



Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu Inconel 718

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

David Burda

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu Inconel 718

Jméno a příjmení: **David Burda**
Osobní číslo: S18000021
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky se slitinami Ni a jejich základním rozdělením, vlastnostmi a využitím.
2. Proveďte rešerši současného stavu znalostí o 3D tisku kovových prášků pomocí metody SLM.
3. Stanovte mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu Inconel 718.
4. Proveďte experimenty zaměřené na stanovení vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu.
5. Proveďte zhodnocení a diskuzi výsledků.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] PAULONIS, D. F., J. M. OBLAK a D. S. DUVALL. Precipitation in nickel-base alloy 718. *ASM (Amer. Soc. Metals), Trans. Quart.*, 62: 611-22(Sept. 1969). [online]. 1969 [vid. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/4733654>
- [2] YAMASHITA, Y., T. MURAKAMI, R. MIHARA, M. OKADA a Y. MURAKAMI. Defect analysis and fatigue design basis for Ni-based superalloy 718 manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue* [online]. 2018, 117, 485–495. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002
- [3] *NICKEL* [online]. [cit. 12.1. 2021]. Dostupné z: <https://en.institut-selteneerden.de/seltene-erden-und-metalle/basismetalle/nickel/>
- [4] *INCONEL alloy 718: Properties and applications* [online]. 2018 [cit. 14.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/inconel-alloy-718-properties-andapplications>
- [5] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. [1. vyd.]. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [6] Technické normy ČSN.

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

30. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

15. května 2022

David Burda

Abstrakt

Bakalářská práce zkoumá vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti a strukturu 3D tisknuté slitiny Inconel 718.

V teoretické části práce jsou popsány niklové slitiny, jejich doporučené tepelné zpracování a 3D tisk kovů.

Experimentální část byla rozdělena do několika fází. Nejprve byly připraveny tištěné zkušební vzorky metodou SLM. Následně byla zkoumána struktura materiálu a byly provedeny zkoušky mechanických vlastností. V další fázi byl materiál podroben tepelným úpravám a opět byla pozorována struktura. Poté byly tepelně upravené vzorky mechanicky testovány, a následně bylo hodnoceno, jak velký dopad mělo vybrané tepelné zpracování na výsledky zkoušek. V poslední fázi bylo provedeno porovnání 3D tisknutých vzorků se vzorky vyrobenými metodou tváření.

Klíčová slova

3D tisk kovů, Inconel 718, slitiny niklu, nikl, mechanické vlastnosti, tepelné zpracování

Abstract

Bachelor thesis examines the effect of heat treatment on mechanical properties and structure of 3D printed alloy Inconel 718.

Theoretical part of the thesis describes nickel based alloys, their suggested heat treatments and metal 3D printing.

Experimental part was divided into several phases. Firstly, the samples were printed using the SLM method. Structure of the base material was observed and then tests of mechanical properties took place. The next phase contained heat treatment of the new samples and observation of structure. Later on these new samples were also tested for their mechanical properties. Hereafter, comparison of the heat treatment on mechanical properties was done. In the last phase, close examination and comparison of 3D printed and formed samples was performed.

Key words

3D printing of metals, Inconel 718, nickel alloys, nickel, mechanical properties, heat treatment

Poděkování

Předně bych rád poděkoval paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za odborné vedení mé závěrečné práce, za velkou trpělivost, ochotu a za mnoho podnětných rad v průběhu celé práce. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za pomoc s uskutečněním všech provedených experimentů. A v neposlední řadě patří velké děkuji mé rodině za nekonečnou podporu po dobu celého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1. Obsah.....	10
2. Teoretická část	11
2.1 Nikl a jeho slitiny	11
2.1.1 Konstrukční slitiny	12
2.1.2 Žárupevné a žáruvzdorné slitiny	14
2.2 Tepelné zpracování niklových slitin	16
2.3 Technologie využívané pro 3D tisk kovových součástí	18
3. Experimentální část	21
3.1 Příprava vzorků pomocí 3D tisku	21
3.2 Struktura základního materiálu.....	26
3.3 Mechanické vlastnosti základního materiálu	27
3.4 Struktura tepelně zpracovaného materiálu.....	32
3.5 Mechanické vlastnosti tepelně zpracovaného materiálu	35
4. Diskuze výsledků.....	42
5. Závěr	46
Literatura	47

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka Symbol	Význam	Jednotka
A_g	Homogenní tažnost	[%]
A_{35mm}	Celková tažnosti na 35mm	[%]
A_{40mm}	Celková tažnost na 40mm	[%]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
KV_2	Absorbovaná energie	[J]
KCV_2	Vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
CAD	Computer Aided Design	
DED	Direct Energy Depositing	
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	
EBSD	Difrakce elektronového zpětného rozptylu	
FCC	Krychlová plošně středěná	
HV	Tvrдость podle Vickerse	
PBF	Powder Bed Fusion	
SLM	Selective Laser Melting	
SLS	Selective Laser Sintering	
TZ	Tepelné zpracování	
TZ1	Tepelné zpracování typ 1	
TZ2	Tepelné zpracování typ 2	
γ'	Fáze gama [$Ni_3(Ti,Al)$]	
γ''	Fáze gama (Ni_3Nb)	
3D	Trojrozměrný	

1. Úvod

Niklové slitiny jsou v průmyslovém světě jedním ze zástupců, který kombinuje skvělé mechanické vlastnosti a zároveň výbornou korozivzdornost, žárupevnost, žáruvzdornost a rozměrovou stálost. Přesto že jsou tyto vlastnosti dnes velice žádané, využití niklových slitin komplikuje nejen jejich vysoká cena ale i to, že je velice obtížné tyto slitiny obrábět.

Relativně novou metodou zpracování materiálů s vysokými mechanickými vlastnostmi je 3D tisk kovů. Tato technologie se značně rozšiřuje právě do oblastí, kde je potřeba vyrábět tvarově složité součástky. Příkladem je zejména letecký a kosmický průmysl.

Ke slitinám niklu, které si zachovávají svou vysokou pevnost, korozivzdornost a rozměrovou stálost i za vysokých teplot patří slitiny na bázi niklu a chromu mezi které se řadí např. Inconely.

Předložená bakalářská práce se věnuje vlastnostem materiálu Inconel 718 vyrobeného metodou SLM (Selective Laser Melting). Jejím cílem je stanovit mechanické vlastnosti niklové slitiny Inconel 718 vyrobené metodou 3D tisku a poté sledovat k jakým změnám struktury a mechanických vlastností vlivem tepelného zpracování dochází.

2. Teoretická část

S ohledem na téma bakalářské práce jsou v teoretické části popsány vlastnosti niklu a jeho slitin, možnosti jejich tepelného zpracování a možnosti výroby dílů ze slitin niklu metodou 3D tisku.

2.1 Nikl a jeho slitiny

Nikl je stříbrobílý kujný, tažný kov s vysokým leskem. Řadí se mezi těžké feromagnetické kovy a krystalizuje v kubické plošně středěné mřížce FCC, která podporuje jeho dobrou tvárnost. Teplota tání niklu se pohybuje okolo 1455 °C, k varu dochází na teplotě 2913 °C [1]. Přehled základních fyzikálních vlastností je uveden v tab. 2.1. V přírodě se čistý nikl téměř nenachází, většinou se jedná o sloučeniny s kobaltem a železem v sulfidických rudách, ze kterých se následně i vyrábí [2].

Tab 2.1 Základní vlastnosti niklu [3]

Vlastnost	Hodnota
Krystalická mřížka	FCC
Hustota	8909 kg/m ³
Teplota tání	1455 °C
Curieho teplota	631 °C
Mez pevnosti	317 MPa
Tažnost	30%

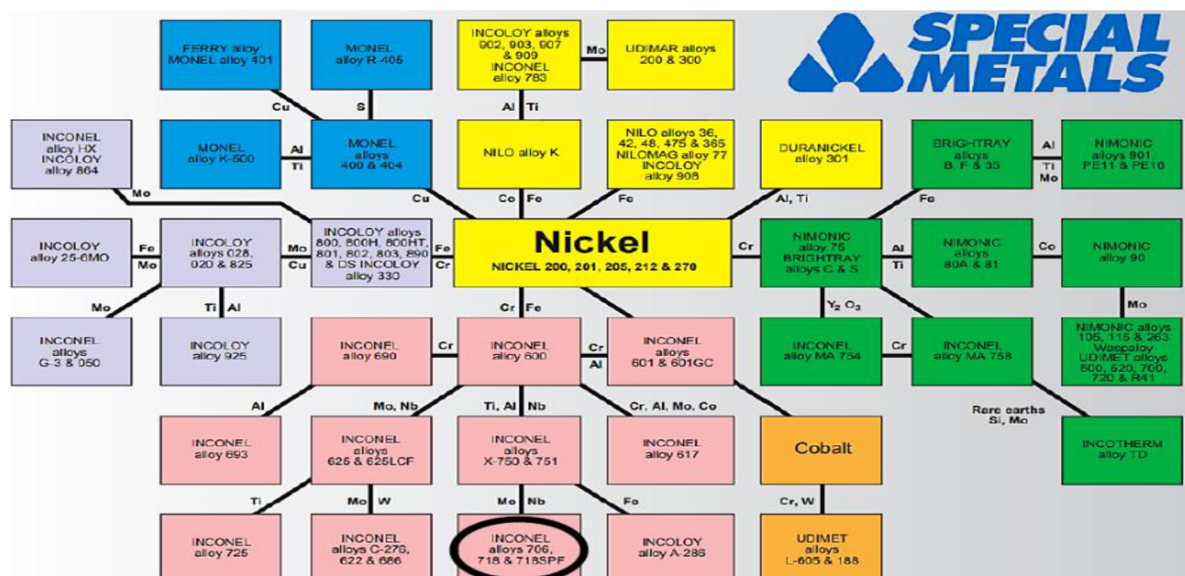
Nikl je velice významný kov, hojně využívaný v technickém průmyslu zejména jako legující prvek při výrobě korozivzdorných, žárupevných a žáruvzdorných ocelí. V tomto odvětví se spotřebovává až na 60 % celkové produkce. Nikl také najde uplatnění v oblasti pokovování, a to jak v oblasti antikorozní, tak i dekorativní. Pro svůj lesk se používá v mincovním průmyslu a díky svým elektromagnetickým vlastnostem i v elektrotechnickém průmyslu. Zbývá část, přibližně 25 %, se využívá na výrobu niklových slitin [1].

Slitiny niklu jsou velice atraktivní pro svoje mechanické vlastnosti. Pro svou cenu se však niklové slitiny využívají hlavně v oblastech, kde kladený důraz na mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti převyšuje použitelnost ocelí. Příkladem jsou letecký, námořní, energetický a chemický průmysl [2].

Slitiny niklu se řadí mezi nejpevnější a nejtvrdší slitiny neželezných kovů. Pro jejich mechanické vlastnosti je velice obtížné tyto slitiny obrábět. Výroba těchto dílů upřednostňuje technologie tváření, přesné lití a případně 3D tisk. Při zpracování tvářením je však nutnost využít silných lisů vzhledem k rychlému nárůstu přetvárného odporu [1].

Niklové slitiny se obecně dělí na konstrukční, žárupevné, žáruvzdorné a slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi [4]. Další dělení je dle nejvýznamnější legury, a to na slitiny na bázi Ni-Cu a Ni-Cr.

Slitiny na bázi Ni-Cu lze považovat za největšího zástupce konstrukčních slitin a slitiny Ni-Cr za hlavního zástupce slitin žárupevných a žáruvzdorných. Dalšími legujícími prvky v těchto slitinách jsou např. titan, niob, hliník, železo, molybden a další [1, 2]. Na obr. 2.2 je uveden přehled vyráběných niklových slitiny jedním z nejvýznamnějších výrobců společnosti Special metals. Na tomto obrázku je označena slitina Inconel 718, která bude využívána v rámci experimentální části této práce [5].



Obr 2.2 Přehled niklových slitin společnosti Special metals [5]

2.1.1 Konstrukční slitiny

Mezi nejvýznamnější konstrukční slitiny na bázi niklu patří monely, kde je hlavním legujícím prvkem měď. Nikl a měď jsou vůči sobě dokonale rozpustné a tvoří tak jednofázovou slitinu při zastoupení mědi v rozsahu 27 – 34 %. Dalšími legujícími prvky jsou pak titan, hliník, železo, mangan, křemík a další. Nevyhovující doprovodný prvek je síra, která se do slitiny dostává už při extrakci

niklu ze sulfidů. Síra má za důsledek snížení mechanických vlastností. Vytvrditelnost monelů zajišťují legury jako titan a hliník. Mechanické vlastnosti slitin neobsahující tyto dvě legury je nutno zlepšovat tvářením za studena. V závislosti na způsobu úprav mechanických vlastností mohou monely dosahovat pevností až 1379 MPa. V technickém použití lze nejčastěji nalézt Monel 400, Monel R405 a Monel K500, jejichž chemické složení je uvedeno v tab. 2.2 [5].

Tab 2.2 Procentuální zastoupení prvků slitin typu Monel [6–8]

Prvek [hmot.%]	Monel 400	Monel R405	Monel K500
Ni (min.)	63	63	63
Cu	28 – 34	28 – 34	27 – 33
Fe (max.)	2,5	2,5	2,0
Mn (max.)	2,0	2,0	1,5
C (max.)	0,3	0,3	0,25
Si (max.)	0,5	0,5	0,5
S	0,024 (max.)	0,025 – 0,06	0,01 (max.)
Ti	-	-	0,35 – 0,85
Al	-	-	2,3 – 3,15

Monel 400 je slitina niklu a mědi obsahující prvky železa, manganu, uhlíku, křemíku a síry. Slitina je vytvrditelná pouze tvářením za studena. Monel 400 si udržuje vysokou pevnost, tvrdost a houževnatost i za vysokých teplot. Má též vysokou korozivzdornost v široké škále prostředí. Hranice pro použitelnost slitiny se uvádí do 537 °C a to i v oxidačním prostředí. Je též dobře svařitelná a relativně obrobitelná. Pro tyto své vlastnosti našla uplatnění hlavně v námořním a chemickém průmyslu. Mezi typické příklady využití se řadí ventily, pumpy, spojovací prvky vystavené agresivnímu prostředí, vodní a chemické nádrže [6].

Monel R405 je svými vlastnostmi, jako korozivzdornost a svařitelnost, velice podobný slitině Monel 400. Rozdíl tkví ve vyšším obsahu síry. Mezi další doprovodné prvky patří železo, mangan, uhlík a křemík. Síra má za důsledek mírné snížení mechanických vlastností, nicméně přispívá obrobitelnosti slitiny. Slitina se využívá na tlakové nádoby, boilery, pouzdra jaderných reaktorů a části měřidel [7].

Monel K500 je slitina niklu a mědi obsahující prvky jako titan, hliník, železo, mangan, uhlík, křemík a síru. Díky obsahu titanu a hliníku je slitina vytvrditelná tepelným zpracováním, jako je precipitační vytvrzování a její pevnost dosahuje

až 1100 MPa. Slitina Monel K500 má ze skupiny Monelů nejlepší mechanické vlastnosti a zachovává si výbornou korozivzdornost ostatních. Proto je využívána v těch nejnáročnějších případech jako řetězy, kabely, pružiny a spojovací materiál v námořním průmyslu, části čerpadel a ventily chemického průmyslu, vrtáky pro hlubinnou těžbu, skalpely v medicíně, části senzorů a elektrické součástky [8].

2.1.2 Žárupevné a žáruvzdorné slitiny

Slitiny na bázi nikl-chrom jsou dle svého zařazení vysoce žárupevné a žáruvzdorné, též jsou podobně jako slitiny nikl-měď vysoce korozivzdorné. Nikl a chrom jsou vůči sobě do poměru přibližně 1:1 dokonale rozpustné a tvoří jednofázový tuhý roztok s kubickou plošně středěnou mřížkou. Z pravidla je poměr zastoupení Ni:Cr přibližně 6:1 až 3:1 [4].

Chrom zajišťuje slitině žáruvzdornost. Legující prvky titan, hliník a niob utváří vytvrzující fáze, čímž zajišťují slitině žárupevnost. Po rozpouštěcím žhání a stárnutí dochází k vyloučení vytvrzujících fází $Ni_3(Ti,Al)$ značící se γ' a Ni_3Nb značící se γ'' . Tyto dvě fáze slitiny mají značný vliv na její žárupevnost a to zejména rovnoměrnost rozprostření těchto fází. Přítomnost uhlíku ve slitině umožňuje tvorbu karbidů, které se též podílejí na žárupevnosti. Karbidy se tvoří uvnitř i po hranicích zrn, při jejich nesprávné koncentraci však mají nepříznivý vliv na plasticnost, což vede k náchylnosti na vznik štěpných lomů [4].

Tab 2.3 Procentuální zastoupení prvků slitin typu Inconel [9–11]

Prvek [hmot.%]	Inconel 600	Inconel 625	Inconel 718
Ni	72 (min.)	58 (min.)	50 – 55
Cr	14 – 17	20 – 23	17 – 21
Fe	6 – 10	5,0 (max.)	Doplněk
Mn (max.)	1,0	0,5	0,35
Si (max.)	0,5	0,5	0,35
Cu (max.)	0,5	-	0,3
C (max.)	0,15	0,1	0,08
S (max.)	0,015	0,015	0,015
Mo	-	8,0 – 10,0	2,8 – 3,3
Nb	-	3,15 – 4,15	4,75 – 5,5
Co (max.)	-	1,0	1,0
Al	-	0,4 (max.)	0,2 – 0,8
Ti	-	0,4 (max.)	0,65 – 1,15
P (max.)	-	0,015	0,015
B (max.)	-	-	0,006

Slitiny na bázi Ni-Cr jsou označovány jako Inconely. V technické praxi jsou nejpoužívanější slitiny Inconel 600, Inconel 625 a Inconel 718, jejichž chemické složení je uvedeno v tab. 2.3 [5].

Inconel 600 je slitina na bázi nikl-chrom se značným obsahem železa. Další zastoupené prvky jsou mangan, křemík, měď, uhlík a síra. Jedná se o tvárnou slitinu běžně užívanou v případech, kde je potřeba výborná korozivzdornost, dobrá tepelná stálost, pevnost a tvrdost. Není precipitačně vytvrditelná, její mechanické vlastnosti lze zlepšovat pouze tvářením za studena. Pevnosti v tahu u této slitiny lze dosáhnout až 1517 MPa a rozsah použitelnosti je v rozmezí teplot -150°C až 1095°C . Slitina se vzhledem k její korozní odolnosti proti vysoce čisté vodě používá při výrobě částí jaderných reaktorů, dále jako katody elektrických zařízení a hlavně v leteckém průmyslu na součástky, u kterých se předpokládá velké tepelné zatížení [9].

Inconel 625 je slitina niklu a chromu se značným obsahem molybdenu. Další zastoupené prvky jsou železo, niob, kobalt, mangan, uhlík, křemík, hliník, titan, fosfor a síra. Tato slitina vyniká svou výbornou svařitelností a možnostmi zpracování. Slitinu není potřeba precipitačně vytvrzovat. Její mechanické vlastnosti zajišťuje přítomnost prvků molybden a niob, které vytvrzují matici slitiny. Jsou též odpovědné za její schopnost odolávat široké škále agresivních prostředí, a to i za zvýšených teplot. Odolnost slitiny proti agresivnímu prostředí je výjimečně vysoká i v porovnání s ostatními slitinami řady Inconel. Též dobře odolává creepovému zatížení, a to opět i za zvýšených teplot. Oblast použitelnosti slitiny je v rozsahu teplot od -150°C až po 982°C . Kombinace těchto vlastností předurčuje tuto slitinu pro použití v oblastech, kde jsou součásti vystavené mořské vodě. Příklad využití jsou lopatková kola námořních lodí, ponorek a člunů, opláštění transatlantických optických kabelů a kotvicích kabelů různých zařízení [10].

Inconel 718 je slitina niklu a chromu s velkým množstvím legujících prvků. Vyniká svými výbornými mechanickými vlastnostmi, dobrou korozivzdorností a dobrou žárupevností a žáruvzdorností. Po precipitačním vytvrzování dosahuje pevnost slitiny až 1700 MPa a teplotní rozsah použitelnosti se uvádí od hlubokého podchlazení přibližně -250°C až po 700°C . Tepelné zpracování způsobí vylučování vytvrzující fáze na bázi Ni_3Nb , která je zde, na rozdíl od ostatních slitin

na bázi nikl-chrom, výrazně více zastoupena než fáze $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$. Slitina je podobně jako Inconel 625 dobře svařitelná, zejména metodou TIG, nicméně řadí s k těm nejméně tvárným a nejhůře obrobitelným. Tvářením za tepla lze vyrábět pouze jednoduché výrobky jako tyče, trubky a plechy. V případě složitějších obrobků lze využít metodu přesného lití, případně 3D tisk. Tyto metody mají výhodu, že výsledný produkt má přesný tvar konečného výrobku. K příkladům užití v technické praxi patří hlavně letecký průmysl, kde se slitina používá na součásti proudových motorů, kosmický průmysl a pro svou použitelnost v nízkých teplotách též na výrobu kryogenických nádrží [11].

2.2 Tepelné zpracování niklových slitin

Tepelné zpracování je stěžejní krok pro dosažení potenciálu mechanických vlastností niklu i jeho slitin [4].

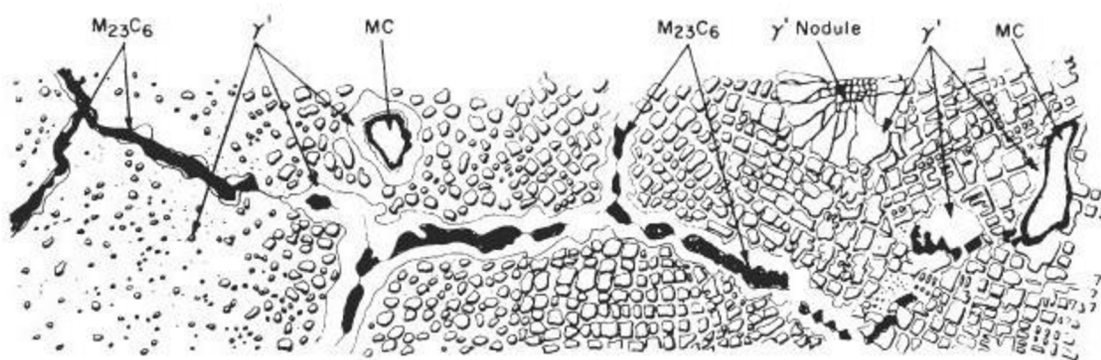
Nejčastější tepelné zpracování technicky čistého niklu je žíhání na snížení vnitřního pnutí při teplotě 300 °C po dobu 1 hodiny nebo rekrystalizační žíhání při teplotě 525 – 800 °C po 1 hodinu [4].

U slitin niklu nejčastěji používané tepelné zpracování je vytvrzování, které má dvě fáze a to rozpouštěcí žíhání a následné precipitační vytvrzování. Cílem je slitinu homogenizovat a následně nechat rovnoměrně rozprostřít zpevňující fáze [4, 12]. Podmínkou pro precipitační vytvrzování slitin niklu je obsah legur a to titan, hliník a niob, které umožňují tvorbu zpevňujících fází γ' $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ a γ'' Ni_3Nb [4, 13].

Účelem rozpouštěcího žíhání je rozpuštění fáze γ' , případně γ'' a karbidů obsažených ve slitině. Z důvodu, že legující prvky slitiny jsou za vysokých teplot náchylné na reakci s okolní atmosférou, se doporučuje provádět tepelné zpracování ve vakuových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou. Teplota rozpouštěcího žíhání a doba setrvání na této teplotě je dána především chemickým složením slitiny a velikostí upravované součásti. Běžně se hodnoty teplot pohybují mezi 1080 °C až 1220 °C a doba výdrže v rozsahu 2 až 12 hodiny. Následné chlazení probíhá pomalu na vzduchu, případně v ochranné atmosféře argonu. V případě rychlého ochlazení vzniká nebezpečí popraskání vlivem nárůstu vnitřních pnutí [4, 12].

Po rozpouštěcím žíhání a zchlazení následuje proces vytvrzování. Vytvrzování neboli stárnutí bývá vícestupňový proces, ale běžně je dvoustupňové, což znamená při umělém stárnutí setrvání na dvou různých teplotách. Žádoucím výsledkem je vyloučení karbidů a co nejjemnější vyloučení vytvrzujících fází γ' a γ'' , což výrazně zvyšuje žárpevnost slitiny. Ve slitinách niklu jsou obsaženy karbidy typu MC a $M_{23}C_6$. U karbidů MC jsou karbidotvornými prvky titan, wolfram, tantal a kolumbium. Jedná se o velice stabilní karbidy, které vznikají těsně pod teplotou solidu. Karbid $M_{23}C_6$ je převážně karbid chromu nebo železa, případně v nižším množství i wolframu, molybdenu nebo kobaltu. Tyto karbidy se se obvykle vylučují na hranicích zrn při teplotách 760 °C až 980 °C [13].

Struktura slitiny Ni-Cr po tepelném zpracování je schematicky zobrazena na obr. 2.3.



Obr 2.3 Struktura slitiny na bázi Ni-Cr [13]

Proces stárnutí ze zásady probíhá za vyšší teploty, než je pracovní teplota dané součásti. Vytvrzovací teplota a doba setrvání na této teplotě opět závisí na chemickém složení slitiny a velikosti upravované součásti. Běžné hodnoty jsou 700 až 950 °C pro teplotu a 2 až 10 hodin pro čas setrvání. Chlazení nejčastěji opět probíhá pomalu na vzduchu [4, 12].

Dodržení správné teploty a doby setrvání je velice důležité. Existuje možnost přehřátí, které má za důsledek růst a hrubnutí zrn. To vede k nežádoucím efektům jako je snížení pevnosti a tažnosti. Tento defekt již nelze zvrátit žádnou tepelnou úpravou [4, 12].

Tepelné zpracování slitiny Inconel 718 se v praxi obecně dělí na dva druhy precipitačního vytvrzování [11].

První druh tepelného zpracování slitiny Inconel 718 je tvořen rozpouštěcím žíháním probíhajícím při teplotách 925 až 1010 °C po dobu 1 hodiny a následným prudkým ochlazením ve vodě. Dalším krokem je precipitační vytvrzování při teplotě 718 °C po dobu 8 hodin a poté 2 hodiny chladnutí v peci na teplotu 620 °C. Na této teplotě se setrvává po dalších 10 hodin. Tepelné zpracování končí chladnutím na vzduchu [11].

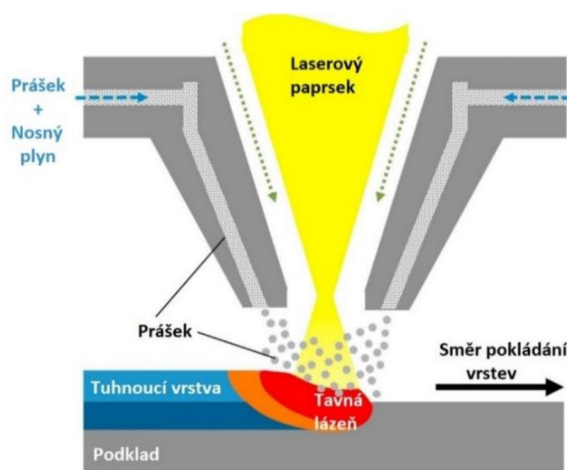
Druhý typ tepelného zpracování slitiny Inconel 718 je tvořen rozpouštěcím žíháním při teplotách 1040 až 1065 °C po dobu 1 hodiny a následným prudkým ochlazením ve vodě. Dalším krokem je precipitační vytvrzování při teplotě 760 °C po dobu 10 hodin a poté 2 hodiny chladnutí v peci na teplotu 650 °C. Na této teplotě se setrvává po dalších 10 hodin. Tepelné zpracování končí chladnutím na vzduchu [11].

2.3 Technologie využívané pro 3D tisk kovových součástí

Technologie 3D tisku patří k technologiím pro Rapid Prototyping (RP). Rapid prototyping (RP) je termín používaný pro řadu technologií zaměřených na výrobu přesných součástí přímo z CAD programů během několika hodin [14].

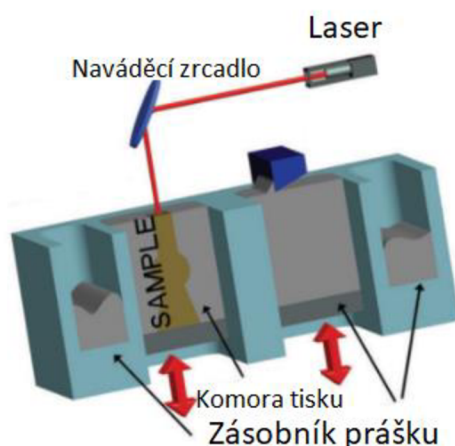
Technologie 3D tisku kovů se obecně dělí dle způsobu vnesení tisknutého materiálu do tiskárny. Dvěma nejrozšířenějšími metodami jsou Direct Energy Deposition (DED) a Powder Bed Fusion (PBF) [15].

Metoda **Direct Energy Deposition (DED)** jako zdroj tepla využívá laser, elektronový paprsek a případně plazmový oblouk. Materiál je uložený externě a do komory tisku se dodává odvíjením drátu z cívky nebo ve formě kovového prášku pomocí trysky. Princip metody DED je uveden na obr. 2.4 [16].



Obr 2.4 3D Princip metody Direct Energy Deposition [16]

Metoda **Powder Bed Fusion (PBF)** využívá jako zdroj tepla laser nebo elektronový paprsek. U této metody je materiál, kovový prášek, uložen přímo v komoře tisku a přidává se podavačem ze zásobníku. Princip této metody je ukázán na obr. 2.5. Metodou je možné prášky spékat nebo natavovat a tím tvořit různě porézní díly. Metody *Selective Laser Sintering (SLS)* a *Direct Selective Laser Sintering (DSLS)* prášky spékají a metoda *Selective Laser Melting (SLM)* prášky taví [17].



Obr 2.5 Princip metody Powder Bed Fusion [17]

Prvním krokem 3D tisku je návrh modelu v CAD programu. Využít lze široké spektrum 3D modelářů, je však nutné ukládat soubor ve formátu podporovaném danou 3D tiskárnou. Nejčastějším formátem je formát STL (solid to layer). Software 3D tiskárny převádí navržený model na soubor vrstev, které po navršení přes sebe tvoří navrženou součást. Počet vrstev určuje počet posuvů, které bude lože v komoře tisku muset vykonat. Proces tisku je rozdělen do cyklických fází [18].

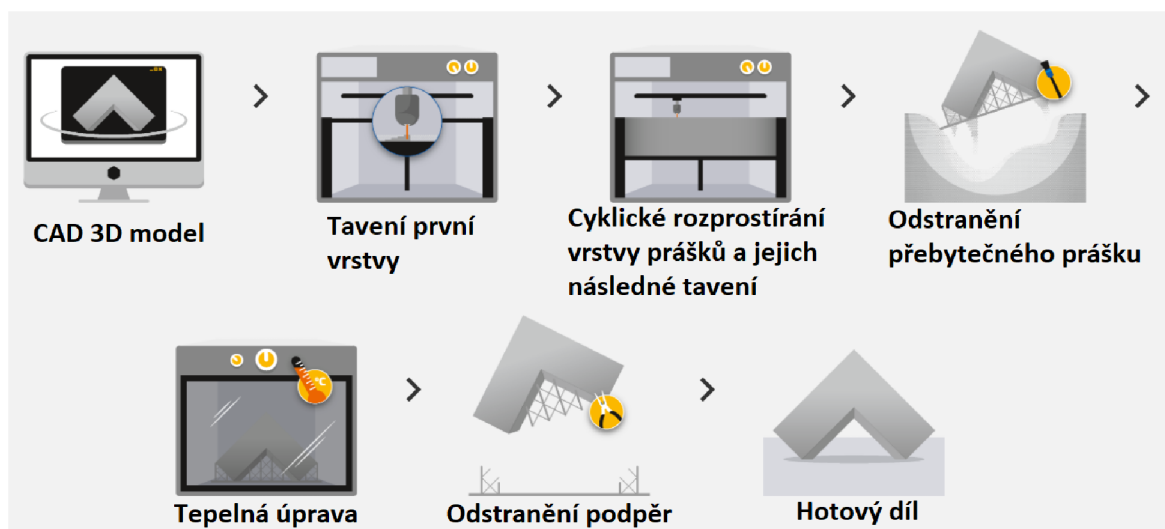
V první fázi je lože pokryté práškem zasahováno laserem, který přesně nataví první vrstvu tisku v požadovaném prostoru. Ve druhé fázi se lože posune dolu o určitou vzdálenost danou parametry tisknutého materiálu, kterou lze v jistém rozsahu nastavit. Kupříkladu pro slitinu Inconel 718 jsou posuvy lože v rozsahu 0,03-0,1 mm. Ve fázi třetí podavač opět rozprostře prášek ze zásobníku na lože a natavenou vrstvu tisku. Opět nastupuje fáze jedna a tavení prášku k sobě. Poté opět fáze dvě a tři. Počet cyklů potřebných k výrobě je dána posuvem lože a velikostí součásti. Po dokončení součásti je z prostoru tisku

odstraněn přebytečný prášek a podle potřeby je možno před odstraněním podpěr nechat součást tepelně zpracovat. Poté již stačí odstranit podpěry, které vznikají při tisku, aby zabránily narušení geometrie [18].

Vhodné materiály pro tyto metody 3D tisku jsou slitiny niklu, titanu, hliníku, mědi a kobaltu a vysoce legované oceli [19].

Vzhledem k metodě užití pro výrobu zkušebních těles pro experiment bude dále popsána pouze metoda SLM.

Metoda Selective Laser Melting (SLM) na rozdíl od metod SLS a DMLS prášek nespéká, ale taví, čímž lze dosáhnout podstatně lepší plnosti a homogenity výtisku. Tavení prášků samozřejmě vyžaduje mnohem více energie než jejich spékání, proto metoda SLM využívá vysoce výkonných laserů. Laser případně několik laserů je zpravidla zavěšen nad ložem, které je pokryté vrstvou kovového prášku. Komora, ve které se lože nachází, musí být naplněna ochrannou atmosférou například dusíkem, aby se předešlo oxidaci a degradaci prášku. Schéma postupu tisku touto metodou je patrné z obr. 2.6 [18, 20].



Obr 2.6 Schéma postupu tisku metodou SLM [18]

3. Experimentální část

V experimentální části práce je sledována struktura a mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu Inconel 718. Hlavním cílem experimentů je stanovení vlivu tepelného zpracování na změnu struktury a mechanických vlastností tohoto materiálu.

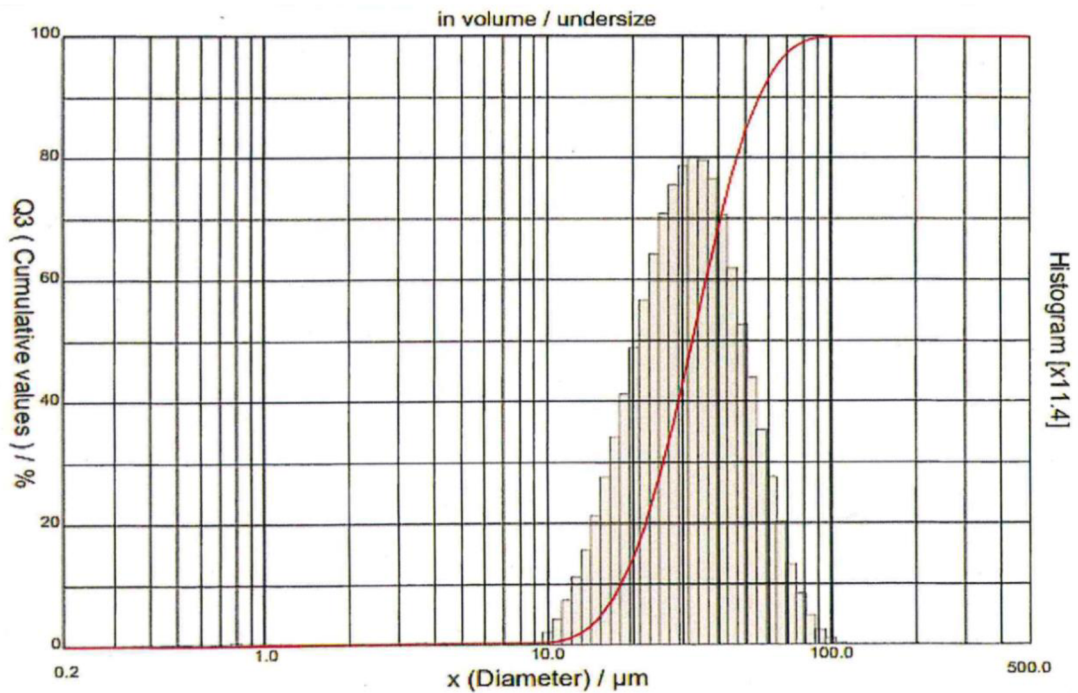
3.1 Příprava vzorků pomocí 3D tisku

Vzorky byly vyrobeny v laboratoři prototypových technologií a procesů Technické univerzity v Liberci. Pro výrobu vzorků byla využita 3D tiskárna společnosti SLM Solutions Group AG, typ SLM280HL, která umožňuje tisk různých kovových slitin, viz obr. 3.1. Pro tavení prášků využívá laserovou jednotku typu Yb:YAG s maximálním výkonem až 400 W. Tisková plocha zaujímá prostor o rozměrech 280 x 280 x 350 mm. Jako ochrannou atmosféru lze využít argon nebo dusík.



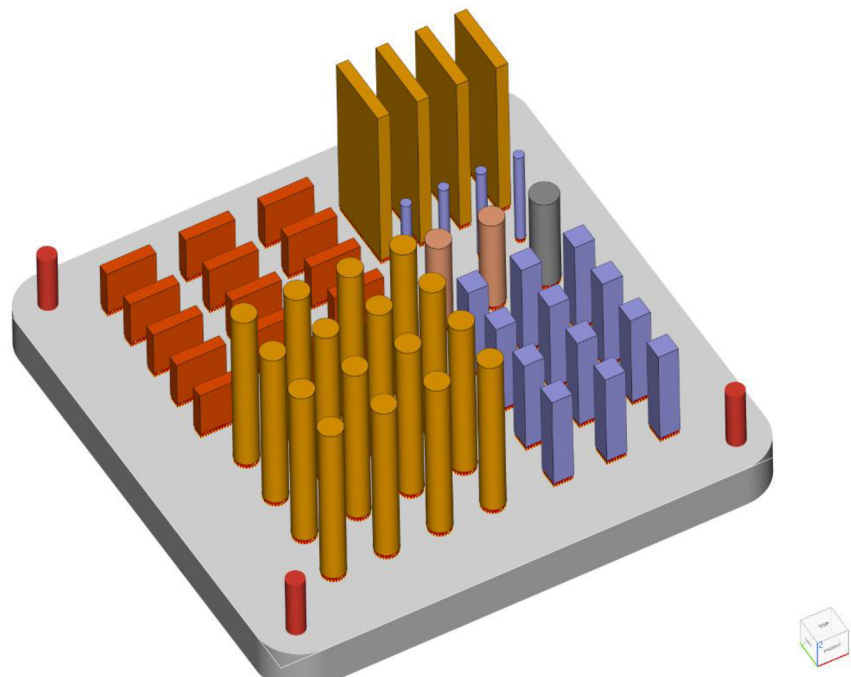
Obr. 3.1 3D tiskárna SLM280HL (SLM Solution Group AG, Lübeck, Německo)

Společnost SLM Solutions Group AG též dodává prášek slitiny Inconel 718 použitý při tisku. Histogram převzatý od společnosti SLM Solutions Group AG ukazuje, že rozložení velikosti částic odpovídá užití pro aditivní technologie SLM.



Obr. 3.2 Rozdělení velikosti částic prášku Inconel 718

Návrh a definice všech vzorků byla provedena v programu Materialise Magics 23.1. Vzorky byly tisknuty tak, aby zaujímaly co nejmenší půdorysnou plochu, čímž lze minimalizovat vnitřní prnutí. Zároveň se tímto uzpůsobením značně omezí potřeba podpor pro tisk. Tisk vzorků probíhal 3 mm nad ložem a spojení s ložem bylo provedeno pomocí blokových podpůrných struktur, viz obr. 3.2.



Obr. 3.3 Návrh dat v programu Materialise Magics 23.1

Nastavení procesních parametrů tisku přímo ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu. Obecně je nejdůležitější vlastností porozita a vnitřní pnutí výtisku. Největší vliv na porozitu a vnitřní pnutí má výkon laseru P [W] a skenovací rychlost v [mm/s]. Dalšími ovlivňujícími parametry jsou ochranná atmosféra a tloušťka nanášených vrstev. Základní parametry užívané pro tisk vzorků jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Parametry tisku pro slitinu Inconel 718

Parametr	Označení a jednotka	Hodnota
Výkon laseru	P [W]	200
Skenovací rychlost	v [mm/s]	900
Tloušťka vrstvy	h [μm]	30
Vzdálenost drah laseru	t [mm]	0,12
Ochranná atmosféra	-	Argon (Ar)

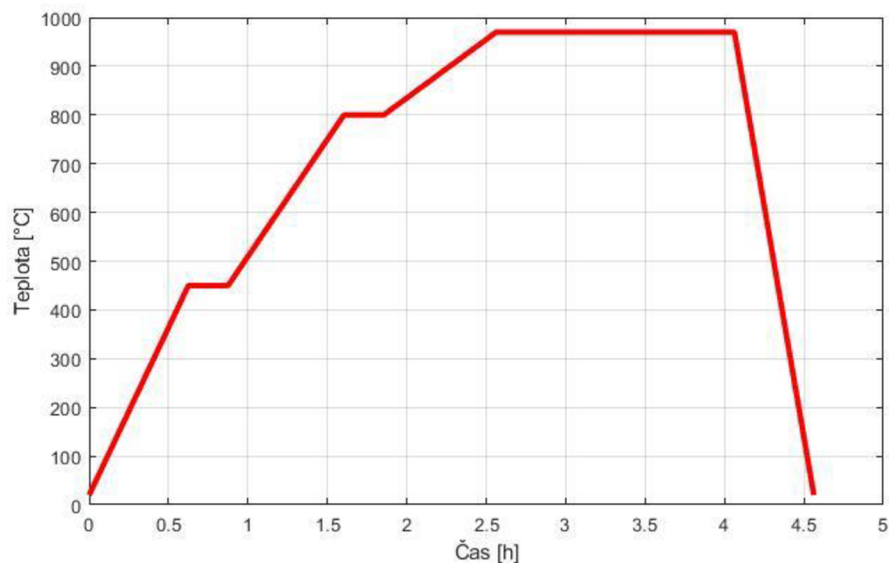
Po dokončení tisku byl z komory tisku odsát přebytečný prášek, viz obr. 3.4. Vzorky byly odtrženy od tiskové plochy, zbaveny podpor a odeslány do společnosti Jimalu s.r.o. k obrobení dle výkresové dokumentace.



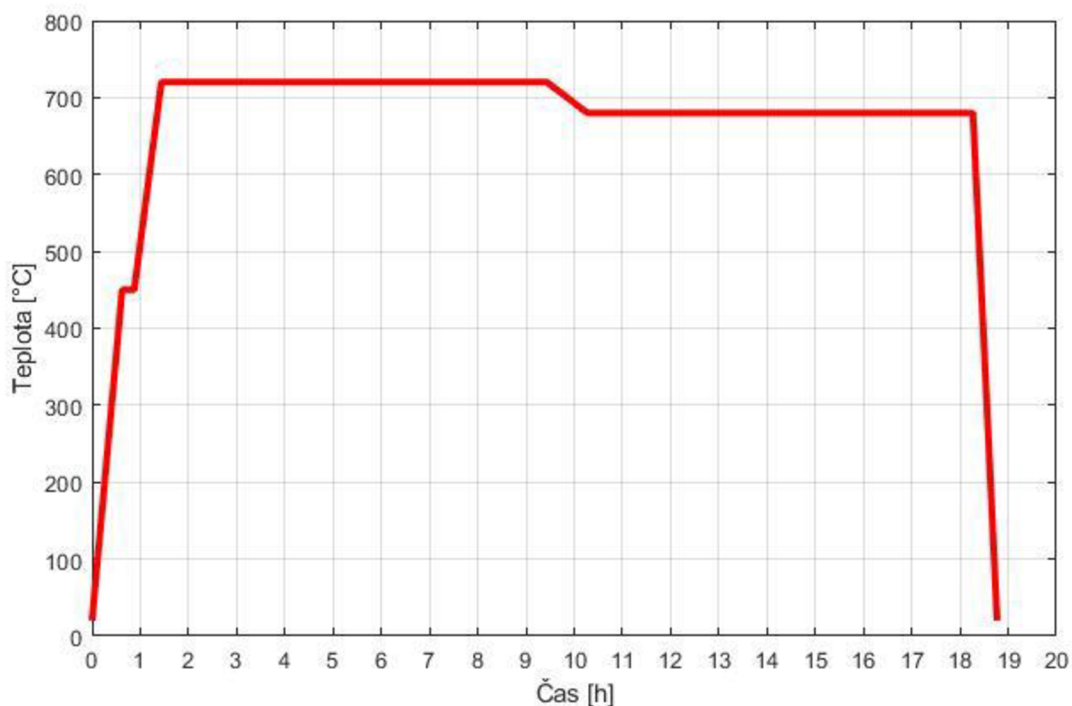
Obr. 3.4 Proces odsávání přebytečného prášku

Pro tepelné zpracování byla využita elektrická, odporová pec 11016S Clasic. Na vzorky byly aplikovány 2 typy tepelného zpracování (TZ1 a TZ2).

U tepelného zpracování **TZ1** byl proveden ohřev na teplotu 970 °C, výdrž na teplotě po dobu 1,5 hodiny s následným ochlazením do vody. Potom bylo aplikováno precipitační vytvrzování - ohřev na teplotu 720 °C rychlostí 0,5 °C.min⁻¹ s výdrží po dobu 8 hodin, po uplynutí doby výdrže byl vzorek po dobu 2 hodin ochlazován z teploty 720 °C na teplotu 620 °C a následně na této teplotě držen po dalších 8 hodin. Následovalo dochlazení na vzduchu. Celkový čas cyklu precipitačního vytvrzování tedy činil přes 18 hodin.

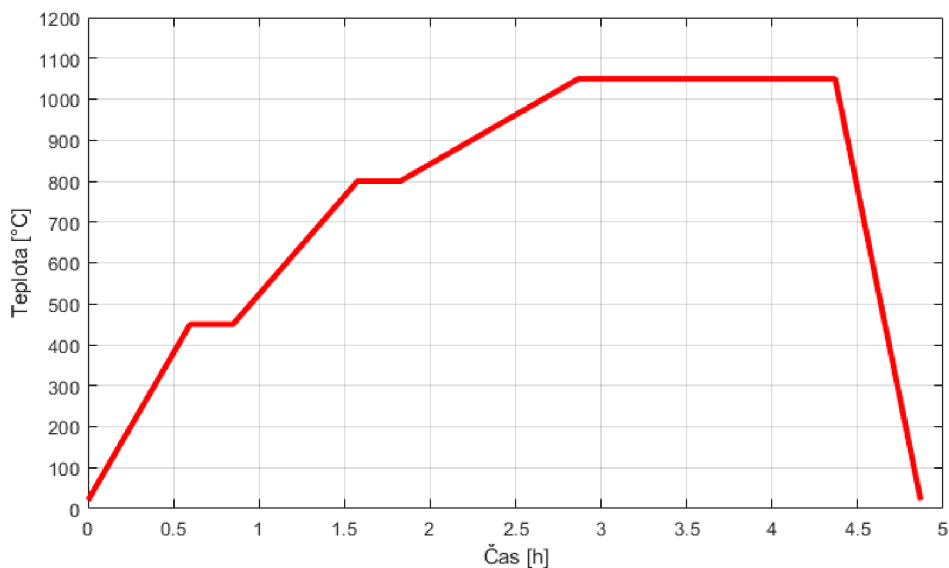


Obr. 3.5 Časový průběh rozpouštěcího žíhání pro TZ1

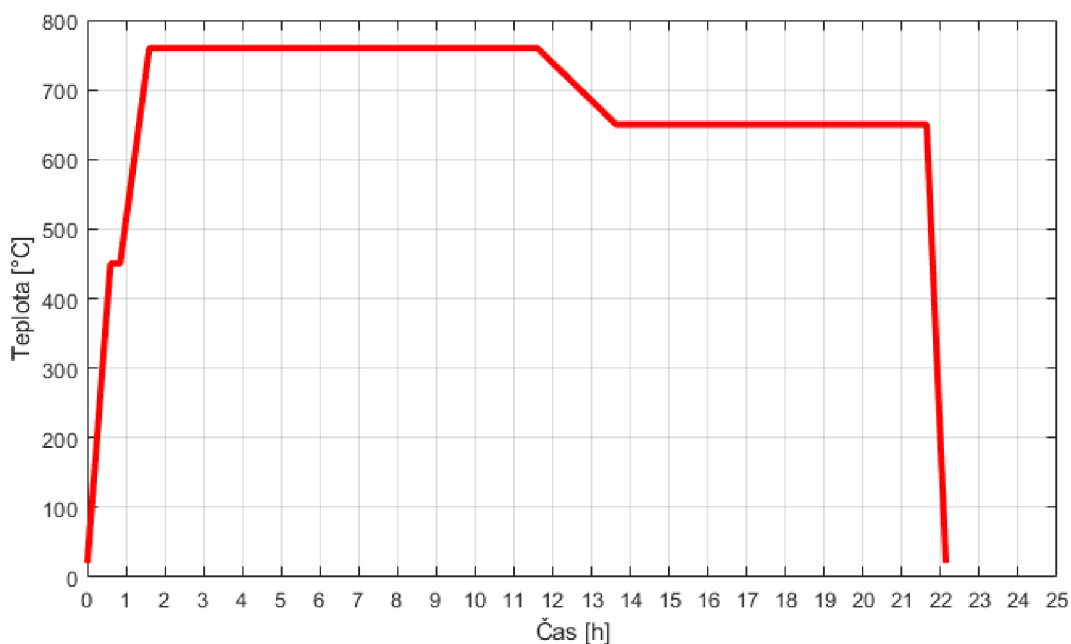


Obr. 3.6 Časový průběh vytvrzování TZ1

U tepelného zpracování **TZ2** byl proveden ohřev na teplotu 1050 °C, výdrž na teplotě po dobu 1,5 hodiny s následným ochlazením do vody. Potom bylo aplikováno precipitační vytvrzování - ohřev na teplotu 760 °C rychlostí 0,5 °C.min⁻¹ s výdrží po dobu 10 hodin, po uplynutí doby výdrže byl vzorek po dobu 2 hodin ochlazován z teploty 760 °C na teplotu 650 °C a následně na této teplotě držen po dalších 8 hodin. Následovalo dochlazení na vzduchu. Celkový čas cyklu precipitačního vytvrzování tedy činil přes 22 hodin.



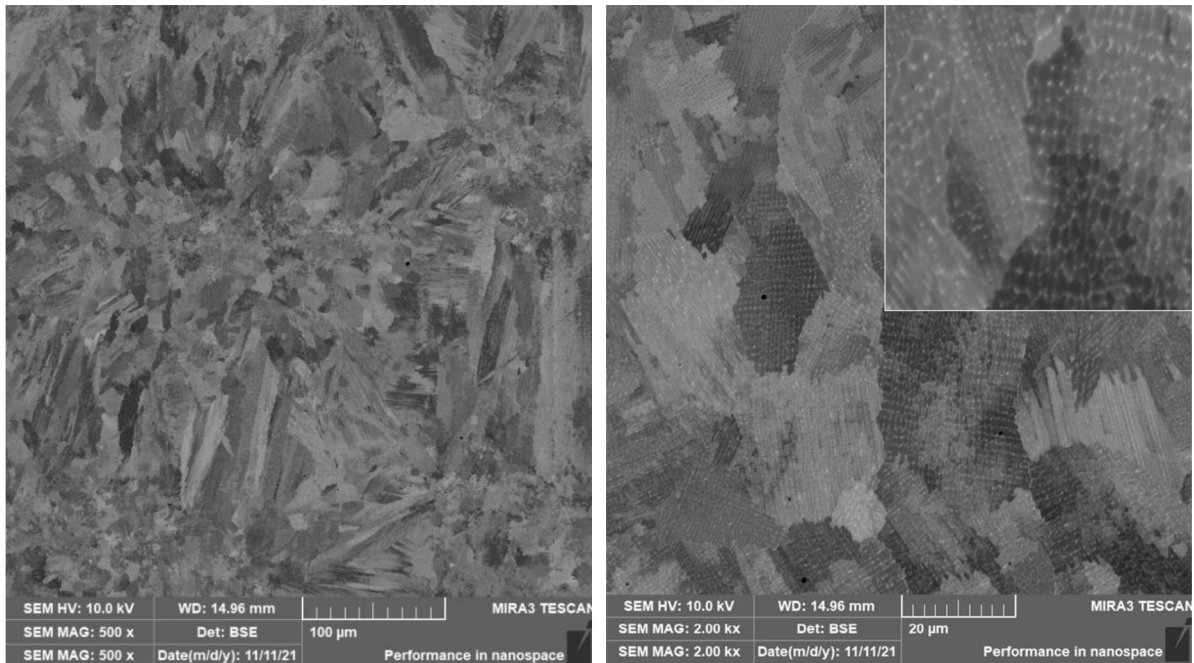
Obr. 3.7 Časový průběh rozpouštěcího žíhání pro TZ2



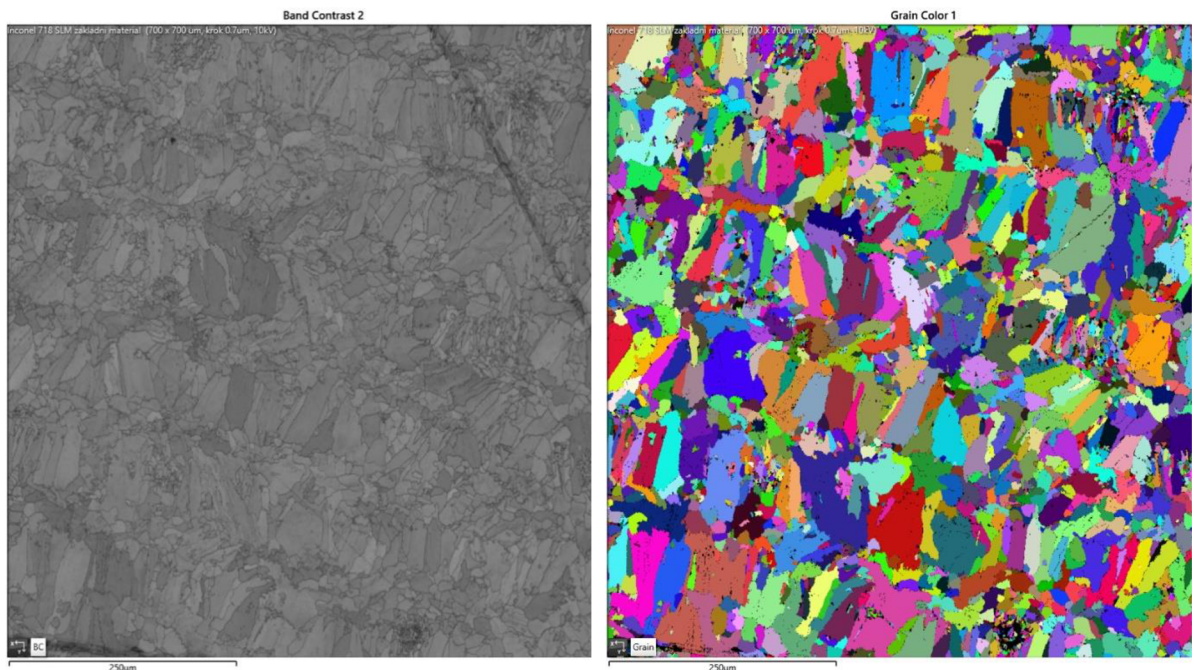
Obr. 3.8 Časový průběh vytvrzování TZ2

3.2 Struktura základního materiálu

Pro pozorování struktury byl využit elektronový mikroskop MIRA 3 TESCAN. Vzorky z 3D tisku pro metalografické pozorování byly připraveny běžným postupem, a to broušením a leštěním. Struktura materiálu je uvedena na obr. 3.9. Matrice obsahuje velmi jemný precipitát ve formě sít'oví. Velikost zrn byla stanovena pomocí metody EBSD a činila 17,51 μm , viz obr. 3.10.



Obr. 3.9 Struktura slitiny Inconel 718

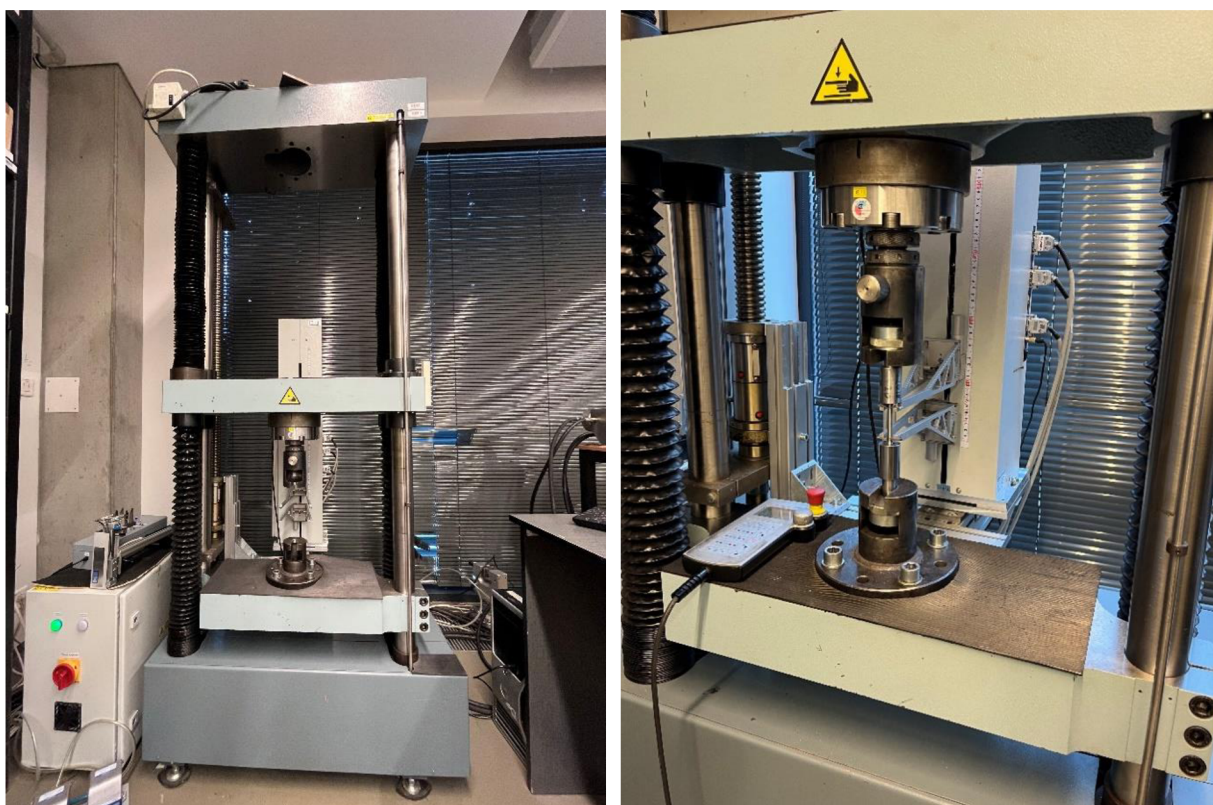


Obr. 3.10 Struktura slitiny Inconel 718 – EBSD

3.3 Mechanické vlastnosti základního materiálu

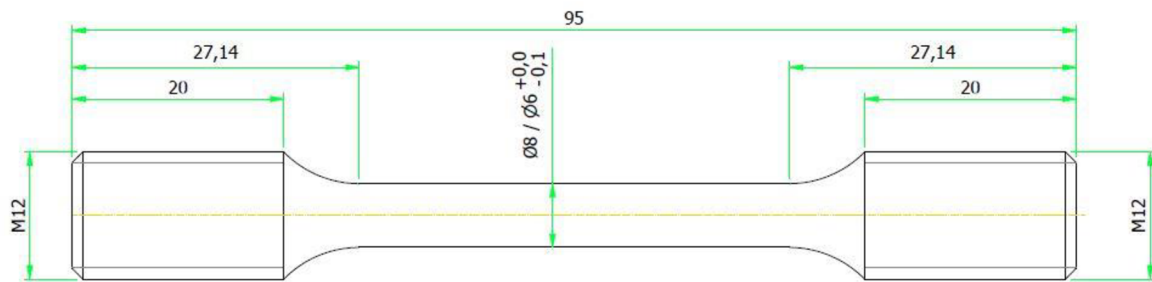
Pro určení mechanických vlastností materiálu byla použita statická zkouška tahem za pokojových teplot a za zvýšených teplot 600 °C, 700 °C a 800 °C. Proběhlo měření tvrdosti a rázová zkouška v ohybu.

Statická zkouška tahem za pokojové teploty se prováděla v laboratořích TUL, pomocí zkušebního zařízení TIRA Test 2300, viz obr. 3.11. Prodloužení vzorků bylo sledováno pomocí extenzometru MFX 500 a zatěžující síla pomocí tenzometrického snímače KAF 100. Zkouška proběhla v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Cílem zkoušky bylo stanovit smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , modul pružnosti v tahu E , homogenní tažnost A_g a celková tažnost A_{40mm} .



Obr. 3.11 Zkušební zařízení TIRA Test 2300

Zkušební vzorky byly vyrobeny dle normy pro statickou zkoušku tahem. Rozměry a tvar vzorku je uveden na obr. 3.12.



Obr. 3.12 Zkušební vzorek pro statickou zkoušku tahem – výkres



Obr. 3.13 Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem

Měření se uskutečnilo na dvou vzorcích. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2.

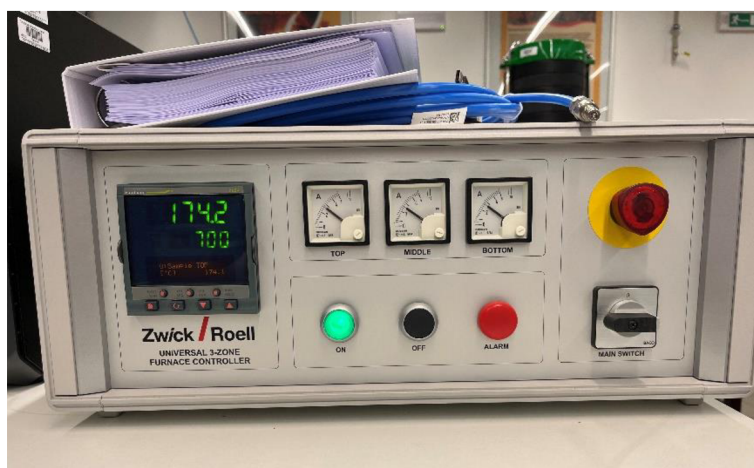
Tab 3.2 Hodnoty statické zkoušky tahem základního materiálu za pokojové teploty

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
Vzorek 1	586,1	895,7	147 670	24,59	29,82
Vzorek 2	576,1	852,3	129 717	11,98	12,19
Průměr	581,1	874,0	138 694	18,29	21,01

Statická zkouška tahem za zvýšených teplot (600°C, 700°C, 800°C) byla provedena v laboratořích TUL na zkušebním stroji s tepelnou komorou Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF, viz obr. 3.14. Prodloužení vzorku bylo sledováno pomocí extenzometru společnosti Epsilon, model 3549, který je určený pro sledování až do teplot 1200°C. Teplota v komoře byla udržována 3 zónovým regulátorem Zwick Roell Universal 3 zone furnace controller, viz obr. 3.15. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-2. Geometrie vzorků se shodovala se vzorky použitými pro zkoušku za pokojové teploty. Cílem zkoušky bylo stanovit smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , modul pružnosti v tahu E, homotgenní tažnost A_g a celková tažnost A_{40mm} .



Obr. 3.14 Zkušební stroj Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF

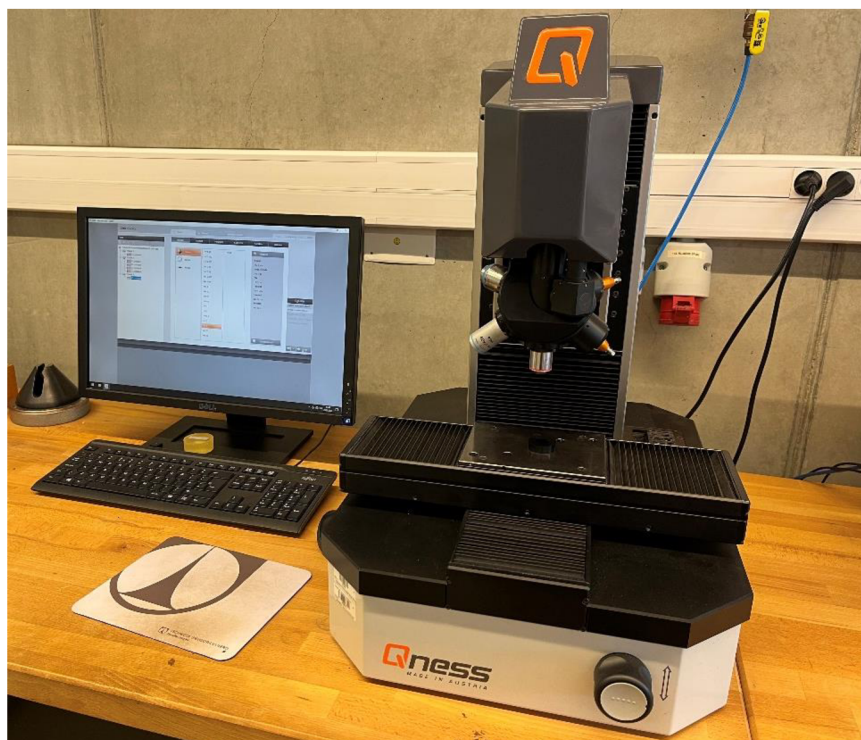


Obr. 3.15 Teplotní regulátor Zwick Roell Universal 3 zone furnace controller

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot základního materiálu

ZM	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A_g [%]	A_{35mm} [%]
600 °C					
Vzorek 1	533,3	815,8	632 425	27,1	27,6
Vzorek 2	532,1	801,1	1 526 549	29,9	32,4
Průměr	532,7	808,5	1 079 487	28,5	30,0
700 °C					
Vzorek 1	682,5	795	150 376	7,24	14,85
Vzorek 2	677,4	814,7	133 172	7,04	18,15
Průměr	680,0	804,9	141 774	7,14	16,5
800 °C					
Vzorek 1	575,3	642,7	167 972	0,83	8,92
Vzorek 2	545,3	577,1	125 760	2,94	9,39
Průměr	560,3	609,9	146 866	1,89	9,16

Tvrdoost byla měřena metodou podle Vickerse HV10. Měření se uskutečnilo v laboratořích TUL na mikrotvrdoměru Qness Q30A, viz obr. 3.16. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.4.



Obr 3.16 Mikrotvrdoměr Qness Q30A

Tab 3.4 Výsledné hodnoty tvrdosti základního materiálu

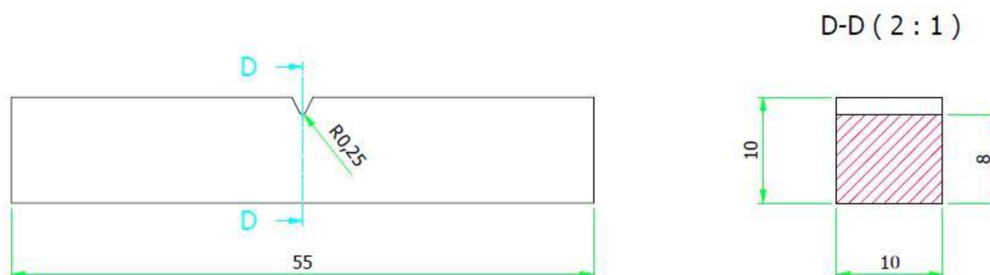
Tvrdost HV10											
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
	308	295	304	300	306	287	278	286	300	285	295 ± 10

Zkouška rázem v ohybu se uskutečnila v laboratořích TUL metodou Charpy. Zkušebním strojem byl LabTest CHK-400J-I, viz obr. 3.17. Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN ISO 148-1.



Obr. 3.17 Zkušební stroj LabTest CHK-400J-I

Zkušební vzorek měl tvar rozměry dle výkresu na obr. 3.18 s vrubem tvaru V.



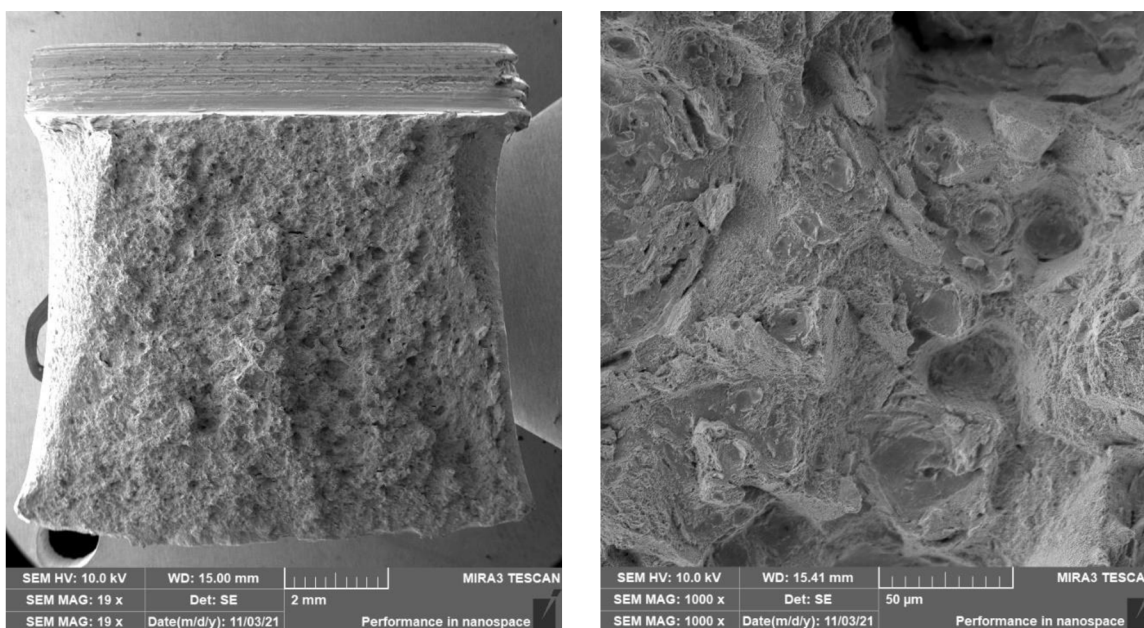
Obr. 3.18 Vzorek pro rázovou zkoušku v ohybu - výkres

Absorbovaná energie KV_2 [J] a vrubová houževnatost KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$] byla měřena na třech vzorcích. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Výsledné hodnoty absorbované energie a vrubové houževnatosti

Vzorek	KV_2 [J]	KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$]
1	38	47,5
2	55	68,75
3	50	62
Průměr	47,7	59,4
Směrodatná odchylka	7,13	8,86

Na obr. 3.19 jsou nafoceny lomy vzorků po rázové zkoušce v ohybu, ze kterých je zřejmé, že se jedná o tvárný lom.

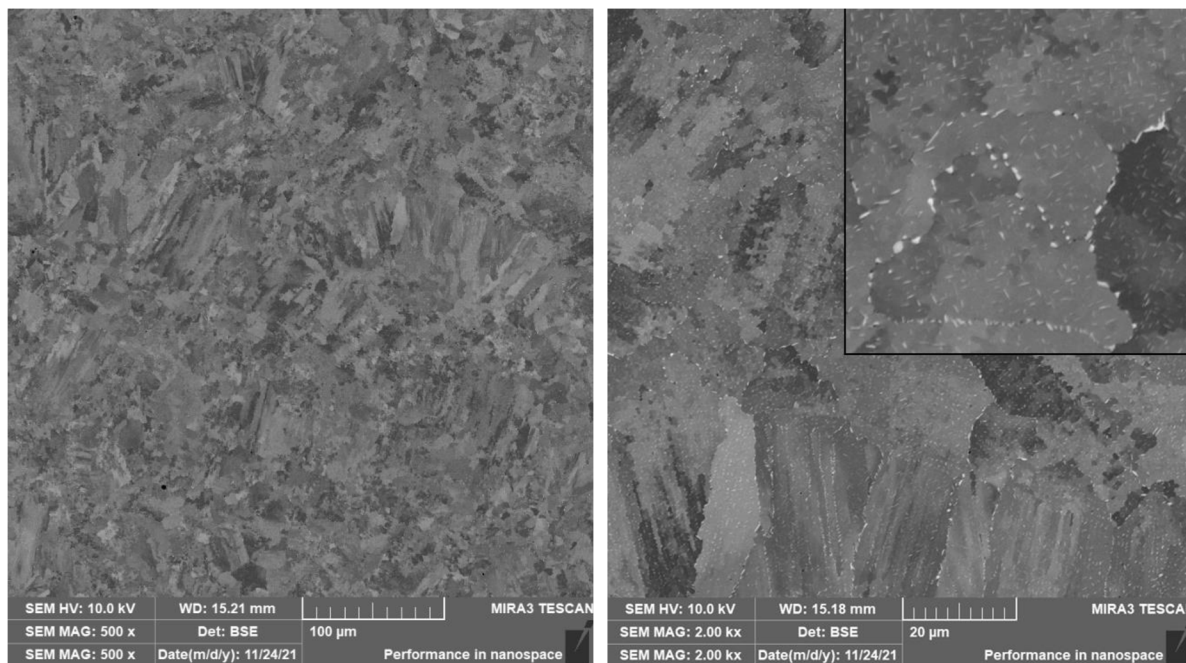


Obr. 3.19 Lom vzorků – vlevo celý vzorek, vpravo detail lomu

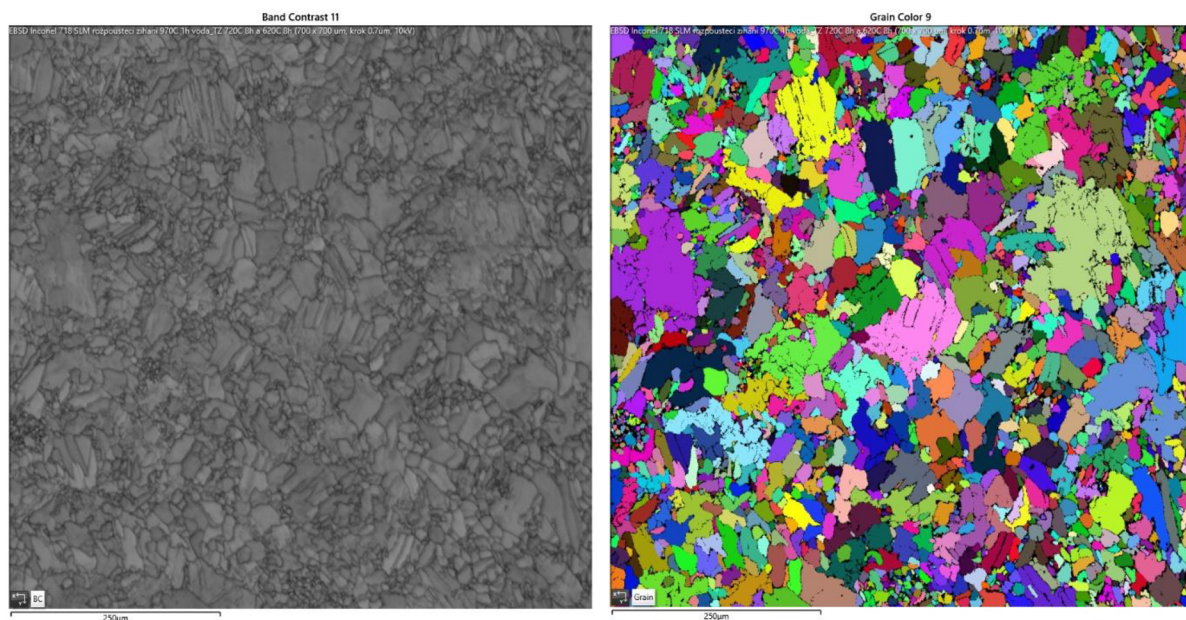
3.4 Struktura tepelně zpracovaného materiálu

Technologické parametry tepelného zpracování byly zvoleny ve shodě s parametry použitými ke zpracování tvářených vzorků ze slitiny Inconel v práci KUBÍNA [21].

U tepelně zpracovaných vzorků bylo opět provedeno pozorování struktury pod elektronovým mikroskopem MIRA 3. Na obr. 3.20 a 3.21 jsou ukázány vzorky po tepelném zpracování TZ1. Z pozorování je zřejmé, že tepelné zpracování TZ1 nemělo na strukturu výrazný vliv. Průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD činila 18,57 μm , viz 3.21.

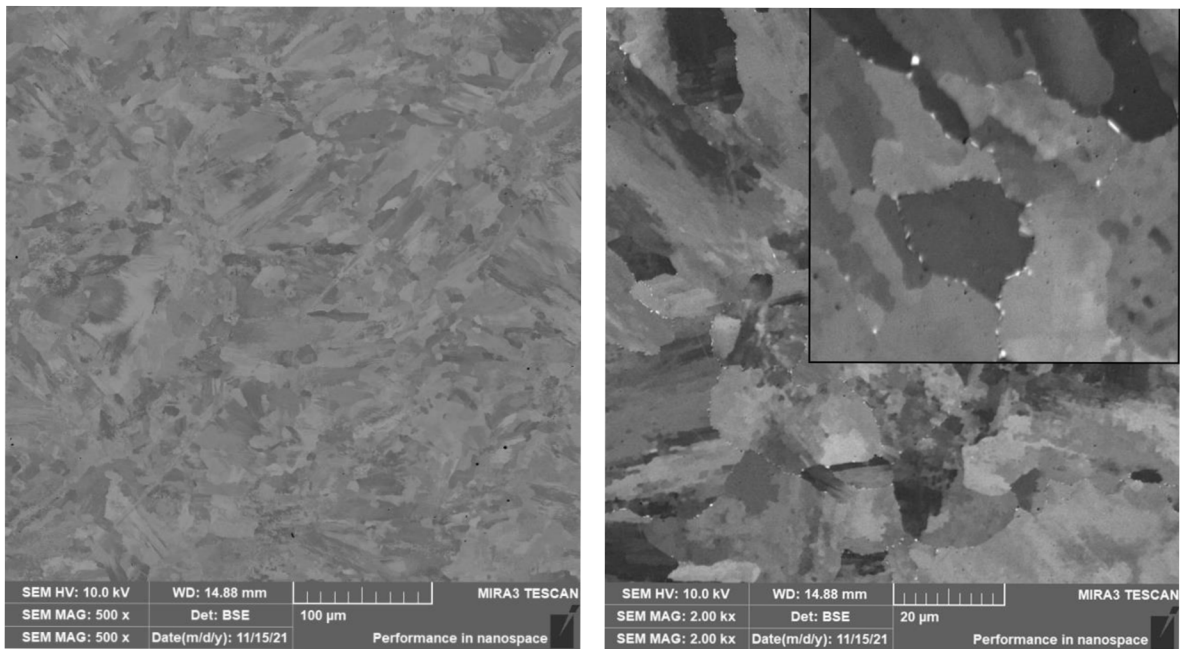


Obr 3.20 Struktura slitiny Inconel 718 po tepelném zpracování TZ1

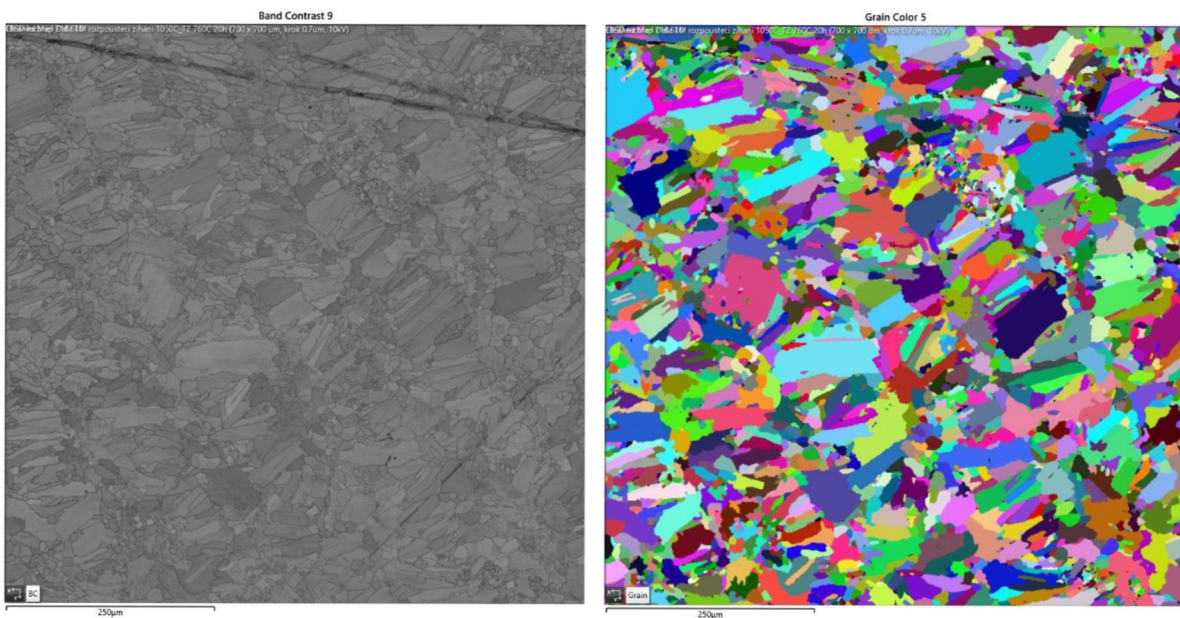


Obr. 3.21 Struktura slitiny Inconel 718 po tepelném zpracování TZ1 – EBSD

Na obr. 3.22 a 3.23 jsou ukázány vzorky po tepelném zpracování TZ2. Pozorování ukazuje, že ani tepelné zpracování TZ2 nemělo na strukturu a velikost zrna materiálu výrazný vliv. Průměrná velikost zrna stanovena metodou EBSD činila 17,26 μm , viz 3.23.



Obr. 3.22 Struktura slitiny Inconel 718 po tepelném zpracování TZ2



Obr. 3.23 Struktura slitiny Inconel 718 po tepelném zpracování TZ2 – EBSD

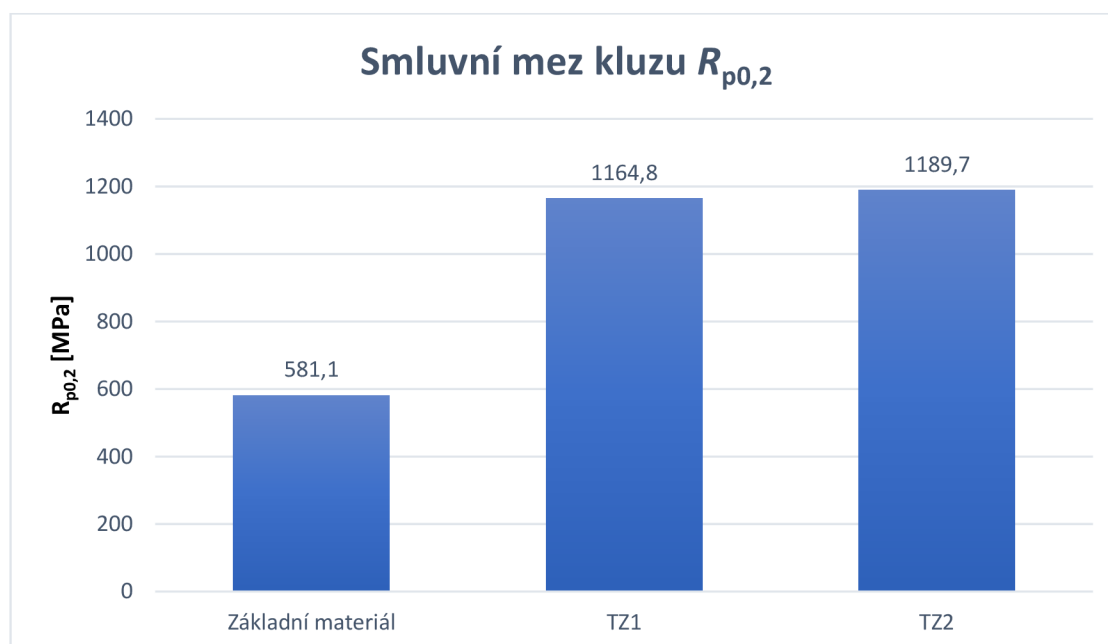
3.5 Mechanické vlastnosti tepelně zpracovaného materiálu

Tepelně zpracovaný materiál byl podroben stejným mechanickým zkouškám jako základní materiál. Průběh zkoušek byl popsán v kapitolách výše. Naměřené hodnoty jako mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , modul pružnosti v tahu E a tažnosti A_g a A_{40mm} při pokojové teplotě (RT) jsou uvedeny v tab. 3.6. Měření byla provedena vždy na dvou vzorcích daného tepelného zpracování.

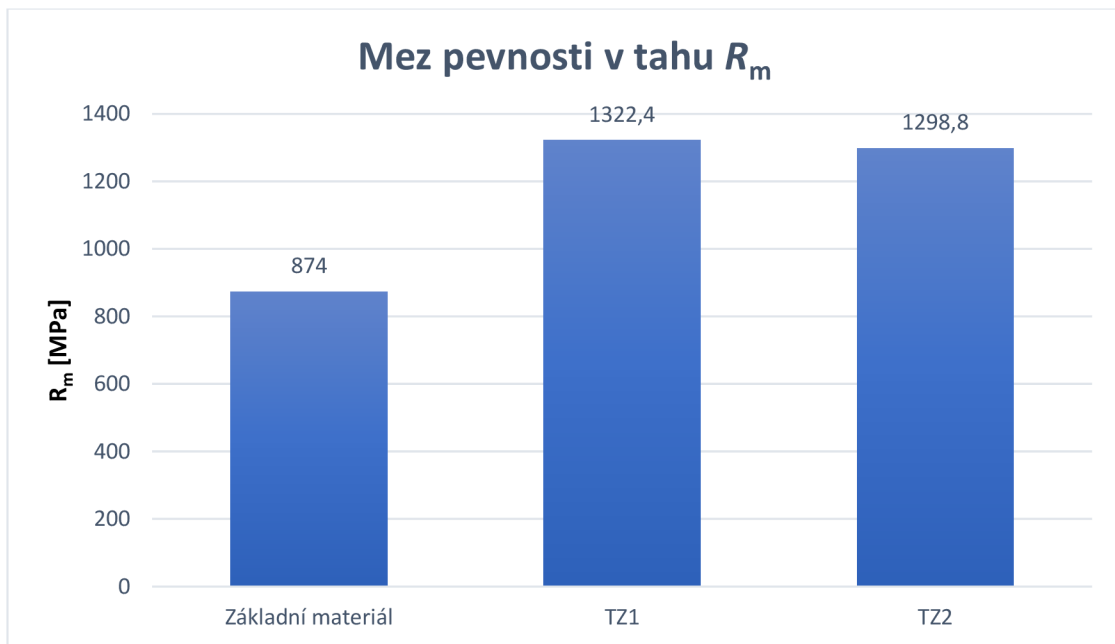
Tab. 3.6 Mechanické vlastnosti za pokojové teploty RT po tepelném zpracování

Teplota RT	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
ZM					
Průměr	581,1	874,0	138 694	18,29	21,01
TZ 1					
Vzorek 1	1165,2	1312,6	190 379	10,15	12,65
Vzorek 2	1164,5	1332,2	163 309	6,57	6,63
Průměr	1164,8	1322,4	176 844	8,36	9,64
TZ 2					
Vzorek 1	1190,2	1300,1	180 649	11,09	16,76
Vzorek 2	1189,3	1297,5	175 491	9,52	12,85
Průměr	1189,7	1298,8	178 070	10,31	14,81

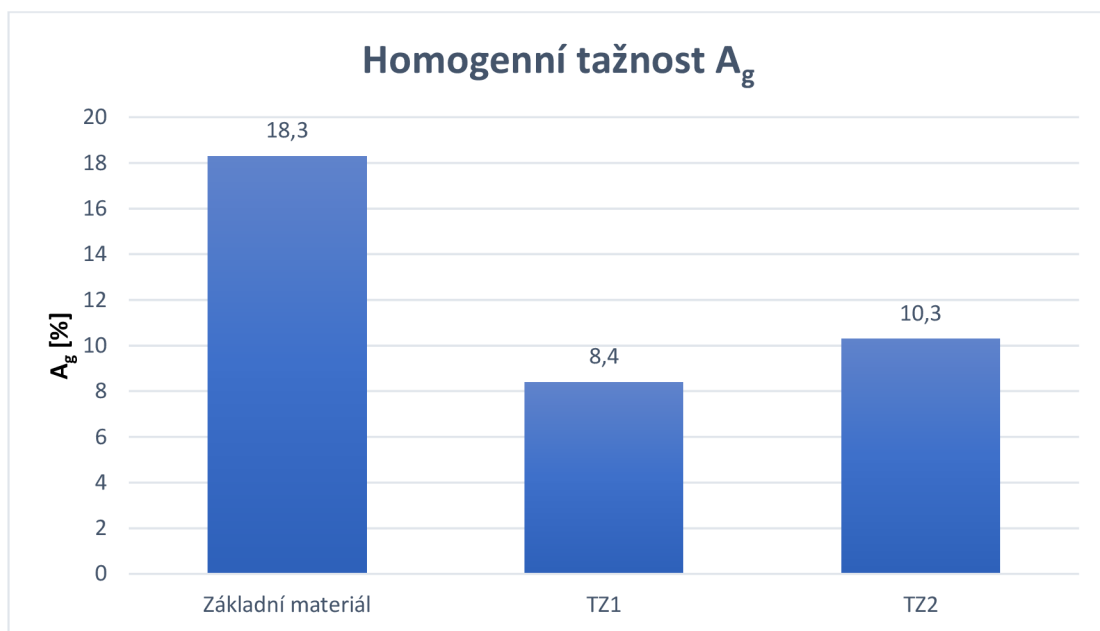
Grafické porovnání naměřených hodnot $R_{p0,2}$, R_m a A_g jsou uvedeny na obrázcích obr. 3.24, 3.25, 3.26.



Obr. 3.24 Porovnání průměrných hodnot smluvní meze kluzu za pokojové teploty pro ZM, TZ1 a TZ2



Obr. 3.25 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu za pokojové teploty pro ZM, TZ1 a TZ2



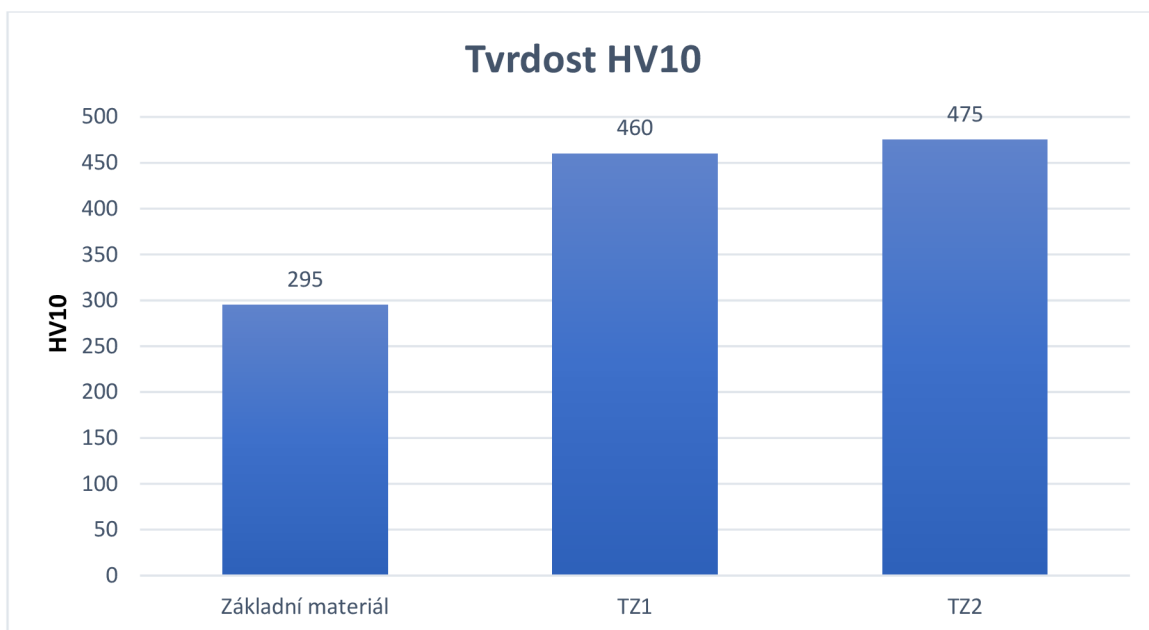
Obr. 3.26 Porovnání průměrných hodnot homogenní tažnosti za pokojové teploty pro ZM, TZ1 a TZ2

Následně byla opět měřena **tvrdost** materiálu metodou Vickers HV10. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.7. Grafické zpracování a porovnání se základním materiálem je pak na obr. 3.27.

Dále byla provedena rázová zkouška v ohybu metodou Charpy. Naměřené hodnoty absorbované energie KV_2 [J] a vrubové houževnatosti KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$] jsou uvedeny v tab. 3.8.

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty tvrdosti HV10 po tepelném zpracování

Tvrdość HV10											
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
ZS	308	295	304	300	306	287	278	286	300	285	295 ± 10
TZ1	437	451	451	476	474	482	456	446	449	478	460 ± 16
TZ2	460	468	462	485	465	484	492	468	494	471	475 ± 13

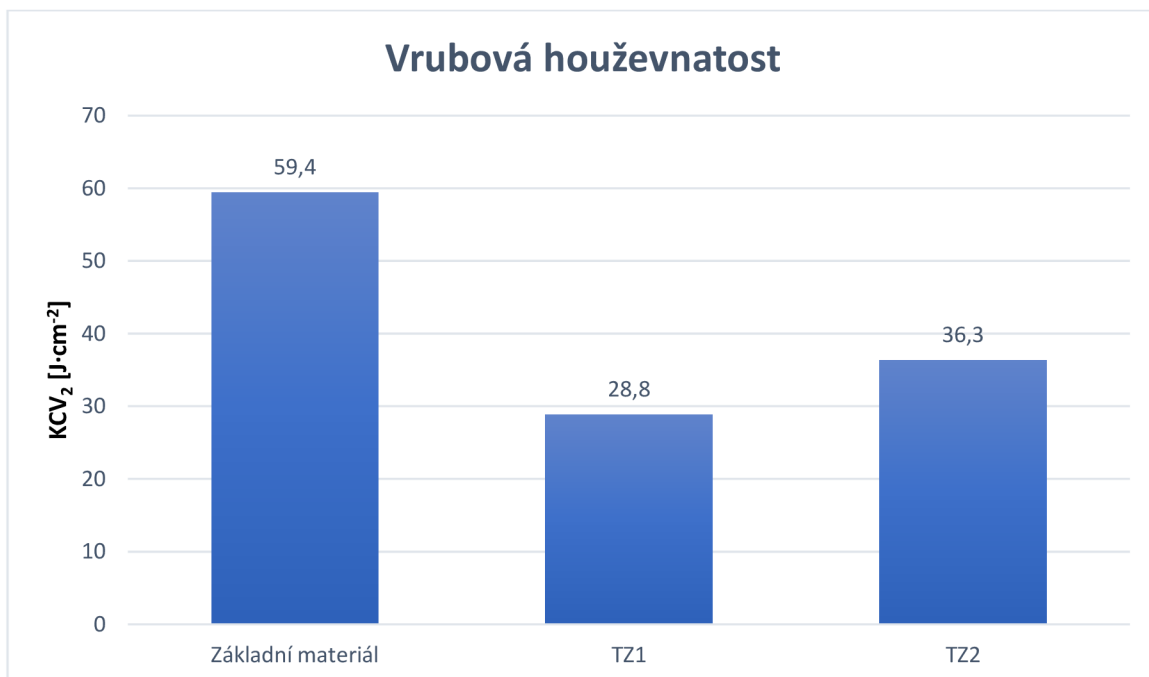


Obr. 3.27 Porovnání průměrných hodnot tvrdosti HV10 za pokojové teploty pro ZM, TZ1 a TZ2

Tab. 3.8 Naměřené hodnoty z rázové zkoušky v ohybu

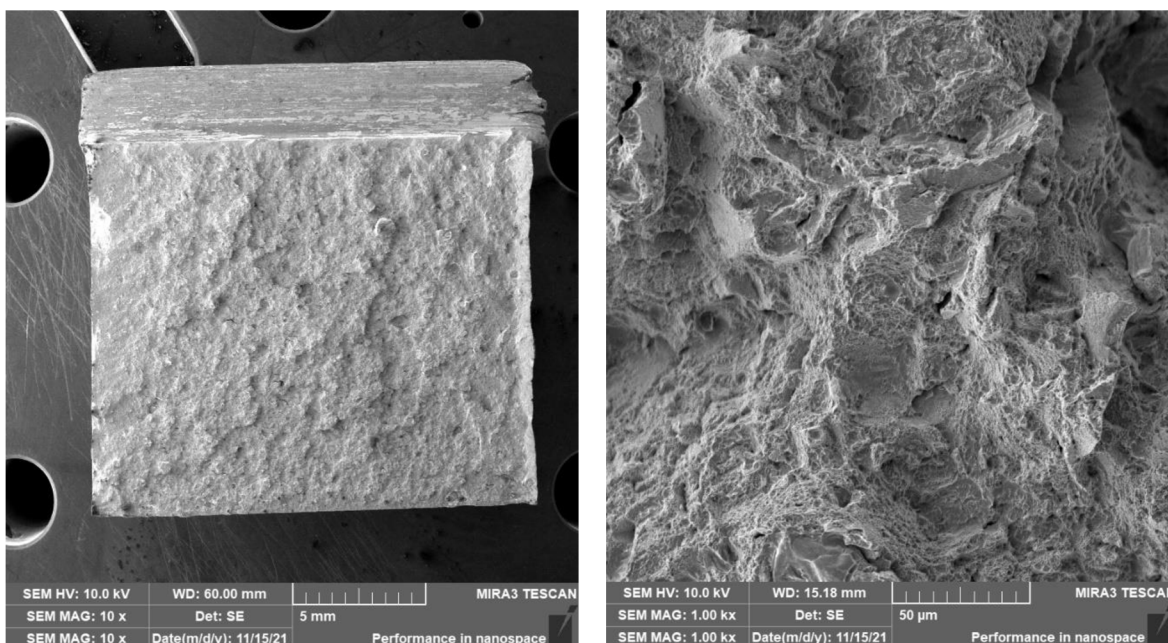
	KV ₂ [J]	KCV ₂ [J·cm ⁻²]
ZM		
Průměr	47,7 ± 7,13	59,41 ± 8,86
TZ 1		
Vzorek 1	14	17,5
Vzorek 2	32	40
Průměr	23	28,8
TZ 2		
Vzorek 1	20	25
Vzorek 2	36	45
Vzorek 3	31	39
Průměr	29	36,3
Směrodatná odchylka	6,68	8,38

Grafické porovnání výsledků vrubové houževnatosti KCV_2 je zpracováno na obr. 3.28.

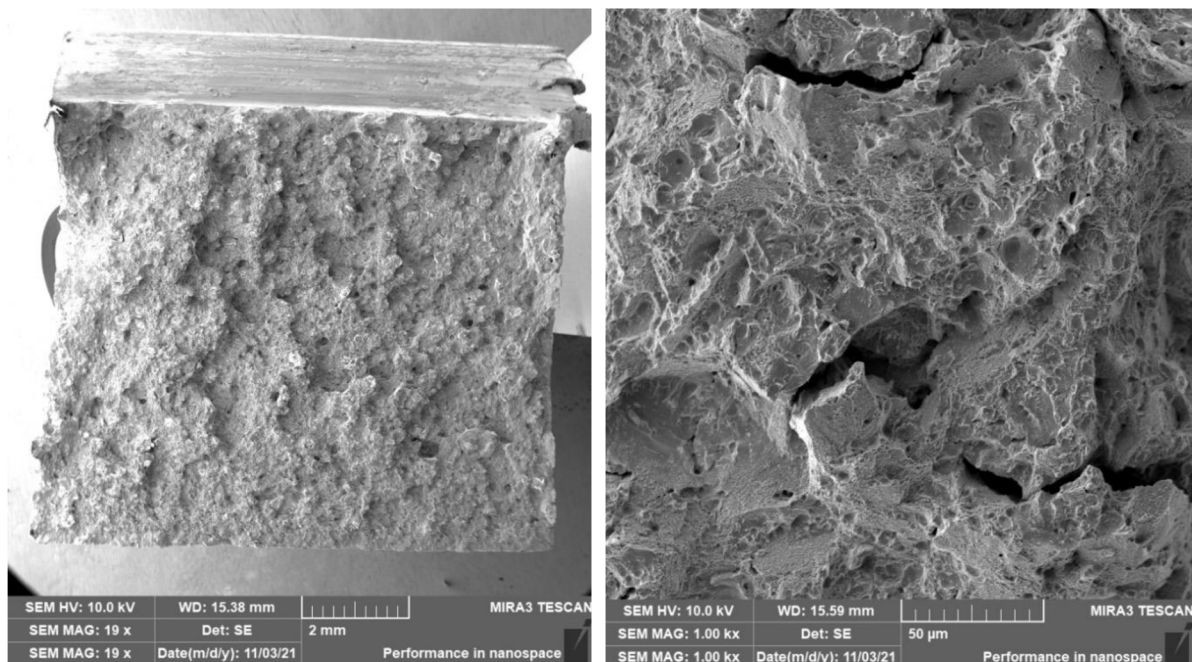


Obr. 3.28 Porovnání průměrných hodnot vrubové houževnatosti pro ZM, TZ1 a TZ2

Na obrázku 3.29 jsou snímky lomu po rázové zkoušce v ohybu vzorku zpracovaného dle tepelného zpracování označeném TZ1. Na obrázku 3.30 potom vzorku zpracovaného dle TZ2. Stejně jako u základního stavu se v obou případech jedná o tvárný lom.



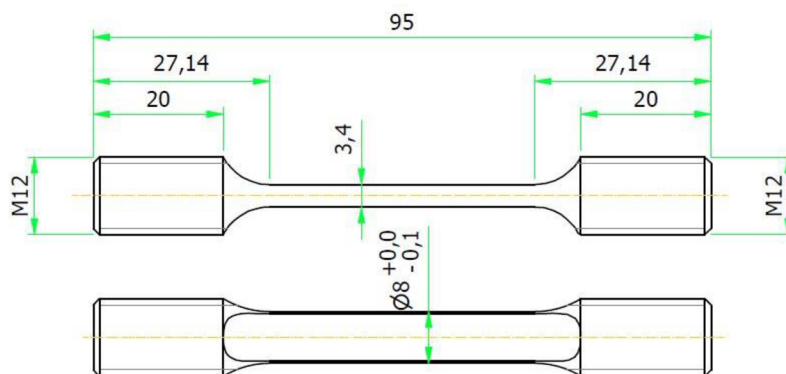
Obr. 3.29 Lom vzorků po TZ1 – vlevo celý vzorek, vpravo detail lomu



Obr. 3.30 Lom vzorků po TZ2 – vlevo celý vzorek, vpravo detail lomu

Statická zkouška tahem za zvýšených teplot byla provedena pouze u tepelně zpracovaného materiálu dle TZ2. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.9.

Na rozdíl od běžných ocelí, u kterých s rostoucí teplotou výrazně klesá pevnost materiálu, tak testovaný materiál Inconel 718 zachovává pevnostní charakteristiky i za vyšších teplot. Upínací čelisti testovacího zařízení jsou zhotoveny z niklové slitiny s obchodním označením MAR. Vzhledem k tomu, že testovaný materiál je chemicky velmi podobný čelistem, bylo nutné rozměry zkušebního tělesa upravit tak, aby závity upínacích čelistí M12 nebyly namáhány nad limitní hodnotou danou výrobcem stroje. Tato hodnota je pro podmínky testování (800 °C) 35 kN. Tvar a rozměry upraveného zkušebního tělesa jsou uvedeny na obr. 3.31.

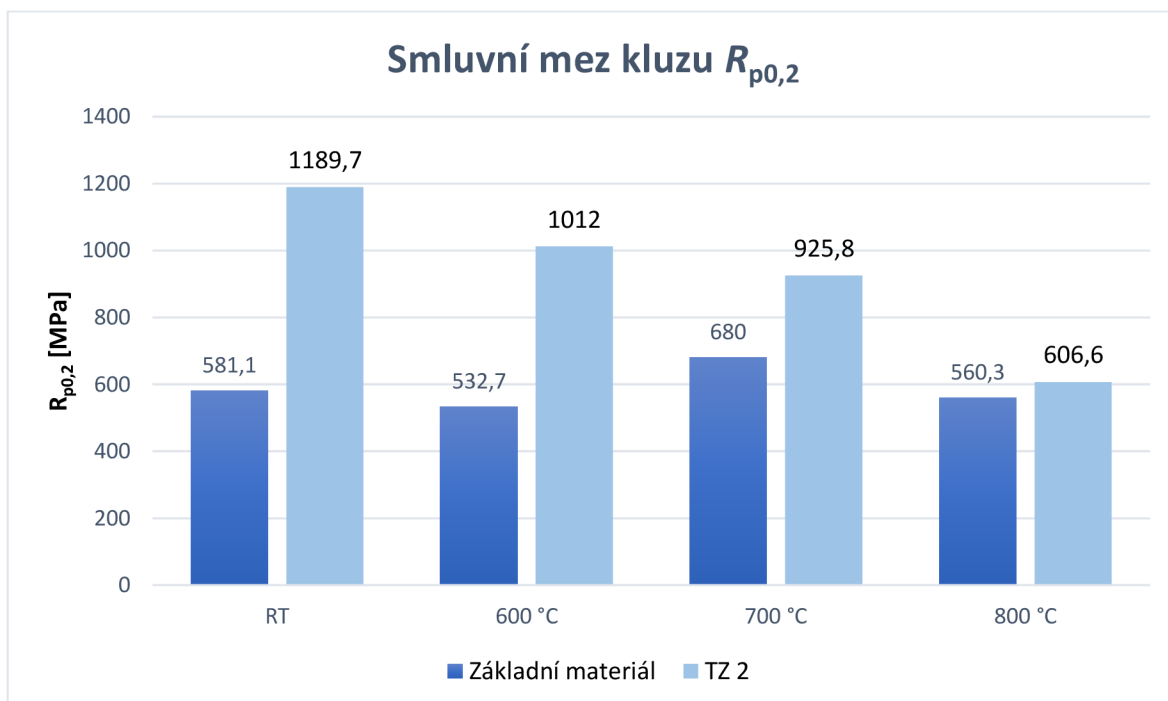


Obr. 3.31 Zkušební vzorek pro statickou zkoušku tahem za tepla pro TZ2 – výkres

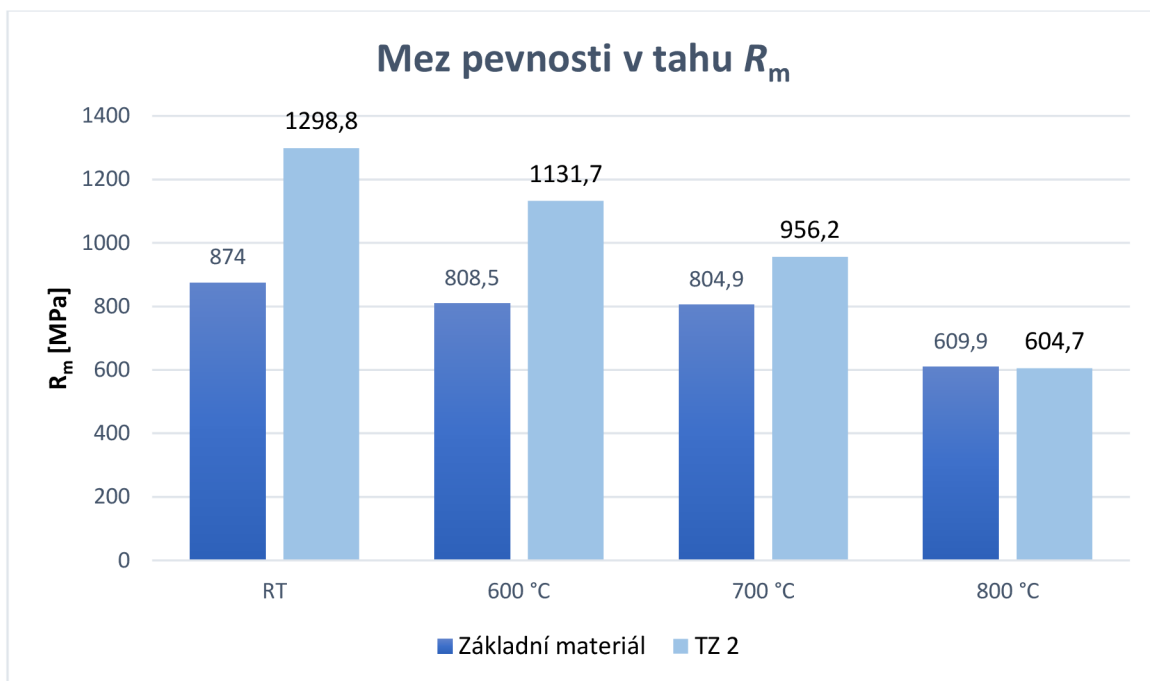
Tab 3.9 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot po tepelném zpracování TZ2

TZ2	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]	A_g [%]	A_{35mm} [%]
600 °C					
Vzorek 1	1011,6	1136,5	174 201	5,80	7,97
Vzorek 2	1012,5	1126,9	158 290	3,61	3,78
Průměr	1012,1	1131,7	166 245	4,7	5,87
700 °C					
Vzorek 1	908,5	942,1	147 907	0,67	1,74
Vzorek 2	943,1	970,2	160 253	0,60	1,27
Průměr	925,8	956,15	154 080	0,635	1,51
800 °C					
Vzorek 1	591,3	596,1	130 160	0,36	6,15
Vzorek 2	620,6	613,2	137 334	0,33	2,52
Průměr	606,6	604,7	133 747	0,345	4,34

Porovnání průměrné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti materiálu v základním stavu a po tepelném zpracování je uvedeno na obr. 3.32 a 3.33.



Obr 3.32 Porovnání průměrných hodnot smluvní meze kluzu za zvýšených teplot pro ZM a TZ2



Obr. 3.33 Porovnání průměrných hodnot meze pevnosti v tahu za zvýšených teplot u ZM a TZ2

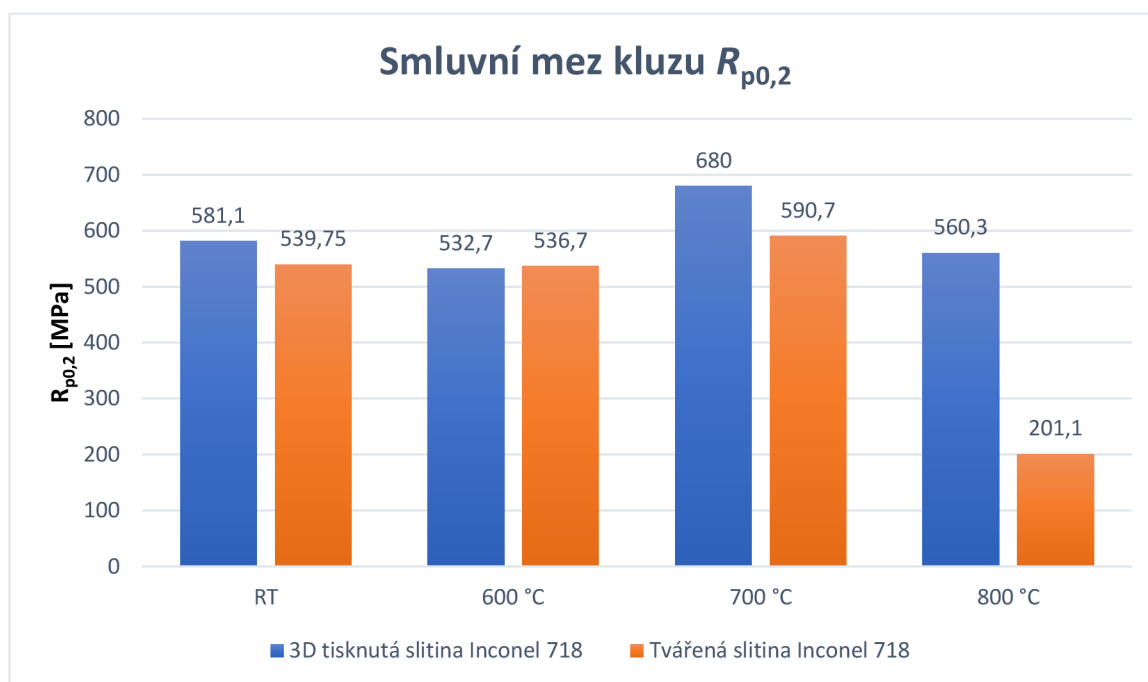
4. Diskuze výsledků

Bakalářská práce byla zaměřena na sledování změn mechanických vlastností 3D tisknuté slitiny Inconel 718 po aplikaci tepelného zpracování a jejich následné porovnání s vlastnostmi slitiny vyrobené procesem tváření.

Práce porovnává výsledky s diplomovou prací Kubína [21], který hodnotil mechanické vlastnosti Inconelu 718 vyrobeného metodou tváření.

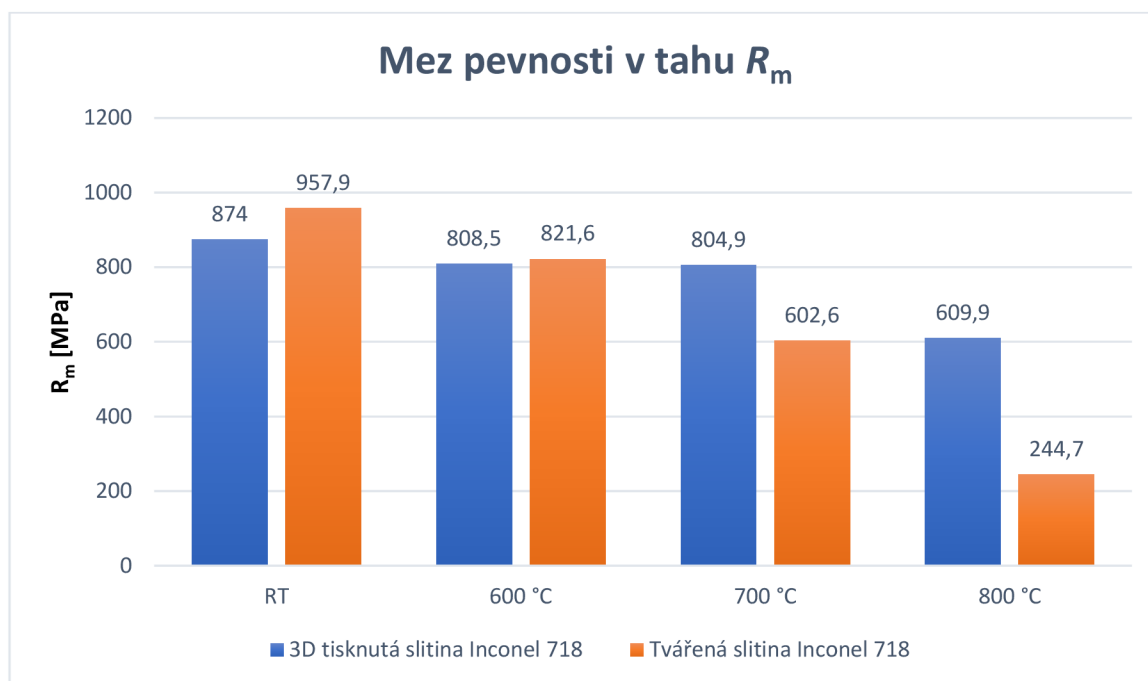
V první fázi experimentu byla hodnocena struktura 3D tisknutého materiálu. Dále byly hodnoceny mechanické vlastnosti jako mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnost A_g , Youngův modul pružnosti E a to i za zvýšených teplot (600 °C, 700 °C, 800 °C). Dále pak absorbovaná energie KV_2 , vrubová houževnatost KCV_2 a tvrdost podle Vickerse. Následně byly nové vzorky podrobeny tepelnému zpracování a proběhly stejné zkoušky jako na základním materiálu.

Grafické porovnání meze kluzu $R_{p0,2}$ a pevnosti v tahu R_m tištěných a tvářených vzorků v základním stavu je uvedeno na obr. 4.1 a 4.2. 3D tisknutý materiál v základním stavu dosahuje při RT oproti tvářenému vyšší mez kluzu o cca 8 %, naopak nižší meze pevnosti v tahu o cca 9 %.



Obr. 4.1 Porovnání meze kluzu materiálů v základním stavu dle způsobu výroby

Nevýhodou 3D tisknutého materiálu je to, že v základním stavu má výrazně nižší tvárné schopnosti než materiál tvářený, který v základním stavu vykazuje oproti 3D tisku přibližně 4x vyšší vrubovou houževnatost. Porovnání vrubové houževnatosti je uvedeno na obr. 4.5.

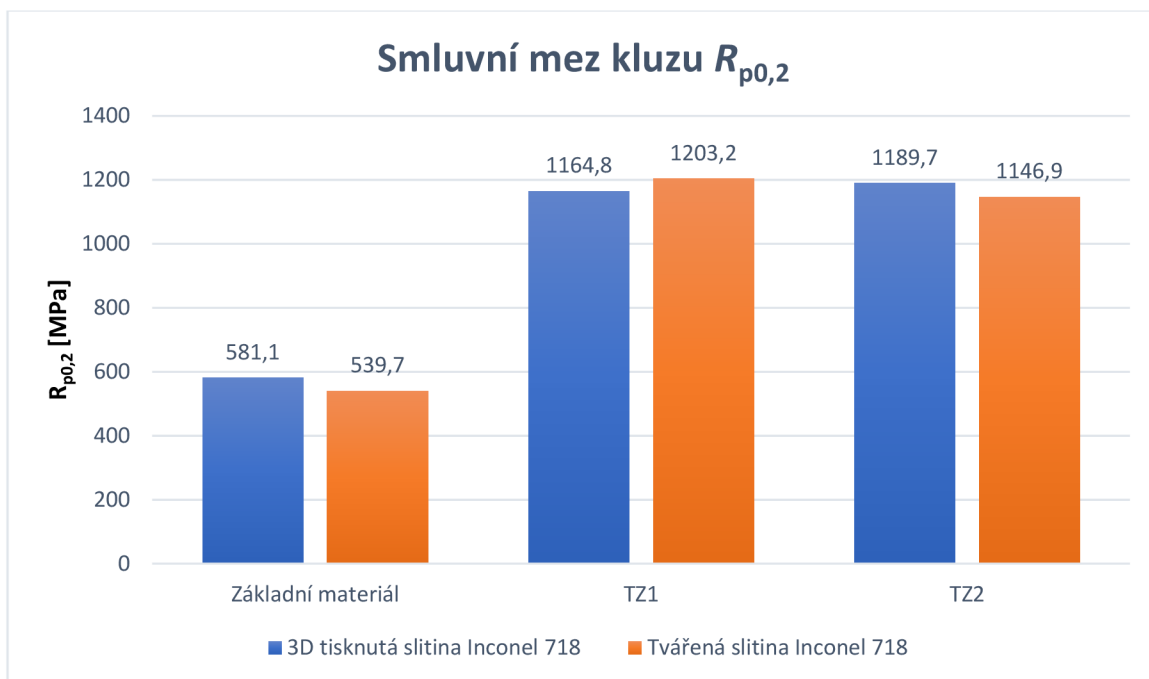


Obr. 4.2 Porovnání meze pevnosti materiálů v základním stavu dle způsobu výroby

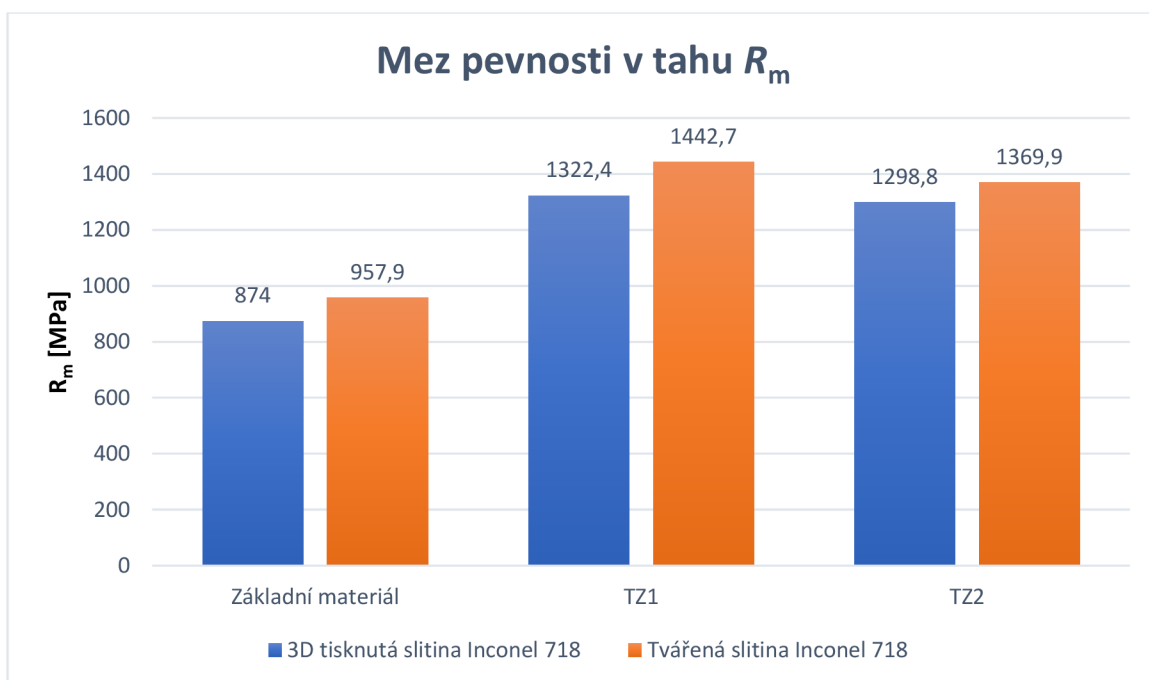
Materiál si zachovává vysokou pevnost i za zvýšených teplot, v tom se 3D tisk od tvářeného materiálu neliší. Stejně jako u tvářeného materiálu byla pozorována anomálie, kde za teploty 700 °C, což je hranice použitelnosti materiálu, vzrůstala mez kluzu. Měření však ukazuje, že 3D tisknutý materiál dosahuje obdobných pevností na 800 °C jako tvářený na 700 °C.

Pozorování struktury materiálu prokázalo, že tepelné zpracování nemělo v případě 3D tisknutého materiálu téměř žádný vliv na velikost zrna, velikost před i po tepelném zpracování činila cca 18 μm, čímž se liší od tvářených vzorků, kde zrno po tepelném zpracování značeného jako TZ2 zhrublo z cca 9 μm na 32 μm [21].

Z provedených měření vyplývá, že u 3D tisknutého materiálu Inconel 718 zvyšuje tepelné zpracování mechanické vlastnosti jako $R_{p0,2}$ a R_m , nicméně u obou způsobů tepelného zpracování dochází k významnému poklesu KV_2 a KCV_2 .



Obr. 4.3 Porovnání smluvní meze kluzu 3D tisku a tvářeného materiálu za pokojové teploty u ZM a po TZ1 a TZ2

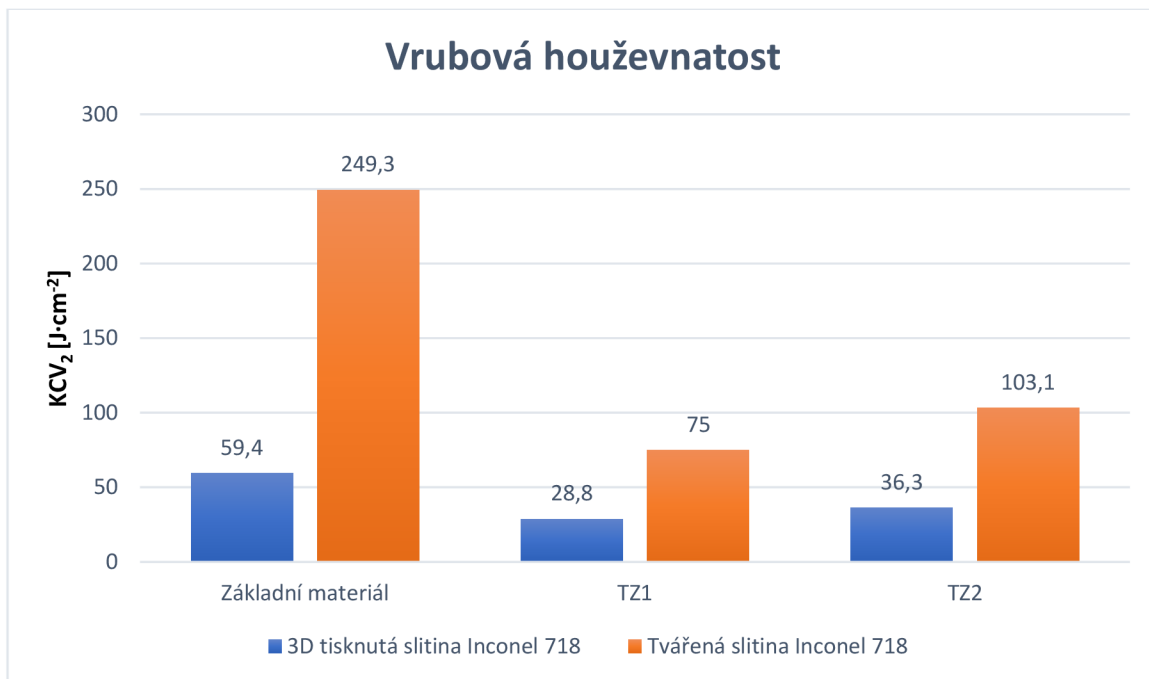


Obr. 4.4 Porovnání meze pevnosti 3D tisku a tvářeného materiálu za pokojové teploty u ZM a po TZ1 a TZ2

Stejně jako u tvářeného materiálu nelze pozorovat, že by typ tepelného zpracování (TZ1 a TZ2) měl značný vliv na výsledky mechanických vlastností jako mez kluzu a mez pevnosti v tahu, které u obou způsobů výroby činí cca 1200 MPa pro smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$ a cca 1300 – 1400 MPa

pro mez pevnosti v tahu R_m [21]. Vliv tepelného zpracování na mez kluzu a mez pevnosti je uveden na obr. 4.3 a 4.4.

Značný rozdíl pak je, že tvářený materiál dosahuje podstatně vyšší hodnoty absorbované energie KV_2 a vrubové houževnatosti KCV_2 (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Porovnání vrubové houževnatosti 3D tisku a tvářeného materiálu u ZM a po TZ1 a TZ2

Tepelné zpracování sice nezpůsobí tak markantní pokles houževnatosti jako u tvářeného materiálu, ale kvůli nízkým výchozím hodnotám, cca $59 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro KCV_2 , jej pokles značně ovlivní. Tepelné zpracování značené jako TZ1 dokonce způsobuje u 3D tisknutého materiálu tak velký pokles, že ho nelze doporučit k praktickému použití. U tepelně zpracovaného 3D tisknutého materiálu dle TZ2 dosahuje vrubové houževnatosti cca $36 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ při pevnosti v tahu R_m cca 1300 MPa, kde tvářený materiál dosahuje vrubové houževnatosti cca $103 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ při pevnosti v tahu cca 1370 MPa dle [21].

5. Závěr

Cílem práce bylo stanovit vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti 3D tištěné slitiny Inconel 718 metodou SLM a porovnat ho s tvářenou verzí materiálu.

V teoretické části bakalářské práce byly popsány niklové slitiny, jejich využití v technické praxi a způsob jejich tepelného zpracování.

Experimentální část byla rozdělena do několika fází. V první fázi byla zkoumána struktura 3D tisknutého materiálu v základním stavu. V druhé fázi byl základní materiál podroben mechanickým zkouškám, a to statické zkoušce tahem za pokojové teploty i za tepla, byla měřena absorbovaná energie, vrubová houževnatost a tvrdost. Ve fázi třetí byl materiál tepelně upraven. Ve čtvrté fázi byla u tepelně upravených vzorků opět zkoumána struktura a následně byly podrobeny stejným zkouškám jako materiál základní.

Z provedených experimentů lze konstatovat:

- Tepelné zpracování zvyšuje mechanické vlastnosti jako smluvní mez kluzu a mez pevnosti v tahu.
- Tepelné zpracování značně snižuje tvárné schopnosti jako je houževnatost.
- Tepelné zpracování TZ1 u 3D tisknutého materiálu způsobuje tak velký pokles vrubové houževnatosti, že ho nelze doporučit pro praktické použití.
- 3D tisknuté vzorky stejně jako tvářené mají tvárný lom.
- 3D tisknuté vzorky dosahují obdobné pevnosti v tahu jako materiál vyrobený technologií tváření.
- 3D tisknuté vzorky mají oproti tvářeným výrazně nižší výsledky vrubové houževnatosti a absorbované energie.
- Na rozdíl od tvářeného materiálu nezpůsobuje u 3D tisku tepelné zpracování změnu velikosti zrna.

Literatura

- [1] EVERHART, John. *Engineering properties of nickel and nickel alloys*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] DAVIS, Joseph R. *Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. B.m.: ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-685-0.
- [3] *Nikl, chemický prvek Ni, popis a vlastnosti* [online]. [vid. 2021-10-13]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II* [online]. B.m.: Brno: CERM. 2002. Dostupné z: <https://ndk.cz/view/uuid:b45814a0-b78a-11e6-a108-005056827e51?page=uuid:dbc83630-c655-11e6-bf97-005056825209>
- [5] *Special Metals - Technical Bulletins* [online]. [vid. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/>
- [6] SPECIAL METALS. *Monel 400* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-400.pdf>
- [7] SPECIAL METALS. *Monel R405* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-r-405.pdf>
- [8] SPECIAL METALS. *Monel K500* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-k-500.pdf>
- [9] SPECIAL METALS. *Inconel 600* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-600.pdf>
- [10] SPECIAL METALS. *Inconel 625* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [11] SPECIAL METALS. *Inconel 718* [online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
- [12] KUDRMAN, Jiří, Božena PODHORNÁ a Karel HRBÁČEK. *Tepelné zpracování niklových superslitin* [online]. 2003. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_03/papers/52.pdf
- [13] SMITH, W. *Structure and properties of engineering alloys*. B.m.: New York: McGraw-Hill, 1981.
- [14] PHAM, D. T a R. S GAULT. *A comparison of rapid prototyping technologies*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1998,

38(10), 1257–1287. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(97)00137-5

- [15] KOIKE, Ryo, Ryo ASHIDA, Keiichi YAMAZAKI, Yasuhiro KAKINUMA, Tojiro AOYAMA, Yohei ODA, Tatsuhiko KURIYA a Makoto FUJISHIMA. Graphical Evaluation Method for Void Distribution in Direct Energy Deposition. *Procedia Manufacturing* [online]. 2016, **6**, 16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry - MIC 2016, 105–112. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2016.11.014
- [16] OH, Wook Jin, Wook Jin LEE, Min Seob KIM, Jong Bae JEON a Do Sik SHIM. Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition. *Optics & Laser Technology* [online]. 2019, **117**, 6–17. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2019.04.012
- [17] LIAN, Zhichao. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*. B.m.: BoD – Books on Demand, 2010. ISBN 978-953-307-212-8.
- [18] *Inconel | IN718 | Metal 3D Printing at Materialise* [online]. [vid. 2021-10-20]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/inconel>
- [19] Explore Metals Used in 3D Printing. *SLM Solutions* [online]. [vid. 2021-10-20]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>
- [20] YUAN, Li, Songlin DING a Cuie WEN. Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials* [online]. 2019, **4**, 56–70. ISSN 2452199X. Dostupné z: doi:10.1016/j.bioactmat.2018.12.003
- [21] KUBÍN, Martin. *Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti Ni - typ 718* [online]. 2021. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160731>