ do oleje s následným popouštěním za teplot 550 až 650°C , pohybuje v rozmezí 45 ± 5 HRC.

Tvrdost lze měřit v různých okamžicích tepelného zpracování. První možnost, kdy dává smysl měřit tvrdost, je v okamžiku po kalení. Tou dobou je materiál velmi tvrdý, v závislosti na parametrech ochlazování. Představu o vývoji tvrdosti v materiálu si je možné udělat na základě následujícího grafu, viz obr. 7, který znázorňuje hodnotu dosažené tvrdosti

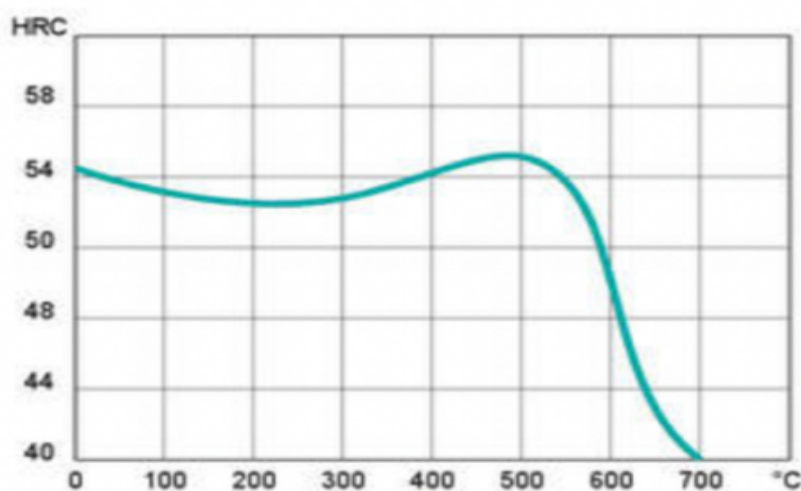
v závislosti na rychlosti ochlazování materiálu. K získání martenzické struktury, a tím vysoké tvrdosti, je nutné ochlazování realizovat co možná nejrychleji [6, 17].



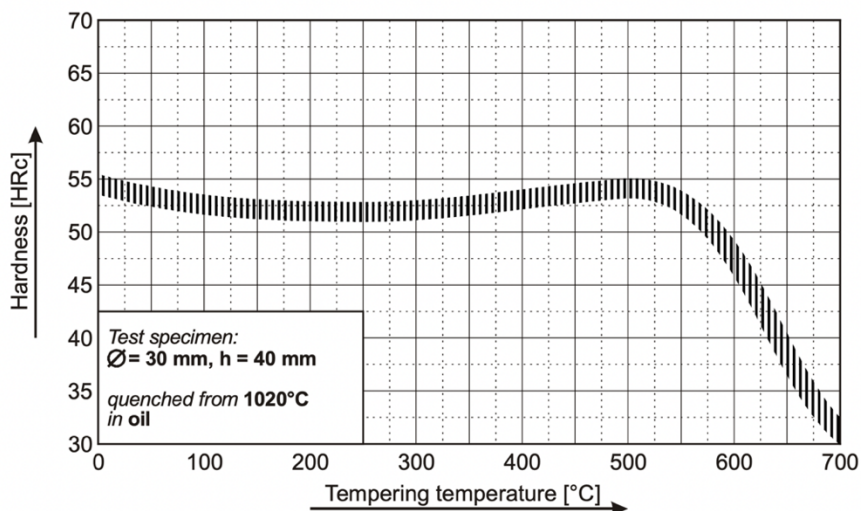
Obr. 7: Diagram kalení H11 [15]

V případě obr. 7 bylo kalení provedeno z teploty 1 030°C, a to různou rychlostí. Z grafu je jasné, že rychlejší ochlazení má za následek větší dosaženou tvrdost materiálu, protože hodnota dosažené tvrdosti klesá s narůstající hodnotou času ochlazování. Je dobré si uvědomit, že hodnoty na časové ose grafu jsou uvedeny v logaritmickém měřítku. Graf je rozdělen na několik oblastí, mezi nimiž je oblast bainitu a perlitu. V tomto případě je zásadní hodnota martenzit start (dále M_s), kdy již dochází k tvorbě požadované martenzické struktury. V tomto případě se tato hodnota blíží 280°C.

Další okamžik, kdy je vhodné určit tvrdost, je po následném TZ, popouštění na obr. 8 a obr. 9, zde můžeme předpokládat pokles tvrdosti na hodnotu odpovídající materiálovému listu. Níže uvedené grafy udávají orientační vztah dosažené tvrdosti v závislosti na teplotě popouštění [6, 15, 17].



Obr. 8: Diagram teploty popouštění vůči tvrdosti H11 [18]



Obr. 9: Diagram teploty popouštění vůči tvrdosti H11 [15]

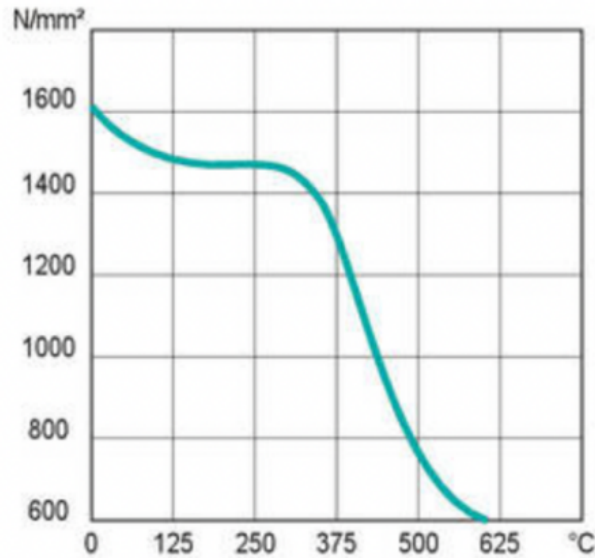
Ze schémat není jasné, po jakou dobu bylo popouštění prováděno. Předpokládejme, že doba popouštění odpovídá doporučené hodnotě, uvedené v materiálovém listu. V tom případě by tedy šlo o vztah tvrdosti vůči teplotě po dvou po sobě jdoucích popouštěních po dobu jedné hodiny. Sice jde pouze o orientační hodnoty, ale lze zde najít zajímavé závislosti. První je, že s narůstající teplotou se hodnota tvrdosti lehce snižuje a následně pomalu roste zhruba na původní hodnotu. Druhý poznatek je, že lze očekávat znatelné snížení tvrdosti v případě překročení určité teploty popouštění, která odpovídá zhruba 500°C. Tuto závislost bude důležité zohlednit při návrhu TZ, budeme-li předpokládat, že se materiál připravený metodou AM chová při TZ podobně jako materiál připravovaný konvenční cestou [6, 15, 17, 18].

- Mez pevnosti a kluzu

Mez pevnosti udává zatížení, při kterém dojde k destrukci materiálu vlivem natahování. V případě zadaného materiálu H11 je za normálních podmínek, dle materiálového listu, mez pevnosti R_m od 1 220 do 1 880 MPa, v rozmezí od 1 520 do 800 MPa při teplotě 200 až 600°C.

V případě zadaného materiálu je, dle materiálového listu, $R_{p0,2}$ rovno 1 050 až 1 650 MPa, za podmínek zvýšených teplot (200 až 600°C) se hodnoty pohybují v rozmezí 1 350 a 660 MPa. Při určování meze pevnosti či kluzu se dá určit i tažnost a kontrakce materiálu. Zadaný materiál má za normálních podmínek tažnost A_5 rovno 12 až 15 % a kontrakci Z rovno 53 až 59 %, při tvrdosti 40 až 53 HRC. V případě zvýšených teplot se tyto hodnoty mění na A_5 od 12 do 18 % a kontrakci Z od 55 do 78 %.

Následující diagram na obr. 10 udává vztah mezi teplotou, při které bylo provedeno TZ, a očekávatelnými hodnotami pevnosti v tahu po TZ [6, 17].



Obr. 10: Diagram teploty temperování vůči pevnosti v tahu H11 [18]

Tento graf, na obr. 10 napovídá, že při zvyšující se teplotě TZ klesá materiálu dosažená hodnota pevnosti v tahu.

- Hustota materiálu

Hustota materiálu H11 je, dle materiálového listu, $7\,790\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [17].

- Teplotní roztažnost

Součinitel teplotní roztažnosti, dle materiálového listu, pro zkoumaný materiál zpracovaný konvenčními metodami je $\alpha = 12,4 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ [17].

- Obrobitelnost

Obrobitelnost se určuje standardně dle tříd, které slouží k porovnání obrobitelnosti různých materiálů, také se liší z hlediska různých druhů obrábění. V tomto případě má materiál, dle materiálového listu, obrobitelnost při soustružení a hoblování 11b, při frézování a vrtání 11b, při broušení 7b [17].

- Prokalitelnost

Jde o chrom-molybdenovou vanadovou ocel, kalitelnou v oleji i na vzduchu s velmi dobrou prokalitelností [19, 20].

- Tepelná vodivost

Hodnota tepelné vodivosti je pro materiál H11, dle materiálového listu, $\lambda_t = 29\text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ [17].

- Odolnost proti korozi

Některé materiály se vyznačují odolností vůči působení atmosférických vlivů, takzvanou korozivzdorností. Zadaný materiál H11 má však odolnost proti korozi nízkou [17].

2.2 Aditivní výroba nástrojových ocelí pro lící formy

Další možností výroby forem je 3D tisk, neboli aditivní výroba (dále AM). V následující kapitole bude prozkoumána tato výrobní technologie.

2.2.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je jedním z nejmladších způsobů zhotovování součástí. Tento proces tvorby součásti je značně odlišný od konvenčních postupů. Konvenční metody, jako je obrábění, fungují na principu odebírání materiálu z polotovaru do okamžiku, kdy zbude hotový díl. AM metoda spočívá v nanášení vrstev materiálu a následném spojování těchto vrstev účinkem tepla. AM je tedy proces, který má oproti konvenčním metodám téměř nulový odpad.

Aby bylo možné využít AM zhotovování součástí, je nutné zpracovat 3D CAD model požadované součásti, který je následně použit jako podklad pro program AM tiskárny. Oproti konvenčním metodám zde ale není nutné rozsáhlé plánování výrobního procesu, které může představovat například výstavbu výrobních linek. K výrobě součásti metodou AM je nutné pouze specializovaná tiskárna přiměřené velikosti a kvalifikovaná obsluha.

Zásadní výhodou 3D tisku je flexibilita v prototypové výrobě, kdy je možné velmi jednoduše vyrobit součásti, které se standardně nevyrábí. Z toho důvodu by AM mohlo sloužit například jako vhodný prostředek k opravám částí poškozených lících forem. Tuto možnost dále podporuje i schopnost tvorby velmi složitých tvarů.

Dále je toto podpořeno faktem, že s rozvojem počítačových technologií je již možné provádět rozsáhlé simulace pro optimalizaci nejrůznějších komponent, viz obr. 11. Jak se ukazuje, výroba některých komponent by jinou, než AM metodou byla velmi obtížná, ne-li nemožná [21, 22, 23].



Obr. 11: Optimalizovaná součást zhotovená metodou AM [23]

Proces AM se skládá z řady kroků, tyto kroky budou dále popsány v následující části. Cílem je přiblížit metodiku a proces aditivní výroby [21].

Příprava kovového prášku

Typickým znakem AM je používaný materiál, nejde totiž o standartní polotovary, jako například při soustružení či frézování. Při výrobě metodou AM se k výrobě používají speciální prášky, které jsou pomocí laseru taveny a jejich chladnutím dochází ke vzniku vrstev materiálu, které tvoří stěny komponent. Velikost zrn prášku se obvykle pohybuje v rozmezí 15-45 μm a 45-150 μm [21, 22, 23].

Volba parametrů procesu

Tato část může zahrnovat například volbu použitého stroje, kde bude proces proveden. Parametry je nutné volit s ohledem na druh použitého materiálu, rozměry a tvary vyráběných komponent. Je nutné zařídit vhodnou trajektorii laserové hlavy a intenzitu laserového paprsku k minimalizaci vneseného tepla a jeho vhodnému rozložení.

Návrh a simulace

V tomto stádiu dochází k finálnímu plánování výrobního procesu a předchází skutečnému zpracování materiálu. Zahrnuje tvorbu komponenty v CAD programu, na které se zkoumá, jaká trajektorie laseru bude použita a jak bude proces náročný.

Aditivní výroba

Samotný proces výroby, kdy dochází k natavování prášku energií z laseru a tvorbě vrstev modelu. Proces umožňuje tvorbu velmi rozmanitých prvků, ale v současné době není vhodný pro konstrukci rozměrných a hmotných součástí. Obvykle se používá pro tvorbu malých až středně velkých komponent o hmotnosti do několika kilogramů. Významný vliv zde má cena energie a materiálu, dále pak cena samotného zařízení.

Tepelné zpracování

Používá se k dosažení specifických mechanických vlastností vyrobených součástí. Také může mít vliv na snížení vnitřního pnutí v součásti a může zajistit rovnoměrnou strukturu v materiálu. Používá se například žíhání či temperování.

Obrábění

V případě, že výrobní přesnost AM nesplňuje požadavky na vyráběnou součást, je možné po procesu AM funkční plochy obrobít konvenčními metodami a tím dosáhnout požadované jakosti povrchu.

Povlakování

Z důvodu ochrany materiálu vůči korozi, či z důvodu zkvalitnění některé z mechanických vlastností, lze komponenty připravené AM dále upravovat nanesením vrstev speciálních materiálů na povrchy komponent. Lze tak učinit i z estetických důvodů, použitím různých barev a laků.

Kontrola, testování

Konečný proces před odesláním komponenty klientovi, jde o proces zjišťování vad a nedostatků vyráběných komponent. V případě nalezení vad, je možné součást buď opravit, anebo je nutné ji zlikvidovat či recyklovat.

2.2.2 Efektivita AM

AM výroba je pravděpodobně nejvhodnější pro provoz, kde je výroba značně nekonzistentní a je nutné často vyrábět různé výrobky o malých počtech kusů. AM je také vhodná k výrobě prototypů či vzorků k testování. V případě AM je však nutné zohlednit velikost výrobního prostoru tiskáren. V současné době jsou obvykle malé a lze na nich vytvářet výrobky maximálně o hmotnosti několika kilogramů. Na druhou stranu je možné metodou AM tvořit i více součástí najednou, za předpokladu, že se vejdu do pracovního prostoru stroje [21, 22, 23].

2.2.3 Hmotnost AM dílů

Aditivní výroba umožňuje optimalizaci součástí pro nejlepší výsledky z hlediska hmotnosti a pevnosti. Lze toho dosáhnout rozsáhlým žebrováním uvnitř stěn komponent a obecně tvorbou rozmanitých tvarů. Vhodná konstrukce takovýchto odlehčení může mít vliv na rozložení napětí uvnitř vyráběné komponenty, viz obr. 12 [21, 22, 23].



Obr. 12: Odlehčení metodou AM [23]

V případě konvenčních metod by taková odlehčení byla těžko dosažitelná. Možným řešením by mohlo být použití tenkých stěn u součástí, nebo zhotovení mnoha odlehčovacích dutin, což by mohlo mít negativní důsledky na tuhost komponent.

2.2.4 Vady AM

V porovnání s konvenčními metodami zhotovování komponent, například třískovým obráběním, lze říci, že jde o značně pomalou výrobní metodu. Existuje několik druhů AM. Některé využívají 3D tisk ke zhotovení polotovaru, který není příliš pevný, spíše je křehký. Tento nedostatek se odstraňuje tepelným zpracováním v peci, kde dojde k natavení materiálu a po vychladnutí k dosažení velmi rovnoměrné a pevné struktury. V případě metody Selective Laser Melting (dále SLM), která je předmětem tohoto zkoumání, dochází k nanášení materiálu ve vrstvách, bez obdobného procesu, kdy by došlo k homogenizaci materiálu. Z tohoto důvodu mají součásti zhotovené metodou SLM nehomogenní mechanické vlastnosti, což je nutné zohlednit při konstrukci požadovaných součástí, například forem a částí forem pro tlakové lití.

Dalším problémem SLM je nerovnoměrný a prudký ohřev a následné ochlazování materiálu vyráběné součásti v různých oblastech, dle pohybu hlavičky laseru. Toto ohřívání a ochlazování může mít negativní důsledky, a to například deformace vyráběné součásti vlivem tepelné roztažnosti kovu, ze kterého je výrobek zhotovován. Deformace vlivem tepelné roztažnosti by pravděpodobně bylo možné omezit volbou vhodné trajektorie pohybu laserové hlavy, díky čemuž by mohlo dojít k rovnoměrnějšímu ohřevu a následnému ochlazení materiálu, a tím ke snížení velikosti vznikajícího vnitřního pnutí v materiálu, které je příčinou takových deformací [22].

2.3 Tepelné zpracování konvenčních a tištěných nástrojových ocelí

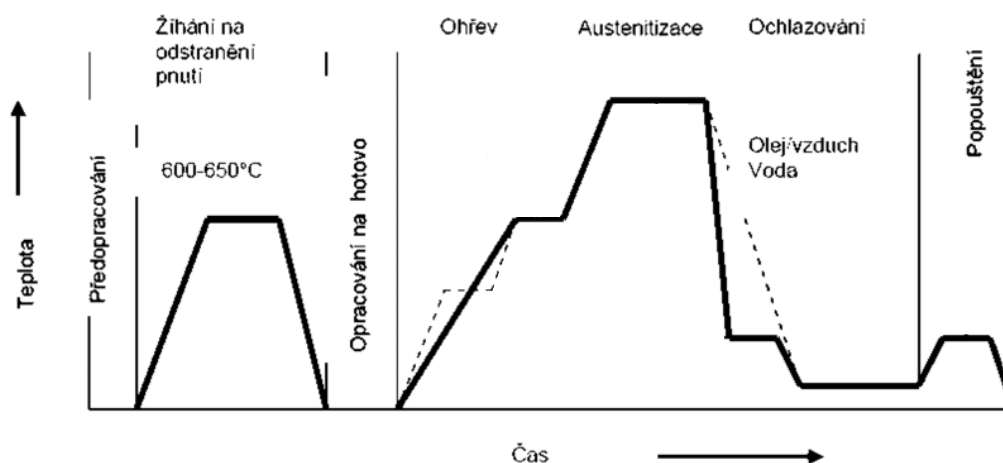
Volba TZ má významný vliv na koncové mechanické vlastnosti materiálu. Je rozdíl mezi vlastnostmi konvenčně a aditivně zhotoveného výrobku, proto je nutné parametry TZ patřičně upravit, aby bylo dosaženo maximálně výhodného efektu.

2.3.1 Základní poznatky o TZ ocelí

V této kapitole bylo zjišťováno, jakým postupem a za jakých parametrů se TZ provádí u konvenčně zhotovovaných výrobků. Cílem bylo porozumění procesu a jeho vlivu na konečný stav materiálu.

TZ nástrojových ocelí

Nástrojové oceli uhlíkové a nízkolegované mají stejný způsob tepelného zpracování. Můžou se lišit v teplotách ohřevu a prostředích pro ochlazování. Základním TZ je žihání pro odstranění vnitřního pnutí, kalení a následné popouštění, tento proces je znázorněn na obr. 13.



Obr. 13: Základní TZ [24, 25]

Proces TZ nástrojových ocelí zpravidla začíná žiháním při teplotě 600 až 650°C. Po ochlazení následuje proces kalení. Ohřev na kalící teplotu lze provést kontinuálně anebo postupně. V případě postupného ohřevu dochází k rovnoměrnějšímu prohřívání materiálu a je tak zmírněna pravděpodobnost vzniku prasklin. Rychlost ohřevu představuje zhruba 0,5 min/mm tloušťky materiálu. Po dosažení kalící teploty se obvykle provádí výdrž na kalící teplotě, což umožňuje rovnoměrné prohřátí materiálu. Následuje rychlé ochlazení. Některé materiály jsou samokalitelné, ale u některých je k dosažení martenzitické struktury nutné použít kalící médium. Jako kalící médium se obvykle používá voda či olej.

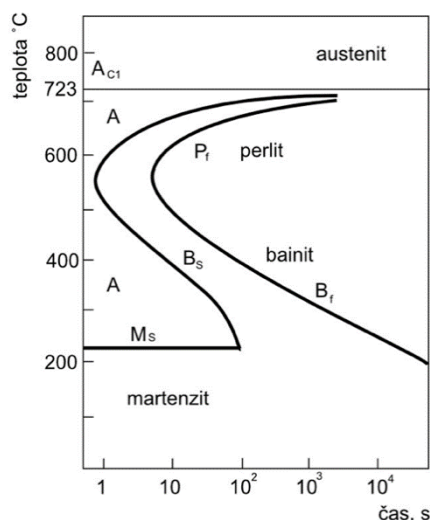
Po procesu kalení je materiál tvrdý a křehký, což je dáno jeho strukturou a vnitřním pnutím uvnitř materiálu. Konec TZ představuje popouštění. Jedná se o opětovný ohřev a výdrž na teplotě. Parametry popouštění určují, jak kvalitně bude sníženo vnitřní pnutí v materiálu. Popouštění má vliv také na mechanické vlastnosti materiálu.

Pro dosažení potřebné tvrdosti a houževnatosti u materiálů forem pro tlakové lití, které musí odolávat značným tepelným namáháním, je vhodné provádět popouštění při teplotách nad vrcholem sekundárního kalení.

Problém TZ velkých licích forem představuje nerovnoměrný prostup a odvod tepla materiálem formy. Důsledkem je, že vnitřní část formy chladne pomaleji než povrch formy, což vede například v případě kalení k nedokonalému zakalení jádra součásti.

Proces žíhání se provádí za účelem zajištění rovnovážného stavu materiálu změnou struktury materiálu. Nedochozí ke změně chemického složení. Důsledkem žíhání je také snížení vnitřního pnutí v materiálu.

Následující proces kalení slouží k dosažení martenzitické struktury materiálu. Závislost typu fáze na rychlosti kalení lze znázornit prostřednictvím IRA a ARA diagramů, kdy ARA diagram znázorňuje anizotermický rozpad austenitu a IRA znázorňuje izotermický rozpad austenitu. Na následujícím obrázku je uveden příklad grafu IRA diagramu, viz obr. 14, konkrétní tvar diagramu závisí na konkrétním materiálu [1, 3, 26].



Obr. 14: Příklad IRA diagramu [27]

Aby byl proces kalení úspěšný, je nutné pracovat s vhodným materiálem. Zkoumaný materiál H11 má dobrou kalitelnost, a proto je schopen dosáhnout martenzitické struktury.

Závěrečný proces popouštění je proces určený ke snížení vnitřního pnutí, které vzniká procesem kalení. Tím dochází ke snížení tvrdosti materiálu, ale jeho houževnatost se zvyšuje. Proces je nutné provádět pečlivě. Materiál musí být kvalitně, rovnoměrně prohřátý, musí následovat výdrž na popouštěcí teplotě a následné popouštění musí být provedeno pomalu a rovnoměrně, jinak může dojít ke vzniku dalšího vnitřního pnutí.

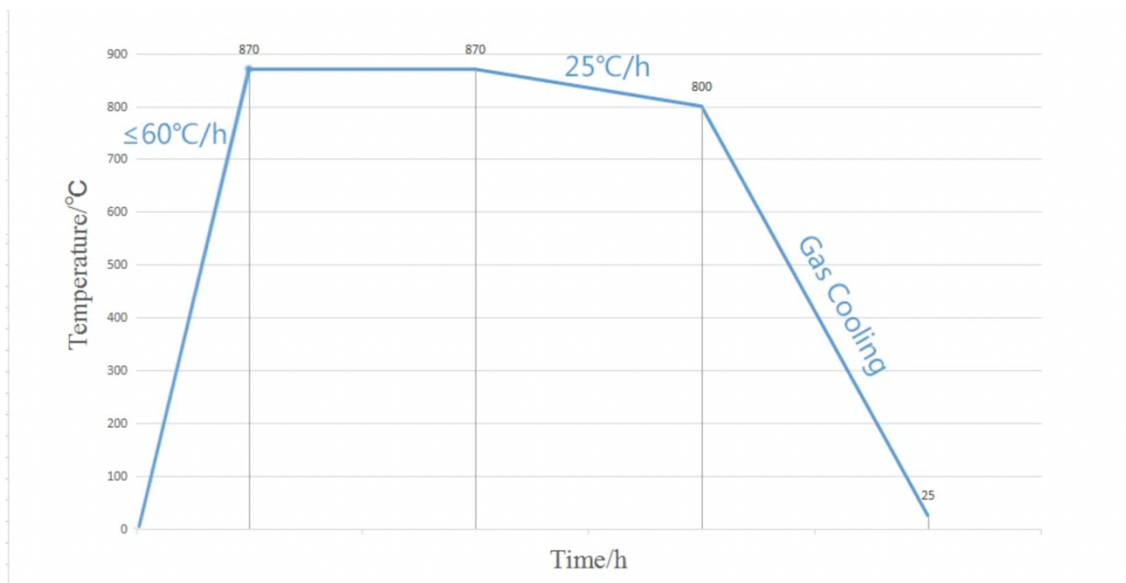
Někdy je proces temperování prováděn opakovaně. U legovaných ocelí pro práci za tepla se obvykle provádí popouštění dvakrát, případně víckrát. Při vícenásobném popouštění je prodleva na popouštěcí teplotě asi dvě hodiny. Teplota druhého a dalších popouštění je asi o 10°C nižší než u předchozích. Násobným popouštěním se dosahuje dokonalejšího rozpadu zbytkového austenitu a zároveň popouštění martenzitu [1, 19, 20, 28].

2.3.2 Doporučované parametry konvenčního TZ

Materiál H11 i H13 se v průmyslu běžně používají, a proto jsou o nich známé informace, mimo jiné i doporučené hodnoty TZ při konvenčním zpracování. V následující kapitole bude probráno, za jakých parametrů TZ má dojít k nejlepším výsledným parametrům zpracovávaných materiálů.

Žihání

Pro dosažení rovnoměrné struktury před kalením, se v případě materiálu H13 doporučuje zahřívat maximálně rychlostí $60^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Doporučovaná doba výdrže při teplotě žihání 870°C je $0,8 \text{ min}/\text{mm}$ maximální tloušťky tělesa, minimálně však 2 hodiny. Schéma procesu, viz obr. 15.

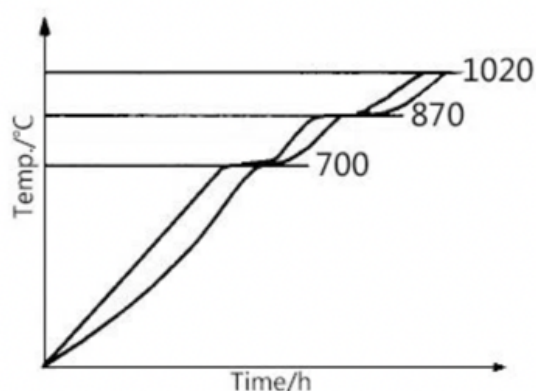


Obr. 15: Proces vakuového žihání oceli H13 [2]

Rychlost ochlazování by neměla být vyšší než $28^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Po ochlazení na teplotu 800°C je možné provést dochlazení na vzduchu [2].

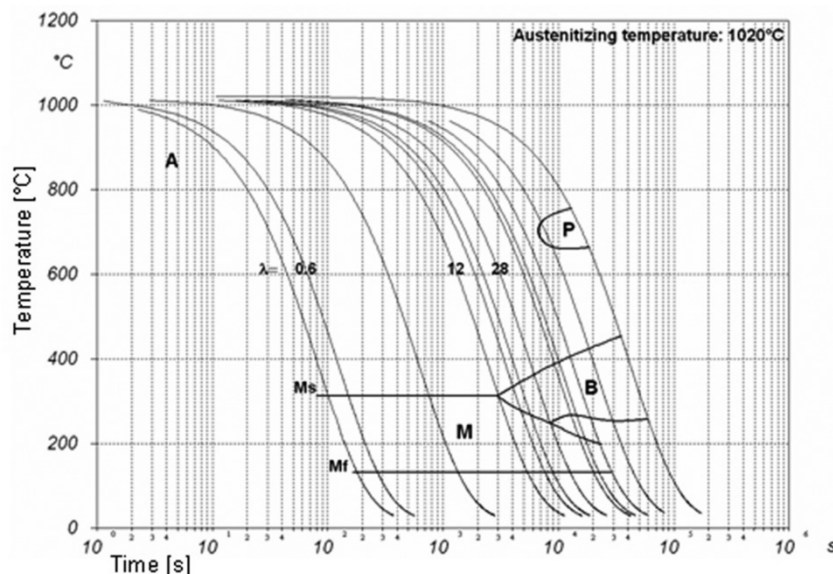
Kalení

Pro dosažení martenzitické struktury je vhodné použít kalení z horní mezní teploty ohřevu. Ohřev tělesa je vhodné provádět po etapách, rychlostí $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ do teploty 700°C , dále rychlostí $165^{\circ}\text{C}/\text{h}$ do teploty 870°C . Nakonec maximální možnou rychlostí na teplotu 1025°C . Znázornění průběhu ohřevu, viz obr. 16.



Obr. 16: Proces ohřevu H13 ve vakuové peci před kalením [2]

Tělesa s tloušťkou větší než 127 mm vyžadují zrychlené chlazení použitím nuceného proudu vzduchu, stlačeného plynu nebo přerušovaného kalení. U chlazení do oleje se doporučuje chladit do zčernání, asi na 482°C , poté ochladit na klidném vzduchu. Na následujícím snímku, na obr. 17, je uveden diagram kalení H13 [2, 29].



Obr. 17: Křivka ochlazování oceli H13 při kalení [1]

Tento diagram vyjadřuje, jakou rychlostí je nutné kalení provést, aby bylo dosaženo žádané martenzitické struktury. Je zřejmé, že v případě, kdy proces ochlazování bude proveden příliš pomalu, dojde k transformaci na perlit nebo bainit.

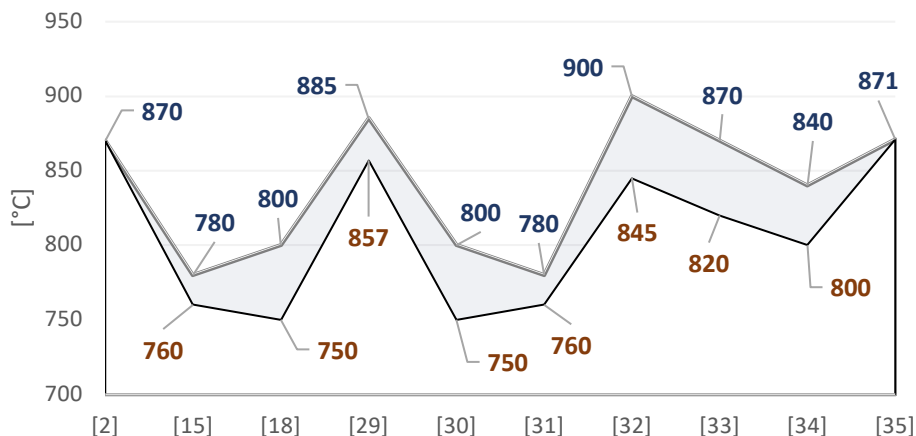
Popouštění

Pro dosažení homogenního materiálu a odstranění maximálního množství vnitřního pnutí, je vhodné provést popouštění ihned po kalení. Doporučená doba popouštění je 1 hodina na 20 mm tloušťky součásti. Minimální uváděná doba popouštění je obvykle 2 hodiny [18, 29].

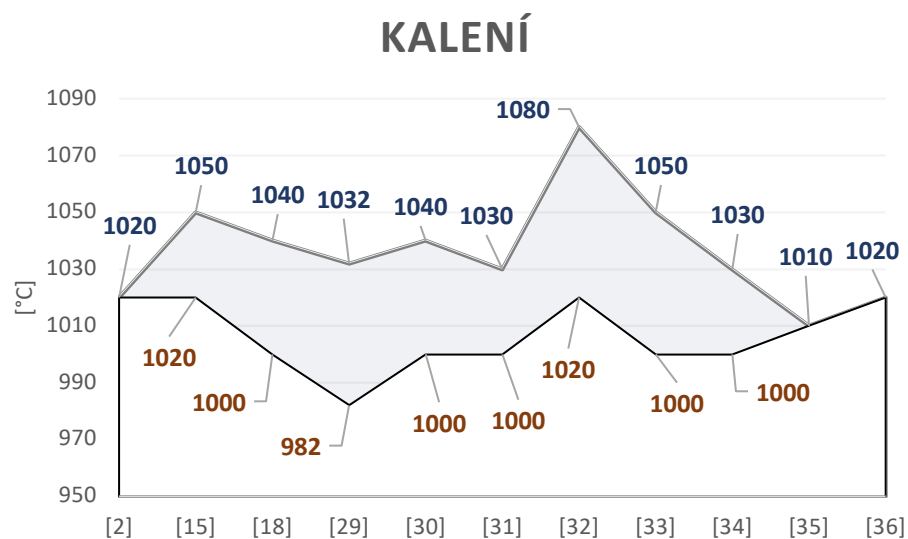
Interpretace dat – doporučené teploty TZ

Různé zdroje (v diagramu uvedeny pod zjištěnou hodnotou) uvádějí různé doporučené hodnoty TZ. Za účelem výběru vhodných podmínek tepelného zpracování byla provedena analýza různých zdrojů. Následující diagramy obr. 18, obr. 19 a obr. 20 znázorňují doporučené hodnoty teplot tepelného zpracování materiálu H11 a H13.

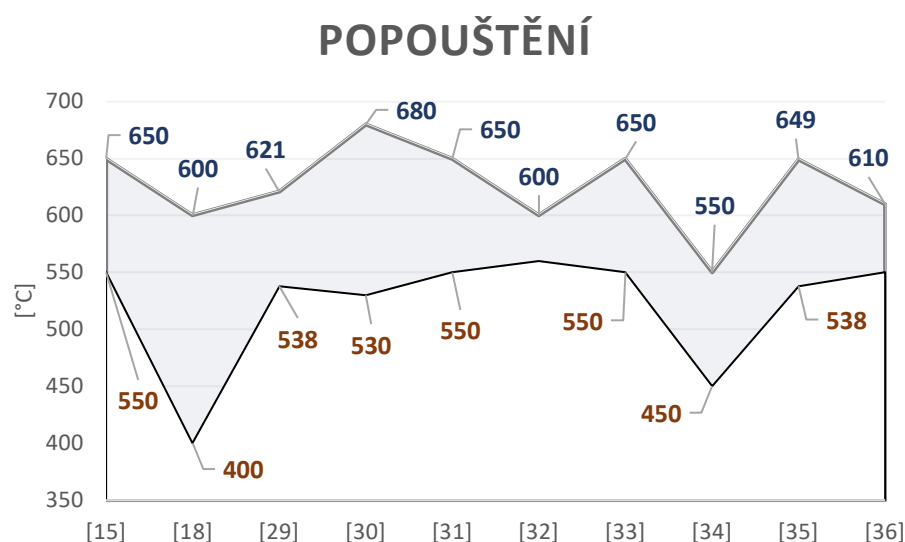
ŽÍHÁNÍ



Obr. 18: Doporučené hodnoty teploty žhání



Obr. 19: Doporučované hodnoty teploty kalení



Obr. 20: Doporučované hodnoty teploty popouštění

Výstup

Doporučená teplota žíhání je v rozmezí od 750 do 900°C. Doporučená hodnota kalící teploty je v rozmezí od 982 do 1 080°C, doporučená teplota pro popouštění je v rozmezí od 400 do 680°C [2, 15, 18, 29, 30 – 36].

2.3.3 Materiál po zpracování AM

Ze studií vyplývá, že materiály zpracované metodou AM vykazují zpravidla lepší vlastnosti než jejich konvenčně zpracované varianty. Typicky vede AM k tvorbě velmi jemné struktury, která se odráží na pevnosti a tvrdosti vzniklé součásti. AM má nepříznivý vliv na tažnost a únavovou životnost. AM se příznivě projevuje i zvýšenou korozivzdorností materiálu [37].

Struktura

Při zpracování materiálu metodou AM často dochází ke vzniku pórů, které oslabují materiál, protože mohou sloužit jako iniciátor trhlin. Z důvodu vysokého vnitřního pnutí je vhodné provádět předehřev základní desky alespoň na teplotu 200°C. Ukázalo se, že výsledná struktura je téměř dokonale martenzitická.

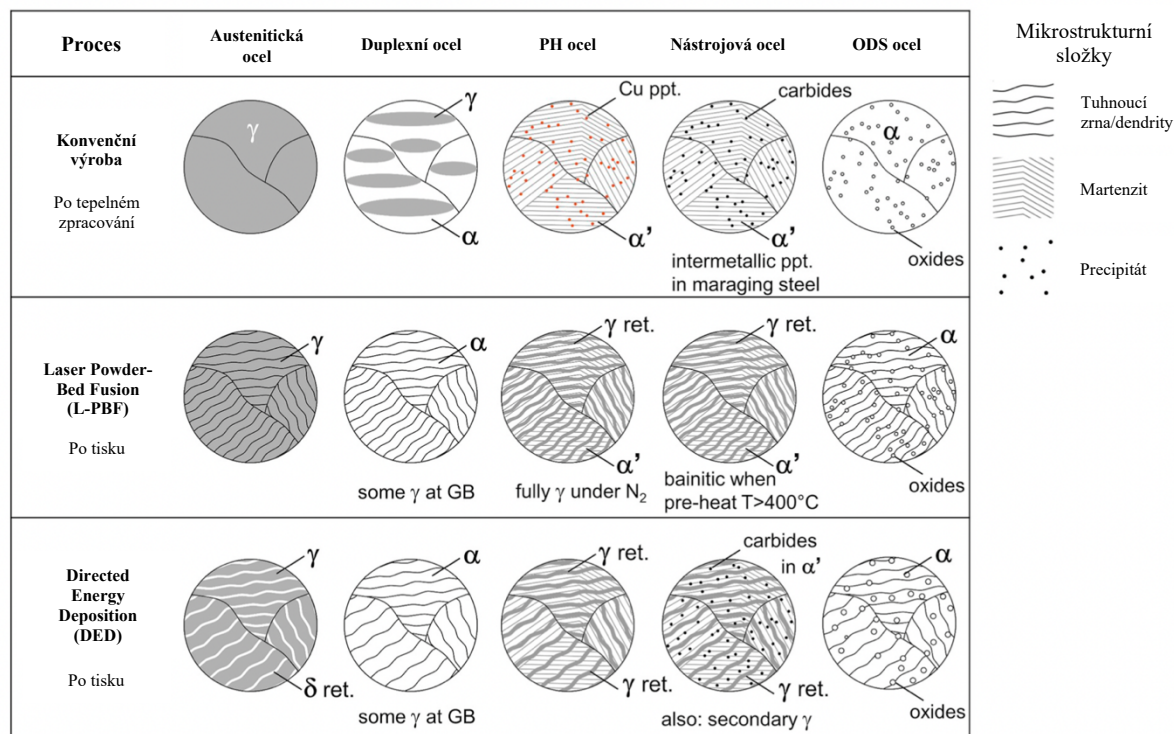
Konkrétní struktura a vlastnosti vzniklého tělesa jsou dány použitým materiálem, technologií, rozměry tělesa a také parametry použité metody. Studiumi bylo zjištěno, že materiál H13, který je velmi podobný materiálu H11, zpracovaný metodou Laser powder bed fusion (dále L-PBF) po výrobě obsahuje i austenit, v temperovaném stavu obsahuje karbidy. V případě předehřevu na 500°C dochází k tvorbě bainitu z austenitu, na místo martenzitu.

Materiál H11 je po SLM tvořen převážně feritem s karbidy a austenitem, po ochlazení na vzduchu se struktura mění v martenziticou s malým množstvím austenitu. V případě procesu Laser beam melting (dále LBM) v materiálu H11 vzniká austenit. Při 400°C se austenit přeměňuje v bainit. Výsledná struktura odpovídá plně bainitické struktuře. H11 zpracován LBM odpovídá H11 po žhání a kalení.

Bylo zjištěno, že i malé množství bainitu má velmi negativní vliv na pevnost a houževnatost struktury. Pro formy je nejvhodnější úplná martenzitická struktura.

Ukázalo se, že strukturu materiálu H11 lze modifikovat dodatečným vakuovým tepelným zpracováním. Vakuové tepelné zpracování je technologie neoxidačního tepelného zpracování s regulovatelnou atmosférou. Tato technologie je schopna výrazně omezovat, až eliminovat, vliv oxidace, dekarbonizace, znečištění a deformace obrobku.

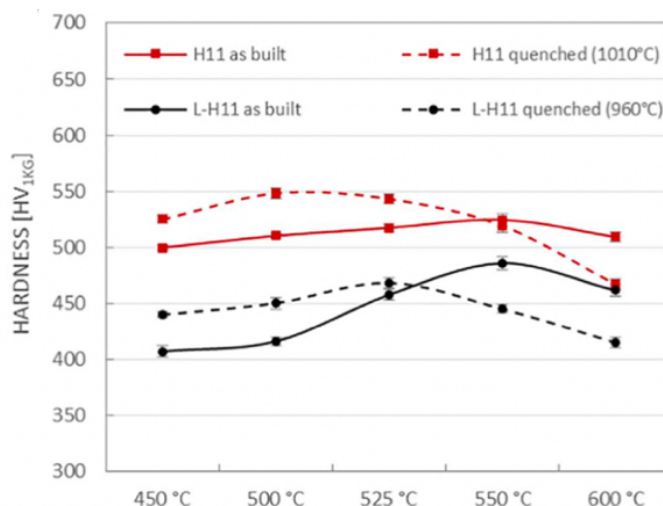
Následující schéma, viz obr. 21 znázorňuje očekávatelné mikrostruktury podle druhu zpracovávaného materiálu vůči použité technologii [1, 3, 24, 37, 38, 39].



Obr. 21: Charakteristické mikrostruktury [37]

Tvrdość

Tvrdość ocelí připravených metodou AM obvykle převyšuje tvrdość těchto materiálů připravených konvenčními metodami. Například ocel H13 připravená metodou L-PBF dosahuje tvrdości 57 až 64 HRC, jiné zdroje uvádí hodnoty 570 až 745 HV, maximální tvrdość je obvykle 680 HV. V případě zpracování metodou Directed Energy Deposition (dále DED), je obvykle dosaženo tvrdości 550 až 660 HV. Následující diagram znázorňuje očekávatelnou tvrdość aditivního materiálu H13 po TZ, viz obr. 22 [37, 38].

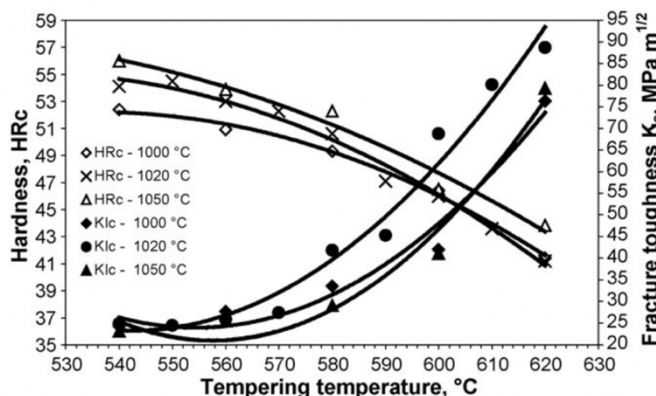


Obr. 22: Diagram závislosti tvrdości na teplotě temperování H11 a L-H11 [38]

Materiál H13 ihned po SLM dosahuje obvykle tvrdości 40 HRC, po TZ i 45 HRC. Tvrdość kalených a popouštěných vzorků H11 je podobná tvrdości konvenčně vyráběných dílů, může dosahovat tvrdości 548 HV po popouštění. Zajímavé je, že vícenásobné popouštění má pouze zanedbatelný vliv na tvrdość materiálu. Rozdíl mezi tvrdości po jednom a po dvou po sobě jdoucích popouštěních je v řádu jednotek HV v závislosti na parametrech tepelného zpracování.

V případě zakalení L-PBF zpracované H11 dochází ke zvýšení tvrdości na 737 ± 16 HV, při následném popouštění dochází k poklesu tvrdości na 585 ± 9 HV. V případě kalení na vzduchu může nabýt tvrdości 609 HV, tvrdość lze následně popouštěním snížit na 548 HV.

Z hlediska opotřebení je vhodné používat materiál o vyšší tvrdości, který je odolnější. Bylo zjištěno, že tvrdość materiálu H13 i rázová houževnatost je závislá na teplotě popouštění. Tuto závislost znázorňuje níže uvedený diagram, viz obr. 23, který udává souvislost mezi dosaženou hodnotou tvrdości materiálu a hodnotou K_{IC} podle tepelné úpravy [3, 5, 24, 38, 40].



Obr. 23: Vliv popouštěcí teploty na tvrdość a lomovou houževnatost H11 [3]

Pevnost v tahu

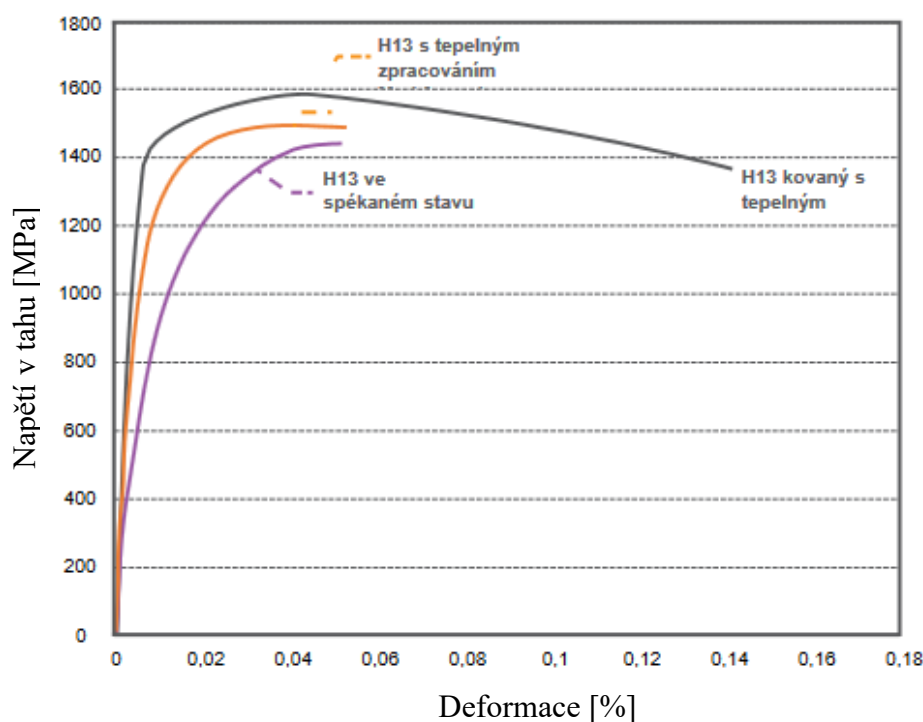
Studie naznačují, že AM zpracování má negativní vliv na tažnost a křehkost materiálu. Materiály zpracované AM mají obvykle vyšší hodnoty tvrdosti než konvenčně zpracované materiály, ale mez pevnosti v tahu je nižší. Při zpracování oceli H11 metodou L-PBF dochází k předčasnému lomu ve srovnání se standardně připraveným materiálem. Lze dosáhnout meze pevnosti v tahu 1 300 MPa a 0,7 % prodloužení. V případě standardně tepelně zpracovaného materiálu lze očekávat hodnoty 1 600 MPa.

V případě SLM H13 lze očekávat R_m 1 420 MPa, po TZ až 1 500 MPa. Mez kluzu je výrazně nižší, lze očekávat hodnotu $R_{0,2}$ 800 MPa. Lze očekávat hodnotu tažnosti blízkou 5 %. Hodnota tažnosti po TZ konvenčně zhotoveného dílu se obvykle pohybuje okolo 14 %. Charakteristické chování H13 při tahovém namáhání, viz obr. 24.

Nižší schopnost prodloužení je pravděpodobně způsobena pórovitostí materiálu, význam má také velké vnitřní pnutí. Vliv vnitřního pnutí lze částečně vyřešit tepelným zpracováním. Po popouštění při alespoň 600°C dochází k uvolnění napětí, čímž lze dosáhnout téměř shodných vlastností jako má standardně připravený materiál.

Materiál H13 zpracovaný metodou DED může dosáhnout hodnot i 2 000 MPa a prodloužení při přetržení 5–6 %. Navíc, metodou DED materiál získává stejnou, či dokonce lepší, odolnost vůči opotřebení než konvenční materiál.

V případě zpracování materiálu H11 metodou Laser beam melting (dále LBM), lze dosáhnout meze pevnosti v tahu i $2\,148 \pm 16$ MPa a prodloužení při přetržení $8,8 \pm 1,1$ % [5, 24, 37].



Obr. 24: Tahová zkouška materiálu H13 [5]

Z více uvedeného diagramu se zdá, že materiál H13 po SLM se před i po TZ chová značně křehce. Naproti tomu, materiál zhotovený konvenční cestou se chová výrazně houževnatěji [5].

2.3.4 Porovnání procesů

Z výše uvedené rešerše lze říci, že parametry materiálu po AM zpracování jsou jiné než parametry materiálu zpracovaném konvenčními metodami, shrnutí těchto parametrů znázorňuje následující tabulka, viz tab. 3.

Tab. 3: Porovnání důsledků procesů

| Očekávatelné hodnoty zjištěné pro H11, H13 | SLM před TZ | Konvenčně po TZ |
|---|---|---|
| Struktura | Martenzit [37] - jemnější - póry - austenit - karbidy | Martenzit [14] - austenit - karbidy |
| Tvrdość [HRC] | 40 [5] | 45±5 [17] |
| R _m Pevnosť v tahu – stand. tep. [MPa] | 1 420 [5] | 1 550±330 [17] |
| R _m Pevnosť v tahu – 200 až 600°C [MPa] | - | 1 160±360 [17] |
| R _{p0,2} Mez kluzu – stand. tep. [MPa] | 800 [5] | 1 350±300 [17] |
| R _{p0,2} Mez kluzu – 200 až 600°C [MPa] | - | 1 005±345 [17] |
| A prodloužení při mezi pevnosti [%] | 5 [5] | 13,5±1,5 [17] |
| A ₅ prodloužení při mezi pevnosti – 200 až 600°C [%] | - | 15±3 [17] |

Z výše uvedené tabulky lze určit, že struktura vzniklá oběma postupy je téměř shodná, avšak při výrobě konvenční metodou dochází k tvorbě hrubšího martenzitu. Jeho výhodou je, že neobsahuje významné množství pórů. Tvrdość konvenčně vyrobeného materiálu po TZ je vyšší než tvrdość materiálu vyrobeného metodou SLM před TZ. Pro přiblížení se parametrům konvenčně vyráběných forem je tedy potřeba tepelným zpracováním zvýšit tvrdość materiálu zhotoveného SLM. Hodnota meze pevnosti je vyšší u materiálu zhotoveném konvenčními metodami. Pravděpodobně jde o důsledek pórovitosti struktury a velkého vnitřního pnutí dosaženého metodou SLM. K zvýšení hodnoty meze pevnosti je nutné tyto problémy odstranit nebo alespoň potlačit.

3 Experimentální program

Cílem práce je nalezení optimálních parametrů TZ pro dosažení optimálních vlastností materiálu, po AM pro aplikaci v tlakových licích formách. Aby bylo možné určit optimální parametry TZ, je nutné experimentálně ověřit zjištěné informace uvedené výše, v rešeršní části, aby se předešlo práci s nesprávnými údaji. Zároveň tím bude ověřena opakovatelnost naměřených dat. Následující část se bude věnovat přípravě zkušebních vzorků a návrhu, popisu provedení a následnému vyhodnocení TZ za účelem určení nejvhodnější varianty TZ.

3.1 Popis použitého materiálu a vybavení

V metalografických výzkumech se obvykle k experimentům nepoužívají hotové součásti, ale zkušební vzorky, na kterých se provádí patřičné úpravy a experimenty. Tento postup je méně nákladný a manipulace se vzorky je navíc jednodušší. Z toho důvodu byla vyrobena následující zkušební tělesa, viz tab. 4.

Tab. 4: Zkušební tělesa pro příslušné TZ

| č. | Proces TZ | Aditivní materiál | | | Konvenční m. Hranolek pro metalografii a HV10 |
|----|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| | | Váleček pro metalografii a HV10 | Zkušební těleso pro tahovou zk. | Zkušební těleso pro zk. rázem v ohybu | |
| 1. | 2x 450°C / 2 h | 1x | | | |
| 2. | 450°C / 4 h | 1x | 2x | 3x | |
| 3. | 2x 500°C / 2 h | 1x | | | |
| 4. | 500°C / 2 h | 1x | | | |
| 5. | 500°C / 4 h | 1x | 2x | 3x | |
| 6. | 550°C / 4 h | 1x | | | |
| 7. | 620°C / 4 h | 1x | 2x | 3x | |
| 8. | 1 030°C / 30 min + 450°C / 4 hod | 1x | | | 1x |
| 9. | 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod | 1x | 2x | 3x | 1x |

Zkušební vzorky, z materiálu H11, představovalo 9 válečků připravených metodou AM (předtíštěné ve směru Z), dále 12 AM připravených zkušebních těles pro kontrolu rázové houževnatosti (předtíštěné ve směru Z), 8 zkušebních těles zhotovených metodou AM pro tahové zkoušky (předtíštěné ve směru X) a 2 vzorky konvenčně zpracovaného materiálu pro porovnání účinků TZ (tvar hranolu). Na níže uvedeném snímku je uvedena ukázka jedné z experimentálních sérií vzorků, viz obr. 25.



Obr. 25: Série 9 – 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod

Zkušební vzorky bylo nutné nadělit a zpracovat do stavu použitelného v laboratoři. Dále bylo nutné využít speciálního vybavení pro analýzu zkušebních vzorků, uvedeny níže.

K dělení zkušebního materiálu před tepelným zpracováním byla použita metalografická pila Struers Discotom – 10, ta byla dále použita k přípravě vzorků pro světelnou a elektronovou mikroskopii.

3D tištěné válečky a konvenčně zhotovené hranolky byly naděleny na délku 38 mm. Proces TZ byl proveden pomocí pece Carbolite Gerpo s pracovním rozsahem teplot od 30 do 1 100°C. Proces ohřevu byl pomalý stupňovitý.

Před mikroskopickou analýzou byly vzorky zalisovány pomocí lisu Struers CitoPress – 10. Lisování bylo provedeno do materiálu PolyFast při teplotě 180°C. Tlak 250 bar, doba žhavení 3,5 min, doba chlazení 3,5 min.

Zhotovení výbrusů bylo provedeno na metalografické brusce a leštičce Struers Tegamin – 30. Nejprve bylo provedeno broušení kotoučem MD Piano chlazené vodou, drsnost 500, přítlak 40 N, 2 min, 300 rpm kotouče, 150 rpm vřetena. Následovalo broušení jemnějším kotoučem MD Piano, drsnost 1200, přítlak 30 N, 2 min, 300 rpm kotouče, 150 rpm vřetena, chlazení opět vodou.

K leštění byl použit kotouč MD DUR, emulze 9 μm , přítlak 30 N, 2 min, 150 rpm kotouče, 150 rpm vřetena. Dále byl použit kotouč Iota, emulze 3 μm , přítlak 25 N, 3 min, 150 rpm kotouče, 150 rpm vřetena. K dokončení výbrusu byl použit kotouč Iota, emulze 1 μm , přítlak 20 N, 2,5 min, 150 rpm kotouče, 150 rpm vřetena.

Po vybroušení byly vzorky leptány Nitalem. Koncentrace leptadla byla tříprocentní. Testované aditivně zhotovené vzorky na leptadlo reagovaly přibližně po čtyřiceti sekundách. V případě konvenčního materiálu byla reakce rychlejší a vzorky reagovaly přibližně po dvaceti sekundách.

Ke zhotovení snímků světelnou mikroskopií byl použit mikroskop Olympus GX51 se zvětšením 50 až 1 000. Ke skenování vybraných vzorků byl použit elektronový mikroskop Tescan Vega 3 se zvětšením až 10 000.

Při měření tvrdosti HV10 byl použit tvrdoměr Wolpert Wilson Instruments. Pro měření pevnosti v tahu byl použit univerzální trhací stroj Zwick Roell Z250, měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro měření rázové houževnatosti bylo použito Charpyho kladivo Zwick Roell RKP450, měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 14556 [41, 42].

3.2 Tepelné zpracování

Cílem následujících kapitol je, za pomoci výše zjištěných informací, vytvořit takový návrh TZ zkoumaného aditivně zhotoveného materiálu, které povede k optimálnímu napodobení nebo k překonání vlastností materiálu konvenčního. Návrh TZ musí být proveden tak, aby bylo možné naměřená data porovnat se zjištěnými informacemi a zároveň jejich množství musí být dostatečné, aby bylo možné naměřené údaje důsledně vyhodnotit. Po provedení TZ budou zkušební tělesa analyzována a na základě zjištěných a změřených dat bude vyhodnocena nejoptimálnější varianta TZ.

3.2.1 Volba TZ

K volbě TZ bylo využito informací, z již provedených studií a také informací, které doporučují výrobci oceli H11, viz obr. 20. Účelem experimentu je ověření zjištěných informací o důsledcích TZ na zkoumaný materiál, viz obr. 8, 9 a 22. Pokud se zjištěné informace experimentálně potvrdí, bude je možné použít jako podklad pro objektivní posouzení optimální varianty parametrů TZ.

Rešerší bylo zjištěno, že na trvanlivost formy má zásadní vliv odolnost formy proti tepelné únavě. Dále bylo zjištěno, že k minimalizaci vlivu tepelné únavy je vhodné využít

materiál o vysoké tvrdosti. Jelikož trvanlivost je jedním z nejdůležitějších parametrů pro návrh licích forem, viz 2.1.2. Kritéria pro kvalitní formu, návrh experimentu pro TZ byl proveden zejména s ohledem na odhadovanou dosažitelnou hodnotu tvrdosti materiálu po TZ. Za účelem přetvoření materiálu o vysoké tvrdosti, pevnosti a křehkosti, což materiál H11 po AM jistě je, do optimálnějšího stavu, navrhuji po AM zařadit proces popouštění. Konkrétní parametry TZ uvedeny v následující kapitole.

3.2.2 Návrh experimentu

Dle obr. 8 a obr. 9, v kapitole 2.1.6 Konvenčně zpracovaný materiál, dochází k dosažení maximální tvrdosti konvenčního materiálu při teplotě popouštění 500°C. V případě provedených měření po AM je maximální očekávatelná tvrdost dle obr. 22, v kapitole 2.3.3 Materiál po zpracování AM, dosahována při 550°C. Z těchto informací vyplývá, že aditivní a konvenční materiál se při TZ nechová stejně. Je tedy nutné experimentálně potvrdit zjištěná data a na základě nich vybrat nejvhodnější variantu TZ.

Samozřejmě, nejjednodušší možností by bylo materiál tepelně nezpracovávat. V případě ponechání součásti po zpracování AM bez dalšího tepelného zpracování je možné očekávat, že součást bude mít následující vlastnosti, viz tab. 3. Součást pravděpodobně bude mít vysokou tvrdost odpovídající hodnotě 40 HRC. Tažnost takového tělesa bude pravděpodobně velmi omezená, což by naznačovala nízká hodnota A blízka 5 %. Mez pevnosti by byla nižší než při standardně používaných metodách, avšak i tak by byla velmi vysoká, blízka 1 420 MPa. Problémem by však bylo velké vnitřní pnutí v materiálu, které by způsobovalo velkou křehkost a náchylnost ke křehkým lomům či únavovým trhlinám. Navíc by tyto problémy dále umocňovalo množství pórů uvnitř materiálu, které vzniklo jako přirozený důsledek AM. Zdá se, že ponechat materiál bez následného tepelného zpracování by bylo neefektivní, protože životnost takové formy by pravděpodobně byla značně nižší než u formy po tepelném zpracování, které by výše uvedené problémy eliminovalo či zmírnilo.

K ověření zjištěných informací o zkoumaném materiálu navrhuji provést sérii procesů TZ na sadě zkušebních vzorků, na kterých bude následně provedeno měření tvrdosti, tahové zkoušky a kontrola struktury pomocí světelné mikroskopie. U vybraných vzorků bude provedeno i měření rázové houževnatosti v ohybu a snímkování pomocí elektronové mikroskopie.

Všechny tyto zkoušky budou sloužit jako podklad pro určení nejvhodnějších možných podmínek TZ v praxi. Pro experiment není možné provést TZ při všech možných kombinacích teploty a doby trvání TZ, navrhuji provést měření při následujících parametrech TZ, viz tab. 5 [15, 18, 30].

Tab. 5: Návrh TZ

| Parametr TZ | Očekávání a cíl |
|--|---|
| 2x 450°C / 2 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 500 HV. Cílem tohoto měření bude zjištění, zda skutečně při teplotě nižší než 550°C bude tvrdost nižší. Porovnáním TZ 2x2 h a 4 h bude zjištěno, zda je výhodné provádět proces kontinuálně anebo s prodlevou. |
| 450°C / 4 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 500 HV. Cílem tohoto měření bude zjištění, zda skutečně při teplotě nižší než 550°C bude tvrdost nižší. Porovnáním TZ 2x2 h a 4 h bude zjištěno, zda je výhodné provádět proces kontinuálně anebo s prodlevou. |
| 2x 500°C / 2 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 510 HV. Cílem tohoto měření bude zjistit, zda skutečně při teplotě nižší než 550°C bude tvrdost nižší. Dále zjištění, zda zkrácení 2x2 h cyklu pouze na 1x2 h cyklus bude mít vliv na vlastnosti materiálu, případně jaké. Pokud se ukáže, že vlastnosti materiálu budou přijatelné, znamenalo by to potenciálně značnou finanční a časovou úsporu při TZ v praxi. |
| 500°C / 2 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 510 HV. Cílem tohoto měření bude zjištění, zda skutečně při teplotě nižší než 550°C bude tvrdost nižší. Porovnáním TZ 2x2 h a 4 h bude zjištěno, zda je výhodné provádět proces kontinuálně anebo s prodlevou. |
| 500°C / 4 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 510 HV. Cílem tohoto měření bude zjištění, zda skutečně při teplotě nižší než 550°C bude tvrdost nižší. Porovnáním TZ 2x2 h a 4 h bude zjištěno, zda je výhodné provádět proces kontinuálně anebo s prodlevou. |
| 550°C / 4 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 525 HV. Cílem tohoto měření bude zjištění, zda skutečně při této teplotě bude dosaženo nejvyšší tvrdosti materiálu. |
| 620°C / 4 h | Dle obr. 22 lze předpokládat, že dosažená tvrdost materiálu bude 490 HV. Cílem tohoto měření bude zjistit, zda při teplotě popouštění vyšší než 550°C skutečně dojde k poklesu tvrdosti materiálu. |
| 1 030°C / 30 min + 450°C / 4 hod | Vzhledem k zařazení procesu kalení uvažujeme chování materiálu dle obr. 8. V takovém případě lze očekávat dosaženou hodnotu tvrdosti blízkou 54,5 HRC. Cílem je získat porovnání chování materiálu připraveným aditivní a konvenční cestou. |
| 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod | Vzhledem k zařazení procesu kalení uvažujeme chování materiálu dle obr. 8. V takovém případě lze očekávat dosaženou hodnotu tvrdosti blízkou 55 HRC. Cílem je získat porovnání chování materiálu připraveným aditivní a konvenční cestou. |

Tabulka tab. 5 udává teplotu a čas, po který bude provedeno experimentální popouštění zkušebních vzorků. TZ bude provedeno pro jednotlivé série zkušebních vzorků. Zkušební vzorky pro jednotlivé skupiny, viz tab. 4.

Po provedení TZ budou vzorky podrobeny analýze. Zkouška tvrdosti bude provedena podle Vickerse. Tahové zkoušky budou provedeny na univerzálním trhacím stroji. Analýzou získaných diagramů zkušebních vzorků bude určena mez pevnosti, kluzu a kontrakce materiálů po TZ. Vyhodnocení mikrostruktury materiálu bude provedeno na základě snímků naleptaných výbrusů. Analýza mikrostruktury bude zaměřena na identifikaci druhu dosažené mikrostruktury a její jemnost, druhotně pak na zjištění přítomnosti pórů a jiných vad v materiálu zkušebních vzorků.

3.3 Mikrostrukturní analýzy

V této kapitole bude provedena analýza snímků získaných světelnou a, u vybraných vzorků, elektronovou mikroskopií. Cílem je popsat chování materiálu při různých parametrech TZ a určit akceptovatelné podmínky TZ dle dosahované struktury.

3.3.1 Mikroskopie – po TZ

Postup zkoušky

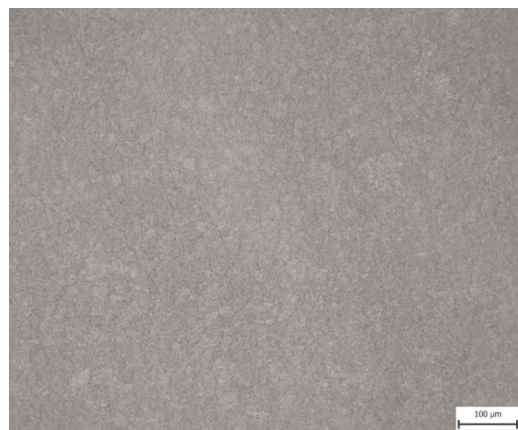
- Z AM tištěných zkušebních těles (9 válečků a 2 hranolky) byl pomocí metalografické pily příčně preparován vzorek o tloušťce 5 mm.
- Preparovaný vzorek byl zalisován pro snazší manipulaci.
- Pomocí metalografické brusky a leštičky byl zhotoven metalografický výbrus vzorku.
- Vzorky byly leptány.
- Jednotlivé vzorky byly analyzovány pomocí mikroskopu a byla zhotovena obrazová dokumentace vzorků.
- Zhotovené snímky byly dále analyzovány.

Naměřené hodnoty

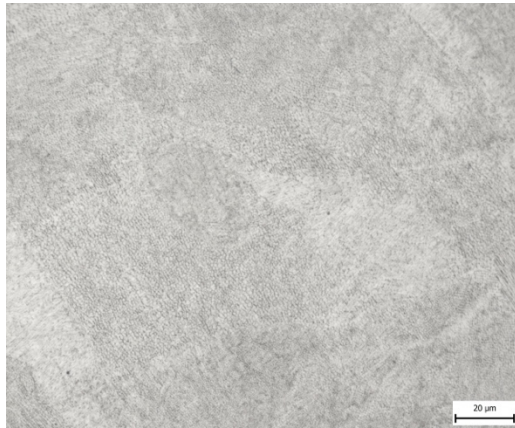
Pro snazší orientaci jsou níže uvedeny pouze vybrané snímky. Další snímková dokumentace je uvedena v sekci přílohy (příloha 1). Níže jsou uvedeny charakteristické snímky struktury materiálu H11 zpracovaného aditivní metodou a následně popuštěné při 450°C na obr. 26 a obr. 28 a vzorku připraveného konvenční cestou, zakaleného a následně popuštěného na obr. 27 a obr. 29.



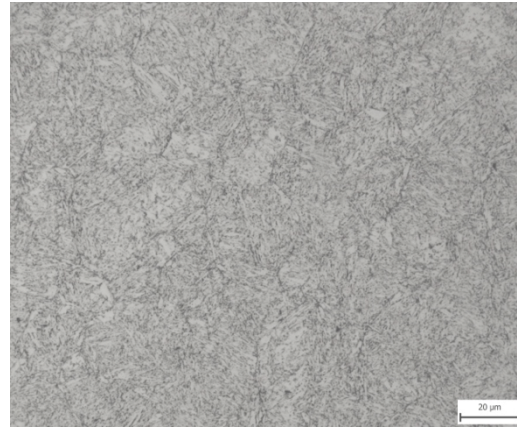
Obr. 26: H11-2-200x-3



Obr. 27: H11-8-200x-2

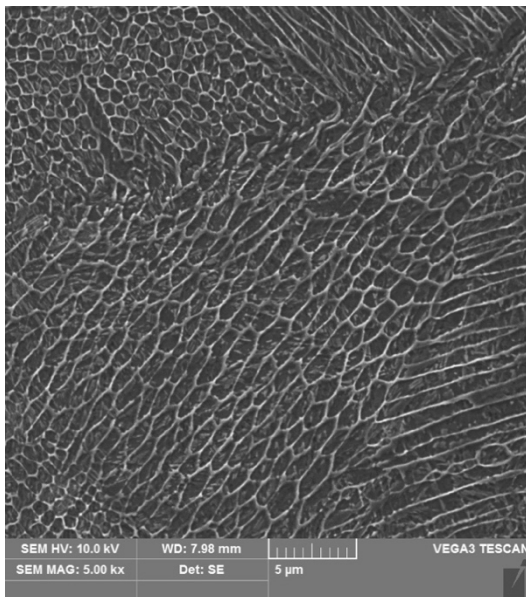


Obr. 28: H11-2-1000x-3

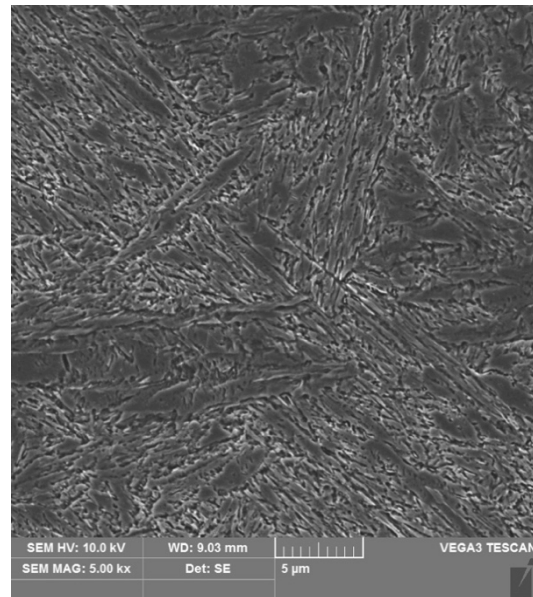


Obr. 29: H11-8-1000x-3

Z výše uvedených snímků se zdá, že výsledná struktura konvenčního vzorku je tvořena jemným martenzitem. Struktura aditivně připraveného materiálu se jeví rovněž martenzitická, ale jemnější. Zdá se, že latě martenzitu jsou u AM materiálu tvořeny latěmi kratšími, které připomínají buňky. Detail uveden na následujících snímcích. Snímek na obr. 30 představuje materiál zhotovený aditivní cestou, snímek na obr. 31 představuje strukturu konvenčního materiálu.



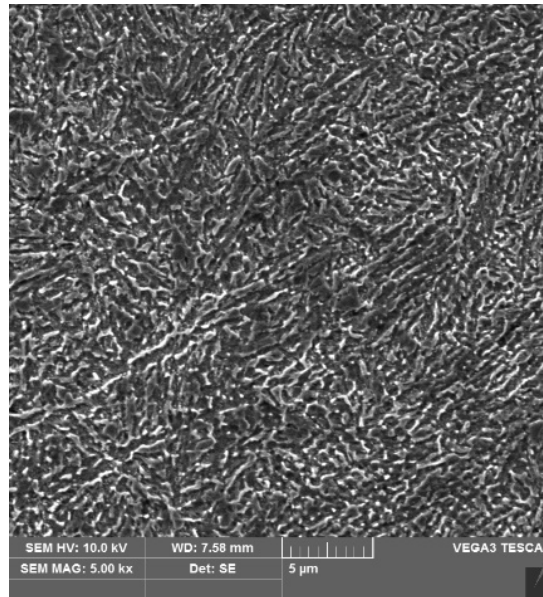
Obr. 30: 2-5000x-1



Obr. 31: 8-5000x-1

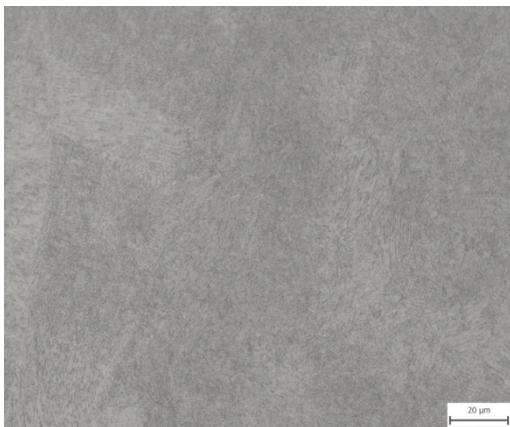
Při analýze vzorku pomocí elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že materiál zhotovený aditivní metodou tvoří velmi jemná struktura, která připomíná buňky. Tato struktura je velmi rovnoměrná v celé ploše výbrusu. Během analýzy vzorků bylo zjištěno, že struktura všech AM vzorků je téměř identická. Struktura většiny vzorků byla při zvětšení do 1 000 téměř nerozeznatelná od obr. 28.

Struktura AM materiálu se při vyšších teplotách TZ přibližuje struktuře konvenčních vzorků, buněčná struktura postupně přechází ve strukturu popuštěného martenzitu jako u konvenčního materiálu. Následující snímek znázorňuje mikrostrukturu AM tištěného vzorku popuštěného při teplotě 620°C po dobu 4 hodin, viz obr. 32.

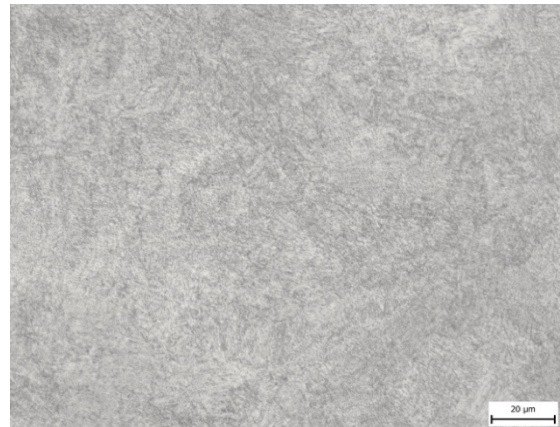


Obr. 32: 7-5000x-4

Důležitým cílem průzkumu bylo zjištění, jaký vliv má doba a opakování TZ na konečné vlastnosti vzorků. Níže jsou uvedeny snímky aditivně připravených vzorků, popuštěných při 500°C po dobu 2 h na obr. 33, po dobu 2x2 h na obr. 34 a po dobu 4 h na obr. 35.



Obr. 33: H11-4-1000x-1



Obr. 34: H11-3-1000x-2

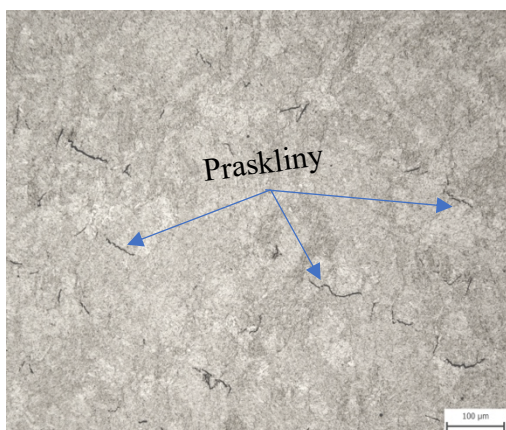


Obr. 35: H11-5-1000x-3

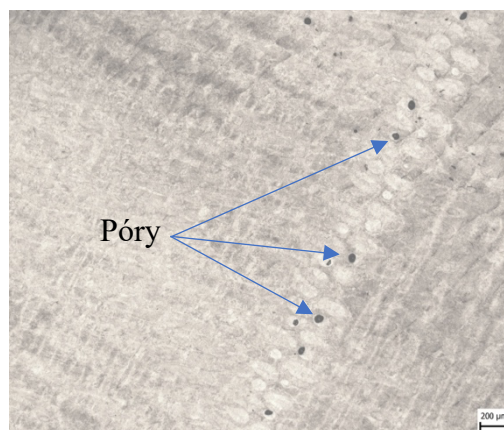
Ze zhotovených snímků se zdá, že doba popouštění nemá téměř žádný vliv na konečnou strukturu materiálu. Ve všech třech případech je struktura velmi jemná a do zvětšení 1 000 téměř nerozlišitelná. Uvažujme tedy, že doba popouštění má pouze malý význam na dosahovanou strukturu. Pokud i ostatní zkoušky potvrdí, že dobu popouštění je možné zkrátit pouze na dvě hodiny a tím ušetřit náklady na energeticky a časově náročný proces TZ, bude to mít pozitivní vliv na finanční náročnost procesu.

Na základě těchto dat lze tvrdit, že popouštění AM materiálu vede k dosažení velmi kvalitní struktury, která je velmi rovnoměrná a lze ji považovat za vyhovující při použití kterékoliv z uvedených testovaných variant parametrů TZ. K výraznému napodobení struktury konvenčního materiálu však dochází až při popouštění při vyšších teplotách, jak ukazuje obr. 32.

Navzdory skvělé struktuře jsou vzorky zhotovené AM značně postižené množstvím pórů a prasklin. Následující snímek znázorňuje póry nalezené v materiálu, obr. 37. Póry se vyskytují v řadách a zdá se, že se netvoří náhodně. Pravděpodobně jde o důsledek trajektorie působení laseru při zhotovování vzorků metodou SLM. Snímek na obr. 36 znázorňuje praskliny, které narušují povrch vzorků připravených AM. Vzorky z konvenčního materiálu jsou bez prasklin.



Obr. 36: H11-9-200x-2



Obr. 37: H11-3-50x-1

Tvorba pórů byla očekávaným důsledkem AM, avšak množství prasklin na některých vzorcích je značné a zřejmě má negativní důsledky na pevnost materiálu. Jelikož TZ bylo provedeno za pomalého stupňovitého ohřevu, je nepravděpodobné, že praskliny vznikly důsledkem TZ. Je možné, že praskliny vznikly důsledkem velkého vnitřního pnutí uvnitř vzorků po zpracování SLM ještě před provedením TZ. Jelikož vzorky nebyly úplně čerstvé, je možné, že časem došlo k samovolnému vzniku drobných prasklin uvnitř materiálu a tím k uvolnění tohoto vnitřního napětí v materiálu.

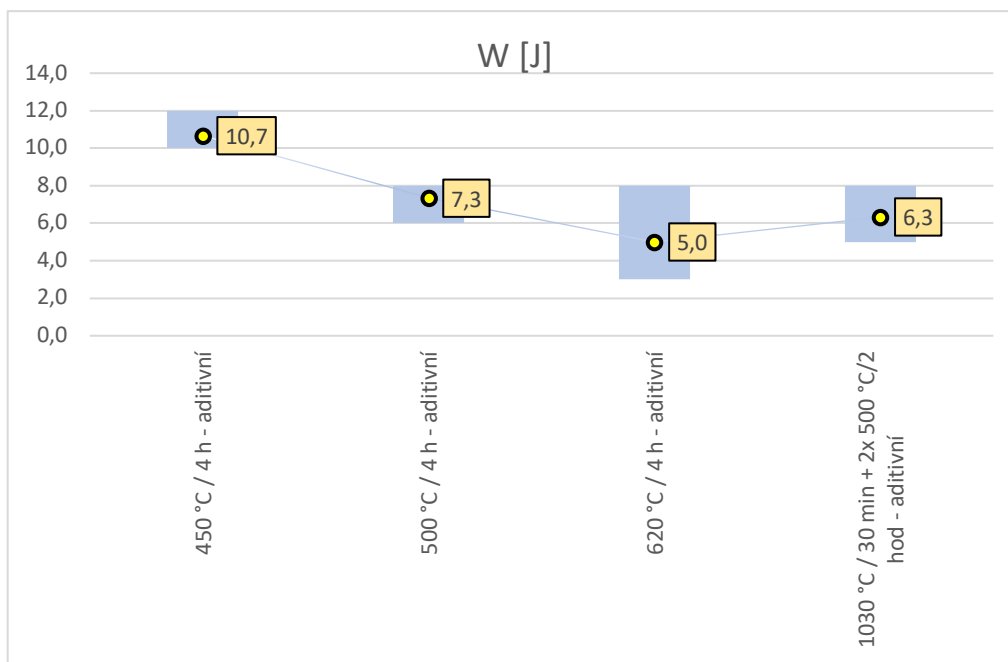
3.4 Mechanické vlastnosti

V této kapitole bude provedeno vyhodnocení mechanických zkoušek zkoumaného materiálu. Cílem je číselné ohodnocení vybraných vlastností zkoumaného materiálu po TZ a jejich popis v závislosti na parametrech TZ.

Měření rázové houževnatosti v ohybu

Měření rázové houževnatosti bylo provedeno na vzorcích po čtyřech vybraných tepelných zpracováních. Pro každý z vybraných procesů TZ byla tepelně zpracována tři zkušební tělesa za účelem minimalizace chyby měření. Naměřená data byla zprůměrována. Zkouška byla provedena Mechanickou zkušebnou Regionálního technologického institutu v Plzni.

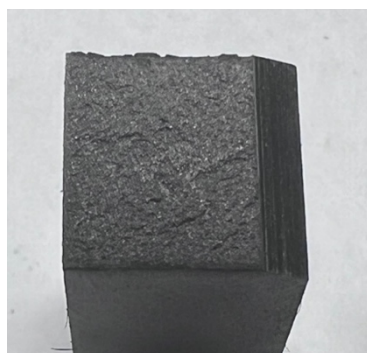
Zkušební tělesa byla opatřena vrubem tvaru V, následně došlo k umístění vzorků do Charpyho kladiva a jejich přeražení. Níže uvedený graf na obr. 38 znázorňuje průměrné zjištěné hodnoty rázové houževnatosti naměřené u vybraných zkušebních těles po TZ. Modrá pole znázorňují rozptyl naměřených hodnot.



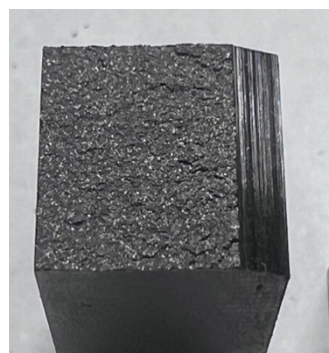
Obr. 38: Rázová houževnatost po TZ

Z naměřených dat se zdá, že vyšší teplota TZ vede k nižší hodnotě rázové houževnatosti. Hodnota naměřené rázové houževnatosti je nejvyšší v případě popouštění při teplotě 450°C po dobu 4 hodin bez přerušení. Snímek lomové plochy je znázorněn na obr. 39. Naopak nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku po TZ při 620°C / 4 hod. Snímek lomové plochy tohoto vzorku je uveden na obr. 40.

Ze snímků je zřejmé, že v obou případech se materiál choval podobně. V obou případech došlo k porušení zkoumaného materiálu křehkým lomem, ani jeden ze vzorků nevykazoval známky tvárného lomu.



Obr. 39: 450°C / 4 hod



Obr. 40: 620°C / 4 hod

3.4.1 Zkouška tvrdosti – po TZ

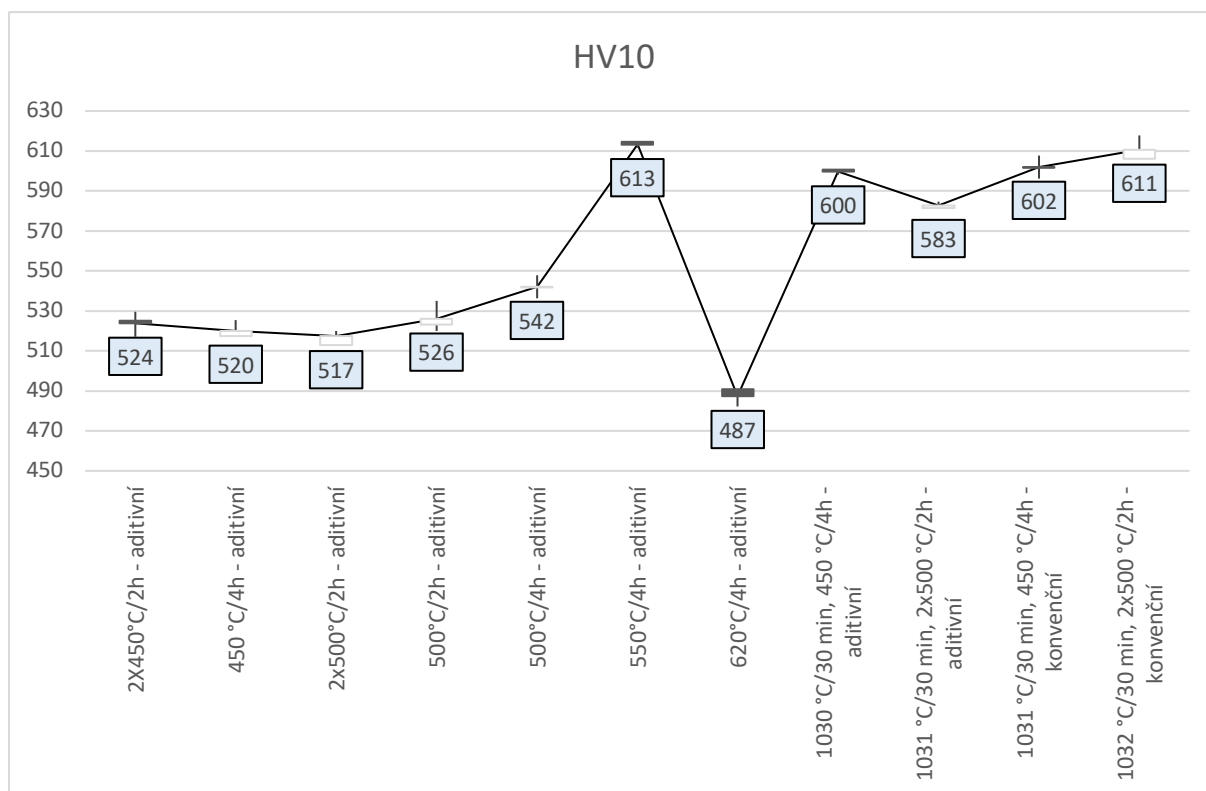
Jedná se o nejdůležitější z provedených zkoušek, protože tvrdost je parametr, podle kterého bude primárně vybírána optimální varianta TZ. U všech devíti AM připravených válečků a dvou konvenčně zhotovených hranolků byla měřena tvrdost podle Vickerse.

Postup zkoušky

- Pro měření tvrdosti byly použity stejné vzorky jako v případě mikroskopické analýzy.
- Vzorek byl umístěn do pracovního prostoru tvrdoměru.
- Byl proveden vtisk na povrchu zkušebního materiálu (pro každý vzorek 3 vtisky).
- Bylo provedeno měření vtisku.
- Bylo provedeno stanovení hodnoty HV10.
- Hodnota tvrdosti byla automaticky spočítána měřícím zařízením.
- Změřená hodnota byla zaevidována pro další vyhodnocení.

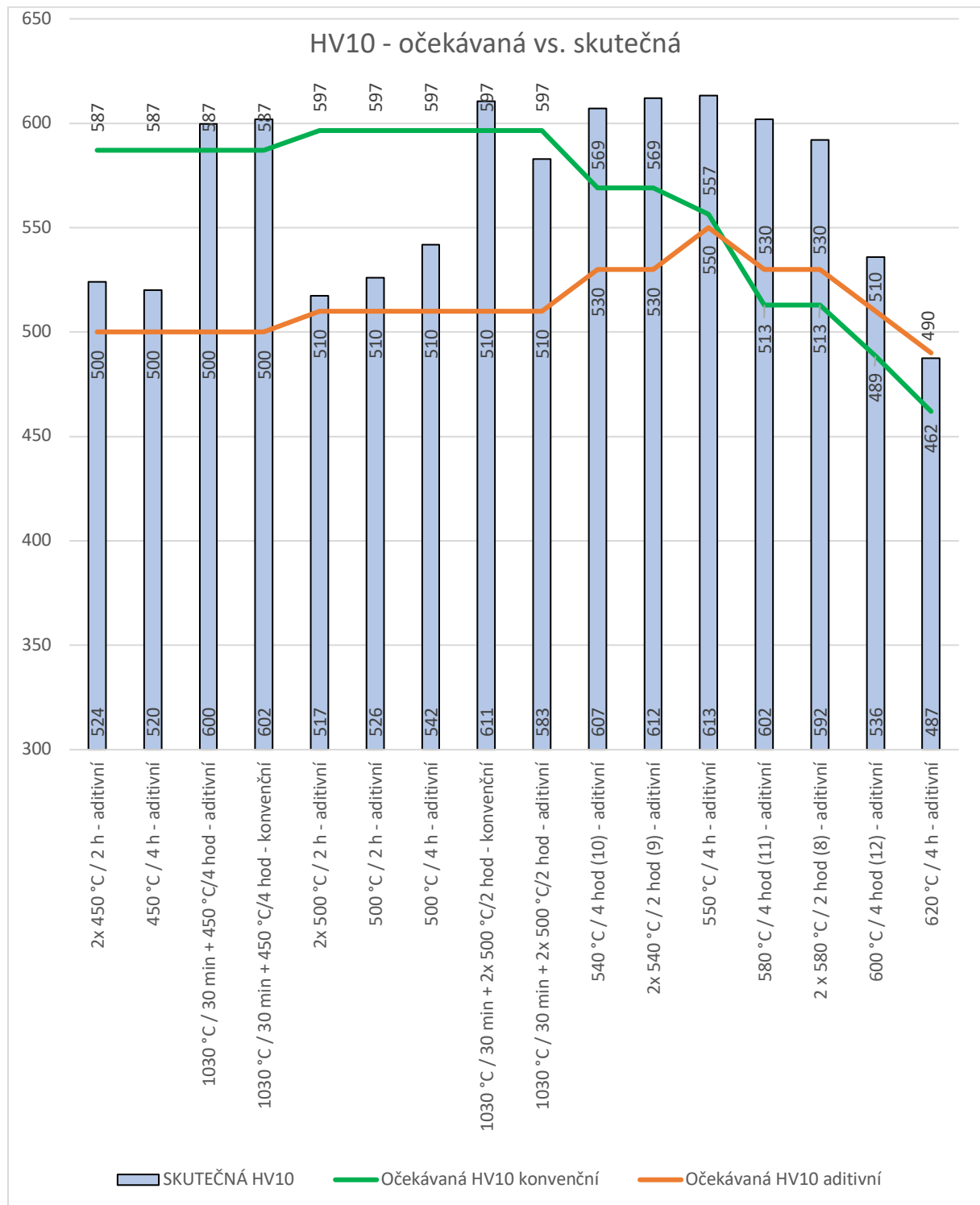
Naměřené hodnoty

Na níže uvedeném obrázku, obr. 41, je znázorněn graf s naměřenými hodnotami tvrdosti zkušebních testovaných vzorků pro jednotlivé parametry TZ. V modrých rámečcích jsou uvedeny průměry naměřených hodnot HV10.



Obr. 41: Naměřená data HV10

Experiment potvrdil, že materiál dosahuje nejvyšší hodnoty tvrdosti po popouštění při teplotě 550°C. Pro detailnější porovnání byla naměřená data rozšířena o další hodnoty zjištěné Metalografickou laboratoří Regionálního technologického institutu v Plzni. Rozptyl naměřených hodnot je velmi malý, do ± 10 HV10, proto bude dále použit pouze průměr naměřených hodnot. Znázornění průměrných naměřených hodnot, viz příloha 3, obrázek 70. Vybraná naměřená data v porovnání s předpokládanými dosaženými hodnotami tvrdosti uvedena na obr. 42.



Obr. 42: Očekávaná a skutečná HV10

Dle naměřených dat se zdá, že aditivně zpracovaný materiál má po zakalení podobné hodnoty tvrdosti jako materiál konvenční vyrobený za obdobných podmínek TZ. Trend vývoje tvrdosti po popouštění je velmi podobný očekávanému trendu dle obr. 22. Hodnota tvrdosti dosažená po procesu TZ je závislá na teplotě popouštění.

3.4.2 Tahová zkouška – po TZ

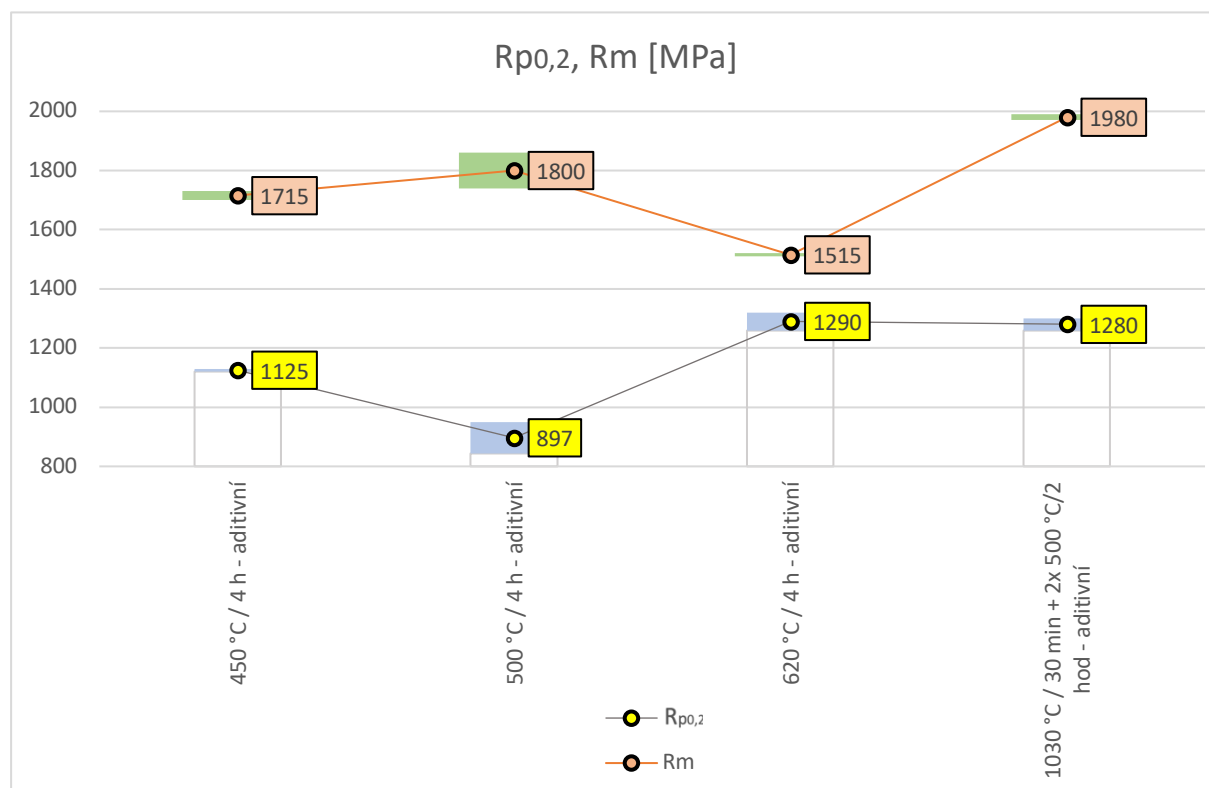
Pevnost v tahu byla určena jako další z významných parametrů pro určení optimální varianty TZ. Dále byla tahová zkouška provedena pro zjištění charakteru lomu zkoumaného materiálu. Vysoká hodnota pevnosti může představovat výhodný parametr pro zamýšlené použití v licích formách, kde bude materiál vystaven licímu tlaku. Měření bylo provedeno pro zkušební tělesa zpracovaná při následujících parametrech TZ, 450°C / 4 h, 500°C / 4 h, 620°C / 4 h a 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod, ve všech případech šlo o vzorky zhotovené aditivní cestou. Pro každý z uvedených procesů TZ byla zhotovena dvě zkušební tělesa.

Postup zkoušky

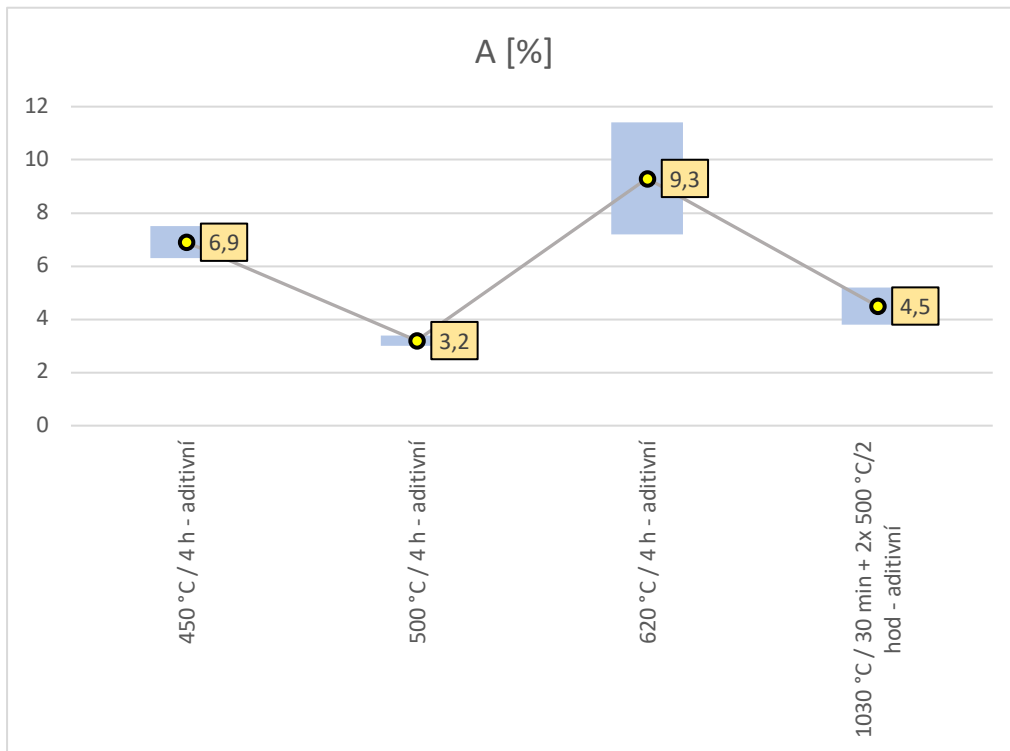
- Zkušební těleso bylo umístěno do čelistí univerzálního trhacího stroje.
- Na těleso bylo působeno silou ve směru osy tělesa, pro vyvolání napětí v tělese.
- Došlo ke vzniku napětí ve zkušebním tělese a jeho prodlužování a zužování.
- Došlo k přetržení zkušebního tělesa.
- Analýzou dat z univerzálního trhacího stroje byla stanovena hodnota meze pevnosti, kluzu a kontrakce zkušebního tělesa.

Naměřené hodnoty

Na níže uvedeném obrázku obr. 43 je znázorněn graf s naměřenými hodnotami meze pevnosti a kluzu vybraných testovaných vzorků. Na obr. 44 je graf jejich zjištěných tažností. Tyto hodnoty jsou výsledkem měření provedeného Mechanickou zkušebnou Regionálního technologického institutu v Plzni. Modrá a zelená pole znázorňují rozptily naměřených hodnot. Číslice v rámečcích představují průměry zjištěných hodnot.



Obr. 43: Naměřená data $R_{p0,2}$, R_m [MPa]



Obr. 44: Naměřená data A [%]

Experimentálně bylo zjištěno, že zkoumaný AM materiál dosahuje nejvyšší pevnosti v tahu po popouštění při teplotě 500°C. Snímek zkušebních těles po přetržení uveden na obr. 45. Na obr. 46 je znázorněna lomová plocha jednoho z těchto vzorků.

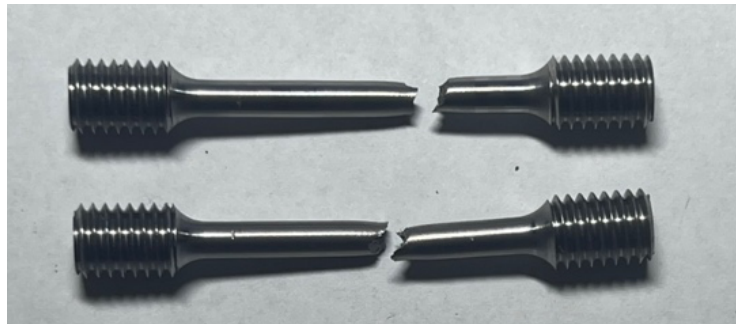


Obr. 45: Zkušební tělesa 500°C / 4 hod



Obr. 46: Lom zkušebního tělesa 500°C / 4 hod

Předchozí snímky potvrzují data získaná ze zkoušek vrubové houževnatosti. Zkoumaný materiál se chová křehce. To bylo ověřeno i kontrolou vzorku s nejvyšší hodnotou meze kluzu, po TZ při 620°C / 4 hod, viz obr. 47. Jeho lomové plochy, viz obr. 48.



Obr. 47: Zkušební tělesa 620°C / 4 hod

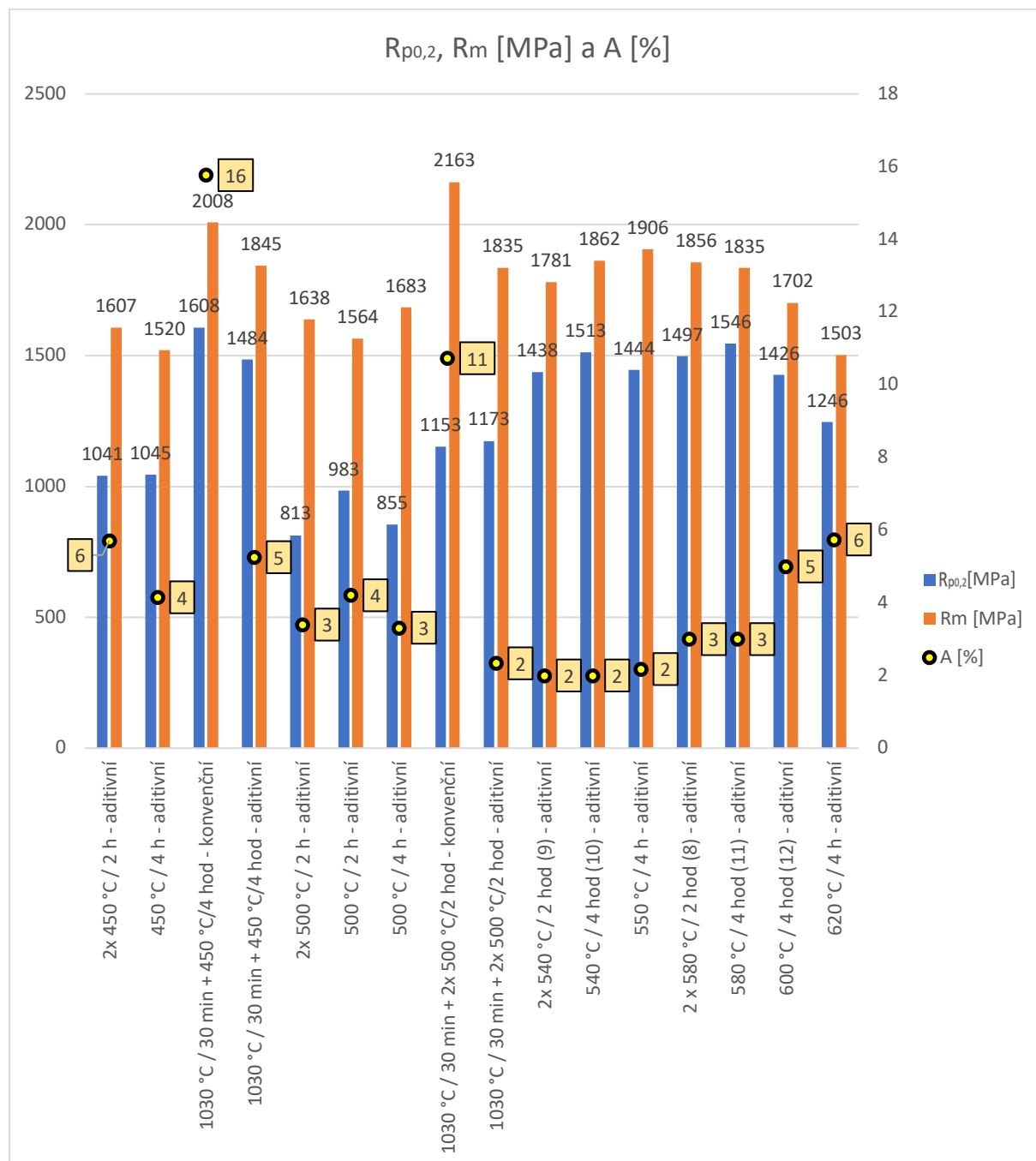


Obr. 48: Lom zkušebního tělesa 620°C / 4 hod

V případě vyšší teploty popouštění se materiál choval výrazně více houževnatě, i tak však došlo jen k malému zúžení, a ne příliš výrazné tvorbě krčku.

Dle obr. 43 se zdá, že konvenční postup, kdy je zařazeno navíc kalení, vede při obdobných parametrech popouštění k vyšší hodnotě pevnosti. Nejvyšší hodnota meze kluzu byla naměřena u vzorku popouštěném při teplotě 620°C. Zdá se, že hodnota meze kluzu stoupá s teplotou popouštění, hodnota meze pevnosti však se zvyšující se teplotou popouštění klesá.

Pro detailnější porovnání byla naměřená data rozšířena o další hodnoty zjištěné Mechanickou zkušebnou Regionálního technologického institutu v Plzni. Konkrétně o data zjištěná pomocí minitahových zkoušek. Průměrné naměřené hodnoty uvedeny v příloze 3, obrázek 71 a 72. Vybraná naměřená data pevností a tažností, viz obr. 49.



Obr. 49: Porovnání průměrných hodnot $R_{p0.2}$, R_m a A vybraných vzorků

Hodnoty dosahované meze pevnosti při teplotách popouštění 540 až 580°C se výrazně neodlišují. Mez kluzu roste do teploty popouštění 580°C, pak dochází k jejímu poklesu. Po překročení teploty popouštění 580°C dochází k razantnímu poklesu i u hodnot meze pevnosti. Při zařazení procesu kalení dosahoval materiál nejvyšší naměřené hodnoty meze pevnosti, mez kluzu měl však nízkou v porovnání s většinou ostatních vzorků. Nejvyšší hodnota tažnosti byla naměřena u konvenčního vzorku kaleném a následně popouštěném při 450°C po dobu 4 hodin, průměrná naměřená hodnota tažnosti zde byla 16%.

4 Diskuse výsledků

Experimentálně bylo zjištěno, že TZ skutečně může vést k dosažení mechanických vlastností a mikrostruktury podobným těm u konvenčně vyráběných forem. Aditivně zhotovený materiál se po zakalení chová podobně jako materiál konvenční a za obdobných podmínek následného popouštění dosahuje podobných hodnot tvrdosti. Naměřená data tvrdosti byla ve shodě s očekávanými hodnotami, čímž se potvrdilo, že nejekonomičtější cestou pro dosažení nejvyšší tvrdosti materiálu je popouštění při 550°C. Vyšší tvrdosti dosáhnout lze, avšak za předpokladu zařazení procesu kalení do procesu TZ. V případě, že by po procesu kalení žádné další TZ nenásledovalo, materiál by pravděpodobně dosahoval hodnoty tvrdosti blízké 678 HV10. Zařazením opakovaného popouštění po procesu kalení při teplotě 550°C po dobu dvakrát jedné hodiny lze očekávat snížení tvrdosti na hodnotu 620 HV10. Obecně se však nedoporučuje ponechávat zkoumaný materiál pouze v zakaleném stavu. Vlivem vnitřního pnutí by pravděpodobně časem docházelo k vývoji trhlin uvnitř materiálu a forma by tak byla nenávratně poškozena. Hodnota tvrdosti materiálu pouze po popouštění se od hodnoty tvrdosti materiálu po kalení a následném popouštění dle naměřených dat lišila pouze o 7 HV10. Dosahovaná hodnota tvrdosti po kontinuálním popouštění při teplotě 550°C a době popouštění 4 hodiny byla 613 HV10. Výhodnost zařazení kalení do procesu TZ se tedy zdá být značně nízká.

Experimentálně bylo zjištěno, že v případě materiálu H11 je téměř bezvýznamné rozlišovat TZ kontinuální a opakované. Dosahovaná tvrdost je pak srovnatelná s druhou variantou a nezdá se, že by jedna z nich byla stabilně výhodnější. Při popouštění při teplotě 450 a 540°C bylo výhodnější provést TZ opakovaně, při teplotách 500 a 580°C byla vyšší hodnota tvrdosti dosažena při kontinuální TZ. Ve všech případech však byl rozdíl v dosahovaných hodnotách tvrdosti velmi nízký a pohyboval se v jednotkách HV10.

Mikrostruktura konvenčního a aditivně zhotoveného materiálu se při světelné mikroskopii jevila velmi podobná (příloha 1). Vzorky se lišily hlavně přítomností pórů a prasklin v tištěném materiálu. Všechny vzorky byly tvořeny jemným martenzitem.

Skenováním pomocí elektronového mikroskopu se podařilo získat snímky konvenčně vyráběného materiálu po kalení a popouštění a materiálu připraveného AM po popouštění při 450°C a 620°C. Po porovnání snímků (příloha 2) se zdá, že při vyšší teplotě popouštění dochází k dokonalejšímu napodobení struktury konvenčního materiálu. Při TZ o teplotě popouštění 450°C byla zjištěna velmi specifická struktura připomínající buňky, při zkoumání světelným mikroskopem se jevila jako velmi jemný martenzit a od struktury konvenčního materiálu byla obtížně rozlišitelná.

Významnou nedokonalostí materiálu H11 po AM je přítomnost pórů, které byly nalezeny u většiny zkoumaných AM vzorků. Jednalo se o řady pórů, které se křížily v oblasti podélné osy vzorků. Pravděpodobně jde o důsledek nastavení trajektorie laseru v průběhu zhotovování vzorku. Žádné z provedených TZ zřejmě není schopné odstranit vzniklé póry ve zpracovávaném materiálu.

Při snímkování vzorků pomocí světelné mikroskopie bylo pravděpodobně neplánovaně potvrzeno působení vnitřního pnutí uvnitř zkoumaného materiálu. U většiny ze zkoumaných vzorků bylo nalezeno množství prasklin uvnitř materiálu. Vzorky, které byly podrobeny TZ, nebyly zcela nové. Uvažujme tedy, že praskliny v materiálu byly důsledkem uvolnění vnitřního pnutí materiálu, které v tomto materiálu vzniklo jako důsledek tvorby metodou SLM.

Tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti ukázaly křehké chování zkušebního materiálu, a to i po TZ. Zřejmě jde o důsledek martenzitické struktury materiálu a přítomných vad v materiálu. Hodnota meze pevnosti při popouštění na 550°C byla 1 906 MPa, dále bylo provedeno měření při teplotě 540°C (pevnost 1 862 MPa po 4 hodinách) a při 580°C (pevnost 1 835 MPa po 4 hodinách). Ani u tahových zkoušek se nepotvrdila jednoznačná závislost mezi

nepřetržitým a postupným popouštěním. Pro dosažení maximální meze pevnosti by bylo vhodné materiál zakalit a poté provést popouštění dvakrát po dobu dvou hodin při teplotě 550°C, v případě přímého popouštění bez zařazení kalení bude pravděpodobně nejvýhodnější opět popouštění při teplotě 550°C. Při této teplotě bude dosažena maximální mez pevnosti, jelikož hodnoty rostou zleva i zprava k tomuto bodu hodnoty teploty popouštění, viz obr. 49.

Trend vývoje meze kluzu je velmi podobný trendu meze pevnosti a zdá se, že i v tomto ohledu bude TZ při teplotě 550°C přijatelné. Při této teplotě TZ lze očekávat hodnotu meze kluzu blízkou 1 444 MPa. To je jedna z nejvyšších naměřených hodnot meze kluzu. Hodnota 1 444 MPa je méně než hodnoty naměřené v případě popouštění při teplotách 540 nebo 580°C, ale rozdíl těchto hodnot je maximálně 102 MPa. Bohužel se potvrdila obava, že při vysoké mezi pevnosti bude materiál jen velmi omezeně tažný. Hodnota tažnosti u takto zpracovaného materiálu bude pravděpodobně 2 %. Horší tažnost by se dala očekávat například u materiálu po kalení bez dalšího TZ.

Zkoušky rázové houževnatosti vycházejí lépe pro popouštění za nižších teplot. Při popouštění při 450°C byla naměřena hodnota 10,7 J, při popouštění při 620°C byla naměřena hodnota méně než poloviční. Z toho usuzuji, že lze při popouštění při teplotě 550°C očekávat hodnotu rázové houževnatosti blízkou 6 J. Zkouška rázové houževnatosti se ukázala jako jediná, kde proces tepelného zpracování konvenčního materiálu nevedl k dosažení lepšího výsledku. Při teplotě popouštění 500°C po kalení dosáhl konvenční materiál hodnoty 6,3 J, což je o 1 J méně než materiál AM. Zde však mohl hrát roli rozdíl v době popouštění. AM materiál byl popouštěn nepřetržitě, konvenční 2x2 hodiny. Avšak, vzhledem k předchozím měřením tato odlišnost pravděpodobně neměla příliš velký vliv.

Experiment potvrdil, že TZ skutečně může vést k přiblížení mechanických vlastností vlastnostem konvenčně vyráběných forem.

5 Závěr

Prvním krokem při návrhu TZ bylo zjištění informací o technologii konvenční výroby licích forem, TZ konvenčně zhotovovaných forem a mechanických vlastnostech konvenčně vyráběných forem. Dalším krokem byl výzkum mechanických vlastností a mikrostruktury materiálu komponent zhotovených metodou 3D tisku. Při návrhu TZ bylo využito dat z již provedených studií materiálu H11 a informací, které doporučují výrobci oceli H11. Ke zjištění dalších dat pro návrh experimentu byla využita i data o materiálu H13, který je materiálu H11 velmi podobný.

Výzkum ukázal, že materiál po zpracování AM má velmi vysoké hodnoty tvrdosti a jeho mikrostruktura je tvořena velmi jemným martenzitem. Struktura martenzitu u aditivně zhotoveného materiálu je velmi zajímavě uspořádaná a specifická, se zvyšující teplotou popouštění však dochází k stále dokonalejšímu napodobení mikrostruktury konvenčně zhotovovaného materiálu.

Rešerší bylo zjištěno, že jedním z nejdůležitějších negativních účinků na povrch formy má opotřebení v důsledku cyklického tepelného namáhání od roztaveného licího materiálu. Trvanlivost forem se určuje právě podle meze tepelné únavy, podle doby, po jakou materiál odolává tvorbě prasklin. Bylo zjištěno, že vyšší tvrdost materiálu má pozitivní vliv na trvanlivost materiálu proti tepelné únavě oproti materiálu s menší tvrdostí.

Proces experimentálního tepelného zpracování byl proveden na sérii vzorků. Parametry TZ testovaných vzorků byly 2x 450°C / 2 h, 450°C / 4 h, 1 030°C / 30 min + 450°C / 4 hod, 2x 500°C / 2 h, 500°C / 2 h, 500°C / 4 h, 1 030°C / 30 min + 2x 500°C / 2 hod, 550°C / 4 h, 620°C / 4 h.

Experimentálně bylo zjištěno, že TZ vede ke změně tvrdosti, pevnosti v kluzu, mezi pevnosti i hodnotě tažnosti. Změny se mohou projevit i v jemnosti struktury a na rázové houževnatosti.

Mechanické zkoušky tvrdosti byly provedeny pomocí měřicího zařízení, respektive tvrdoměru Vickerse. Hodnoty pro tahovou zkoušku byly zjištěny tahovými zkouškami. Analýza mikrostruktury byla provedena analýzou snímků mikrostruktury zkušebních vzorků po tepelném zpracování světelnou a elektronovou mikroskopií.

Ze zjištěných a změřených dat lze předpokládat, že pro maximální napodobení mechanických vlastností konvenčně vyráběných forem, a to zejména s ohledem na parametr tvrdosti, je nejvhodnějším TZ popouštění při teplotě 620°C po dobu 4 h nepřerušovaně, čímž dojde k nejpřesnějšímu napodobení očekávané tvrdosti konvenčně zpracovaného materiálu, následně lze očekávat hodnotu tvrdosti blízkou 487HV10. V případě snahy o dosažení maximální hodnoty tvrdosti, snížení vnitřního pnutí a zachování rozumné hodnoty meze pevnosti a kluzu v tahu, je nejvhodnějším TZ popouštění při teplotě 550°C. Lze použít popouštění kontinuální i přerušované, oba postupy budou dosahovat pravděpodobně shodných, nebo velmi podobných výsledků.

Dále bylo zjištěno, že zkrácení doby popouštění na dvě hodiny je rovněž možné. Pravděpodobně nedojde k tak dokonalému potlačení vlivu vnitřního pnutí, tvrdost materiálu však pravděpodobně bude stejná. Toto bylo potvrzeno experimentálním popouštěním při teplotě 500°C po dobu 2, 4 a 2x2 hodin. V tomto případě dosáhl největší tvrdosti materiál popouštěný po dobu 4 hodin. Nejnižší tvrdost měl materiál popouštěný dvakrát po dobu dvou hodin. U materiálu popouštěného po dobu dvou hodin byla naměřena tvrdost 526 HV10, viz příloha 3.

Je nutno brát v úvahu, že struktura je sice zásadní pro vlastnosti materiálu forem ale není to jediný faktor. Jako předmět dalšího výzkumu navrhuji zkoumat možnosti odstranění pórovitosti materiálu. Bohužel, žádné z dosud provedených tepelných zpracování tento problém nebylo schopno odstranit.

6 Reference

- [1] MAYER, S. et al. Influence of the Cooling Rate on the Mechanical Properties of a Hot-work Tool Steel, *Springer link* [online], BHM Berg-und Huttenmannische Monatshefte 152, 132-136, © 2007, [cit. 3. 11. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00501-007-0285-x>.
- [2] AMIYU. Tepelné zpracování oceli v zápustce H13, *AmiiYu automation machinery equipment co*, [online], © 10. 10. 2018, [cit. 19. 12. 2022]. Dostupné z: <https://cz.cnvacuumfurnace.com/info/h13-hot-work-die-steel-heat-treatment-67531752.html>.
- [3] LESKOVŠECH, V. et. al. The influence of austenitizing and tempering temperature on the hardness and fracture toughness of hot-worked H11 tool steel, *Science Direct* [online], Journal of Materials Processing Technology 178, 1-3, © 2006, [cit. 24. 10. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.016>.
- [4] OERLIKON. Tlakové lití s výkonnými povlaky Balinit, *Oerlikon Bazlers* [online], [cit. 3. 11. 2022]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwie1-Ww56v-AhXKhf0HHXyzDiwQFnoECAsQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.oerlikon.com%2Fecomaxl%2Ffiles%2Fbalzers%2Foerlikon_HQ160CZ_Die_Casting.pdf%26download%3D1&usg=AOvVaw2Emf0HfH4dFMo3jeny2slR.
- [5] MARKFORGED. Materiálový list Nástrojová ocel H13, *Markforged* [online], © 2. 7. 2018, [cit. 3. 3. 2023]. Dostupné z: <https://www.3d-tiskarna.cz/wp-content/uploads/2021/03/h13-tool-steel.pdf>.
- [6] BOGNER. E. Materiálový list 1.2343, *Bogner edelstahl* [online], [cit. 7. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.bogner.cz/files/lists/1-2343.pdf>
- [7] ŠVANDA, P. Legující prvky ocelí, *Knife* [online], © 10. 10. 2000, [cit. 3. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Knifecz/Technika/tabid/57/ctl/Details/mid/384/ItemID/40/Default.aspx>.
- [8] FABORY. Vliv legujících prvků, *Fabory* [online], © 2023, [cit. 2. 1. 2023]. Dostupné z: https://www.fabory.com/cs/knowledge_center/technical/steel/influence_of_alloying_elements
- [9] PRVKY. Periodická tabulka, *Prvky* [online], © 2021, [cit. 14. 11. 2022]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>.
- [10] MORAVEC, Z. Zinek, *Web o chemii, elektrotechnice a programování* [online], © 11. 1. 2022, [cit. 13. 12. 2022]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/periodicka-soustava-prvku/zinek/>.
- [11] POHOŘELSKÝ, M. Zinek, *Multimedia* [online], © 11. 10. 2021, [cit. 17. 11. 2022]. Dostupné z: <http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Zinek>.

- [12] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80 - 720-4248-3.
- [13] FREMUNT, P. et al. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
- [14] NĚMEC K. *Nástrojové oceli*, [online], © 2007, [cit. 15. 3. 2022]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/07%20-%20Nastrojove%20oceli.pdf.
- [15] TOOLSTEEL. 1.2343 / X37CrMo5-1 / X38CrMoV5-1 / 19552, *ToolSteel* [online], © 2019, [cit. 13. 11. 2022]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2343-x37crmo5-1-x38crmov5-1-19552/>.
- [16] ŁUKASZEWICZ, G. et. al. Interrupted quenching and bainitising below Ms temperature of EN X37CrMoV5-1 hot-work tool steel: Bainitic transformation kinetics, microstructure and mechanical properties, *Science Direct* [online], Materials Science and Engineering: A, 869, 144740, ISSN 0921-5093, © 2023, [cit. 22. 5. 2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144740>.
- [17] KNIFE. Materiálový list 19552-H11, *Knife* [online], [cit. 4. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Default.aspx?tabid=53&g=posts&t=38347>
- [18] MEUSBURGER. 1.2343/1.2343 ESU Hot-work steel, *Meusburger* [online], © 2022, [cit. 18. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.meusburger.com/CS/CZ/material-grades/12343-12343-esr-hot-work-steel-die-making>.
- [19] MEPAC. Materiál 1.2343, *Mepac* [online], [cit. 18. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.mepac-eshop.cz/cs/las-12343>.
- [20] JKZ. Materiál 1.2343 ESU, *JKZ* [online], [cit. 24. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12343-esu/>.
- [21] VOESTALPINE. Aditivní výroba, *High Performance Metals CZ* [online], © 2023 [cit. 2. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/luzeb/aditivni-vyroba/>.
- [22] HOMOLA, J. 3D-tisk kovů, *3D tisk* [online], © 27. 1. 2022 [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/kolik-stoji-3d-tisk-z-kovu/>.
- [23] WINSTON, A. Arup unveils its first 3D-printed structural steel building components, *Dezeen* [online], © 11. 6. 2014, [cit. 19. 2. 2023] Dostupné z: <https://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>.
- [24] HUBER, F. et. al. Laser beam melting and heat-treatment of 1.2343 (AISI H11) tool steel – microstructure and mechanical properties, *Science Direct* [online], Materials Science and Engineering: A, 742, © 2019, [cit. 2. 11. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.001>.

- [25] BOLZANO. Zpracování nástrojových ocelí, *Bolzano Bohdan* [online], [cit. 14. 9. 2022]. Dostupné z: <https://tpbolzano.cz/wp-content/uploads/2021/07/Zpracovani-nastrojovych-oceli.pdf>.
- [26] TUMLIKOVO. Proces žihání, *TumliKOVO* [online], © 6. 12. 2010, [cit. 8. 10. 2022] Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/proces-zihani/>.
- [27] COJECO. IRA-diagram, *CoJeCo* [online], © 29. 8. 2006, [cit. 4. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.cojeco.cz/ira-diagram>.
- [28] KNIFE. Tepelné zpracování ocelí, *Knife* [online], © 28. 4. 2011, [cit. 5. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Default.aspx?tabid=53&g=posts&t=10415>.
- [29] GNEE. Nástrojová ocel H13, *GNEE Multinational co.* [online], [cit. 2. 12. 2022]. Dostupné z: <http://m.cz.cortensteels.com/tool-steel/h13-tool-steel.html>.
- [30] PRECIZ. 1.2343, *Preciz s. r. o.* [online], © 2016, [cit. 27. 11. 2022]. Dostupné z: <https://www.preciz.cz/sluzby/prevodnik-materialu/details/1/6-6>.
- [31] LENTUS. 1.2343 ESU, *Lentus spol. s. r. o.* [online], © 2023, [cit. 1. 1. 2023]. Dostupné z: <https://www.lentus-ocel.cz/12343-esu>.
- [32] LKALLOY. Tepelné zpracování horké oceli H13, *Lkalloy* [online], © 14. 11. 2019, [cit. 8. 9. 2022]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/the-heat-treatment-of-h13-hot-steel/>.
- [33] JFS. SKD61, *Ju Feng special steel co.* [online], © 2023, [cit. 11. 1. 2023]. Dostupné z: [SKD61-Chromové nástrojové oceli pro práci za tepla | Více než 47 let služby CNC soustružení a frézování oceli | JFS Steel \(jfs-steel.com\)](https://www.jfs-steel.com/skd61-chromove-nastrojove-oceli-pro-praci-za-tepla-vic-nez-47-let-sluzby-cnc-soustruzeni-a-frezovani-oceli).
- [34] HASCO. Material data sheet 1.2343, *Hasco* [online], © 11. 2017, [cit. 28. 11. 2022]. Dostupné z: https://media.hasco.com/marketing/Produkt/WDB/EN/1.2343_WDB_EN.pdf.
- [35] FUSHUN. 1.2343 H11 Hot Work Steels, *Fushun special steel co.* [online], © 2013, [cit. 5. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.fushunspecialsteel.com/1-2343-h11-hot-work-tool-steel/>.
- [36] GNEESTEEL. AISI H11, *GNEE multinational trade co.* [online], © 29. 8. 2006, [cit. 22. 11. 2022]. Dostupné z: <https://cz.gneeacero.com/tubos-de-acero/aceros-de-aleacin/aisi-h13.html>.
- [37] BAJAJ, P. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties, *Science Direct* [online], Materials Science and Engineering: A, 772, © 2020, [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633>.
- [38] CASATI, R. et al. Microstructure and mechanical behavior of hot-work tool steels processed by Selective Laser Melting, *Science Direct* [online], Materials Characterization, 137, © 2018, [cit. 28. 10. 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580317332539>.

[39] IKS PVD. Vakuové tepelné zpracování, *IKS PVD technology co.* [online], © 4. 11. 2019, [cit. 26. 10. 2022]. Dostupné z: <https://cz.iksvacuum.com/info/what-is-vacuum-heat-treatment-processing-techn-%2034127593.html>.

[40] MARKOŽIČ, R. Time and temperature dependent softening of H11 hot-work tool steel and definition of an anisothermal tempering kinetic model, *Science Direct* [online], *Materials Today Communications*, 22, © 2020, [cit. 5. 11. 2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100744>.

[41] ISO 6892-1. ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310) Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty

[42] ČSN EN ISO 14556. ČSN EN ISO 14556 (420380), Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda

[43] ODBORNÁ ZPRÁVA_FW03010323_2021.pdf (dostupné v systému ista.tacr.cz)

[44] ODBORNÁ ZPRÁVA_FW03010323_2022.pdf (dostupné v systému ista.tacr.cz)

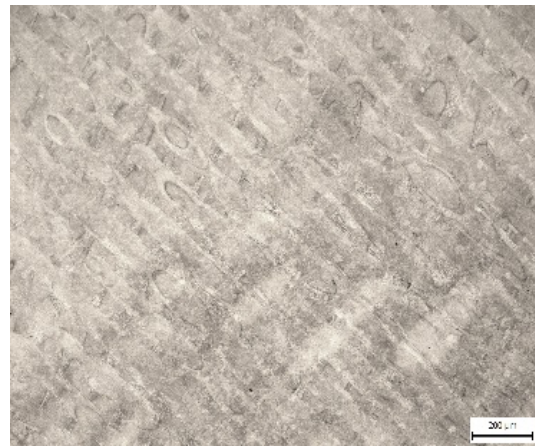
PŘÍLOHA č. 1

FOTODOKUMENTACE **Světelná mikroskopie**

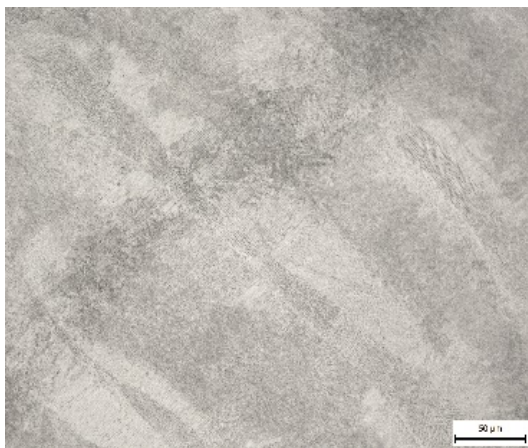
Vzorek 1 - aditivní: 2x 450°C / 2 h



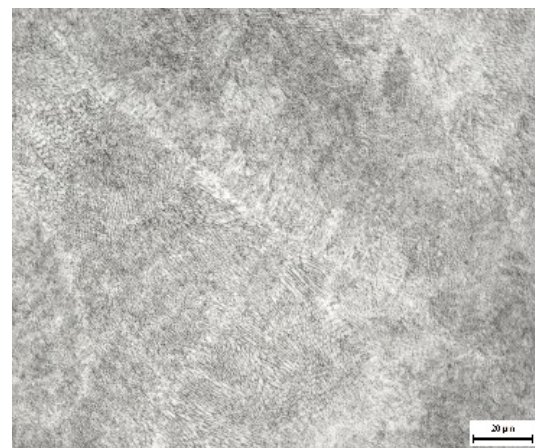
Obrázek 1: H11-1-50x-3



Obrázek 2: H11-1-100x-3



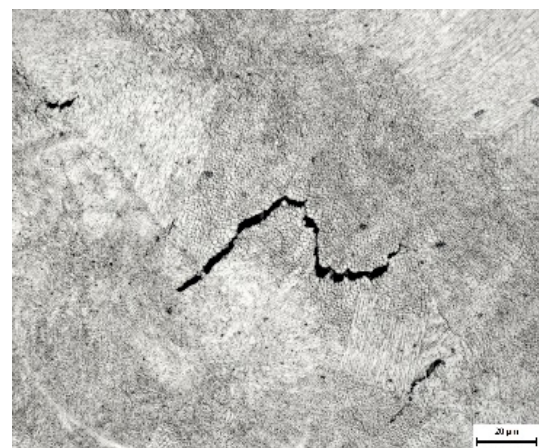
Obrázek 3: H11-1-500x-1



Obrázek 4: H11-1-1000x-2



Obrázek 5: H11-1-50x-2- póry

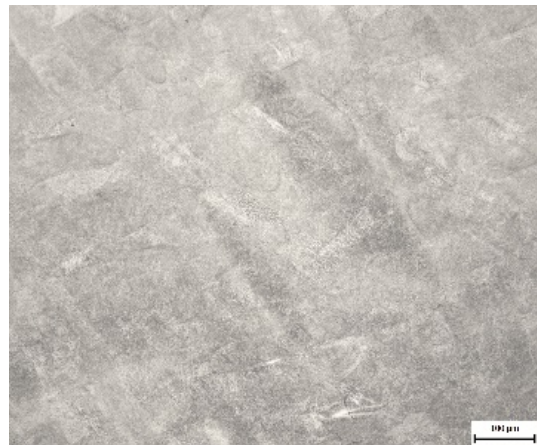


Obrázek 6: H11-1-1000x-3- prasklina

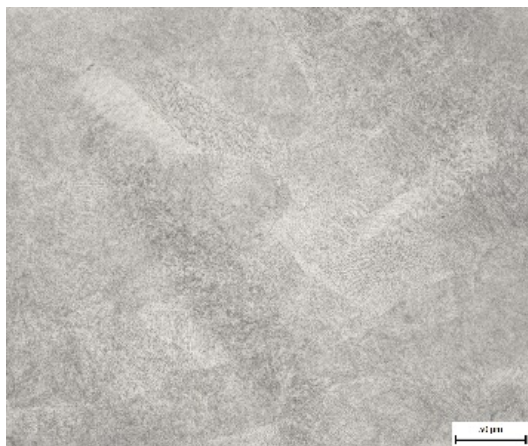
Vzorek 2 - aditivní: 450°C / 4 h



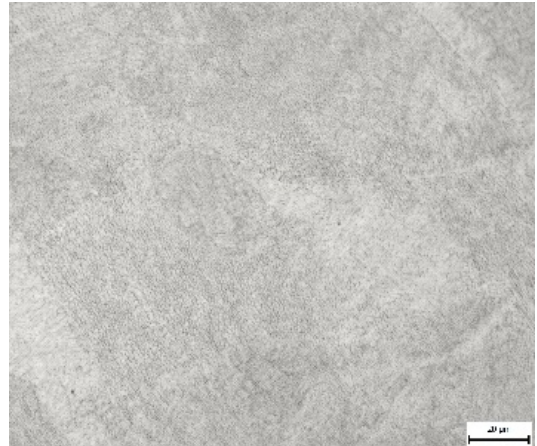
Obrázek 7: H11-2-100x-1



Obrázek 8: H11-2-200x-3



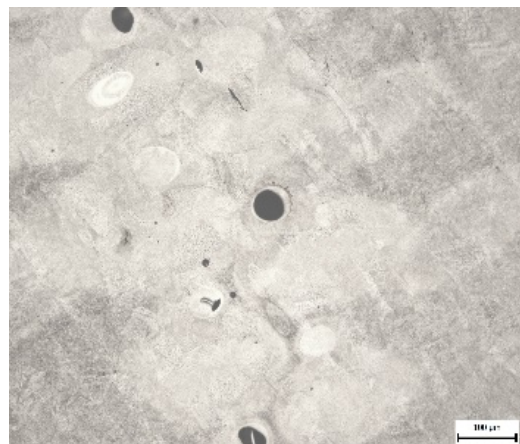
Obrázek 9: H11-2-500x-1



Obrázek 10: H11-2-1000x-3



Obrázek 11: H11-2-50x-2 - póry



Obrázek 12: H11-2-200x-2 - póry

Vzorek 3 - aditivní: 2x 500°C / 2 h



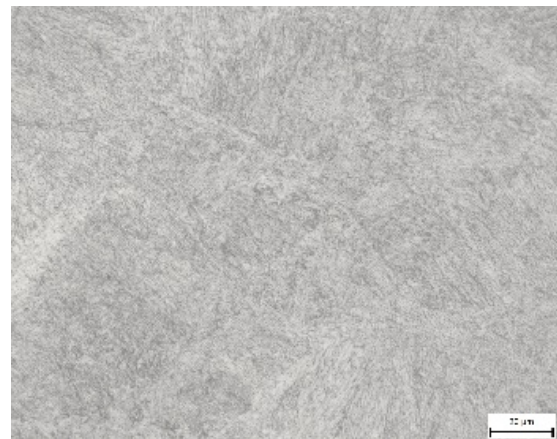
Obrázek 13: H11-3-50x-3



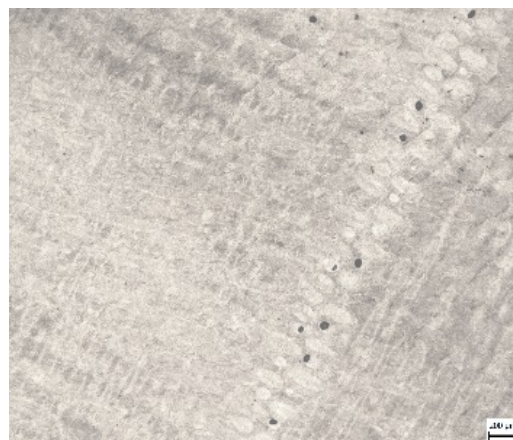
Obrázek 14: H11-3-200x-1



Obrázek 15: H11-3-500x-3

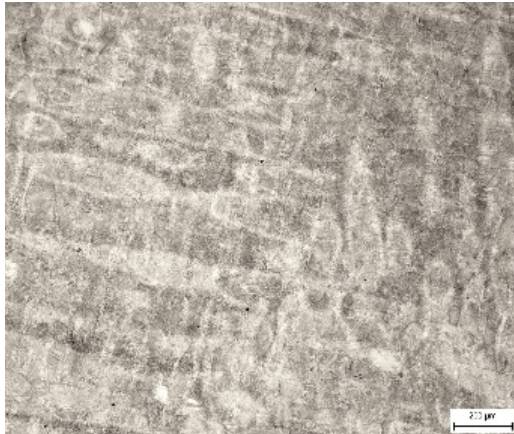


Obrázek 16: H11-3-1000x-1

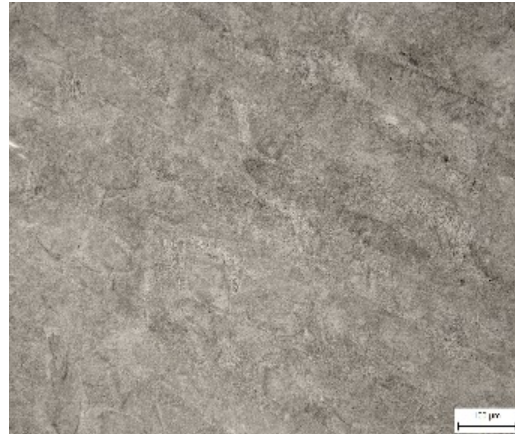


Obrázek 17: H11-3-50x-1 – póry

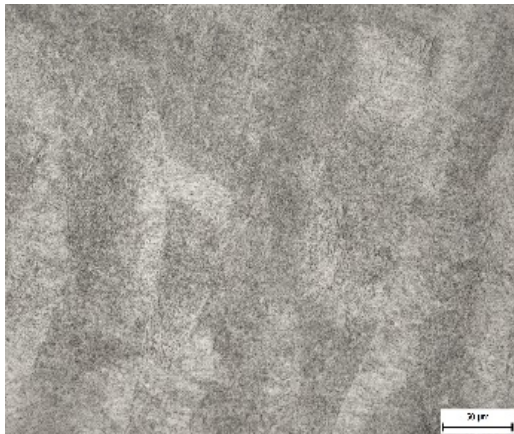
Vzorek 4 - aditivní: 500°C / 2 h



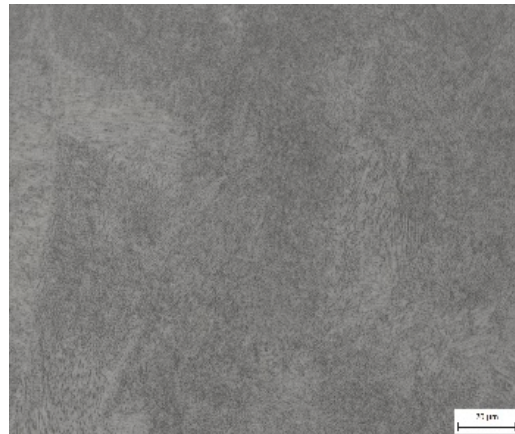
Obrázek 18: H11-4-100x-1



Obrázek 19: H11-4-200x-1
oprava



Obrázek 20: H11-4-500x-3



Obrázek 21: H11-4-1000x-1

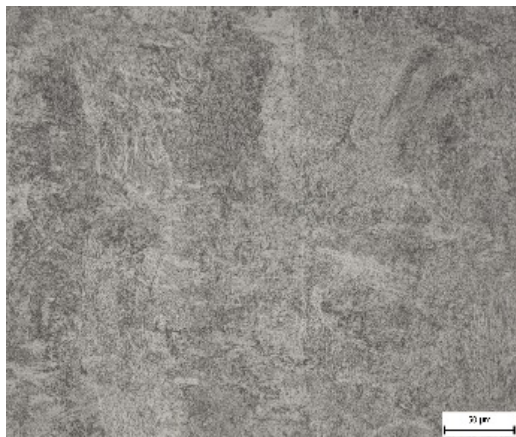
Vzorek 5 - aditivní: 500°C / 4 h



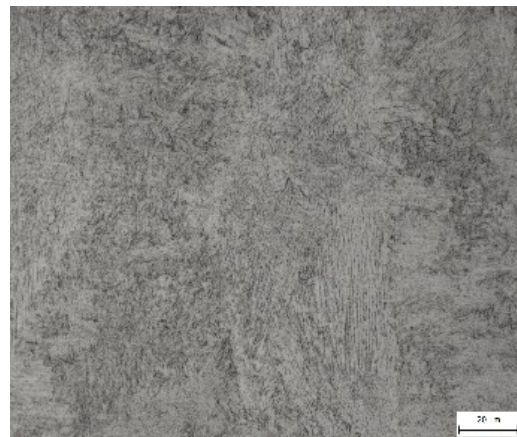
Obrázek 22: H11-5-100x-2



Obrázek 23: H11-5-200x-6



Obrázek 24: H11-5-500x-4



Obrázek 25: H11-5-1000x-3



Obrázek 26: H11-5-50x-1 - praskliny



Obrázek 27: H11-5-200x-2 - praskliny

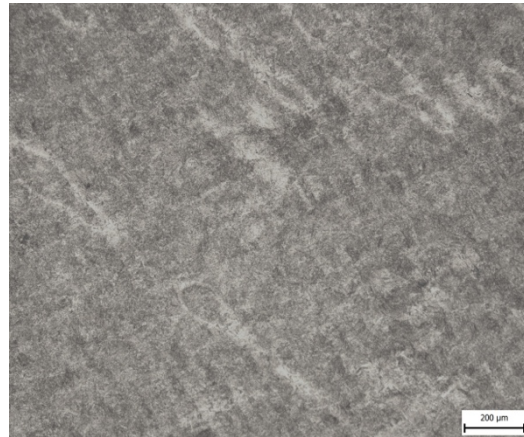


Obrázek 28: H11-5-500x-3 - praskliny

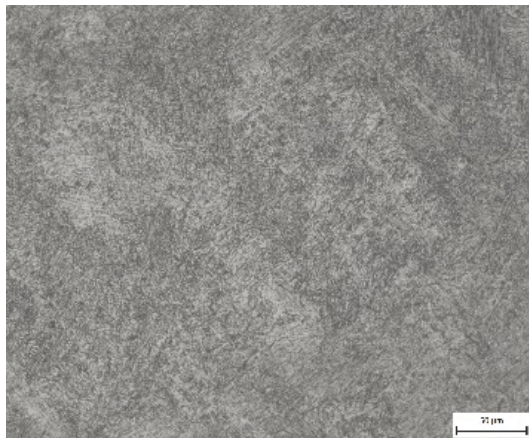
Vzorek 6 - aditivní: 550°C / 4 h



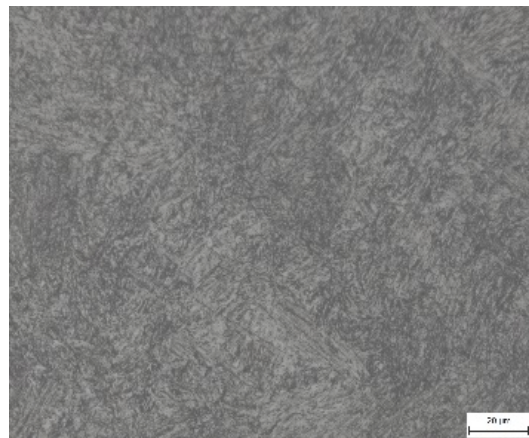
Obrázek 29: H11-6-50x-3



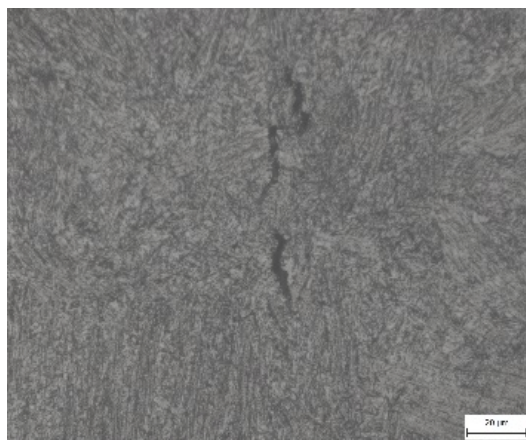
Obrázek 30: H11-6-100x-1



Obrázek 31: H11-6-500x-3

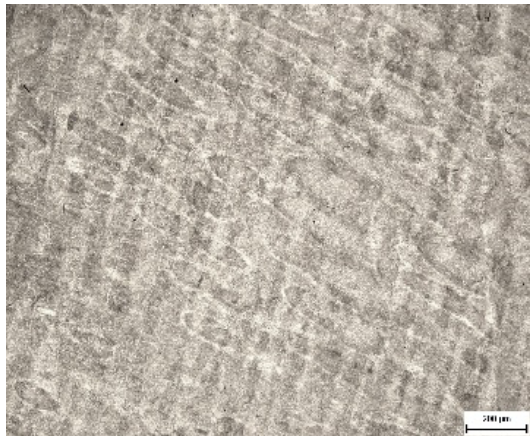


Obrázek 32: H11-6-1000x-3

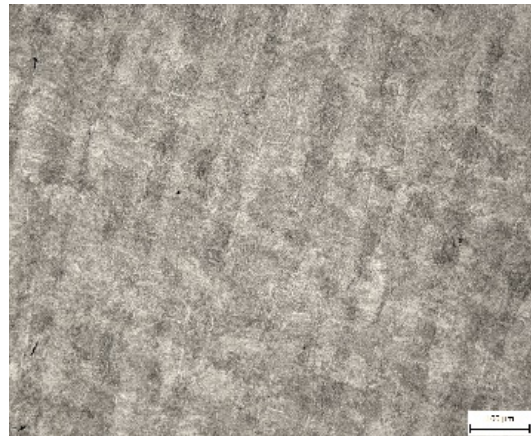


Obrázek 33: H11-6-1000x-1 - prasklina

Vzorek 7 - aditivní: 620°C / 4 h



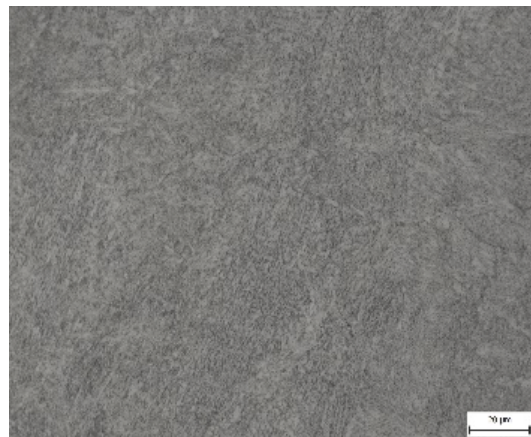
Obrázek 34: H11-7-100x-3



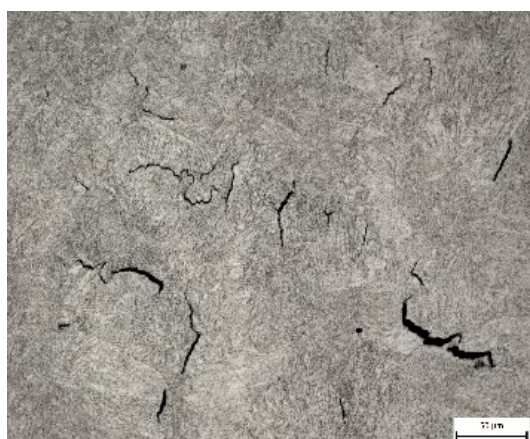
Obrázek 35: H11-7-200x-3



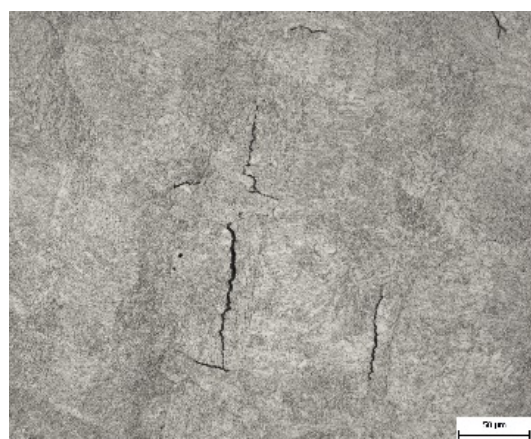
Obrázek 36: H11-7-500x-2



Obrázek 37: H11-7-1000x-2

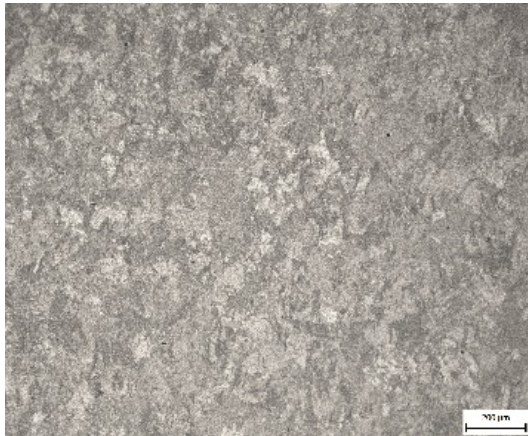


Obrázek 38: H11-7-500x-1 - praskliny

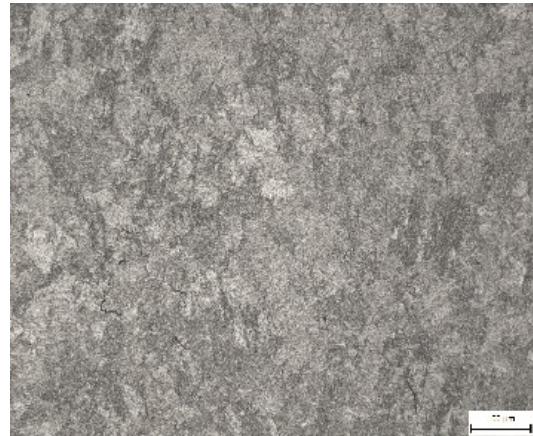


Obrázek 39: H11-7-500x-3 - praskliny

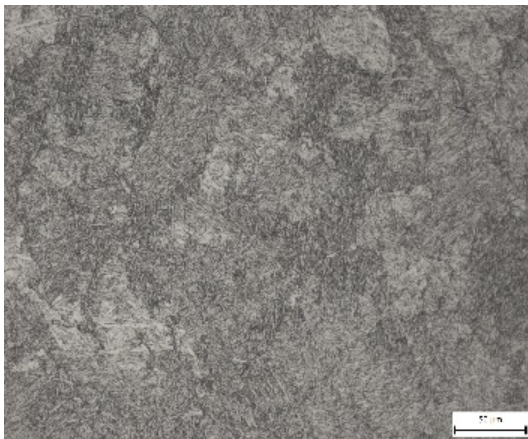
Vzorek 8 - aditivní: 1030°C / 30 min + 450°C/4 hod



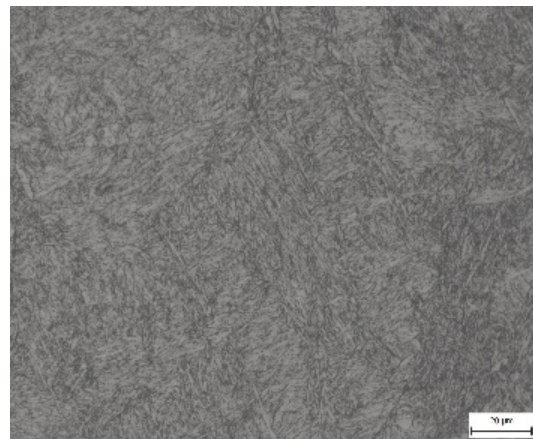
Obrázek 40: H11-8-100x-2



Obrázek 41: H11-8-200x-2



Obrázek 42: H11-8-500x-2



Obrázek 43: H11-8-1000x-3

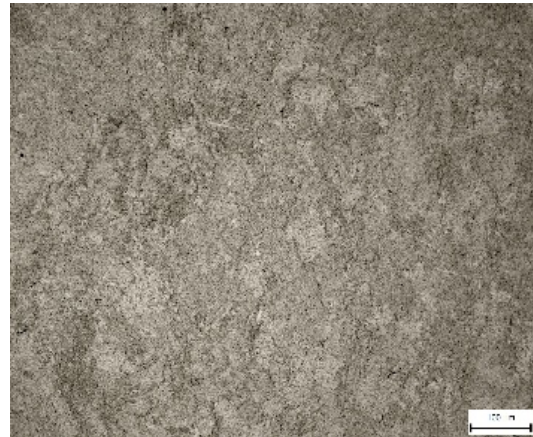


Obrázek 44: H11-8-50x-3 - póry

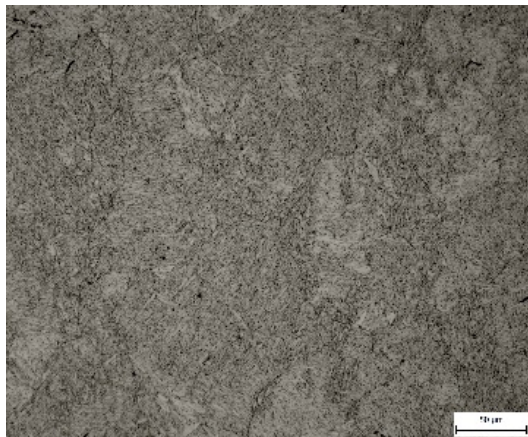
Vzorek 9 - aditivní: 1030°C / 30 min + 450°C/4 hod



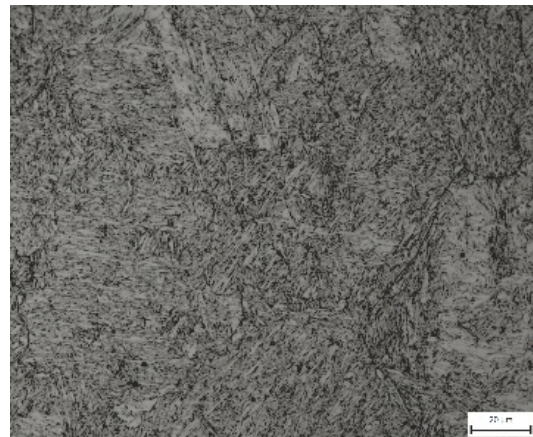
Obrázek 45: H11-9-50x-3



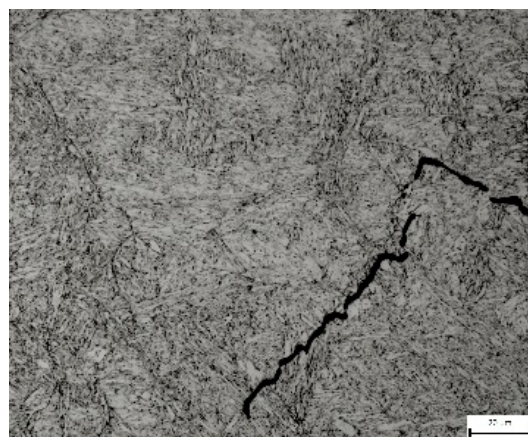
Obrázek 46: H11-9-200x-3



Obrázek 47: H11-9-500x-2

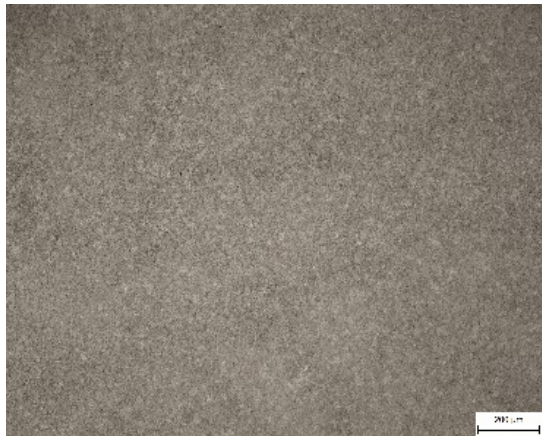


Obrázek 48: H11-9-1000x-2

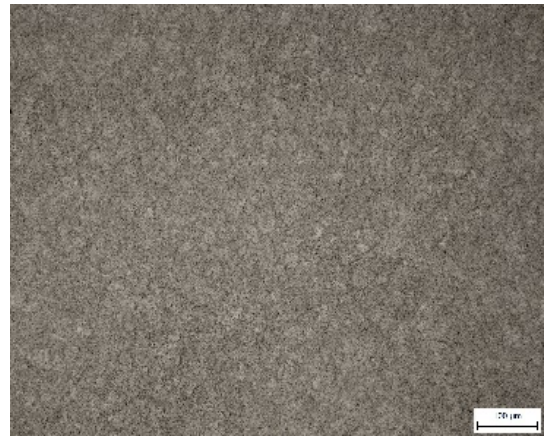


Obrázek 49: H11-9-1000x-1 - prasklina

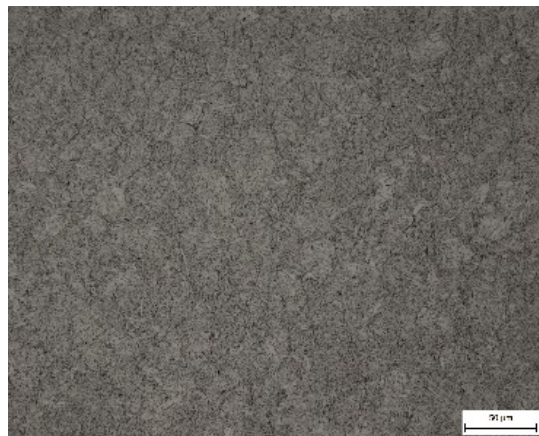
Vzorek 8 - konvenční: 1030°C / 30 min + 2x 500°C/2 hod



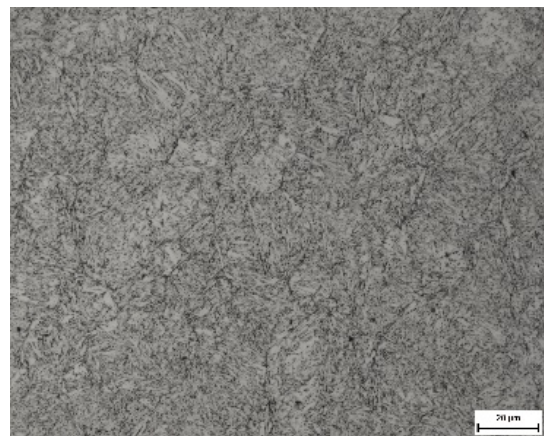
Obrázek 50: H11-8-100x-1



Obrázek 51: H11-8-200x-1



Obrázek 52: H11-8-500x-1

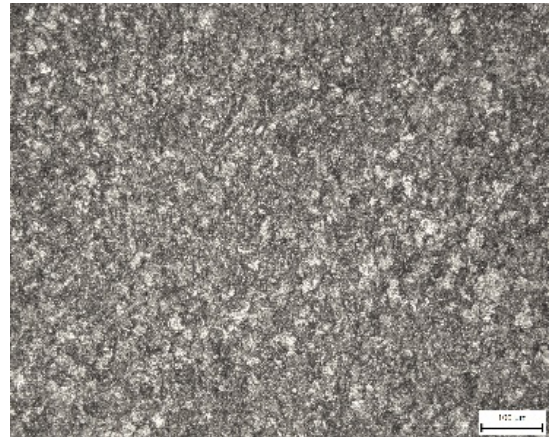


Obrázek 53: H11-8-1000x-3

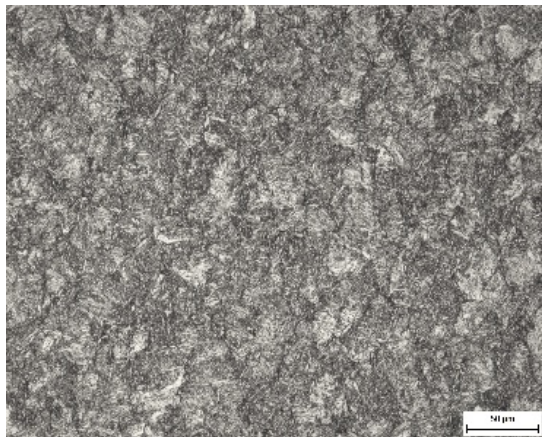
Vzorek 9 - konvenční: 1030°C / 30 min + 2x 500°C/2 hod



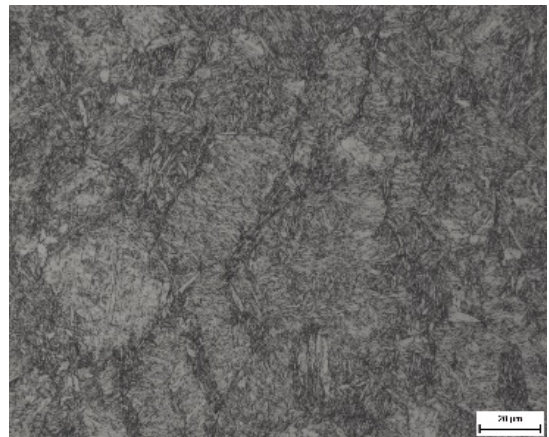
Obrázek 54: H11-9-100x-3



Obrázek 55: H11-9-200x-3



Obrázek 56: H11-9-500x-3

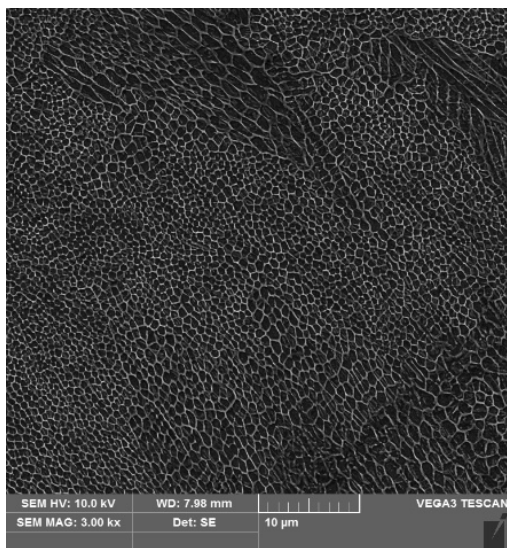


Obrázek 57: H11-9-1000x-3
(střed)

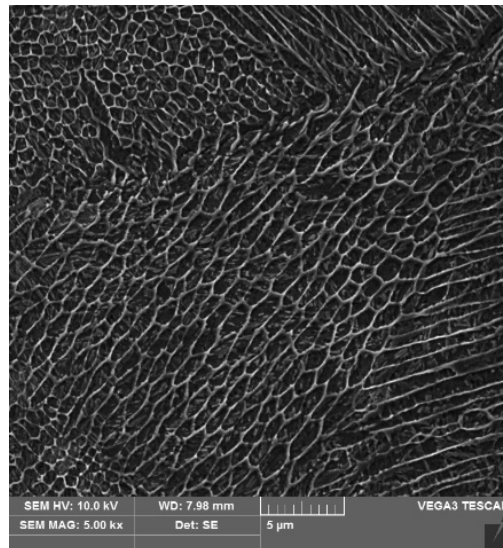
PŘÍLOHA č. 2

FOTODOKUMENTACE Elektronová mikroskopie

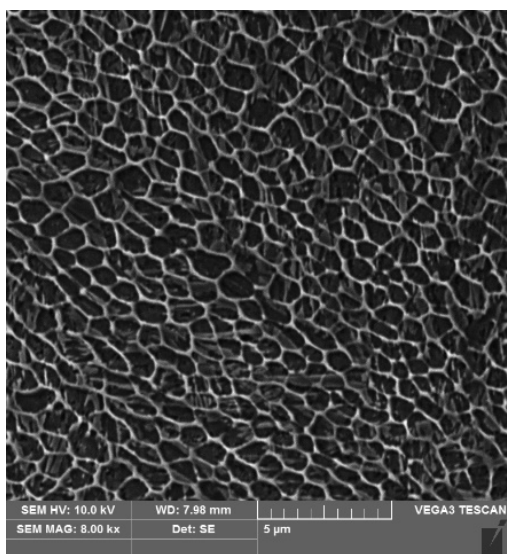
Vzorek 2 - aditivní: 450°C / 4 h



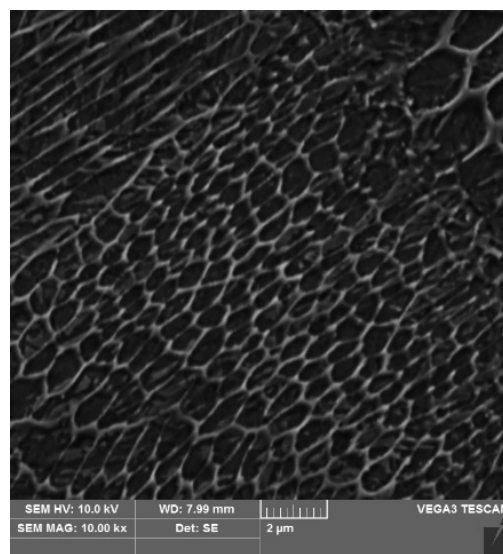
Obrázek 58: 2-3000x-2



Obrázek 59: 2-5000x-1

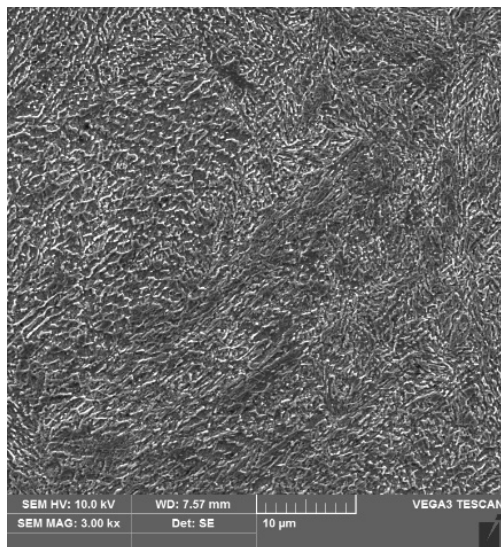


Obrázek 60: 2-8000x-1

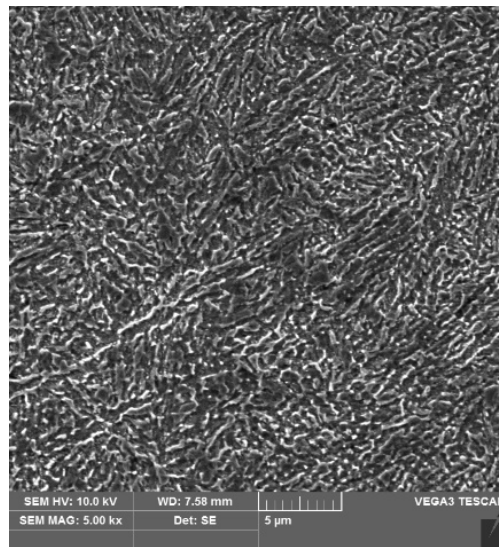


Obrázek 61: 2-10000x-1

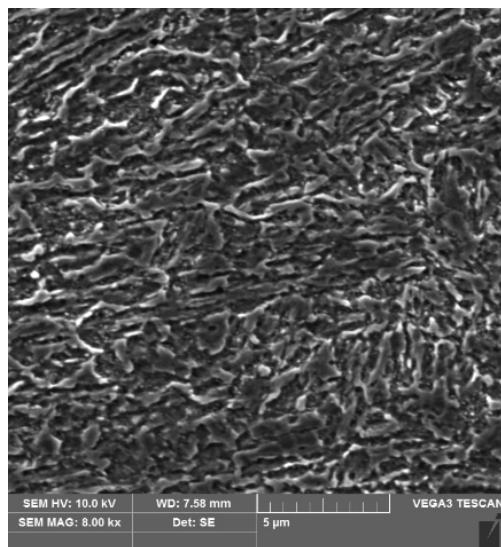
Vzorek 7 - aditivní: 620°C / 4 h



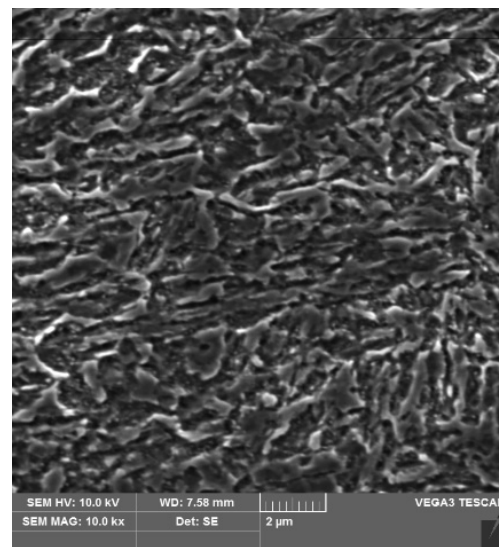
Obrázek 62: 7-3000x-1



Obrázek 63: 7-5000x-4

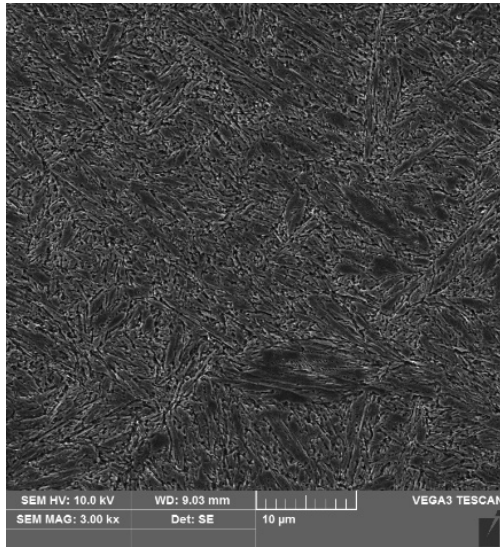


Obrázek 64: 7-8000x-2

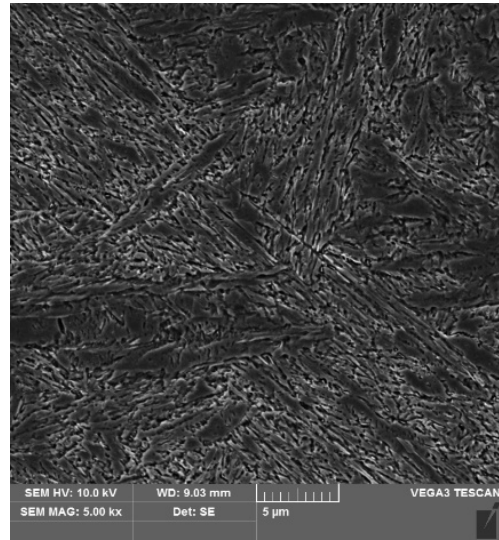


Obrázek 65: 7-10000x-1

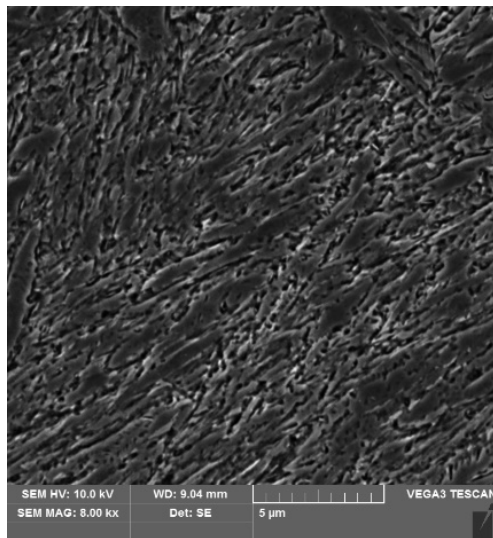
Vzorek 8 - konvenční: 1030°C / 30 min + 2x 500°C/2 hod



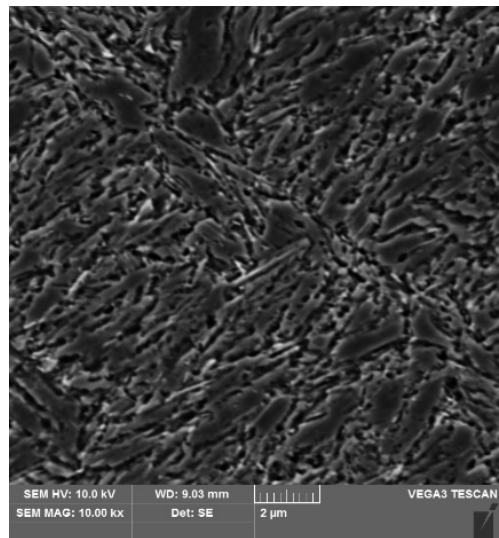
Obrázek 66: 8-3000x-2



Obrázek 67: 8-5000x-1



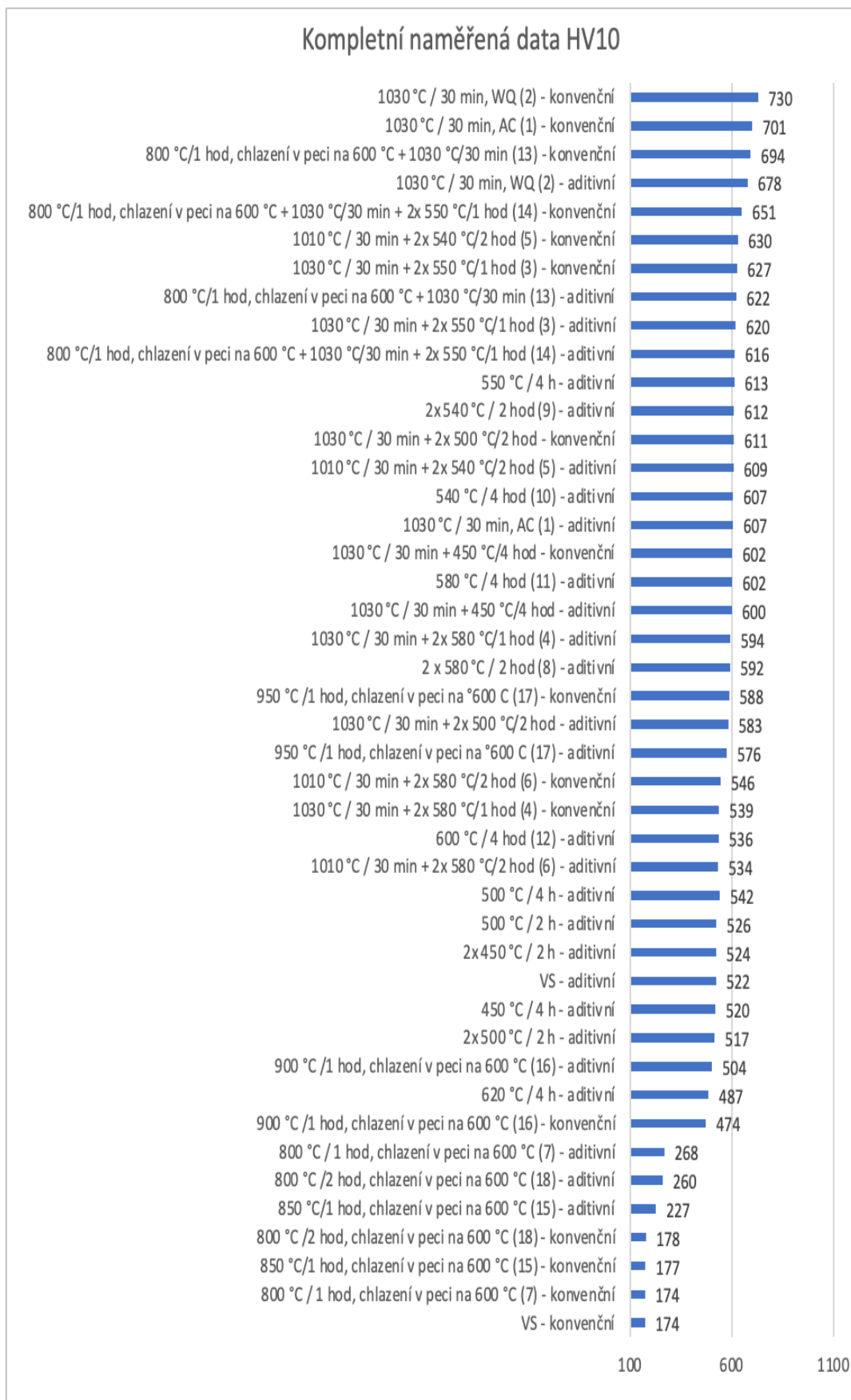
Obrázek 68: 8-8000x-1



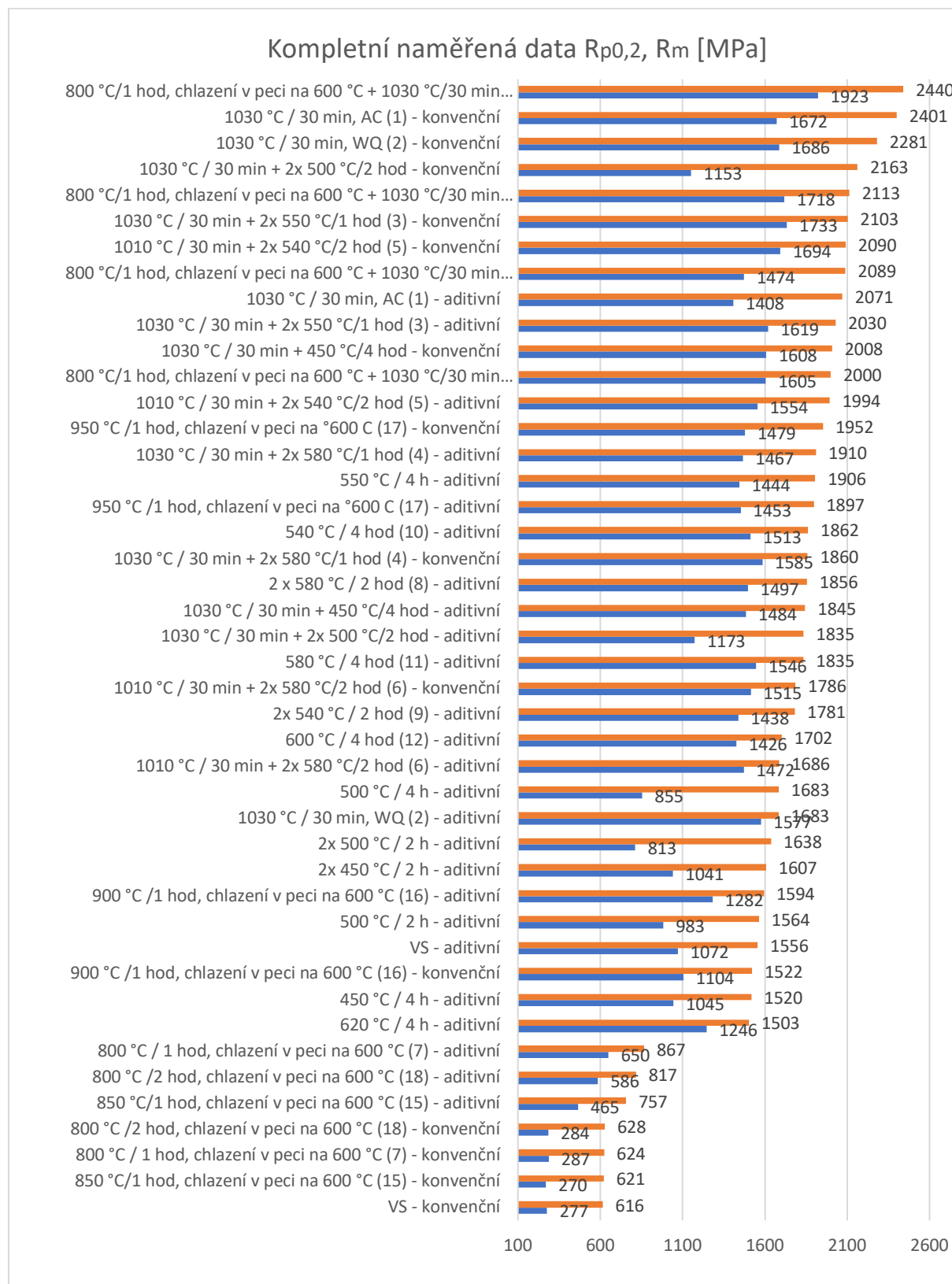
Obrázek 69: 8-10000x-1

PŘÍLOHA č. 3

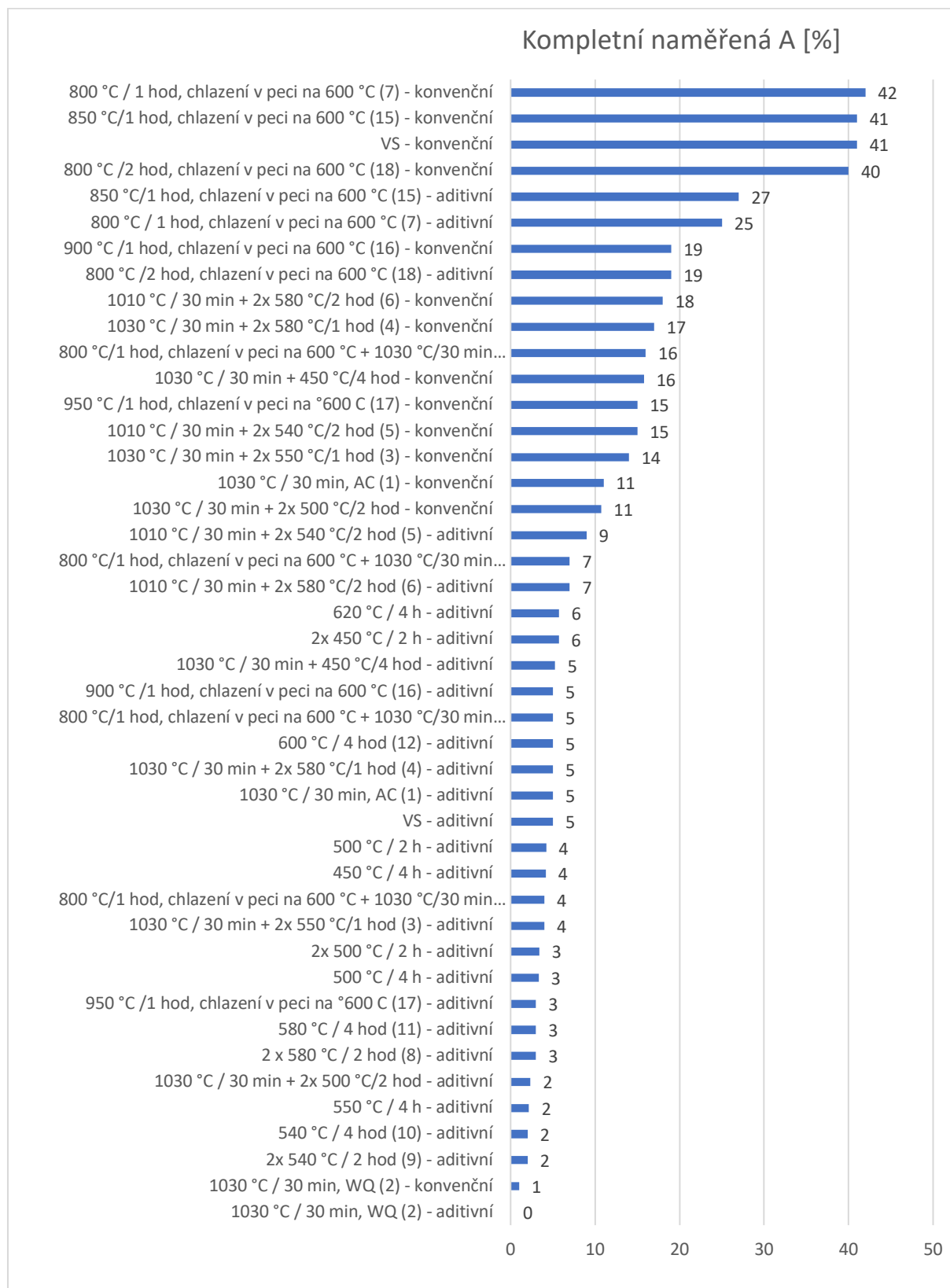
MECHANICKÉ ZKOUŠKY



Obrázek 70: Kompletní naměřená data HV10 [43, 44]



Obrázek 71: Kompletní naměřená data $R_{p0,2}$ a R_m [MPa] [43, 44]



Obrázek 72: Kompletní naměřená data A [%] [43, 44]