

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny Ni – typ 718

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Martin Kubín

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny Ni – typ 718

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Kubín**
Osobní číslo: S19000238
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky se slitinami Ni a jejich základním rozdělením, vlastnostmi a využitím.
2. Provedte rešerši současného stavu znalostí o technologické zpracovatelnosti daného materiálu.
3. Seznamte se s podstatou dilatometrických měření.
4. Stanovte mechanické vlastnosti slitiny za RT i za zvýšených, případně za snížených teplot.
5. Na základě dilatometrických měření posuďte vliv tepelného zpracování na změnu vlastností materiálu.
6. Provedte zhodnocení a diskuzi výsledků.

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

tabulky, grafy
cca 50
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, 2013;495. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002.
- [3] Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. ISBN 80-85771-63-2. ZEROSS.
- [4] Uživatelský manuál přístroje DIL 805L, TA Instrument, 2017.
- [5] Technické normy ČSN.

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou 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 diplomová 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.

28. května 2021

Bc. Martin Kubín

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem tepelného zpracování na změny mechanických vlastností a struktury niklové slitiny typu Inconel 718. Niklové slitiny jsou často využívány jako konstrukční materiál, zejména díky jejich vysokým pevnostem, odolnosti creepu, stálosti za zvýšených teplot a odolnosti vůči korozi.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části jsou popsány niklové slitiny a postupy tepelného zpracování, které jsou vhodné právě pro tyto slitiny.

Cílem experimentální části bylo stanovit, jaký má vliv tepelné zpracování na mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718. Nejprve byla sledována struktura a mechanické vlastnosti základního materiálu pro možnost porovnání s tepelně zpracovanými vzorky. V dalším kroku byly navrženy vhodné parametry tepelného zpracování a následně hodnoceny vzniklé změny. Vyhodnocení mechanických vlastností bylo provedeno pomocí statické tahové zkoušky, měření tvrdosti a rázové zkoušky v ohybu.

Klíčová slova

Nikl, Inconel 718, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, struktura

Abstract

The presented diploma thesis deals with the influence of heat treatment on changes in mechanical properties and structure of nickel-based alloy type Inconel 718. Nickel alloys are often used as a construction material, mainly due to their high tensile strength, creep resistance, stability at elevated temperatures and corrosion resistance.

The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part describes nickel alloys and heat treatment procedures that are suitable for these alloys.

The aim of the experimental part was to determine the effect of heat treatment on the mechanical properties of Inconel 718. First, the structure and the mechanical properties of the base material were monitored for possibility of comparison with heat-treated samples. In the next part suitable parameters of heat treatment were proposed and subsequently the resulting changes were evaluated. The results of mechanical properties were performed by static tensile test, measuring the hardness and Charpy impact test.

Key words

Nickel, Inconel 718, heat treatment, mechanical properties, structure

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost, za poskytnutí mnoha cenných rad a věcných připomínek při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat také doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D., doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. a dalším pracovníkům Katedry strojírenské technologie za jejich výpomoc při realizaci experimentů a rovněž za poskytnutí cenných rad. V poslední řadě děkuji mé rodině a přátelům za jejich podporu během celého trvání studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1. Úvod.....	11
2. Teoretická část.....	12
2.1 Nikl a jeho slitiny.....	12
2.2 Niklové slitiny.....	14
2.2.1 Konstrukční slitiny.....	15
2.2.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.....	16
2.2.3 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny.....	17
2.3 Slitiny Inconel.....	19
2.3.1 Inconel 600.....	19
2.3.2 Inconel 625.....	20
2.3.3 Inconel 718.....	20
2.4 Tepelné zpracování niklových slitin.....	22
2.4.1 Tepelné zpracování slitiny Inconel 718.....	23
2.5 Dilatometrie.....	25
2.5.1 Dilatometry.....	25
2.5.2 Objemové a délkové změny materiálů při ohřevu.....	27
2.5.3 Měření a vyhodnocení transformačních změn.....	29
3. Experimentální část.....	31
3.1 Posouzení výchozích vlastností základního materiálu.....	31
3.1.1 Chemické složení.....	31
3.1.2 Mikrostruktura.....	32
3.1.3 Mechanické vlastnosti za normálních a zvýšených teplot.....	33
3.1.4 Zkouška rázem v ohybu.....	39
3.2 Posouzení možnosti aplikace TZ pomocí dilatometrie.....	42
3.2.1 Rozpouštěcí žihání RŽ1.....	43

3.2.2 Rozpouštěcí žihání a následné vytvrzování dle postupu TZ1	45
3.2.3 Rozpouštěcí žihání RŽ2	47
3.2.4 Rozpouštěcí žihání a následné vytvrzování dle postupu TZ2.....	48
3.2.5 Stanovení součinitele teplotní roztažnosti	50
3.3 Stanovení mechanických vlastností po tepelném zpracování.....	50
4. Diskuze výsledků.....	59
5. Závěr	65
Použitá literatura	66

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	Význam	Jednotka
3D	Trojdimenzionální	
FCC	Krychlová plošně středěná mřížka	
Ni ₃ (Ti,Al)	Sloučenina niklu s titanem a hliníkem	
Ni ₃ Nb	Sloučenina niklu s niobem	
γ'	Fáze gama'	
γ''	Fáze gama''	
HV	Tvrдость dle Vickerse	
LVDT	Linear Variable differential transformer	
V	Konečný objem	[m ³]
V ₀	Počáteční objem	[m ³]
β	Teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
ΔT	Rozdíl teplot	[K]
α	Teplotní součinitel délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
l	Konečná délka	[m]
l ₀	Počáteční délka	[m]
EBSD	Difrakce elektronového zpětného rozptylu	
RT	Pokožová teplota	
ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
A _g	Homogenní tažnost	[%]
A _{40mm}	Celková tažnost	[%]
l _e	Délka měřeného úseku	[mm]
HBW	Tvrдость dle Brinella	
KV ₂	Absorbovaná energie	[J]
KCV ₂	Vrubová houževnatost	[J.cm ⁻²]
TZ	Tepelné zpracování	
RŽ	Rozpouštěcí žihání	

1. Úvod

Požadavky na kovové materiály se odvíjejí od způsobu jejich zatěžování a prostředí, ve kterém pracují. Mnohdy se jedná o požadavky jen obtížně splnitelné a vzájemně si odporující. Jedná se například o součásti pracující za zvýšených teplot v chemicky agresivních prostředích, které jsou navíc cyklicky nebo creepově zatěžovány. Mezi materiály schopné pracovat za výše uvedených podmínek se řadí niklové slitiny.

Niklové slitiny se řadí mezi velice drahé konstrukční materiály, z důvodu využití drahých legujících prvků obsažených v jejich slitinách. Lze je rozdělit na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné a žárupevné, pro které je v některých případech použit pojem superslitiny. Tento pojem se používá pro slitiny speciálně vyvinuté pro práci v náročných podmínkách, které vyžadují vysoké žáruvzdornosti, žárupevnosti a korozivzdornosti. Jedná se např. o niklové slitiny Inconel 625 nebo Inconel 718. Tyto slitiny si drží svou vysokou pevnost, korozivzdornost a rozměrovou stálost i za vysokých teplot. Využívají se v případech, kdy už nelze použít vysokolegované korozivzdorné oceli, jejichž hranice použitelnosti končí přibližně na 650 °C. Nad touto teplotou se zpravidla využívají právě niklové superslitiny. První oblast využití niklových slitin byla pro letectví a kosmonautiku. Postupem času se rozšířily do dalších odvětví průmyslu jako je energetický, petrochemický, chemický atd.

Konvenční výroba niklových superslitin dosáhla téměř svého vrcholu a na řadu se dostávají aditivní technologie, které se snaží klasickou konvenční výrobu nahradit. Rozsáhlé výzkumy jsou zaměřeny na využití technologie 3D tisku pro potřeby průmyslu. Hlavní výhodou této nové technologie je, že nabízí neomezené tvarové možnosti, které byly dříve nemyslitelné.

Cílem této diplomové práce bylo popsat strukturu a mechanické vlastnosti tvářené, niklové slitiny Inconel 718 v základním stavu a dále sledovat, k jakým změnám dochází vlivem následného tepelného zpracování.

2. Teoretická část

2.1 Nikl a jeho slitiny

Nikl je vynikající konstrukční kov pro mnoho technických aplikací. Společně se železem a kobaltem se řadí do skupiny feromagnetických kovů. Byl objeven v roce 1751 švédským chemikem a mineralogem Axelem Frederikem Cronstedtem (1722-1765), při pokusech, kdy se snažil z měděné rudy izolovat měď. Po důkladných výzkumech fyzikálních vlastností byl nikl vyhodnocen jako nový prvek [1].

Nikl je stříbrobílý, lesklý, kujný i tažný kov, který se řadí mezi těžké kovy s hustotou $8908 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Krystalizuje do kubické plošně středěné mřížky. V tab. 2.1 jsou uvedeny jeho vybrané fyzikální vlastnosti. Mezi hlavní výhody patří vysoká pevnost za tepla i za studena. Vůči působení vody i vzduchu je nikl poměrně stálý, proto je často využíván k povrchové ochraně jiných kovů, zvláště železa. Značně také odolává chemickým rozpouštědlům. Největší nevýhodou je jeho vysoká cena. Z tohoto důvodu se nikl a jeho slitiny využívají teprve až pro aplikace, kde není možné zvolit méně finančně náročnou variantu [4].

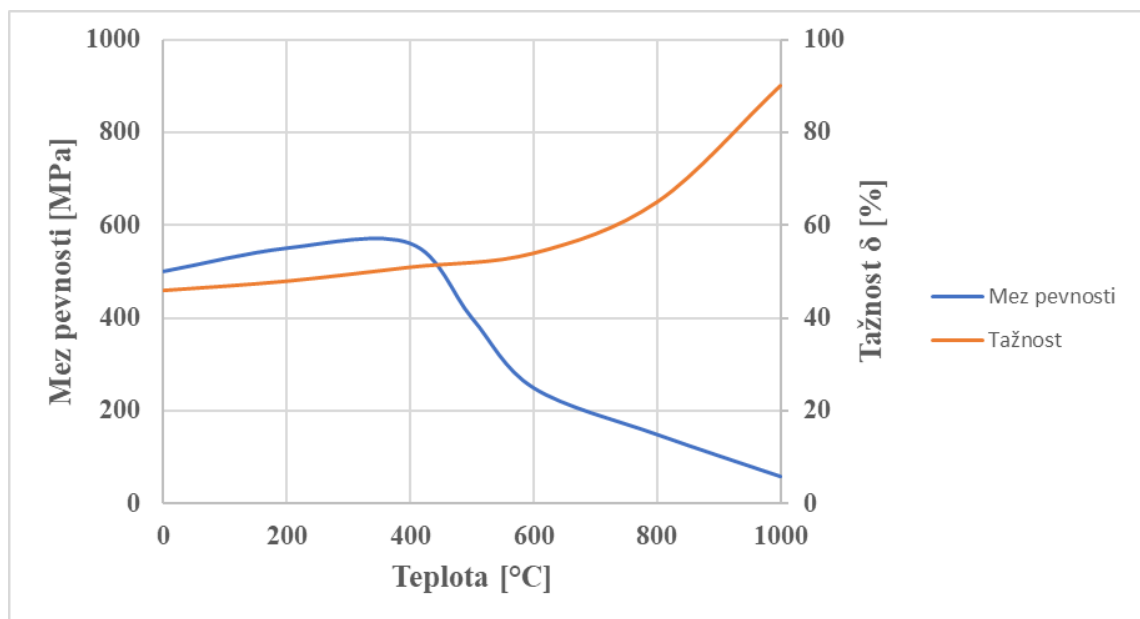
Tab. 2.1 Vybrané fyzikální vlastnosti niklu [5]

Vlastnost	Hodnota
Atomové číslo	28
Relativní atomová hmotnost	58,69
Krystalová mřížka	FCC
Hustota	$8908 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
Bod tání	$1453 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota varu	$2913 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Tepelná vodivost	$91 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

V přírodě se nikl vyskytuje pouze zřídka jako čistý kov, ve většině případů se nachází společně se železem a kobaltem v sulfidických, nebo v lateritických rudách. Podle posledních výzkumů je v zemské kůře zastoupení niklu okolo 0,008 %, celkem je známo téměř 200 nerostů obsahujících nikl. Nejběžnější způsob výroby je ze sulfidických rud,

který spočívá v tavení niklové rudy za přítomnosti koksu a síranu sodného. Nikl se ze sulfidu přeměňuje na oxid a následně je redukován na surový kov. Takto získaný kov nebývá natolik čistý, aby mohl být spolehlivě použit na legování ocelí s předepsaným chemickým složením. Obvykle se proto pročišťuje elektrolýzou, pomocí které se vyloučí surový a čistý nikl. Surový nikl se pohybuje v čistotě mezi 92 až 99,7 % Ni, elektrolyticky čistý 99,5 – 99,9 % Ni [2, 3].

Mechanické vlastnosti jsou stejně jako ostatní vlastnosti do jisté míry ovlivňovány změnou teploty, tepelným zpracováním a přítomností nečistot případně dalším legováním. Pevnost v tahu čistého niklu je 317 MPa a tažnost se pohybuje okolo 30 %. Svým poměrně vysokým modulem pružnosti v tahu (215 GPa) se nejvíce podobá oceli. Pevnost v tahu slitin niklu se obecně pohybuje 450-500 MPa. Čistý kov i slitiny jsou dobře tvářitelné za tepla i za studena a lze je zpevňovat až na 800–850 MPa. Nikl i jeho slitiny si zachovávají pevnostní vlastnosti do poměrně vysokých teplot (400-500 °C). Po překročení této teploty mez pevnosti výrazně klesá, viz obr. 2.1. Za nízkých teplot se mechanické vlastnosti jako je pevnost, houževnatost a tažnost výrazně zlepšují [4, 6].



Obr. 2.1 Vliv teploty na mechanické vlastnosti slitin niklu [7]

Nečistoty, které jsou přítomny nad rámec rozpustnosti, ovlivňují zpracovatelnost, zejména zpracovatelnost za tepla, mohou ovlivnit odolnost vůči korozi i další mechanické vlastnosti. Mezi takové prvky se řadí síra, uhlík, kyslík nebo vodík [6, 9].

Nejdůležitějším průmyslovým využitím niklu je jeho přidávání jako legury do slitinových ocelí, používaných pro korozivzdorné a vysokoteplotní aplikace. K tomu je určeno asi 65 % celkové produkce, dalších 20 % produkce je využito k výrobě neželezných slitin a superslitin, což jsou kovové slitiny odolné vůči extrémně vysokým teplotám a tlakům, nebo slitiny s vysokou elektrickou vodivostí. Niklové slitiny jsou pevné a zároveň tažné, což z nich umožňuje vyrábět plechy, trubky a dráty. Dalších 9 % produkce je určeno k protikoroznímu a dekorativnímu pokovování, zbývajících 6 % nachází využití v elektrotechnice, výrobě mincí a dobíjecích baterií [8, 9].

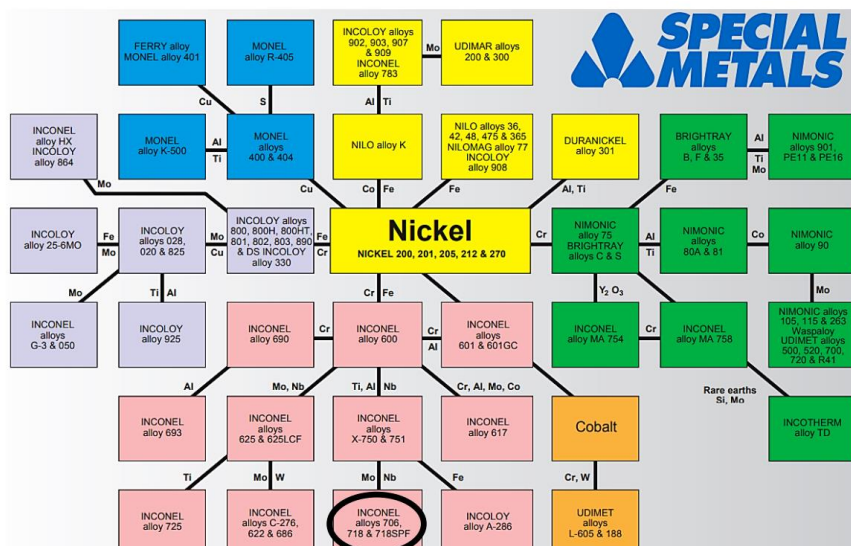
Značně vysoká pořizovací cena niklu a jeho slitin směřuje jeho využití převážně do odvětví, ve kterých se klade velký důraz na odolnost korozi, oxidaci a tepelnou stálost. Hlavní zastoupení je proto v leteckém, chemickém a elektrárenském průmyslu. V budoucnosti další široké uplatnění mohou niklové slitiny najít v automobilovém průmyslu u vodíkových motorů [4].

2.2 Niklové slitiny

Slitiny niklu jsou obecně pevnější, tvrdší a houževnatější než převážná část slitin neželezných kovů. Požadovaných vlastností je dosaženo pomocí legujících prvků, mezi které se řadí především chrom, železo, titan, hliník, niob nebo molybden. Vlastnosti slitin také výrazně ovlivňuje výroba a způsob zpracování. Slitiny niklu lze zpracovávat tvářením za studena, nebo technologií přesného lití metodou vytavitelného modelu. Přesným litím se zpracovávají především žárupevné slitiny. Během procesu tváření dochází k velmi rychlému zpevňování. Z toho důvodu je nutnost použití mohutnějšího zařízení pro kování, lisování a válcování [9, 10].

Podle jejich použitelnosti lze rozdělit slitiny niklu na slitiny *konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné a žárupevné* [9].

Dle nejvýznamnějších prvků obsažených ve slitinách niklu je lze rozdělit na slitiny *Ni-Cu*, které jsou na obr. 2.2 vyznačeny modrou barvou a *Ni-Cr*, vyznačených na obr. 2.2 zeleně. Jak je dále zřejmé, niklové slitiny jsou legovány rozsáhlým spektrem prvků. Velké zastoupení má skupina slitin s označením Inconel. Předložená práce je zaměřena na materiál Inconel 718, který je na obr. 2.2 zakroužkován.



Obr. 2.2 Grafický přehled slitin niklu [11]

2.2.1 Konstrukční slitiny

Hlavním zástupcem konstrukčních niklových slitin jsou **Monely**, u kterých se jako nejvýznamnější legující prvek používá měď v rozmezí 27-34 %. Nikl a měď jsou vzájemně plně rozpustné, vytváří tak jednofázovou binární slitinu. Dalšími legujícími prvky obsažených ve slitinách jsou železo, mangan, křemík a uhlík. Nežádoucí je výskyt síry, který je ovšem nevyhnutelný z důvodu získávání niklu ze sulfidických rud. Síra se ve slitinách nachází po hranicích zrn a snižuje tak mechanické vlastnosti. Negativní účinky síry se eliminují pomocí manganu. Dalším legujícím prvkem může být i hliník nebo titan, tyto slitiny jsou potom vytvrditelné, zatímco mechanické vlastnosti monelů legovaných pouze Fe, Mn a Si mohou být zlepšovány jedině pomocí tváření. Slitiny určené ke slévání mají oproti tvářeným vyšší obsah Si. Pro průmyslové využití se používají především tři druhy, a to Monel-400, Monel R-405 a Monel K-500. Chemické složení těchto slitin je uvedeno v tab. 2.2 [9, 12].

Monel-400 je slitina s vysokou pevností, houževnatostí v širokém teplotním rozsahu a vynikající odolností vůči koroznímu prostředí. Dále má velmi dobrou tažnost a svařitelnost. Slitiny lze použít až do teploty 540 °C a zároveň vykazují výborné vlastnosti i za nízkých teplot. Lze zpracovávat odléváním, ale největší část výroby tvoří slitiny tvářené za tepla a za studena. V případě, že slitiny neobsahují legury jako je Al a Ti, viz tab. 2.2, nelze mechanické vlastnosti zlepšovat tepelným zpracováním. Po tváření za studena se dosahuje pevnosti až 827 MPa. Díky svým vlastnostem se převážně využívá v petrochemickém nebo lodním průmyslu [12, 13].

Monel R-405 se vyznačuje zvýšeným obsahem síry, viz tab. 2.2, díky tomu je zlepšena obrobiteľnosť. Svařitelnost a korozivzdornost jsou téměř totožné jako u Monel-400, ovšem malý rozdíl se projevuje ve snížených mechanických vlastnostech. Používá se jako součást měřidel, ventilů, tepelných výměníků a jako spojovací materiál [12, 13].

Monel K-500 je precipitačně vytvrditelná slitina s vysokou pevností a tvrdostí v kombinaci s výbornou korozní odolností. Precipitačním vytvrzováním lze dosáhnout pevnosti v tahu až 1100 MPa. Zajímavou vlastností je nemagnetičnosť za normální teploty. Využití je opět obdobné jako u slitin popsaných výše, možno dodat, že jako materiál pevný, tvrdý a velice dobře odolný korozi se využívá na lékařské nástroje [12, 13].

Tab. 2.2 Chemické složení monelových slitin [13]

Prvek	Obsah [%]		Maximální obsah [%]						
	Ni	Cu	Fe	Mn	C	S	Si	Al	Ti
Monel-400	63	28-34	2,5	2,0	0,3	0,024	0,5	-	-
Monel R-405	63	28-34	2,5	2,0	0,3	0,025- 0,060	0,5	-	-
Monel K-500	63	27-33	2,0	1,5	0,25	0,01	0,5	2,3- 3,15	0,35- 0,85

Kromě skupiny monelů jsou okrajově využívány i jiné konstrukční slitiny. Jsou to slitiny na bázi *Ni-Be*, které po tepelném zpracování dosahují vysoké pevnosti až 1800 MPa. Dále slitiny typu *Ni-Mn*, *Ni-Mo* nebo *Ni-Al* zvané jako Duralnickel [9].

2.2.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Do této skupiny slitin patří *termočláňkové slitiny*, *odporové slitiny* a *magneticky měkké slitiny*.

Termočláňkové slitiny slouží pro měření teplot s využitím fyzikální podstaty Seebeckova jevu, kdy vlivem teplotního rozdílu vzniká elektrické napětí. Základní požadavky na materiálovou dvojici jsou:

- Velké termoelektrické napětí
- Lineární závislost na teplotě
- Chemická odolnost a odolnost proti korozi

Na termočláňkové materiály jsou používány slitiny Ni-Cr (obsah Cr 9 až 12 %) známé jako *Chromel*, s rozsahem použití 0 až 1000 °C. Dále slitiny *Alumel* s měřitelným rozsahem 300 až 1300 °C [9, 15].

Odporové slitiny se nejčastěji používají na výrobu topných odporů, a to až do teplot okolo 1150 °C. Jsou to slitiny na bázi Ni-Cr, obsah Cr je asi 20 %. S vyšším obsahem chromu roste žárupevnost a žáruvzdornost. Materiál je tvárný, homogenní, tudíž vhodný pro výrobu drátů a tyčí. Drahý nikl může být nahrazen levnějším železem, ale jen do 25 % Fe, přísada železa snižuje škodlivé účinky síry, zároveň ale snižuje i rozsah použití. Odporové slitiny jsou známy pod názvy Chromnikl, Pyrochrom, Chronit, nebo Nichrom [9, 15].

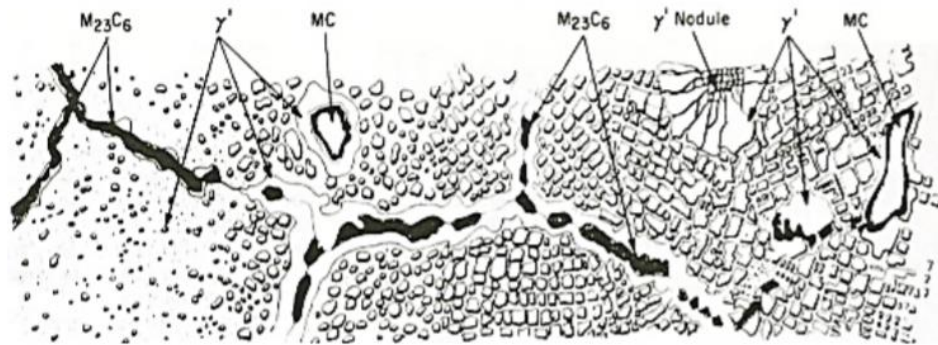
Magneticky měkké slitiny, označované jako permaloy, obsahují kromě niklu velké množství železa 22 až 64 %, případně při nižším obsahu Fe také Mo, Cu, Cr a Si. Jsou to materiály používané pro jádra transformátorů, měřících zařízení a přístrojů. Vysoké magnetické vlastnosti jsou dosažitelné pouze s aplikací velmi čistých prvků a náročné výrobní technologie, což znamená také značně vysokou cenu výrobků [9].

2.2.3 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny

Do této skupiny patří slitiny na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Chrom je nedílnou součástí mnoha slitin na bázi niklu, které jsou odolné vysokým teplotám a korozi. Společně s niklem tvoří soustavu s úplnou rozpustností v tuhém stavu. Obvyklý obsah je mezi 15–30 % Cr. Struktura těchto materiálu je tvořena tuhým roztokem s kubickou plošně středěnou mřížkou, který je zpevněn substitučně. Proto nemůže zajistit žárupevnost těchto slitin [9, 16].

Pro zajištění žárupevnosti jsou slitiny legovány hliníkem, titanem a niobem, které tvoří vytvrzující fázi a prvky karbidotvorné, které substitučně zpevňují tuhý roztok a vytváří vlastní karbidy. Po tepelném zpracování, resp. rozpouštěcím žhánání přísadové prvky přechází do tuhého roztoku, po ochlazení vzniká metastabilní tuhý roztok a po jeho rozpadu (stárnutí) se vylučují precipitáty intermetalických fází. Titan tvoří sloučeninu Ni_3Ti a hliník sloučeninu Ni_3Al . Pokud se ve slitině vyskytují oba tyto prvky, vzniká fáze $Ni_3(Ti, Al)$, kterou lze považovat za tuhý roztok titanu ve sloučenině Ni_3Al a označuje se symbolem γ' . Niob, který se vyskytuje převážně pouze u slitin typu Inconel 718 tvoří sloučeninu Ni_3Nb a označuje se symbolem γ'' . Žárupevnost slitiny je ovlivněna právě rovnoměrností distribuce fáze γ' nebo γ'' ve formě jemného precipitátu [9].

Obsah uhlíku se obecně u niklových slitin potlačuje na co možná nejnižší hranici i přesto, že karbidy mohou mít některé pozitivní vlastnosti. Obsah uhlíku se pohybuje u tvářených slitin od 0,02 do 0,2 % a u litých slitin okolo 0,6 %. Uhlík reaguje s ostatními prvky jako je wolfram, molybden, tantal, niob, titan a tvoří s nimi primární karbidy označované jako MC. Karbidy jsou tvrdé a křehké částice, které se tvoří po hranicích, ale zároveň i uvnitř zrn, viz obr. 2.3. Pokud se vyskytují na hranicích zrn, dochází ke zpevňování těchto hranic a zlepšují tak creepovou odolnost materiálu. Dále mohou zpevňovat matici, pokud v ní precipitují. Na druhou stranu, pokud hranice zrn obsazují souvislé karbidické útvary, jedná se o nežádoucí jev, materiál ztrácí svou plasticitu a také mohou způsobit iniciaci trhlin při tepelném a únavovém namáhání. Během tepelného zpracování nebo následného provozu dochází k přeměně primárních karbidů na sekundární. V matici se mohou nacházet sekundární karbidy typu $M_{23}C_6$, M_6C nebo M_7C_3 [9, 17, 18].



Obr. 2.3 Jednotlivé fáze ve struktuře niklové slitiny [11]

Vysoká žárupevnost je podmíněna přítomností velmi jemných precipitátů fáze γ' rovnoměrně rozložených v objemu slitiny. Problém nastává v případě zpracování tohoto materiálu, kde díky vysokému obsahu fáze γ' klesá tvárnost, a slitiny dostávají charakter kovokeramického materiálu. Žárupevné slitiny jsou tak především zpracovávány technologií přesného lití nebo práškovou metalurgií. Žáruvzdorné materiály, u kterých je důležitá především odolnost za vysokých teplot nikoli pevnost, mají obsahy intermetalických fází poněkud nižší, což umožňuje jejich zpracování tvářením za studena [18].

Tyto materiály jsou obvykle určeny pro teplotně a napěťově nejvíce namáhané součásti. Žárupevné slitiny mohou být používány dlouhodobě pro teploty dosahující maximálně asi 950 °C. Slitiny bez mechanického namáhání (žáruvzdorné) se dají používat až do teplot 1150 °C. Pomyslná hranice pro volbu niklových žárupevných a žáruvzdorných slitin je teplota přibližně okolo 600-650 °C. Za nižších teplot je finančně výhodnější zvolit

jiné konstrukční slitiny většinou oceli. Žárupevné a žáruvzdorné slitiny niklu se rozdělují do jednotlivých skupin podle druhu a obsahu jednotlivých přísad, s komerčními označeními Nimonic, Incoloy, Hastelloy, nebo Inconel [9, 16].

2.3 Slitiny Inconel

Slitiny s označením Inconel jsou vysokoteplotní superslitiny na bázi niklu a chromu. Dalšími legujícími prvky jsou Fe, Mo, Nb, Mn, W, Al, Ti, Co případně Ta. Jejich složení jim obecně zaručuje výborné mechanické vlastnosti za vyšších teplot, odolnost proti různým druhům koroze a odolnost proti působení rozličných chemických látek. Jsou široce využívány v námořním, jaderném, leteckém, chemickém a petrochemickém průmyslu [19].

Nejběžněji používané jsou slitiny typu Inconel 600, Inconel 625 a Inconel 718, které mají výrazně odlišné chemické složení. Každá z těchto slitin má proto v technické praxi jiné využití [12].

2.3.1 Inconel 600

Inconel 600 je konstrukční materiál používaný pro aplikace, které vyžadují odolnost vůči korozi a odolnost vysokým teplotám. Slitina má také vynikající mechanické vlastnosti a představuje výhodnou kombinaci vysoké pevnosti a dobré zpracovatelnosti. Vyniká svým rozsahem provozních teplot, lze ji použít při teplotách hluboce pod bodem mrazu, ale i za vysokých teplot do 1095 °C. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tab. 2.3. Vysoký obsah niklu dodává slitině odolnost korozi i mnohým organickým a anorganickým sloučeninám. Nelze ji však precipitačně vytvrzovat, ke zpevnování dochází jen při tváření za studena. Využívá se v chemickém průmyslu jako destilační zařízení, kondenzátory pro zpracování mastných kyselin, nebo také jako součást pecí pro tepelné zpracování [20].

Tab. 2.3 Chemické složení slitiny Inconel 600 [20]

Prvek	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu
Obsah [%]	min. 72,0	14,0 - 17,0	6,0 -10,0	max. 0,15	max. 1,0	max. 0,50	max. 0,50

2.3.2 Inconel 625

Jedná se o slitinu na bázi Ni-Cr, vyznačuje se svou vysokou pevností a vynikající zpracovatelností. Použitelnost slitiny Inconel 625 je od velmi nízkých teplot až do teploty 982 °C. Jako jednu z mála slitin typu Inconel ji lze spojovat pomocí technologie svařování. Její chemické složení je uvedeno v tab. 2.4. Slitina obsahuje množství přísadových prvků, které slitině dávají schopnost odolávat i silně agresivním korozním prostředím jako je mořská voda. Díky vysokým obsahům prvků Mo a Nb, které vyztužují matici, se pevnost slitiny pohybuje okolo 1000 MPa i bez precipitačního vytvrzování. Nejčastěji se proto využívá v lodním a petrochemickém průmyslu. Jedná se o vrtulové lopatky lodí a ponorek, potrubí, armatury, nebo oplášťování podmořských kabelů. Uplatnění nachází i v letectví, a to u potrubních a výfukových systémů proudových motorů [21].

Tab. 2.4 Chemické složení slitiny Inconel 625 [21]

Prvek	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu
Obsah [%]	min. 58,0	20,0 – 23,0	max. 5,0	max. 0,10	max. 0,50	max. 0,50	max. 0,50
Prvek	Mo	Nb	Al	Ti	Co		
Obsah [%]	8,0 – 10,0	3,15 – 4,15	max. 0,40	max. 0,40	max. 1,0		

2.3.3 Inconel 718

Inconel 718, vysokoteplotní, precipitačně vytvrditelná slitina niklu a chromu, je široce používaným materiálem, především díky své vynikající pevnosti, odolnosti proti korozi a creepové odolnosti při zvýšených teplotách. Ovšem při malém množství Mo může docházet k důlkové nebo šterbinové korozi. Celkové chemické složení slitiny Inconel 718 je uvedeno v tab. 2.5. Její využití je v široké teplotní škále od hlubokého podchlazení -253 °C až do 700 °C. Mechanické vlastnosti mohou být zvyšovány pomocí tepelného zpracování, které je detailněji popsáno v následující kapitole. Tepelným zpracování lze u slitiny Inconel 718 dosahovat meze pevnosti v tahu až 1700 MPa [22]. Od ostatních slitin na bázi Ni-Cr se odlišuje v precipitátech ve formě Ni_3Nb označovaných jako γ'' , pouze v malém množství se vyskytují jako Ni_3Ti nebo Ni_3Al [33]. Materiál dosahuje vyšších mechanických vlastností v kombinaci tváření za studena a následného tepelného zpracování. Obdobně jako Inconel 625 je i tato slitina svařitelná a disponuje odolností proti vzniku prasklin po svařování [19].

Tab. 2.5 Chemické složení slitiny Inconel 718 [22]

Prvek	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Mo
Obsah [%]	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	zbytek	max. 0,08	max. 0,35	max. 0,35	2,80 – 3,30
Prvek	Nb	Al	Ti	Co			
Obsah [%]	4,75 – 5,50	0,20 – 0,80	0,65 – 1,15	max. 1,0			

Inconel 718 lze zpracovávat i technologií tváření za tepla, ovšem tento materiál se řadí mezi ty nejhůře tvárné s ohledem na jeho vysokou pevnost. Tváření probíhá při teplotě asi 900–1120 °C, pro tváření je nutné použít vysoce výkonné stroje a mohutné lisy, které vyvolají dostatečně vysoké tlaky. Obrobitelnost slitiny je velmi špatná, což je způsobeno zpevňováním materiálu během obrábění, nízkou tepelnou vodivostí a samotnou tvrdostí materiálu, která dosahuje až cca 425 HV. Špatná obrobitelnost znemožňuje klasické metody odlévání, proto se využívá speciální technologie přesného lití, která eliminuje následnou potřebu mechanické úpravy materiálu. Kromě konvenčních způsobů výroby polotovarů, jako jsou trubky, tyče a plechy se v posledních letech ve velkém množství využívá technologie 3D tisku, při které vzniká tvar konečného výrobku [11, 22].

Superslitina Inconel 718 je nejčastěji používanou slitinou v leteckém průmyslu, jako součást proudových motorů a plynových turbín, viz obr. 2.4. Dále se používá jako materiál pro výrobu vesmírných raketoplánů a také pro kryogenní nádrže na skladování plynů (tekutý dusík) [24].



Obr. 2.4 Příklad aplikace slitiny Inconel 718 [25]

2.4 Tepelné zpracování niklových slitin

Tepelné zpracování je nezbytnou součástí výroby konstrukčních dílů jak z čistého niklu, tak i z niklových slitin. Na základě volby tepelného zpracování se odvíjejí pevnostní vlastnosti. Tepelné zpracování niklových slitin se skládá ze dvou základních procesů, rozpouštěcí žíhání a vytvrzování (stárnutí) [9].

Cílem rozpouštěcího žíhání je rozpuštění částic fáze γ' a γ'' , části karbidů a homogenizace tuhého roztoku. Obecně se u slitin niklu dle [14] doporučuje rozpouštěcí žíhání nad teplotou 1100 °C. Proces rozpouštěcího žíhání se může rozdělit na dva kroky, ohřev na teplotu 900–1000 °C, výdrž na této teplotě a následný ohřev nad teplotu 1100 °C s obvyklou výdrží 1 až 2 hodin. Důvodem je zamezit vzniku vysokých vnitřních pnutí v důsledku vzniku vysokého teplotního gradientu a tím zabránit případnému poškození. Ohřev je prováděn ve vakuových pecích nebo v pecích s ochrannou atmosférou, aby se zamezilo ochuzování povrchu součásti legujícími prvky. Následné ochlazování musí probíhat pomalu na vzduchu nebo v ochranné atmosféře, prudkým ochlazením by mohly vzniknout praskliny [9, 14].

Proces vytvrzování, který následuje po rozpouštěcím žíhání a ochlazení je závislý na chemickém složení a mikrostruktuře slitiny, tj. na objemovém podílu fáze γ' případně u slitiny Inconel 718 na podílu fáze γ'' . Koherentní fáze γ' a γ'' společně tvoří morfologii, která stabilizuje mikrostrukturu slitiny během precipitace. Hlavní funkcí vytvrzování je precipitace karbidů a vytvrzujících fází z přesyceného tuhého roztoku. S rostoucím obsahem vytvrzujících fází roste i počet stupňů vytvrzování z důvodu co nejjemnějšího vyloučení těchto fází, nejčastěji se aplikuje dvoustupňový proces vytvrzování. Niob obsažený ve vytvrzující fázi γ'' je jeden z prvků, který je vysoce náchylný k segregaci a má sklon k tvorbě nežádoucích fází, jako jsou Lavesovy fáze, které snižují tažnost a únavové vlastnosti slitiny [14, 33].

Konečné vlastnosti slitin lze nejlépe regulovat teplotou a dobou výdrže, která závisí i na velikosti zpracovávané součásti. Při nízké teplotě nebo krátké době se tvoří jemný precipitát. Vzhledem k podobnosti mřížkových parametrů tuhého roztoku niklu a fáze γ' jsou malé částice koherentní, při správně zvolené teplotě a doby výdrže je efekt vytvrzování největší. Částice mohou být i semikoherentní, vytvrzovací efekt je ale menší. Překročením optimální teploty nebo doby výdrže vytvrzování dochází k nárůstu rozměru částic,

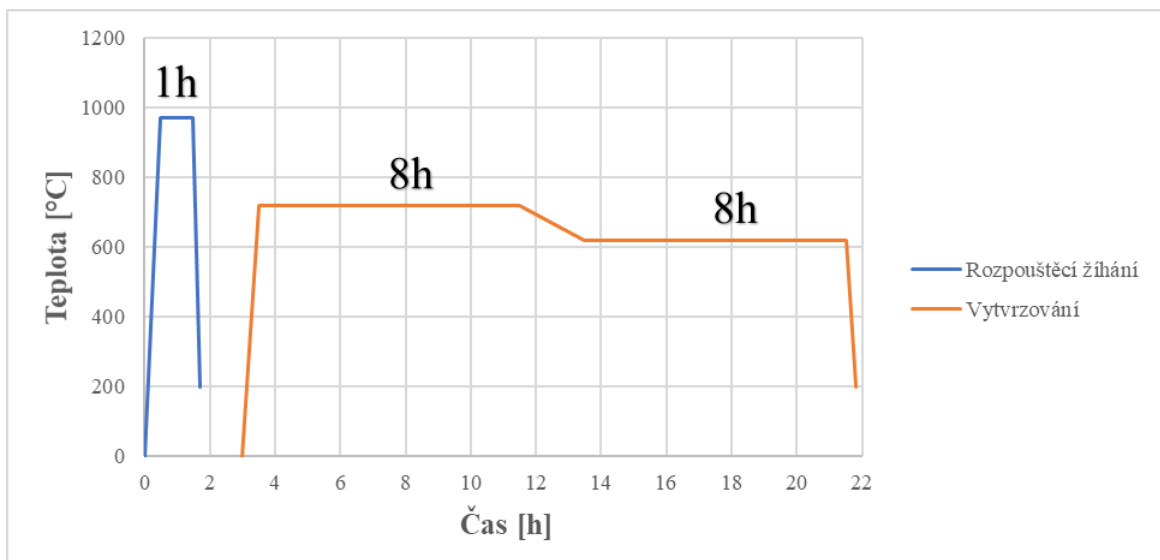
což je nežádoucí jev a dochází tím k přestárnutí a pevnost slitiny začíná klesat. Vytvrzování probíhá při ohřevu na teplotu vyšší, než je teplota funkce součásti [9, 14].

2.4.1 Tepelné zpracování slitiny Inconel 718

Slitina Inconel 718 se ve většině aplikací využívá už jako tepelně zpracovaný materiál. Ve velkém množství případů je tepelné zpracování poslední operací celého výrobního procesu. Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, tak i tepelné zpracování slitiny Inconel 718 se skládá z rozpouštěcího žíhání a následného precipitačního vytvrzování. V průběhu výroby a zpracování se niklové slitiny deformačně zpevňují a tím dochází k nežádoucímu vytvrzení a omezení následného zpracování. Zařazením vhodného rozpouštěcího žíhání do výrobního procesu se může redukovat stav zpevnění a umožňuje další zpracování [22, 26].

Obecně se pro slitinu niklu Inconel 718 používají dva druhy tepelného zpracování:

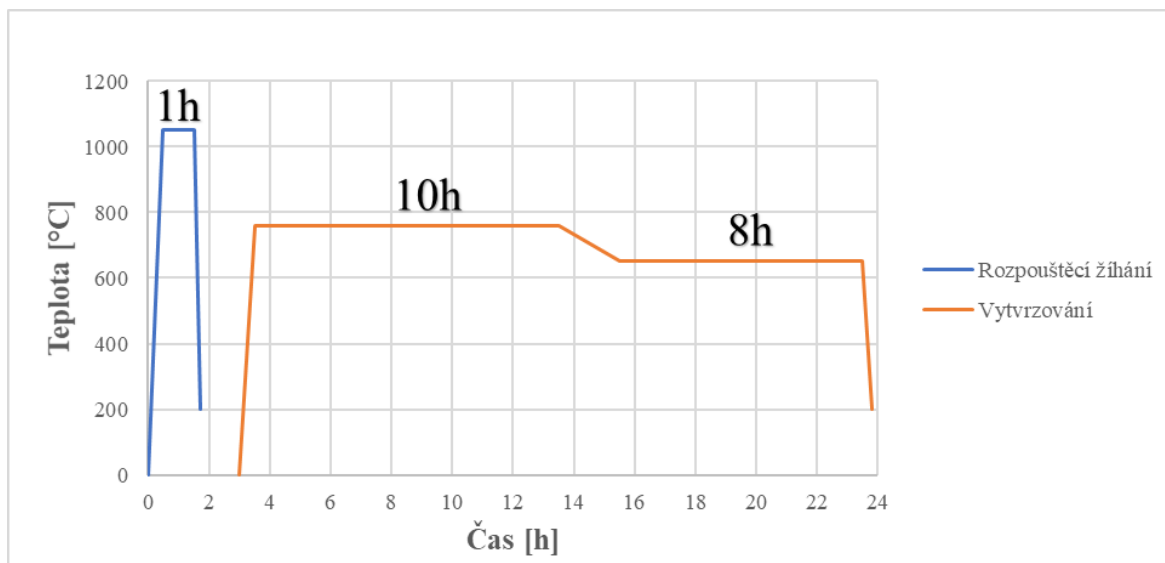
- Rozpouštěcí žíhání při teplotě 925 až 1010 °C po dobu 1 hodiny. Následuje rychlé ochlazení, obvykle ve vodě. Precipitační vytvrzování probíhá při 718 °C po dobu 8 hodin, dále se pec ochlazuje po dobu 2 hodin na teplotu 620 °C s výdrží na této teplotě 8 hodin. Proces končí ochlazením na vzduchu. Celý průběh je uveden na obr. 2.5 [26].



Obr. 2.5 Grafický průběh tepelného zpracování 1. varianta

- Rozpouštěcí žíhání při teplotě 1037 až 1065 °C po dobu 1 hodiny s následným ochlazením do vody. Precipitační vytvrzování na teplotě 760 °C po dobu 10 hodin,

dále 2hodinové ochlazování na 650 °C a výdrž na této teplotě po dobu 8 hodin. Tepelné zpracování končí ochlazením na vzduchu. Celý průběh je uveden na obr. 2.6 [26].



Obr. 2.6 Grafický průběh tepelného zpracování 2. varianta

Použitím první varianty tepelného zpracování je u materiálu dosaženo nejvyšších pevnostních a únavových charakteristik při pokojové teplotě. Druhá varianta tepelného zpracování je používána pro aplikace za nízkých teplot. Materiál dosahuje velmi dobrých hodnot při příčné zkoušce tahem a při zkoušce vrubové houževnatosti, nicméně má sklon k vrubové křehkosti při napěťovém praskání [26].

Slitiny Inconel 718 jsou označovány podle standardů, které označují postup tepelného zpracování, nebo stav v jakém se právě materiál nachází. První variantě tepelného zpracování odpovídá označení ASM 5662 a druhé variantě označení ASM 5664. Porovnání hodnot mechanických vlastností, za použití těchto postupů tepelného zpracování, naměřených firmou EOS je uvedeno v tab. 2.6 [27].

Tab. 2.6 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718 při teplotě 20 °C [27]

Mechanické vlastnosti	Bez tepelného zpracování	AMS 5662	AMS 5664
Mez pevnosti	980 ± 50 MPa	1400 ± 100 MPa	1380 ± 100 MPa
Mez kluzu	634 ± 50 MPa	1150 ± 100 MPa	1240 ± 100 MPa
Tažnost	31 ± 5 %	15 ± 3 %	18 ± 5 %

2.5 Dilatometrie

Sledováním pochodů, které probíhají v měřeném vzorku během zahřívání nebo ochlazování se zabývají metody termické analýzy. Vzhledem k řešené problematice v experimentální části práce je tato kapitola věnována jedné z metod termické analýzy, a to *dilatometrické analýze*.

Dilatometrická analýza je experimentální měřicí metoda, pomocí které lze studovat délkové a objemové změny zkoumaného materiálu způsobené fyzikálními, případně chemickými procesy. Všeobecně se tato měření zaměřují především na koeficienty lineární roztažnosti a na fázové transformace kovů nebo polymerů. Řadí se mezi soubor metod termické analýzy, při kterých jsou v předdefinované atmosféře nebo ve vakuu sledovány vybrané vlastnosti vzorku. Jednotlivé procesy mohou být posuzovány v závislosti na čase, nebo v závislosti na teplotě [28].

2.5.1 Dilatometry

Těchto měřících přístrojů existuje široká řada. Zaměřují se na různé oblasti použití, např. velmi přesný přístroj na změření součinitele teplotní roztažnosti, kalící dilatometry, které mají schopnost zaznamenávat fázovou transformaci při rychlém zahřívání či ochlazování. Existují také přístroje kombinující měření délkové roztažnosti s přídatným zařízením vyvozujícím v průběhu teplotního cyklu sílu definované velikosti, což umožňuje studovat změny vlastností při deformaci vzorku.

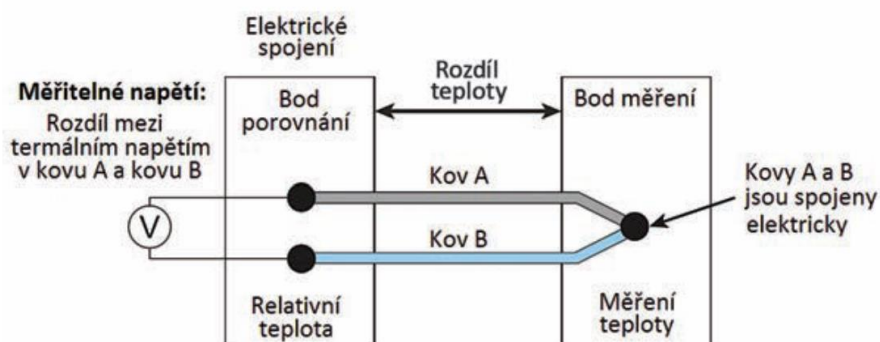
Při dilatometrickém měření je materiál ohříván na určitou teplotu. U vodivých materiálů se nejčastěji používá **indukční ohřev**, který je založen na principu elektromagnetické indukce. Testovaný materiál se vloží do cívky, jejímž vnutím prochází střídavý elektrický proud o vysoké frekvenci a kolem cívky tak vzniká střídavé magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje v testovaném materiálu vířivé proudy, které materiál ohřívají. Velká výhoda indukčního ohřevu spočívá v tom, že je zahříván pouze daný předmět a jeho okolí zůstává chladné. U nevodivých materiálů je pak využíván nepřímý ohřev pomocí radiace. Tento způsob však umožňuje využití mnohem pomalejších rychlostí ohřevu nepřesahujících $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nezbytnou součástí dilatometrů jsou *snímače teploty* a *polohy*. Způsobů měření teploty je celá řada. V těchto zařízeních se z důvodu velmi rychlé odezvy používají nejčastěji termočlánky, které pracují na principu tzv. Seebeckova jevu.

Jde o vznik termoelektrického napětí ve vodiči, jehož konce mají rozdílnou teplotu. V rozdílných materiálech vznikají rozdílná napětí. Na základě jejich rozdílu je následně stanovena hodnota měřené teploty. Schématické zobrazení principu měření pomocí termočlánku je ukázáno na obr. 2.7. Termočlánků je mnoho typů rozdělených na základě rozsahu měřených teplot a použitého materiálu, viz tab. 2.7 [28].

Tab. 2.7 Nejčastěji používané typy termočlánků [34]

Typ	Měřicí rozsah [°C]	Kombinace materiálů
J	-210 až 1200	Fe – CuNi
K	-200 až 1250	NiCr – NiAl
N	-270 až 1300	NiCrSi – NiSiMg
S	-50 až 1750	PtRh – Pt
T	-270 až 400	Cu – CuNi
E	-200 až 950	NiCr – CuNi



Obr. 2.7 Princip funkce termočlánku [31]

Snímání polohy vzorku během dilatometrické analýzy zajišťují snímače polohy. Tyto snímače jsou schopny v každém čase měření přesně definovat polohu testovaného vzorku. Nejčastěji jsou využívána LVDT čidla. Tyto snímače pracují na principu elektromechanického měniče, který dokáže převést přímočarý pohyb objektu na odpovídající elektrický signál. Snímač LVDT je v podstatě transformátor s jedním

primárním vinutím ve středu válcové konstrukce a dvěma sekundárními vinutími, jeden z každé strany primárního vinutí. Pohyb měřeného objektu podél osy cívek dochází ke změně napětí, což umožňuje přesné měření polohy [35, 36].

Na katedře strojírenské technologie je k dispozici kalící dilatometr DIL 805L od společnosti TA Instruments.

2.5.2 Objemové a délkové změny materiálů při ohřevu

V závislosti na změně teploty (ohřev, ochlazení) dochází k objemovým změnám materiálu. U převážné většiny materiálů dochází při jejich ohřevu k rozpínání, což způsobí rychlejší pohyb molekul a zvětšení vzdálenosti rovnovážných poloh. Další objemové změny vznikají při přeuspořádání krystalové mřížky v průběhu fázových transformací. Rozlišujeme *teplotní objemovou roztažnost* a *teplotní délkovou roztažnost* [28].

Teplotní objemovou roztažnost lze vyjádřit vztahem (1):

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (1)$$

kde značí:

V	–	konečný objem [m ³],
V ₀	–	počáteční objem [m ³],
β	–	teplotní součinitel objemové roztažnosti [K ⁻¹],
ΔT	–	rozdíl teplot [K].

Teplotní součinitel objemové roztažnosti β je koeficient úměrnosti. Pro jeho přesné určení je nutné stanovit typ změny probíhající v materiálu a podmínky, za kterých změna probíhá. Hodnota tohoto součinitele závisí především na typu materiálu a na jeho teplotě. U většiny materiálů, až na výjimky, nabývá tento součinitel kladných hodnot, znamená to, že s rostoucí teplotou narůstá i jeho objem. Součinitel β lze definovat vztahem (2):

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} \cong 3\alpha \quad (2)$$

kde značí: α – teplotní součinitel délkové roztažnosti [K⁻¹].

Teplotní délkovou roztažnost lze tedy vyjádřit pomocí vztahu (3):

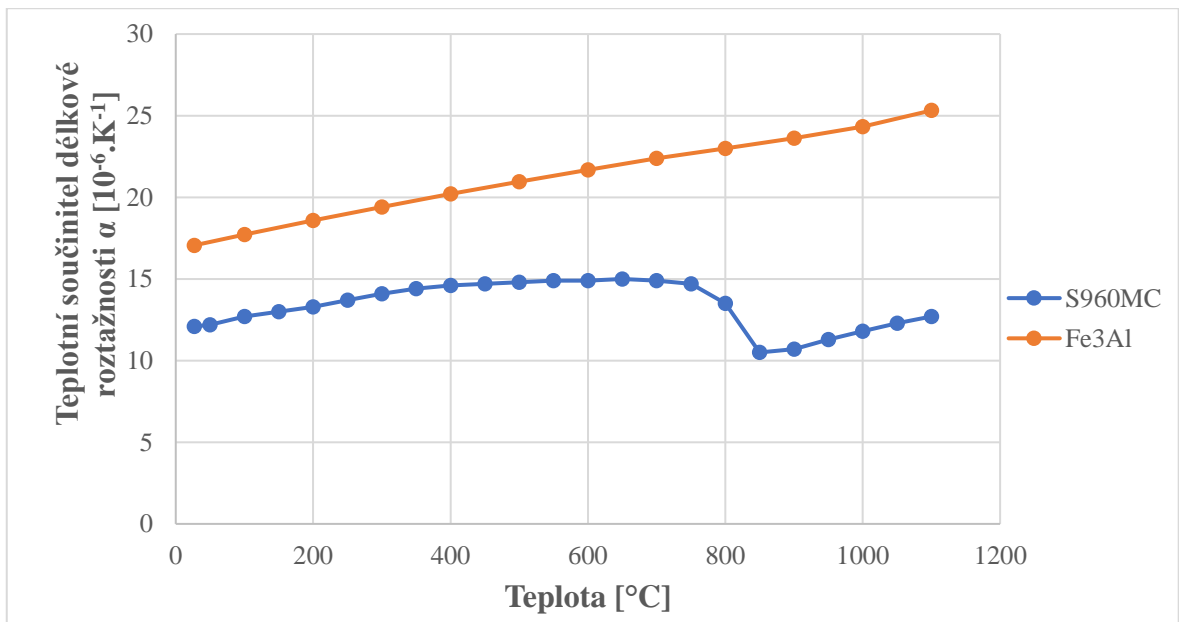
$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3)$$

kde značí: l – konečná délka [m],
 l_0 – počáteční délka [m],
 α – teplotní součinitel délkové roztažnosti [K^{-1}],
 ΔT – rozdíl teplot [K].

Úpravou vztahu (3) lze tedy teplotní součinitel délkové roztažnosti α stanovit dle následujícího vztahu (4):

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (4)$$

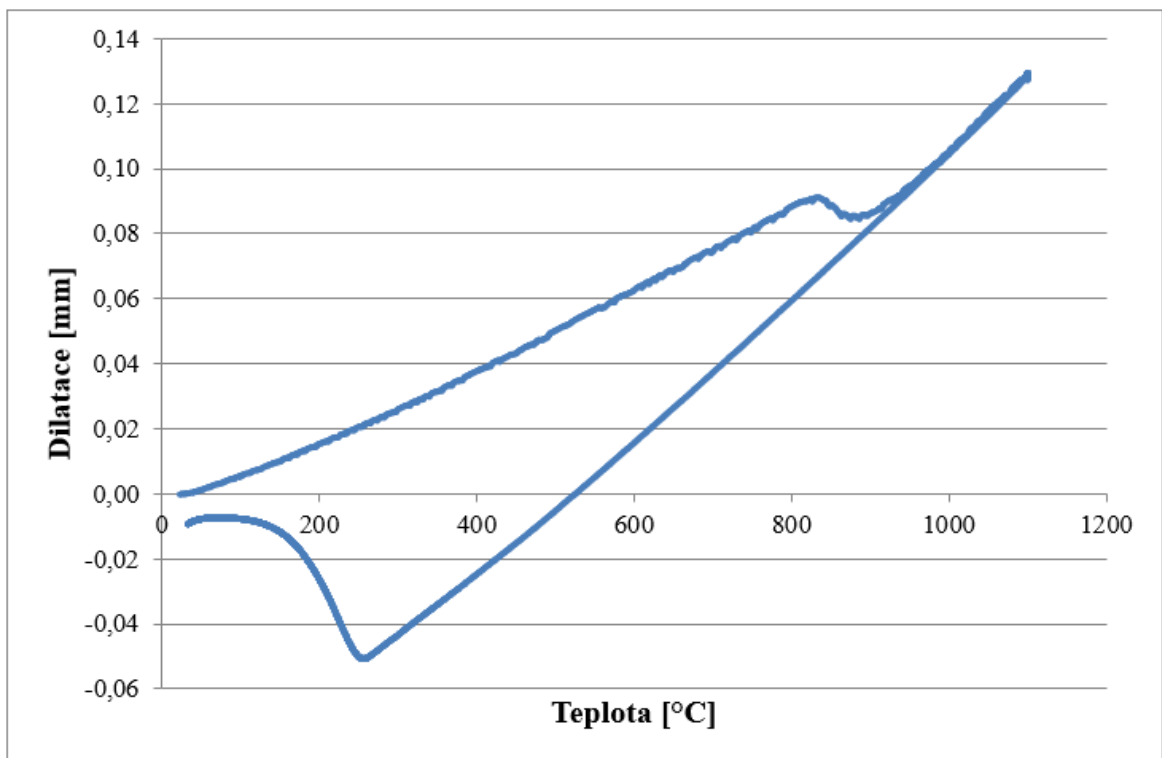
Objemové a délkové změny materiálů při ohřevu úzce souvisí s typem krystalové mřížky a také s tím, zda materiál prodělává transformační přeměny. Materiály, u nichž v průběhu ohřevu nedochází ke změně typu mřížky, mají zpravidla lineární průběh teplotní závislosti koeficientů objemové a délkové roztažnosti. U materiálů s fázovou přeměnou dochází u křivek teplotní závislosti koeficientů objemové a délkové roztažnosti ke zlomům. Na obr. 2.8 je ukázán průběh teplotní závislosti koeficientu lineární roztažnosti u slitiny Fe₃Al, která neprochází polymorfní přeměnou a u oceli S960MC, která polymorfní přeměnou prochází.



Obr. 2.8 Graf závislosti koeficientu roztažnosti na teplotě

2.5.3 Měření a vyhodnocení transformačních změn

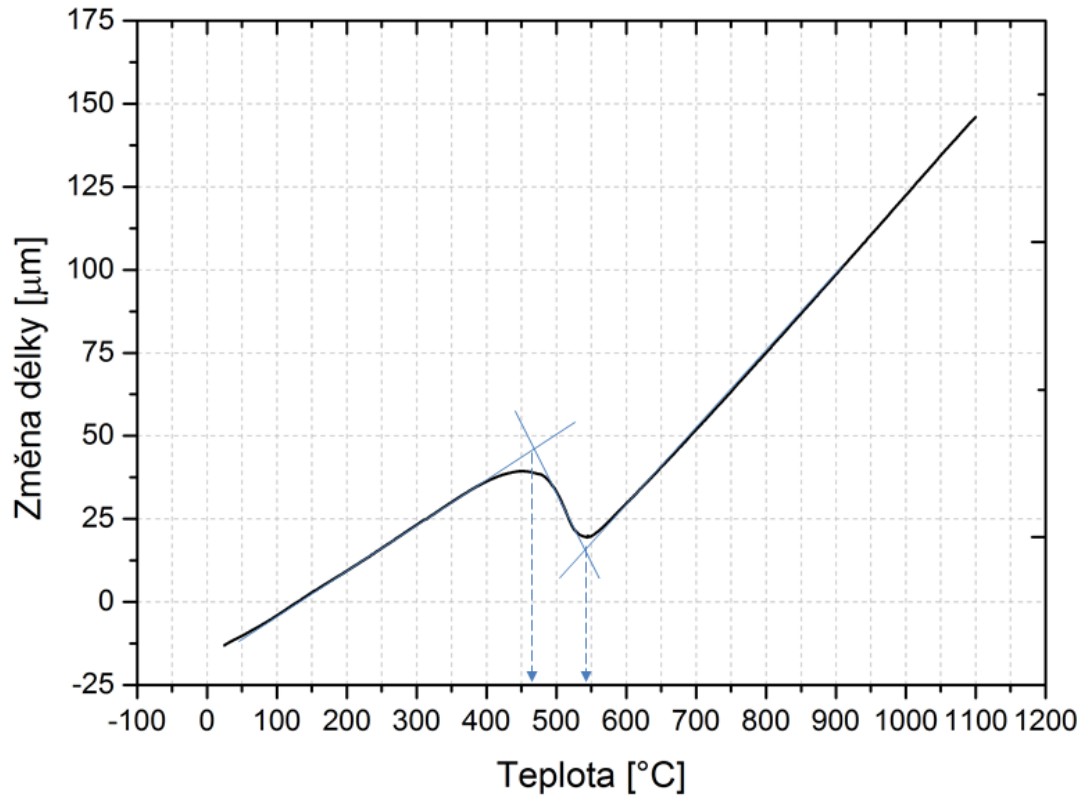
Jak již bylo uvedeno, pomocí dilatometrických křivek je možné zaznamenat objemové změny vznikající při přeuspořádání krystalové mřížky v průběhu fázových transformací. Tyto změny jsou na dilatometrických křivkách zobrazeny jako zlomy nebo skoky, a právě z těchto změn jsou odečítány počátky a konce transformačních přeměn. Příklad dilatometrické křivky s rychlostí ochlazování $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ na materiálu GX23CrMoV12-1 je ukázán na obr. 2.9.



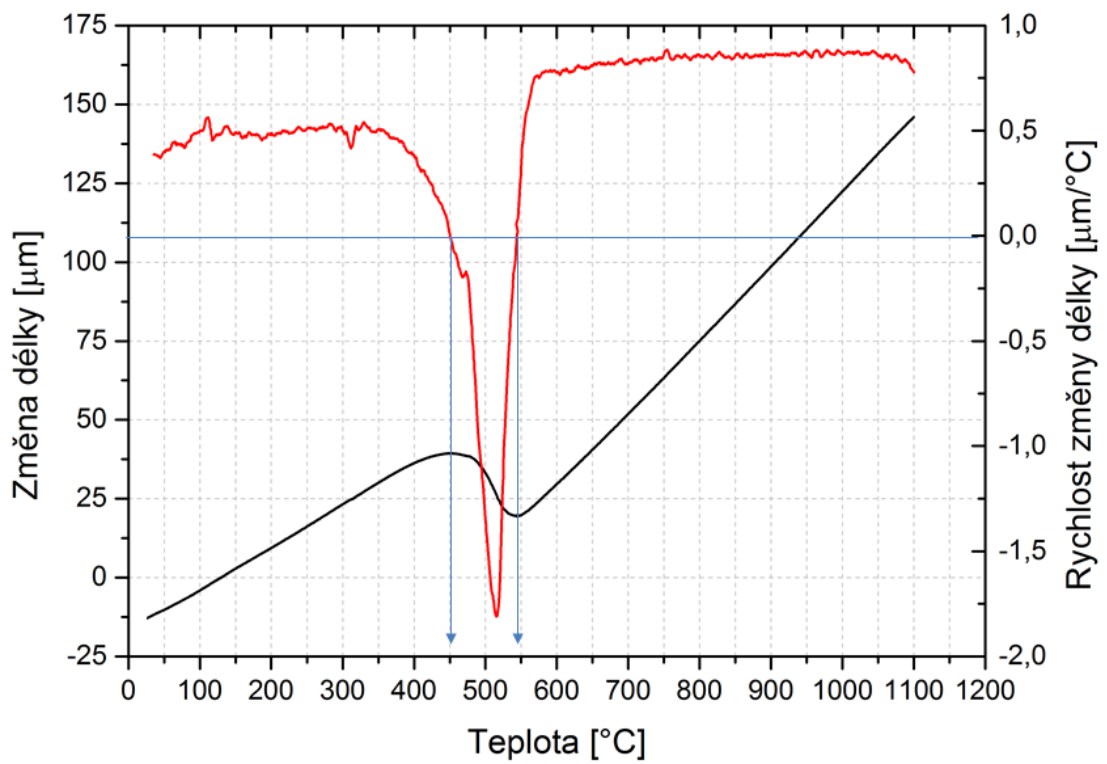
Obr. 2.9 Ukázka dilatometrické křivky – rychlost ochlazování vzorku $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ [37]

Pro stanovení přechodových teplot je vhodné aplikovat více na sobě nezávislých metod pro eliminaci vzniku chyb měření. Výsledná přechodová teplota je potom určena jako aritmetický průměr.

Jednou z možných metod vyhodnocení je **metoda tří tečen**. Přechodové teploty se stanovují jako průsečíky jednotlivých tečen dilatometrické křivky. Princip tohoto způsobu vyhodnocení je ukázán na obr. 2.10. Druhou možností je **metoda stanovení rychlosti délkové změny**, která je založena na první derivaci dilatometrické křivky. Vlastní přechodová teplota je určena teplotou, za které je rychlost změny délky nulová, jak je znázorněno na obr. 2.11 modrou barvou [37].



Obr. 2.10 Příklad vyhodnocení pomocí Metody tří tečen [37]



Obr. 2.11 Příklad vyhodnocení pomocí Metody první derivace [37]

3. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na sledování struktury a mechanických vlastností niklové slitiny typu Inconel 718. Hlavním cílem experimentu bylo stanovit mechanické vlastnosti tvářené slitiny Inconel 718 pro možnost následného porovnání těchto vlastností s 3D tisknutou verzí materiálu.

Vzhledem k tomu, že při technologickém zpracování materiálu, kdy jsou na materiál aplikovány teplotní cykly (např. v tepelně ovlivněné oblasti svarů), dochází ke změnám struktury a tím i ke změně mechanických vlastností, bylo dalším cílem experimentu ověřit možnosti obnovy původních mechanických vlastností materiálu aplikací tepelného zpracování.

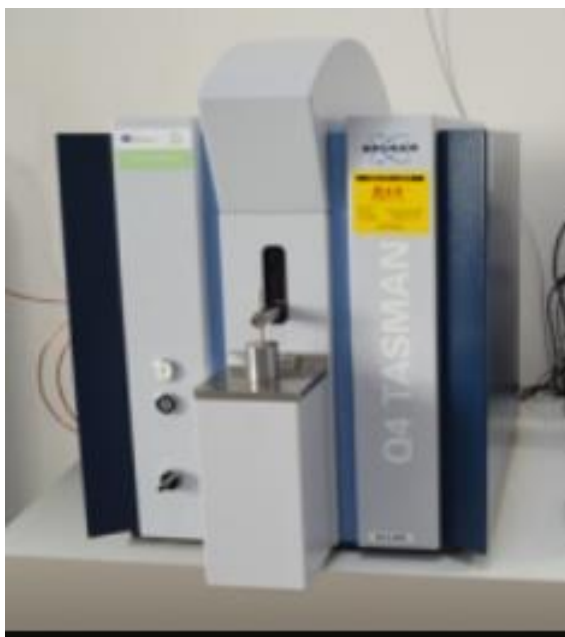
V rámci experimentu bylo u materiálu stanoveno chemické složení a mikrostruktura základního materiálu. Následně byly hodnoceny mechanické vlastnosti za pokojové i zvýšené teploty, dále byla měřena tvrdost a vrubová houževnatost. Na základě provedené rešerše byly zvoleny postupy tepelného zpracování, které byly v další fázi experimentu na vzorky aplikovány. Na tepelně zpracovaných vzorcích byly opět hodnoceny strukturní změny a jejich vliv na mechanické vlastnosti. V poslední fázi byl potom stanoven součinitel teplotní roztažnosti.

3.1 Posouzení výchozích vlastností základního materiálu

Jako základní materiál pro experiment byla použita niklová slitina s označením Inconel 718, která odpovídá evropskému označení dle normy EN 10302 jako 2.4668. Jak již bylo v teoretické části práce uvedeno, jedná se o žárupevnou superslitinu s vysokou pevností a dobrými korozními vlastnostmi. Dodaný materiál byl ve stavu po rozpouštěcím žíhání a následném tvářením za studena. Nebyly však přesně specifikovány technologické parametry rozpouštěcího žíhání. Materiál byl dodán ve formě tyčí a desek, které byly dále obráběny dle potřebné geometrie a tvaru zkušebních vzorků.

3.1.1 Chemické složení

Chemické složení základního materiálu bylo měřeno pomocí laboratorního spektrometru s označením Q4 TASMEN od firmy Bruker Elemental GmbH, který je ukázán na obr. 3.1. Naměřené chemické složení je uvedeno v tab. 3.1 a odpovídá předepsanému složení, které je uvedeno v [22].



Obr. 3.1 Spektrometr Q4 TASMAN

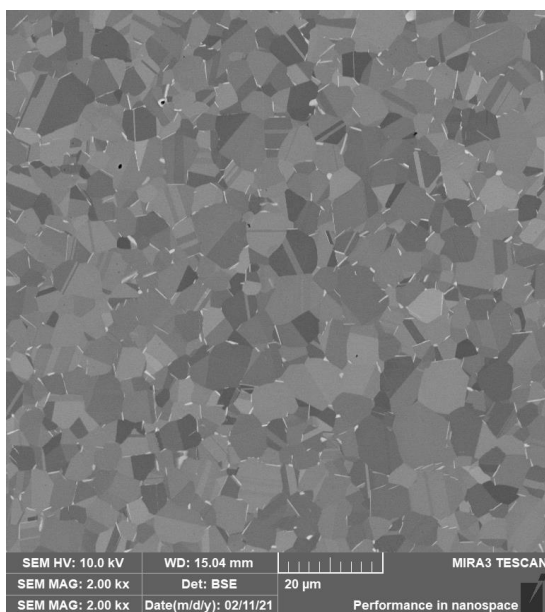
Tab. 3.1 Naměřené chemické složení slitiny Inconel 718

Prvek	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Mo	Nb
Obsah [%]	53,12	19,33	16,97	0,036	0,091	0,0012	3,168	5,38
Prvek	Al	Ti	Co	Cu	W	P	V	B
Obsah [%]	0,542	0,926	0,187	0,048	0,032	0,0012	0,024	0,0041

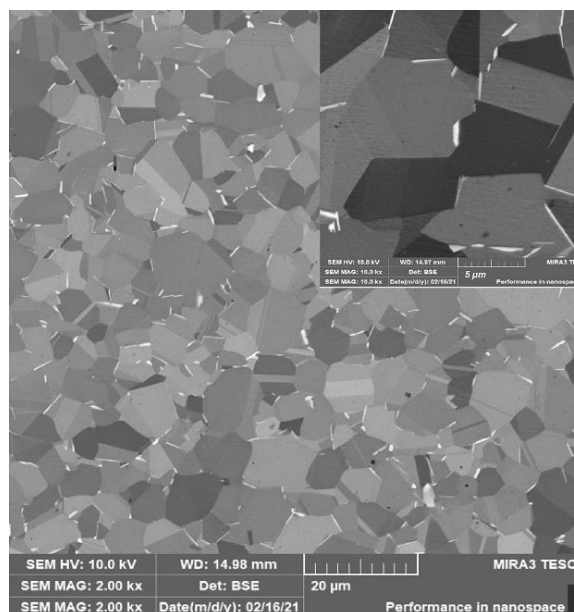
3.1.2 Mikrostruktura

Z dodaného materiálu byl odebrán vzorek pro metalografické hodnocení. Vzorky byly připraveny běžným metalografickým postupem, tedy broušeny a leštěny. Připravené vzorky byly pozorovány na elektronovém mikroskopu MIRA 3 TESCAN.

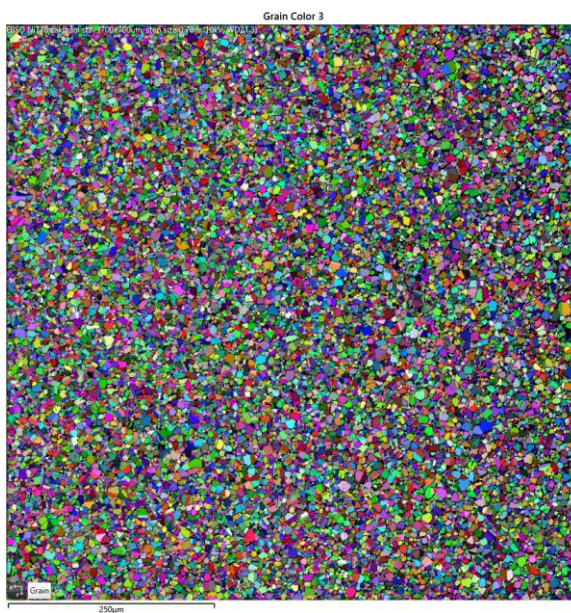
Struktura základního materiálu je uvedena na následujících obrázcích. V matici jsou na hranicích zrn pravidelně distribuovány jemné jehlicovité karbidické částice, viz detail na obr. 3.3. Rozměry těchto částic se pohybují v řádech desetin až jednotek mikrometrů. Na obr. 3.2 a obr. 3.3 je ukázána velikost zrn matrice ve směrech 1 (obr. 3.2) a 2 (obr. 3.3). EBSD měření velikosti zrn potvrdilo, že jejich rozměry jsou v obou směrech obdobné, 9,17 μm pro směr 1 (obr. 3.4) a 9,18 μm pro směr 2 (obr. 3.5).



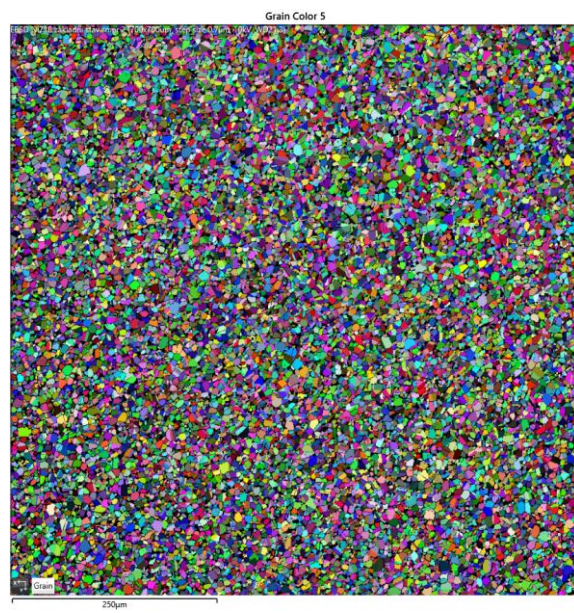
Obr. 3.2 *Struktura základní stav směr 1*



Obr. 3.3 *Struktura základní stav směr 2*



Obr. 3.4 *Struktura základní stav směr 1*
EBSD metoda



Obr. 3.5 *Struktura základní stav směr 2*
EBSD metoda

3.1.3 Mechanické vlastnosti za normálních a zvýšených teplot

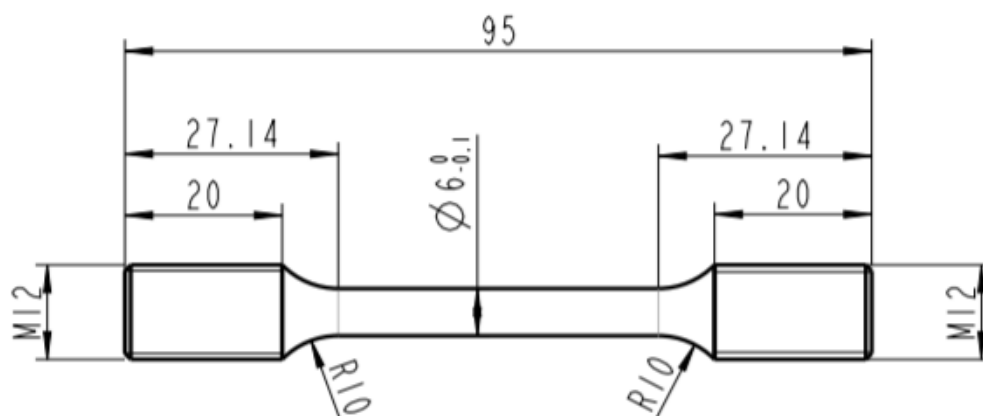
Mechanické vlastnosti základního materiálu byly určeny pomocí statické zkoušky tahem za pokojové teploty RT i za teplot zvýšených. Dále byla měřena tvrdost materiálu.

Statická zkouška tahem za pokojové teploty byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1, kde hlavním účelem bylo zjistit napětíové a deformační charakteristiky. Princip tahové zkoušky spočívá v jednoosém zatížení, ze kterého se stanovují mechanické vlastnosti testovaného materiálu. V rámci zkoušky byla stanovována smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , modul pružnosti E , tažnost A_g a A_{40mm} . Zkouška byla realizována na zkušebním zařízení TIRA Test 2300, jenž je znázorněn na obr. 3.6. Průběh zatěžující síly byl zaznamenáván tenzometrickým snímačem KAF 100 s rozsahem 100 kN a velikost prodloužení testovaného vzorku byla měřena pomocí extenzometru MFX 500. Rychlost zatěžování byla volena v souladu s výše uvedenou normou tak, že do meze kluzu je rychlost posuvu volena $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a po překročení této hodnoty se rychlost plynule zvyšuje až na hodnotu $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Počáteční délka měřeného úseku byla volena $l_e = 40 \text{ mm}$.



Obr. 3.6 Zařízení pro tahovou zkoušku TIRA Test 2300

Zkušební tělesa pro statickou zkoušku tahem za pokojové teploty i pro zkoušku za zvýšených teplot byla vyrobena podle normy ve shodě s výkresem uvedeným na obr. 3.7.



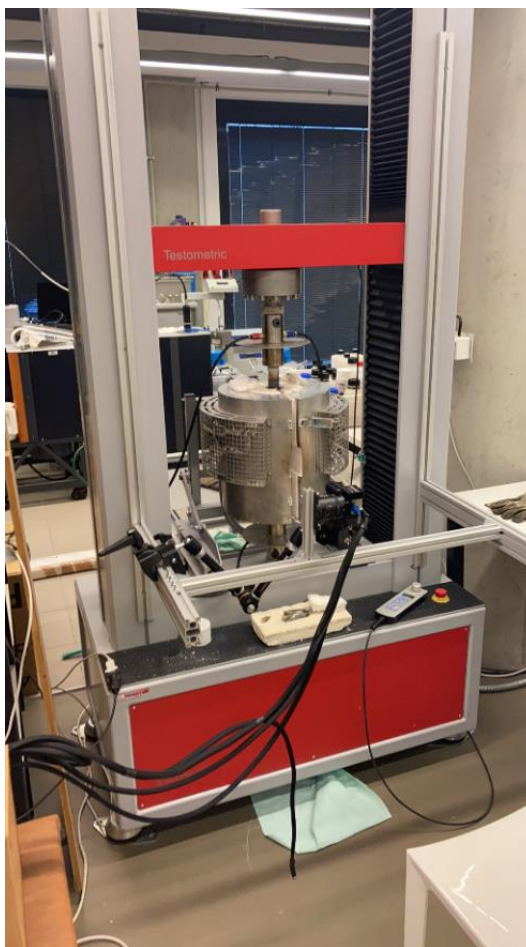
Obr. 3.7 Rozměry a tvar zkušební vzorku pro zkoušku tahem

Měření mechanických vlastností materiálu v základním stavu za pokojové teploty bylo provedeno na dvou vzorcích. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Naměřené mechanické vlastnosti za pokojové teploty

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]	E [MPa]
1	557,2	967,7	34,26	39,62	179231
2	522,3	948,1	35,71	38,98	163777
Průměr	539,7	957,9	34,98	39,3	171504

Statická zkouška tahem za zvýšených teplot byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-2 – Zkušební metoda za zvýšené teploty. Změny mechanických vlastností se zjišťovaly na trhacím stroji Testometric FS 100 CT, viz obr. 3.8. Zkušební stroj je vybaven teplotní komorou se zabudovaným termočlánkem, která poskytuje možnost ohřevu až na teplotu 1500 °C. Pro přesné dosažení požadovaných teplot byl během testu použit regulátor Clasic Clare 4.0. Průběh zatěžující síly byl řízen pomocí tenzometrické hlavy, jejíž upínacími tyčemi proudí chladicí kapalina.

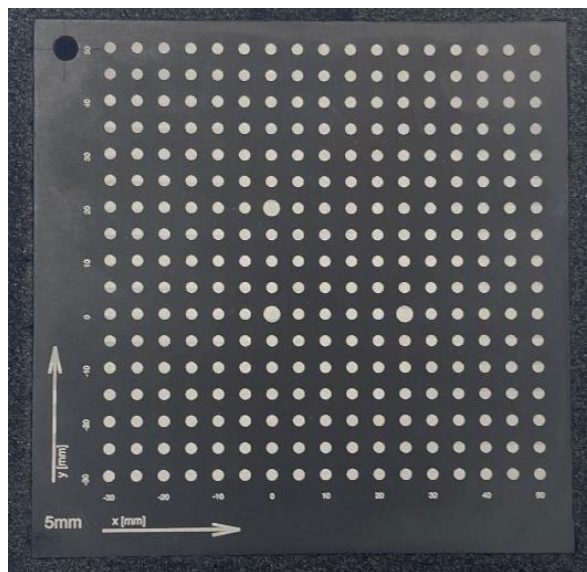


Obr. 3.8 *Trhací stroj Testometric FS 100CT*

Problém u tahové zkoušky za zvýšených teplot je snímání velikosti deformace běžným extenzometrem, proto byl použit video-extenzometr, který snímá vzorek tzv. průzorem v teplotní komoře. Deformace testovaného vzorku byla měřena bezkontaktním optickým systémem od firmy Sobriety a vyhodnocována v softwaru Mercury RT. Systém je založen na principu fotogrammetrické metody. Pro zajištění správné funkce fotogrammetrické analýzy je nutná úprava povrchu testovaného vzorku. Úprava spočívá v nanesení tzv. patternu, který umožňuje detekovat kontrolní body na povrchu vzorku. Pattern je kontrastní nástřík dvou barev, nejčastěji černé a bílé barvy, který musí odolávat teplotám použitých při měření. Z obr. 3.9 je zřejmý průběh tvorby patternu. Nejprve je vzorek nastříkán černou matnou barvou, která odolává teplotám do 800 °C, a následně jsou nanесeny bílé kapky na předchozí černou vrstvu.



Obr. 3.9 *Postup přípravy vzorků*



Obr. 3.10 *Kalibrační destička*

Před zahájením samotného měření je nutná kalibrace optického systému pomocí kalibračních destiček, viz obr. 3.10. Kamera je upevněna v dané vzdálenosti od trhacího stroje a kalibrační destička je vložena do testovací komory na místo měřeného vzorku. Kalibrační destičkou je posouváno a natáčeno do různých poloh, které jsou optickým systémem snímány. Místo, kde se vyskytuje kalibrační destička, nebo během měření testovaný vzorek, je osvětlováno monochromatickým modrým světlem pro snížení vlivu tepelného záření ze zkušební vzorku na optický systém, zároveň se tím dosahuje vyšší přesnosti snímání.

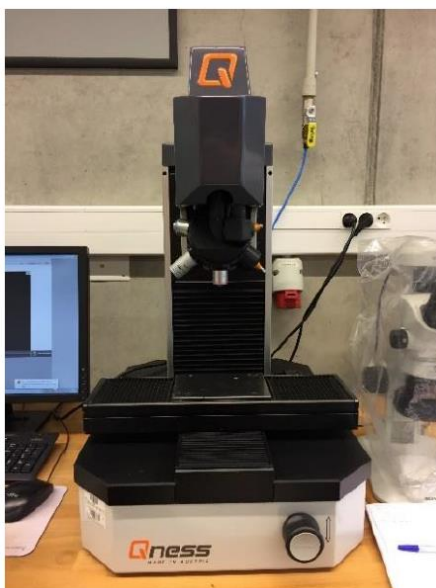
Po kalibraci zařízení následovalo upnutí zkušební vzorku pomocí závitů do závitových čelistí trhacího stroje, uzavření teplotní komory a nastavení ohřevu na požadovanou teplotu. Do softwaru byla zadána počáteční délka a vzorek byl předeptat na hodnotu 5000 N. Rychlost posuvu čelistí byla proměnná, nejprve do meze kluzu se pohybovaly rychlostí $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a následně $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ až do přetržení. Teploty, za kterých proběhlo měření změn mechanických vlastností byly $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ a $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Tyto teploty byly zvoleny z důvodu možnosti použití slitiny Inconel 718 až do teploty $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro každou teplotu byly testovány dva zkušební vzorky, se stejnou geometrií jako byla použita u zkoušky za pokojové teploty. Výsledná naměřená data jsou shrnuta v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Naměřené mechanické vlastnosti za zvýšených teplot

Zvýšené teploty	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
RT				
Průměr	539,7	957,9	34,98	39,3
600 °C				
Vzorek 1	558,5	835,5	17,65	27,56
Vzorek 2	514,9	807,6	13,99	14,34
Průměr	536,7	821,6	15,82	20,95
700 °C				
Vzorek 1	581,7	594,4	0,34	18,07
Vzorek 2	599,7	610,8	2,23	17,28
Průměr	590,7	602,6	1,29	17,68
800 °C				
Vzorek 1	190,1	232,3	7,64	41,77
Vzorek 2	212,2	257,2	8,60	53,47
Průměr	201,1	244,7	8,12	47,62

Měření tvrdosti základního materiálu bylo nejprve provedeno metodou podle Brinella v souladu s normou ČSN EN ISO 6506-1 na zařízení HPO 250 s vyhodnocovacím softwarem LabControl CCD. Vnikacím tělesem pro měření tvrdosti byla vyleštěná kulička ze slinutého karbidu wolframu (HBW) o průměru 2,5 mm při zkušebním zatížení 1839 N.

Vzhledem k tomu, že v průběhu experimentu bylo nutné měřit tvrdost na vzorcích menších rozměrů (\varnothing 4 mm x 10 mm), na kterých nelze tvrdost měřit pomocí metody HBW, byla tvrdost naměřena i pomocí metody dle Vickerse (HV5 a HV10) v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 na mikrotvrdoměru Qness Q30A, viz obr. 3.11. Výsledné naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. 3.4.



Obr. 3.11 Mikrotvrdoměr Qness Q30A

Tab. 3.4 Výsledky naměřené tvrdosti slitiny Inconel 718 základní stav

Vpich	HBW	HV10	HV5
1	441	436	465
2	436	458	455
3	439	474	446
4	429	444	465
5	439	439	460
6	431	437	464
7	431	452	459
8	425	453	465
9	422	439	456
10	431	458	456
Průměr	432 ± 6	449 ± 11	459 ± 6

3.1.4 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu je dynamická destruktivní zkouška, kde je zkušební vzorek vystaven vnějšímu namáhání za vzniku plastické deformace. Zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 148-1 metodou Charpy. Test proběhl na stroji LabTest CHK 450 J-I, viz obr. 3.12. Na zkušebních vzorcích byly vytvořeny vruby pomocí

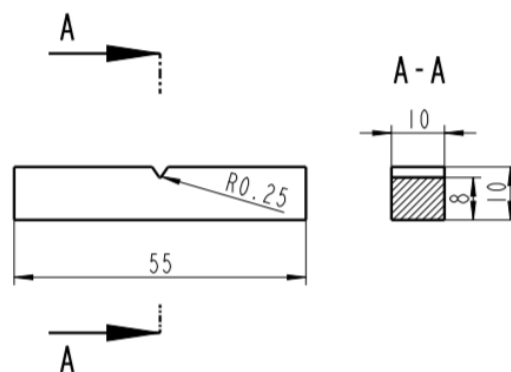
protahovacího hřebene jednoúčelového přístroje VRE 55 (od společnosti Labortech), viz obr. 3.13. Základní rozměry zkušební vzorku byly 10 x 10 x 55 mm a byl použit V – vrub, viz obr. 3.14. Vzorek byl ustaven do opěrky v samotném testovacím stroji tak, aby rovina kladiva protínala osu vrubu. Vrub na zkušebním tělese je umístěn na odvrácené straně úderu kladiva. Při zkoušce je kladivo uvolněno z výchozí polohy a následně vlastní vahou klesá směrem ke zkušebnímu tělesu. Během pohybu kladiva se mění potenciální energie na kinetickou. V nejnižší poloze má kladivo největší hodnotu kinetické energie, která je využita k přeražení vzorku. Touto zkouškou je stanovena hodnota absorbované energie KV_2 [J], což je energie spotřebovaná na přeražení zkušební vzorku a vrubová houževnatost KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$] testovaného materiálu.



Obr. 3.12 Stroj LabTest 450J-I



Obr. 3.13 Stroj VRE 55



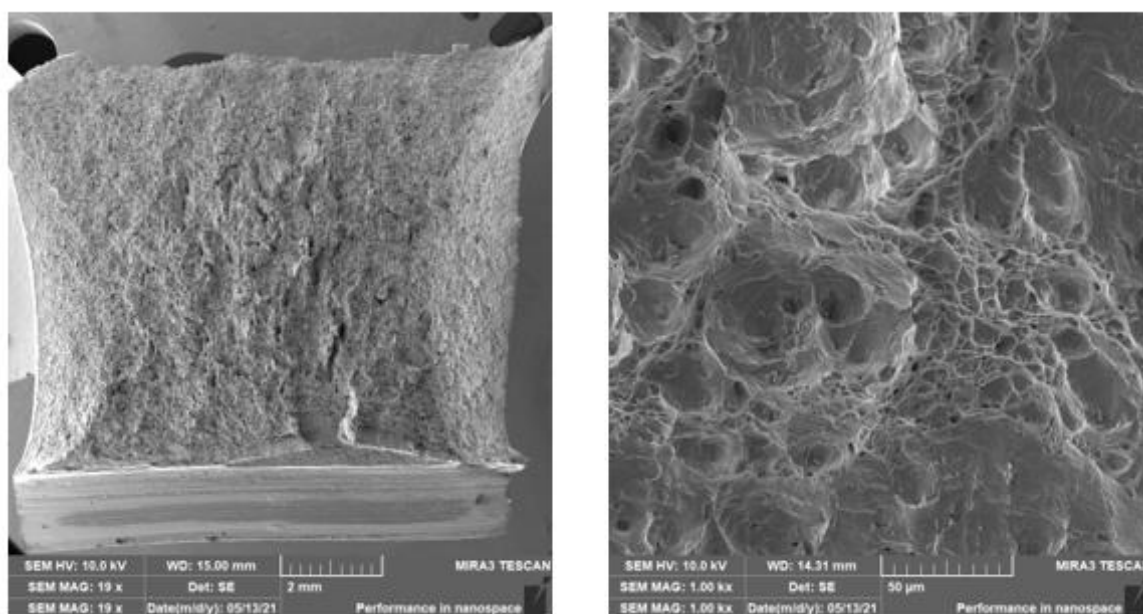
Obr. 3.14 Rozměry a tvar zkušební vzorku pro rázovou zkoušku

Naměřené hodnoty absorbované energie KV_2 a vrubové houževnatosti KCV_2 pro materiál Inconel 718 v základním stavu jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Tabulka naměřených hodnot nárazové práce a vrubové houževnatosti

Vzorek	KV_2 [J]	KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$]
1	185,8	232,3
2	205,3	256,6
3	207,2	259
Průměr	$199,4 \pm 12$	$249,3 \pm 15$

Přeražené vzorky po rázové zkoušce v ohybu byly nasnímány pomocí elektronového mikroskopu. Z fotografií na obr. 3.15 je patrné, že dochází k tvárnému lomu.



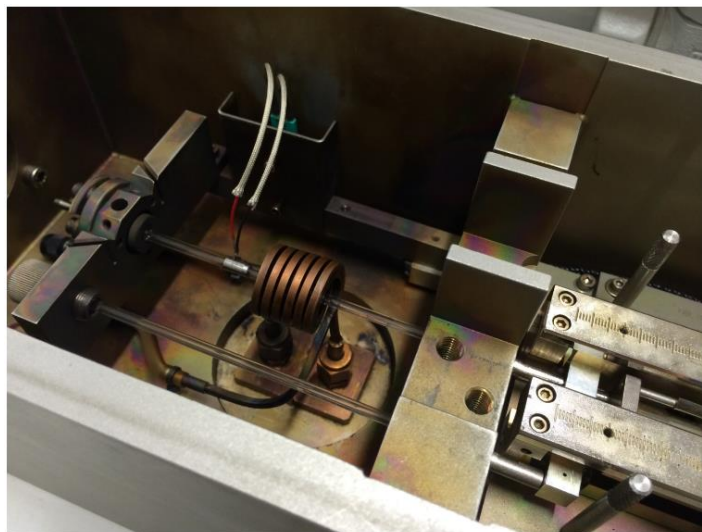
Obr. 3.15 Lom materiálu Inconel 718 v základním stavu, vlevo celý vzorek, vpravo detail

3.2 Posouzení možnosti aplikace TZ pomocí dilatometrie

Na základě prostudovaných informací o niklových slitinách, bylo aplikováno tepelné zpracování v ochranné atmosféře. Z tohoto důvodu byl pro náš experiment zvolen kalící dilatometr DIL 805L od společnosti TA Instruments, který je k dispozici na Katedře strojírenské technologie.

Tento přístroj byl využit jednak pro tepelné zpracování vzorků a vzhledem k tomu, že během tepelného zpracování umožňuje záznam dilatací, ke kterým dochází v průběhu ohřevu a ochlazování, tak i pro stanovení součinitele teplotní roztažnosti α v závislosti na rostoucí teplotě.

Kalící dilatometr DIL 805L, viz obr. 3.16 je plně automatizovaný přístroj využívaný především pro stanovení koeficientů teplotní roztažnosti, nebo ke studiu přechodových změn materiálů během ohřevu a ochlazování. Velká přednost přístroje spočívá ve velmi přesném řízení ohřívací a ochlazovací rychlosti. Ohřev zajišťují indukční cívky umístěné uvnitř izolované komory. Jako maximální uvedená teplota, na kterou lze vzorek ohřát je 1500 °C, minimální hodnota je teplota okolí RT, ovšem je zde i režim „Sub zero“, ve kterém je možné vzorky ochlazovat až do teploty -100 °C. V průběhu měření si dilatometr automaticky nastavuje průtok pracovního plynu a chladicí kapaliny. Přístroj umožňuje práci v různých prostředích: na vzduchu, ve vakuu, anebo v atmosférách helia, argonu případně dusíku. Atmosféry helia jsou vzhledem k jeho velmi vysoké teplotní vodivosti využívány nejčastěji v případech požadavku, co nevyšších rychlostí ochlazování. V rámci experimentů bylo jako ochranná atmosféra použito vakuum o $8 \cdot 10^{-4}$ Pa.



Obr. 3.16 Kalící dilatometr DIL 805L

Na zkušební vzorky Ø 4 x 10 mm byly na základě provedené rešerše (kap 2.4.1) aplikovány dva postupy tepelného zpracování. Postupy se liší technologickými parametry jak rozpouštěcího žihání, tak i u vytvrzování. V tab. 3.6 jsou přehledně uvedeny všechny postupy tepelného zpracování, které byly na zkušební vzorky během experimentu aplikovány.

Tab. 3.6 Přehled parametrů tepelného zpracování

Proces	Zkratka	Teplota	Čas výdrže
Rozpouštěcí žihání 1. postup	RŽ1	970 °C	1 hod
Rozpouštěcí žihání 1. postup	TZ1	970 °C	1 hod
Vytvrzování 1. část cyklu		720 °C	8 hod
Vytvrzování 2. část cyklu		620 °C	8 hod
Rozpouštěcí žihání 2. postup	RŽ2	1050 °C	1 hod
Rozpouštěcí žihání 2. postup	TZ2	1050 °C	1 hod
Vytvrzování 1. část cyklu		760 °C	10 hod
Vytvrzování 2. část cyklu		650 °C	8 hod

3.2.1 Rozpouštěcí žihání RŽ1

Jako první postup tepelného zpracování byl zvolen ten, jehož součástí je rozpouštěcí žihání, které bylo provedeno ohřevem na teplotu 970 °C. Ohřev, jak už bylo výše zmíněno, byl nasimulován pomocí dilatometru a probíhal rychlostí 0,5 °C.min⁻¹. Doba výdrže po dosažení požadované teploty byla 1 hodinu a následně byl vzorek ochlazen pomocí hélia rychlostí odpovídající rychlosti ochlazování ve vodě.

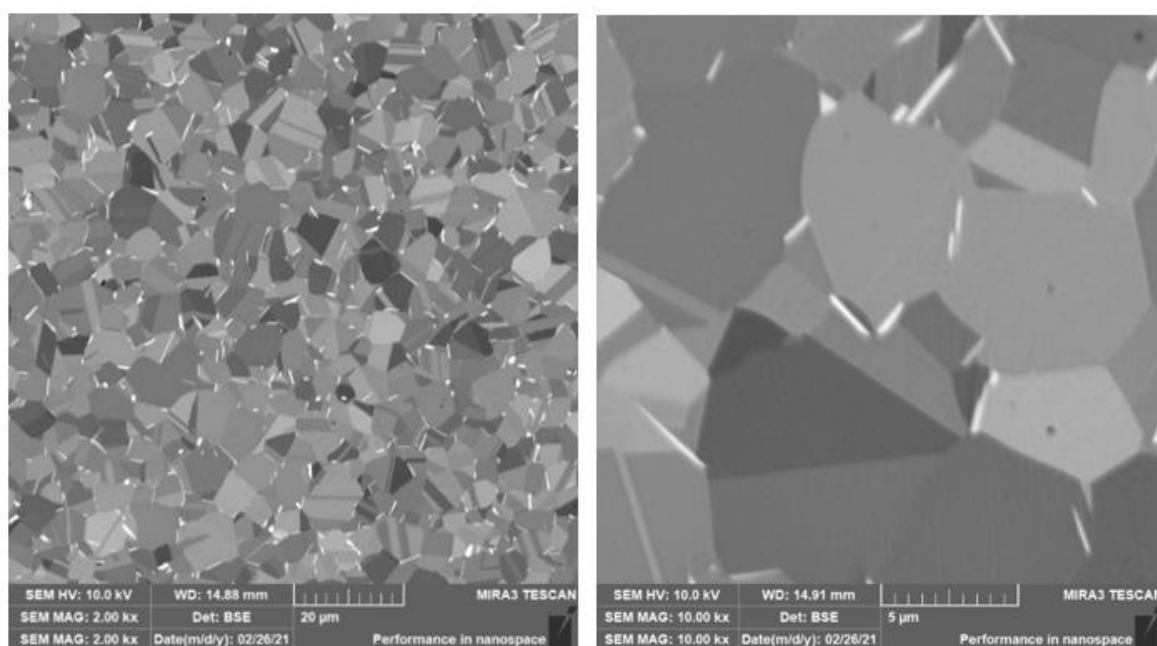
Takto zpracovaný vzorek byl nejprve zapouzdřen a na jeho průřezu hodnocena tvrdost materiálu dle Vickerse metodou HV5. Výsledky měření tvrdosti jsou uvedeny v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty tvrdosti HV5 po RŽI

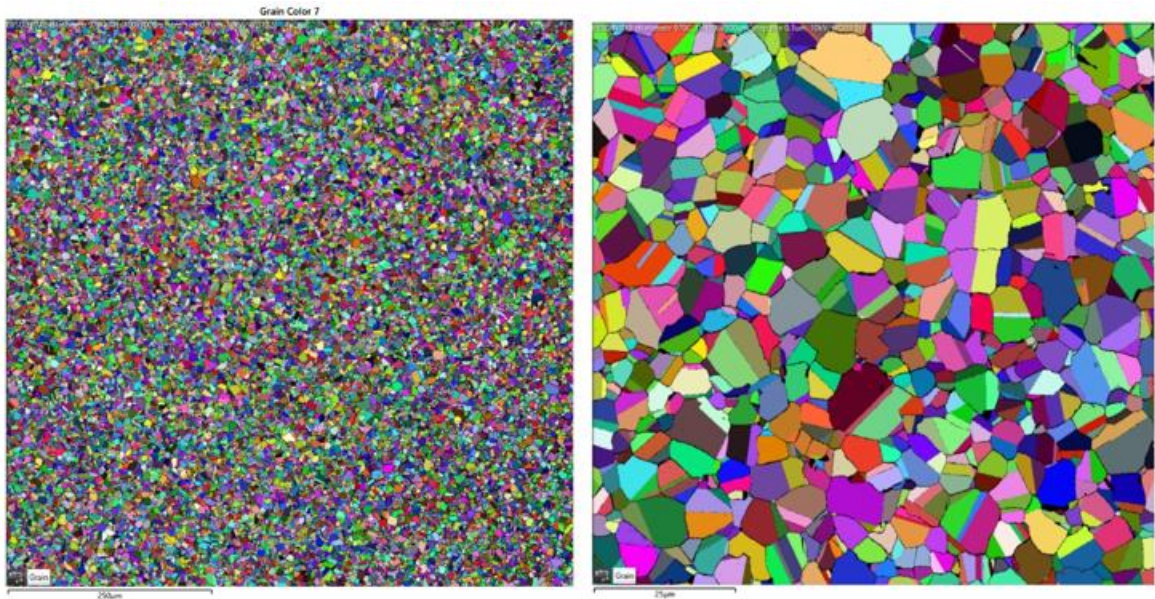
Vpich	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
HV5	250	256	259	251	261	251	258	258	257	261	256 ± 4

Pro mikroskopické pozorování byl vzorek, obdobně jako v předchozí části experimentu připraven běžným metalografickým postupem a na elektronovém mikroskopu pak hodnocena jeho struktura, viz obr. 3.17 a obr. 3.18.

Výsledná struktura ukazuje, že na fázové složení ani na velikost zrn nemělo provedené žíhání při 970 °C vliv. Na hranicích zrn zůstaly přítomny karbidické částice jehlicovitého tvaru. Průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD byla 9,11 µm.



Obr. 3.17 Struktura po RŽI 970 °C – 1 hodina



Obr. 3.18 *Struktura po RŽ1 970 °C – 1 hodina, metoda EBSD*

3.2.2 Rozpouštěcí žhání a následné vytvrzování dle postupu TZ1

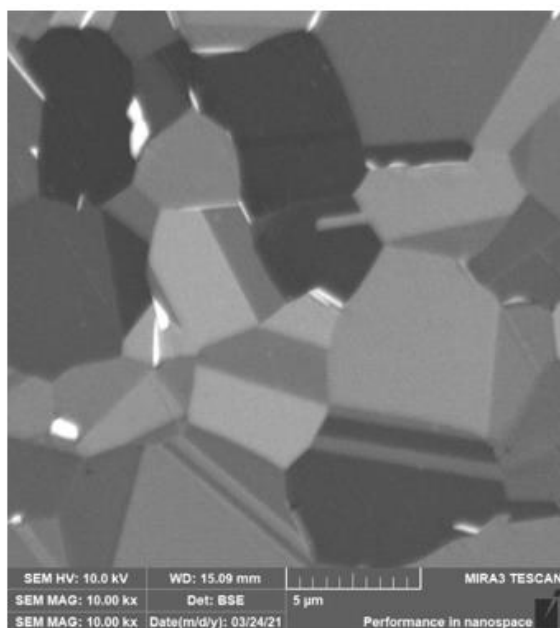
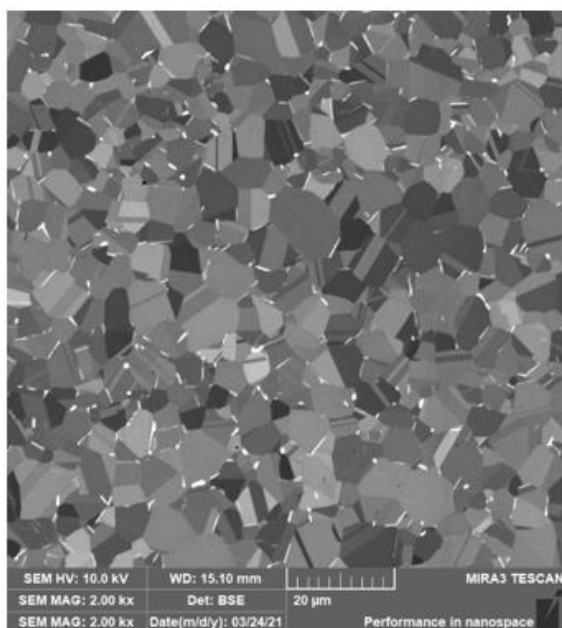
Po rozpouštěcím žhání a zchlazení bylo na vzorek aplikováno precipitační vytvrzování. Vzorek byl nejprve ohříván na teplotu 720 °C rychlostí 0,5 °C.min⁻¹. Na této teplotě byl testovaný vzorek držen po dobu 8 hodin. Po uplynutí doby výdrže byl vzorek po dobu 2 hodin ochlazován z teploty 720 °C na teplotu 620 °C a následně na této teplotě držen po dalších 8 hodin. Následovalo dochlazení na vzduchu. Celkový čas cyklu precipitačního vytvrzování tedy činil 18 hodin.

Po aplikování tepelného zpracování byla obdobně jako v předchozí části experimentu na testovaném vzorku hodnocena tvrdost materiálu. K vyhodnocení byla použita opět metoda dle Vickerse (HV5). Výsledky naměřené tvrdosti jsou uvedeny v tab. 3.8.

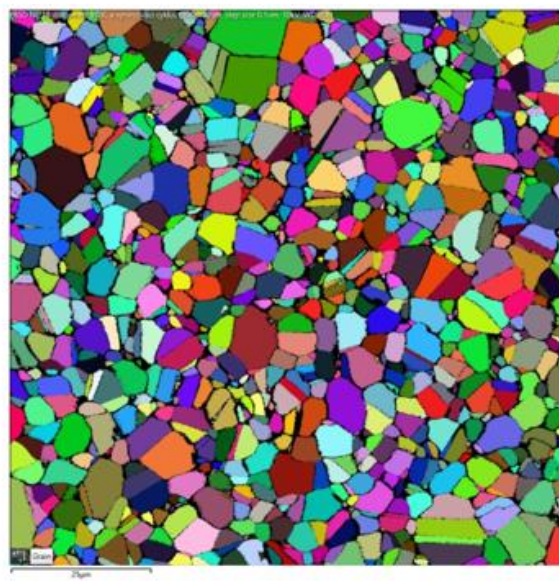
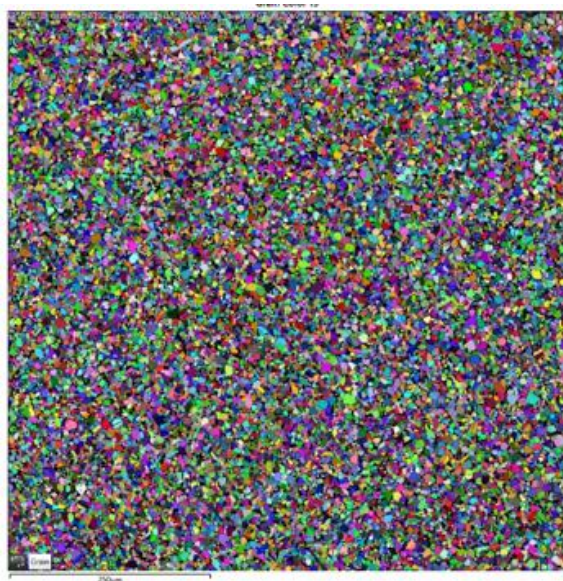
Tab. 3.8 *Naměřené hodnoty tvrdosti HV5 po TZ1*

Vpich	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
HV5	452	456	452	451	455	452	455	454	455	455	454 ± 2

Opět byla na elektronovém mikroskopu hodnocena vnitřní struktura, která je uvedena na obr. 3.19 a obr. 3.20.



Obr. 3.19 *Struktura po RŽI 970 °C – 1 hodina + vytvrzování (TZI)*



Obr. 3.20 *Struktura po RŽI 970 °C – 1 hodina + vytvrzování (TZI), metoda EBSD*

Z obrázků je patrné, že provedené rozpouštěcí žhání a precipitační vytvrzování za výše uvedených parametrů se na struktuře významně neprojevilo. Na hranicích zrn jsou přítomny opět karbidické částice jehlicovitého tvaru. Průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD byla 9,18 μm.

3.2.3 Rozpouštěcí žíhání RŽ2

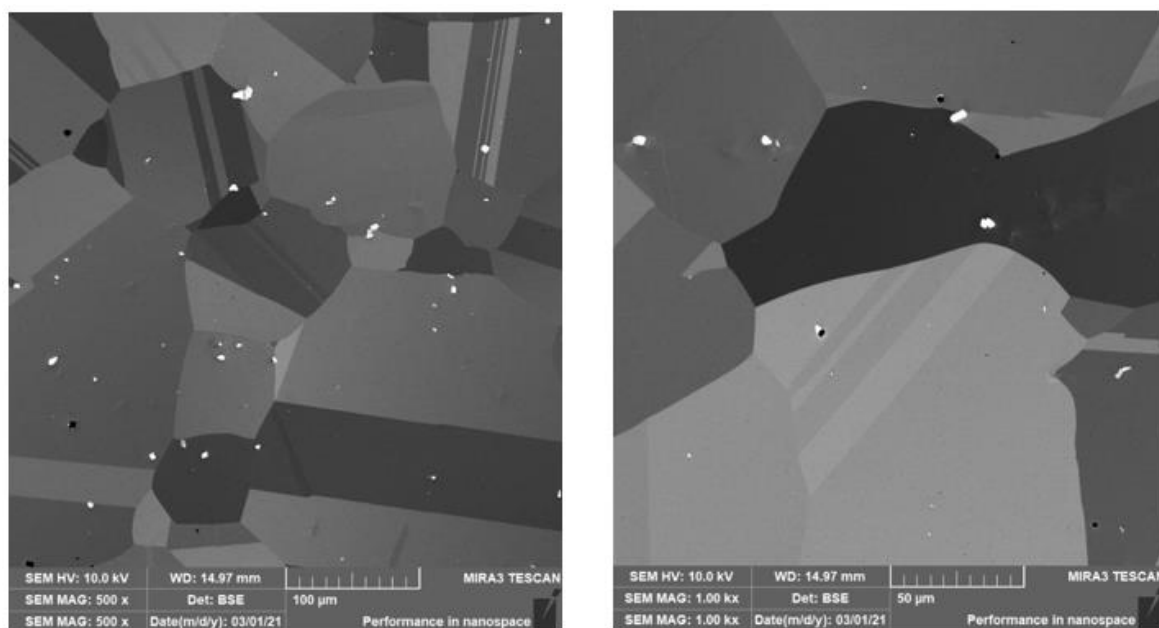
Při druhém postupu tepelného zpracování probíhá rozpouštěcí žíhání při teplotě 1050 °C. Ohřev byl nasimulovaný pomocí dilatometru a probíhal rychlostí 0,5 °C.min⁻¹. Doba výdrže po dosažení požadované teploty byla 1 hodinu. Vzorek byl následně ochlazen pomocí hélia rychlostí odpovídající rychlosti ochlazování ve vodě.

Opět byla hodnocena tvrdost metodou HV5 a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.9.

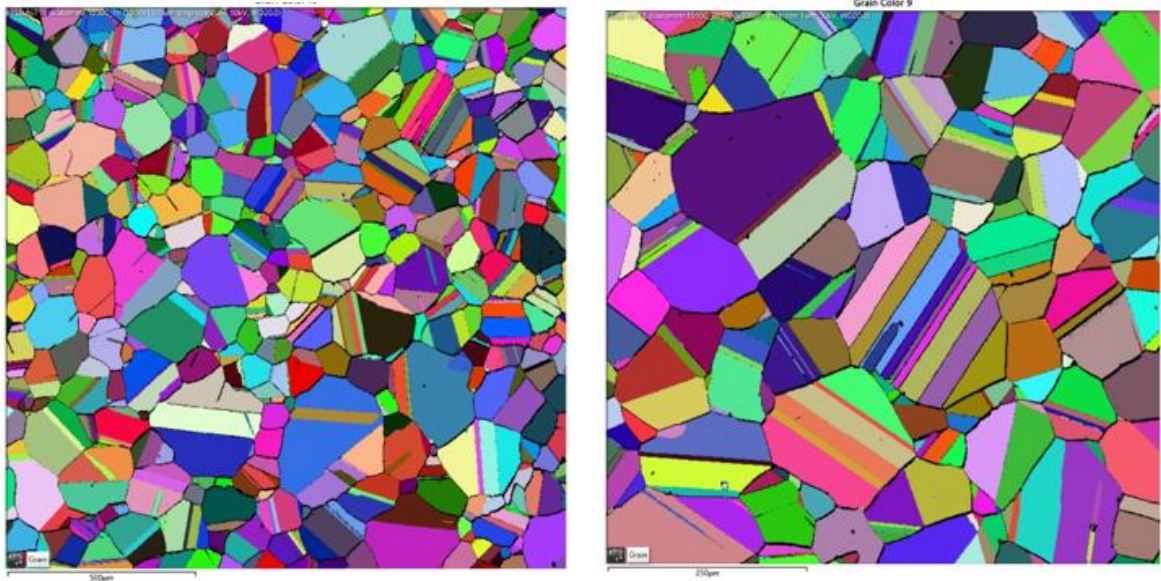
Tab. 3.9 Naměřené hodnoty tvrdosti HV5 po RŽ2

Vpich	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
HV5	178	173	175	175	178	175	178	174	179	176	176 ± 2

Na obr. 3.21 a obr. 3.22 je ukázána struktura takto zpracovaného vzorku získaná pomocí elektronové mikroskopie.



Obr. 3.21 Struktura po RŽ2 1050 °C – 1 hodina



Obr. 3.22 *Struktura po RŽZ 1050 °C – 1 hodina, metoda EBSD*

V případě žihání při teplotě 1050 °C došlo k výraznému růstu velikosti zrna. Průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD byla 40,78 μm. Karbidické částice na hranicích zrn byly rozpuštěny v matici. Pouze lokálně byly pozorovány hrubé karbidické částice vyprecipitované uvnitř zrn.

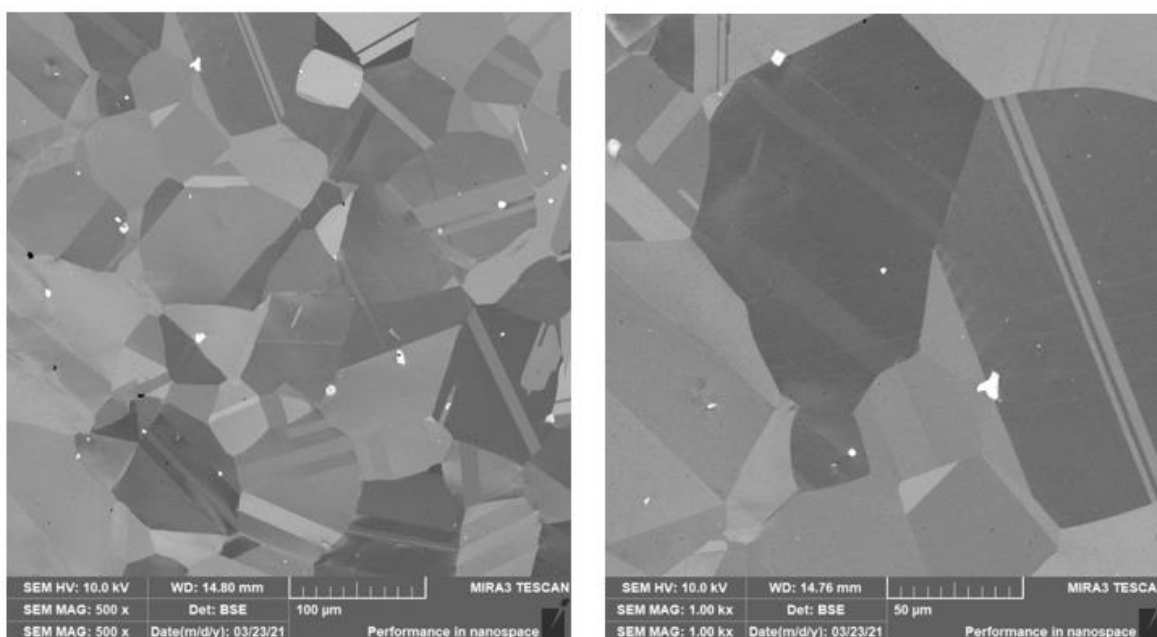
3.2.4 Rozpouštěcí žihání a následné vytvrzování dle postupu TZ2

Po rozpouštěcím žihání při teplotě 1050 °C a zchlazení následovalo precipitační vytvrzování, při kterém byl testovaný vzorek nejprve ohříván na teplotu 760 °C rychlostí 0,5 °C.min⁻¹. Na této teplotě byl testovaný vzorek držen po dobu 10 hodin. Po uplynutí doby výdrže byl vzorek po dobu 2 hodin ochlazován na teplotu 650 °C a poté na této teplotě ještě udržován po dalších 8 hodin. Následovalo dochlazení na vzduchu. Celkový čas cyklu precipitačního vytvrzování tedy činil 20 hodin.

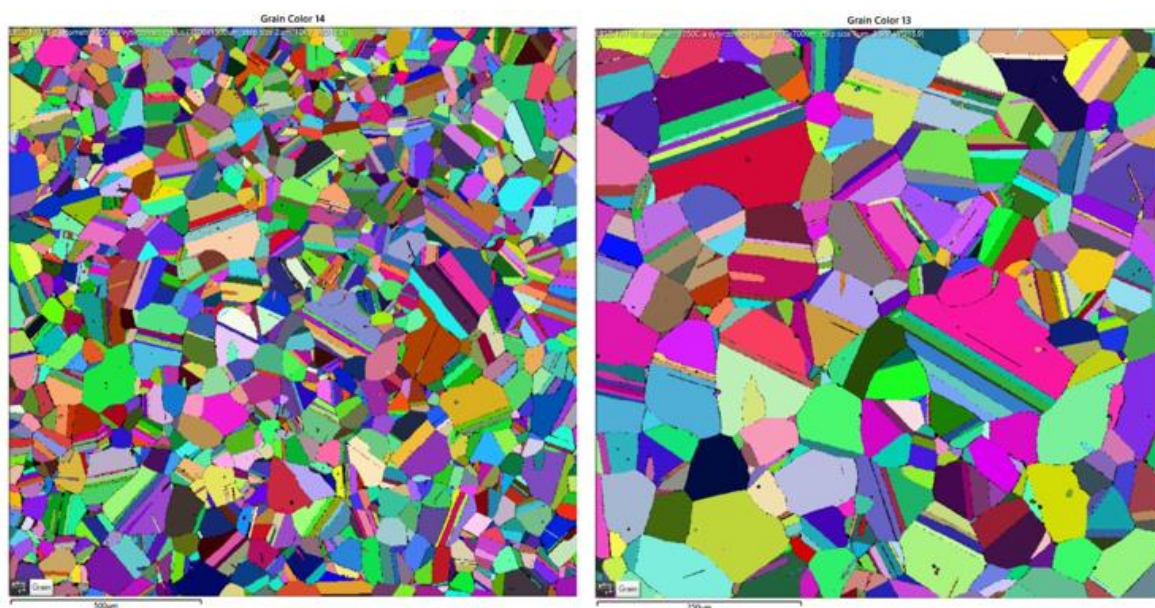
Po ukončení procesu tepelného zpracování byla na testovaném vzorku opět hodnocena tvrdost metodou dle Vickerse (HV5) a na elektronovém mikroskopu hodnocena vnitřní struktura. Naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. 3.10, struktura je uvedena na obr. 3.23 a obr. 3.24.

Tab. 3.10 *Naměřené hodnoty tvrdosti HV5 po TZ2*

Vpich	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
HV5	443	456	442	437	451	445	452	438	449	470	448 ± 10



Obr. 3.23 *Struktura po RŽ2 1050 °C – 1 hodina + vytvrzování (TZ2)*

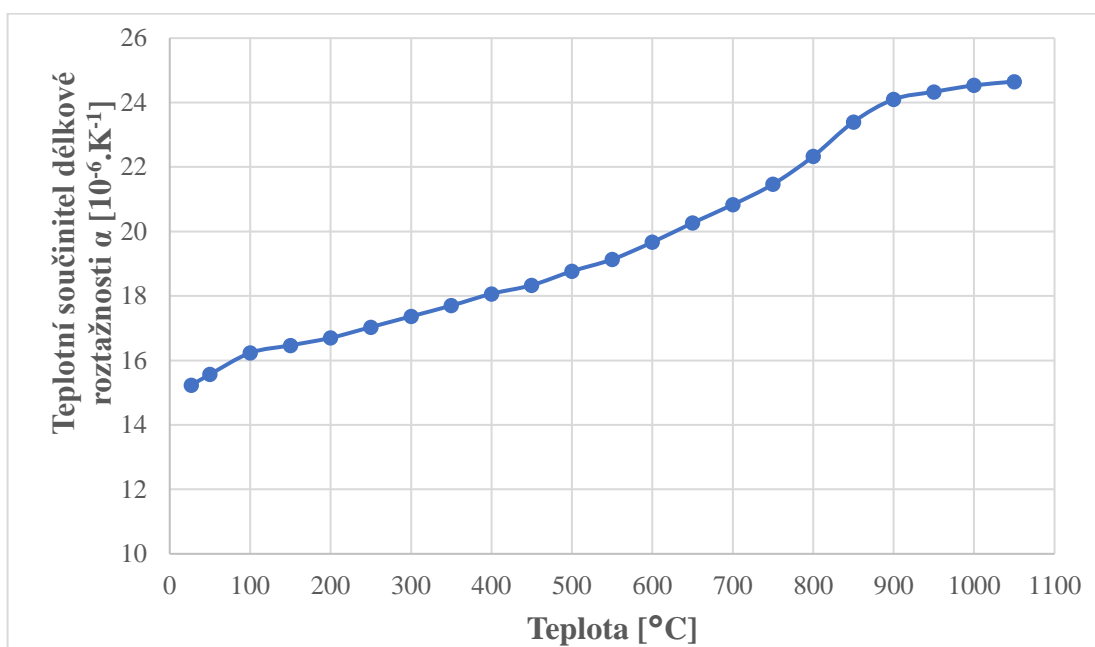


Obr. 3.24 *Struktura po RŽ2 1050 °C – 1 hodina + vytvrzování (TZ2), metoda EBSD*

Výsledná struktura vzorku ukazuje, že provedené rozpouštěcí žhánání a precipitační vytvrzování za výše uvedených parametrů vedlo v porovnání se základním stavem ke zhrubnutí zrna. Průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD byla 32,65 µm. Oproti očekávání nebyla po vytvrzení pozorována přítomnost jemných karbidických částic uvnitř zrn, ani na jejich hranicích.

3.2.5 Stanovení součinitele teplotní roztažnosti

Záznam dilatací pořízených během ohřevu, který byl aplikován při tepelném zpracování, umožnil také vyhodnotit součinitel teplotní roztažnosti slitiny Inconel 718. K jeho stanovení byly použity křivky ohřevu při rozpouštěcím žíhání. První záznam byl pořízen na rozpouštěcím žíhání, u kterého probíhal ohřev na teplotu 970 °C a druhý záznam z ohřevu vzorku na teplotu 1050 °C. U obou případů byla zvolena rychlost ohřívání 0,5 °C.min⁻¹. Během ohřevu byly zaznamenány hodnoty přírůstku teploty a změny délky vzorku, z těchto naměřených hodnot byl následně vypočten pomocí rovnice (4) teplotní součinitel délkové roztažnosti. Získaná závislost teplotního součinitele roztažnosti na teplotě je uvedena na obr. 3.25.



Obr. 3.25 Graf závislosti teplotního součinitele roztažnosti na teplotě

3.3 Stanovení mechanických vlastností po tepelném zpracování

Vzhledem k tomu, že pracovní komora dilatometru je prostorově omezená, nelze tak v ní tepelně zpracovávat vzorky větších rozměrů, které by následně mohly být použity pro vyhodnocení mechanických vlastností statickou zkouškou tahem nebo zkouškou rázem v ohybu.

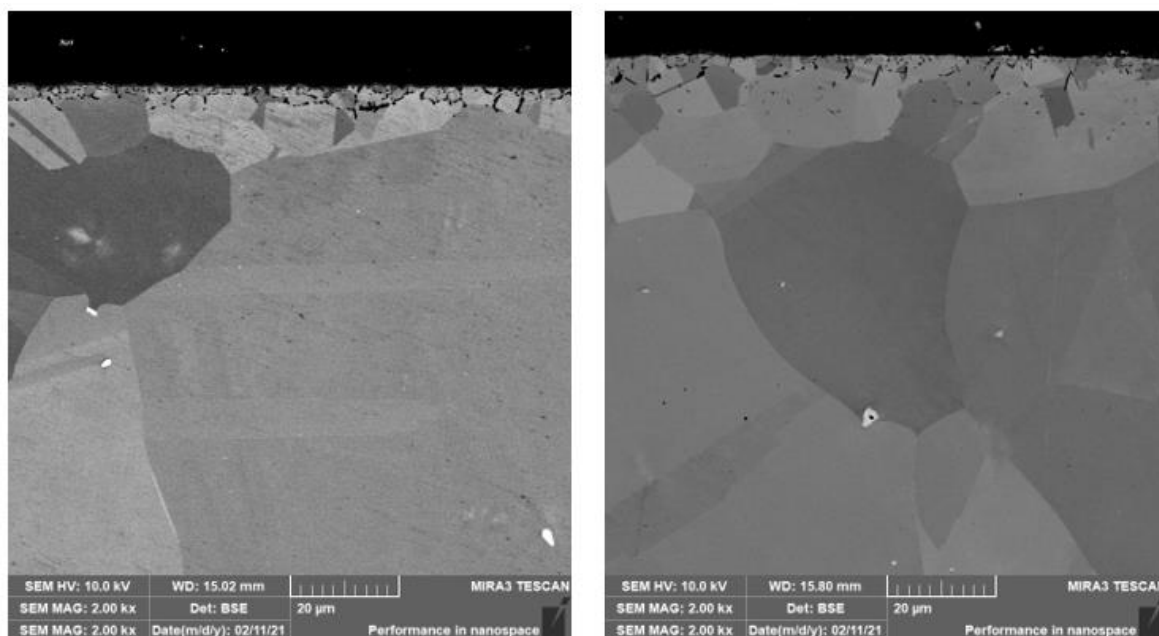
Proto bylo nejprve snahou zjistit, zda použití ochranné atmosféry má zásadní vliv na chemické složení, strukturu a tím i výsledné vlastnosti. Proto byly nejprve v elektrické peci 11016S Clasic, která je ukázána na obr. 3.26 zpracovány dva vzorky, z nichž jeden byl pro zajištění podmínek ochranné atmosféry ošetřen proti oxidační pastou LUISO.

Následně byly oba vzorky tepelně zpracovány, resp. bylo provedeno rozpouštěcí žihání při teplotě 1050 °C.



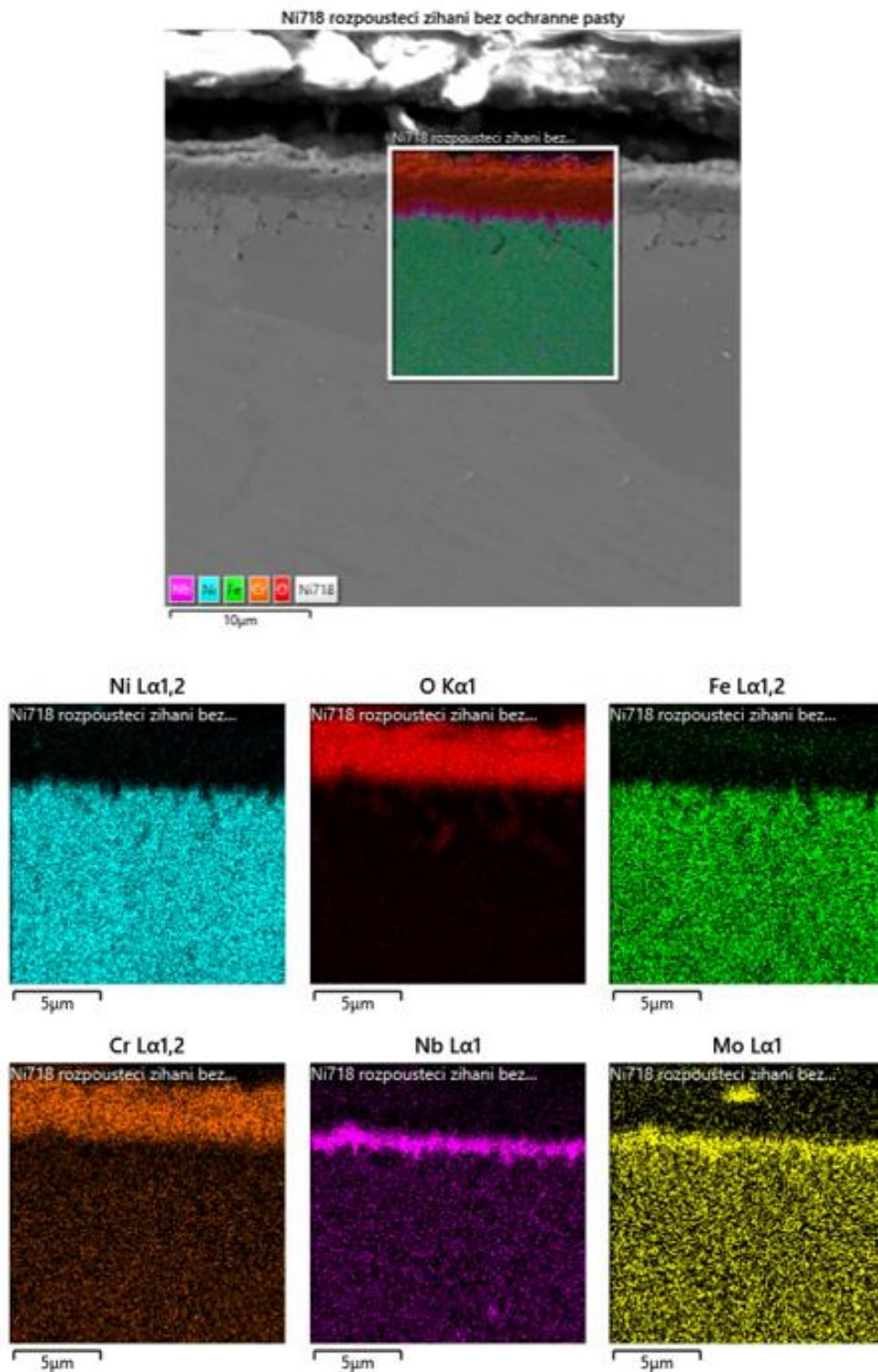
Obr. 3.26 Elektrická pec 11016S Clasic

Na obr. 3.27 jsou zobrazeny snímky povrchu vzorku z elektronového mikroskopu. Vlevo se jedná o vzorek bez ochranného nátěru a vpravo s proti oxidační pastou.

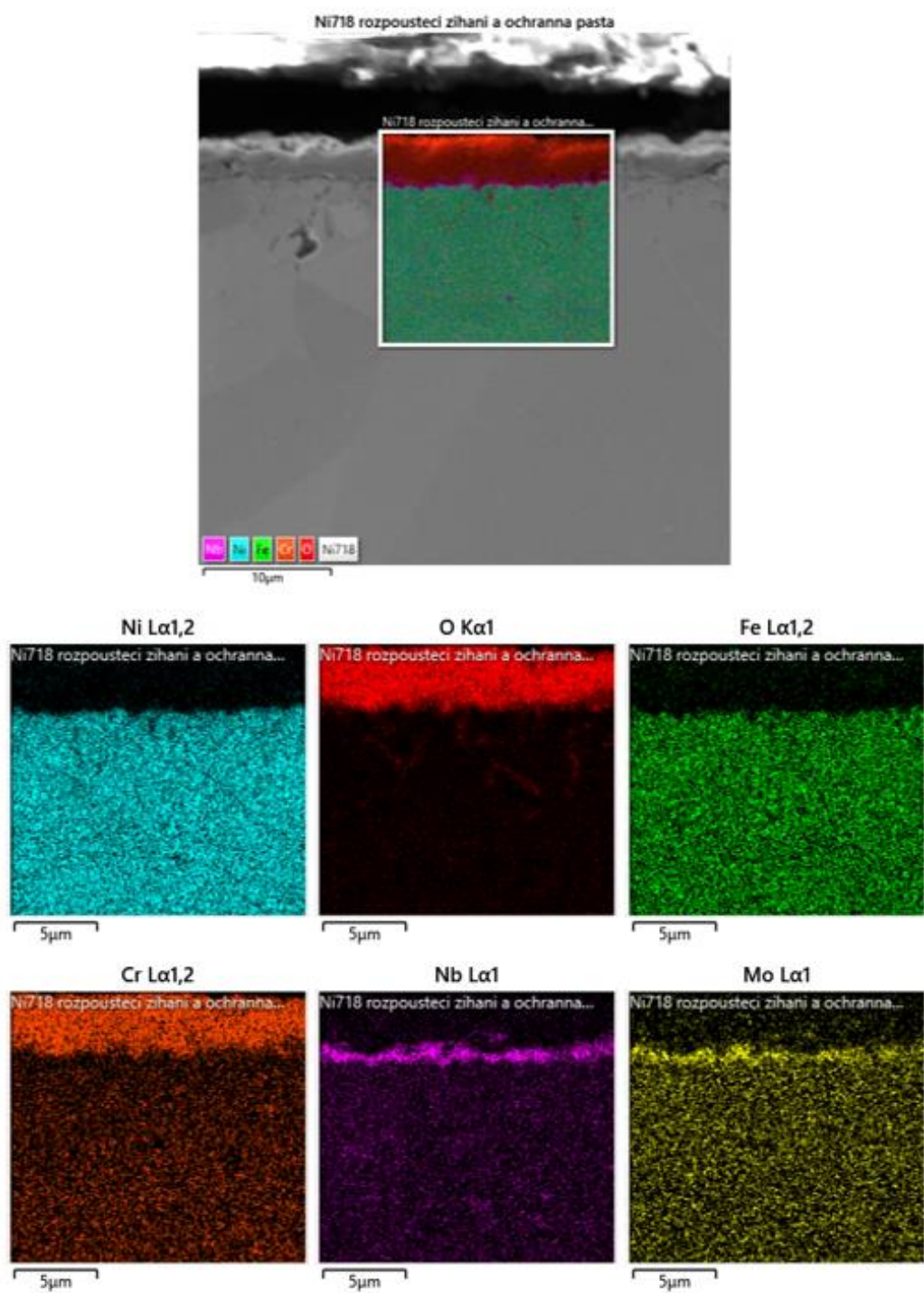


Obr. 3.27 Struktura povrchu po RŽ2 1050 °C

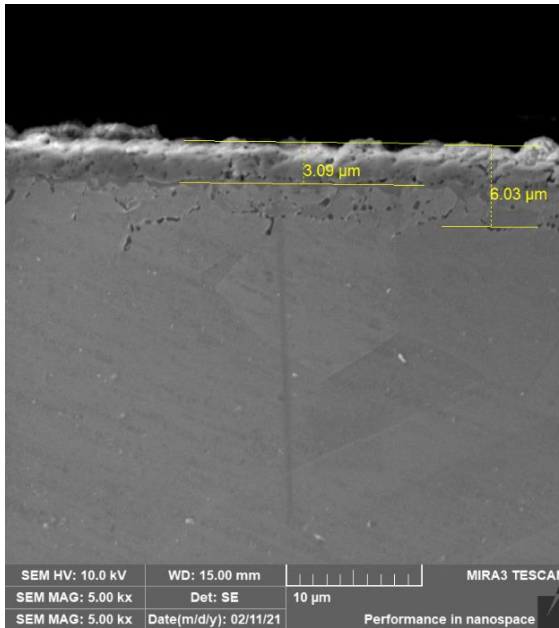
U obou typů vzorků byla dále stanovena EDX mapa rozložení jednotlivých prvků, která je uvedena na obr. 3.28 a obr. 3.29.



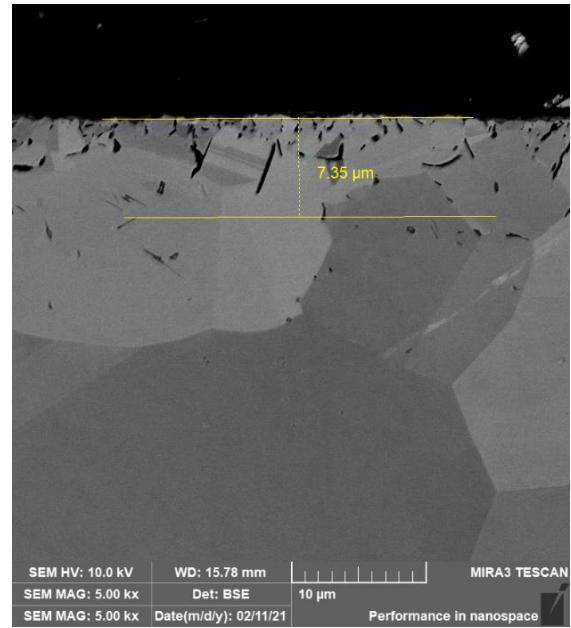
Obr. 3.28 EDX mapa rozložení jednotlivých prvků vzorku bez ochranné pasty



Obr. 3.29 EDX mapa rozložení jednotlivých prvků vzorku s ochrannou pastou



Obr. 3.30 *Povrch vzorku bez pasty, EDX analýza*



Obr. 3.31 *Povrch vzorku s pastou, EDX analýza*

Na obr. 3.30 a obr. 3.31 jsou opět pro oba typy vzorků zobrazeny výsledky EDX analýzy. Z porovnání EDX analýzy vzorku bez ochranného nátěru (obr. 3.30) a vzorku ošetřeného ochrannou proti oxidační pastou (obr. 3.31) vyplývá, že použití ochranné pasty nemělo významný vliv na ochranu povrchu vzorku. V obou případech byla oxidačně napadena povrchová vrstva do hloubky cca 7 μm . Tato vrstva byla tvořena oxidy chromu a vrstvičkou sloučenin na bázi niobu. Z uvedeného vyplývá, že při plánovaných testech za daných parametrů (teplota, čas) není třeba provádět povrchovou ochranu vzorků nátěrovou pastou či plynou ochrannou atmosférou.

Vzhledem k tomu, že se významný vliv ochranné atmosféry na chemické složení a strukturu neprokázal, bylo tepelné zpracování vzorků určených pro stanovení mechanických vlastností provedeno v peci bez ochranné atmosféry. Geometrie vzorků určených pro statickou zkoušku v tahu a zkoušku rázem v ohybu byla uvedena již v předchozích kapitolách, viz kap. 3.1. Na vzorky bylo aplikováno tepelné zpracování dle postupů, které byly již popsány v kap 3.2.

Naměřené mechanické vlastnosti meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , tažnost A_g a $A_{40\text{mm}}$ jsou uvedeny v tab. 3.11. Pro každý stav byla zkouška provedena vždy na dvou vzorcích.

Tab. 3.11 Naměřené mechanické vlastnosti za pokojové teploty po TZ

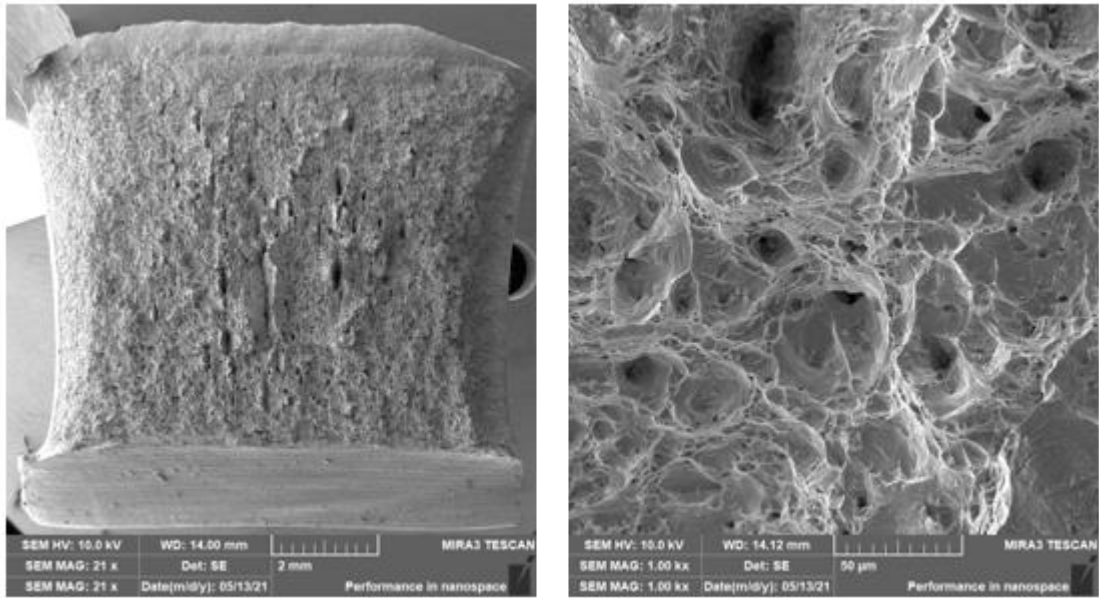
Teplota RT	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _g [%]	A _{40mm} [%]	E [MPa]
ZS					
Průměr	539,7	957,9	34,98	39,3	171504
RŽ 1					
Vzorek 1	542,3	968,1	33,21	39,67	207002
Vzorek 2	506,3	951,2	34,13	40,87	190246
Průměr	524,3	959,7	33,67	40,27	198624
TZ 1					
Vzorek 1	1216,5	1453,1	13,98	21,18	210572
Vzorek 2	1189,9	1423,3	14,31	20,69	209416
Průměr	1203,2	1442,7	14,15	20,94	209994
RŽ 2					
Vzorek 1	301,7	764,2	53,6	61,97	143426
Vzorek 2	305,2	771,9	52,47	61,46	159864
Průměr	303,5	768,1	53,04	61,72	151645
TZ 2					
Vzorek 1	1143,7	1366,3	16,39	23,3	206577
Vzorek 2	1150,2	1373,6	15,95	23,87	202402
Průměr	1146,9	1369,9	16,17	23,59	204489

Mechanické vlastnosti byly hodnoceny i pomocí zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy. Naměřené hodnoty absorbované energie KV₂ [J] a vrubové houževnatosti KCV₂ [J.cm⁻²] jsou uvedeny v tab. 3.12.

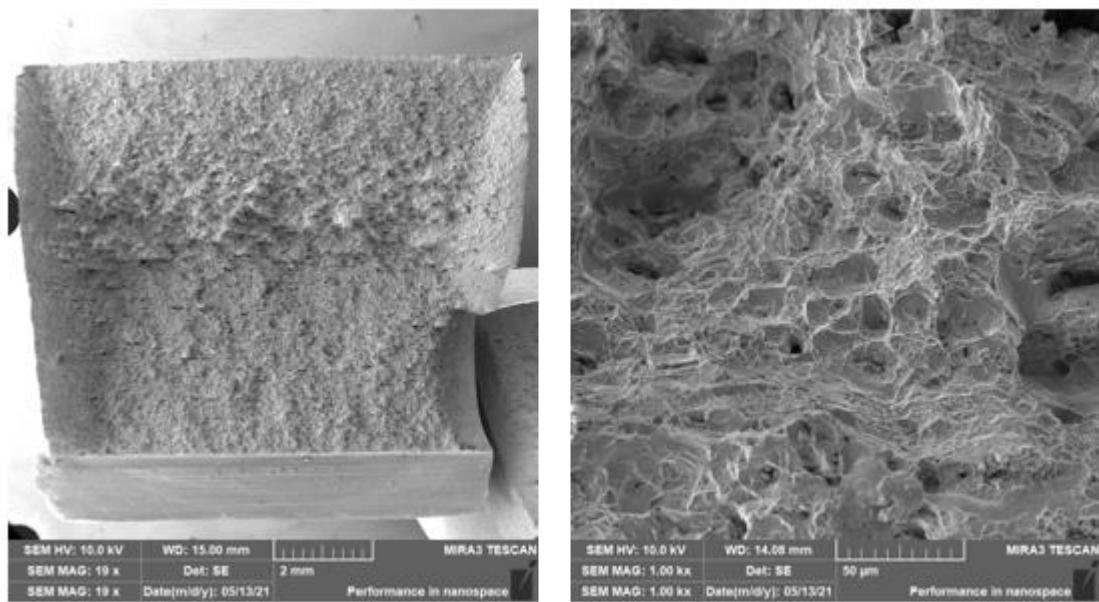
Tab. 3.12 Naměřené hodnoty rázovou zkouškou v ohybu pro jednotlivé TZ

Teplota RT	KV ₂ [J]	KCV ₂ [J.cm ⁻²]
ZS		
Průměr	199,4 ± 12	249,3 ± 15
RŽ 1		
Vzorek 1	201,1	251,4
Vzorek 2	211,5	264,3
Vzorek 3	223,3	279,1
Průměr	211,9 ± 11	264,9 ± 14
TZ 1		
Vzorek 1	67,6	84,4
Vzorek 2	56,7	70,9
Vzorek 3	55,8	69,7
Průměr	60 ± 7	75 ± 8
RŽ 2		
Vzorek 1	286,9	358,6
Vzorek 2	307	383,8
Vzorek 3	307,8	384,8
Průměr	300,6 ± 12	375,7 ± 15
TZ 2		
Vzorek 1	90,1	112,6
Vzorek 2	85,6	106,9
Vzorek 3	71,7	89,6
Průměr	82,5 ± 10	103,1 ± 12

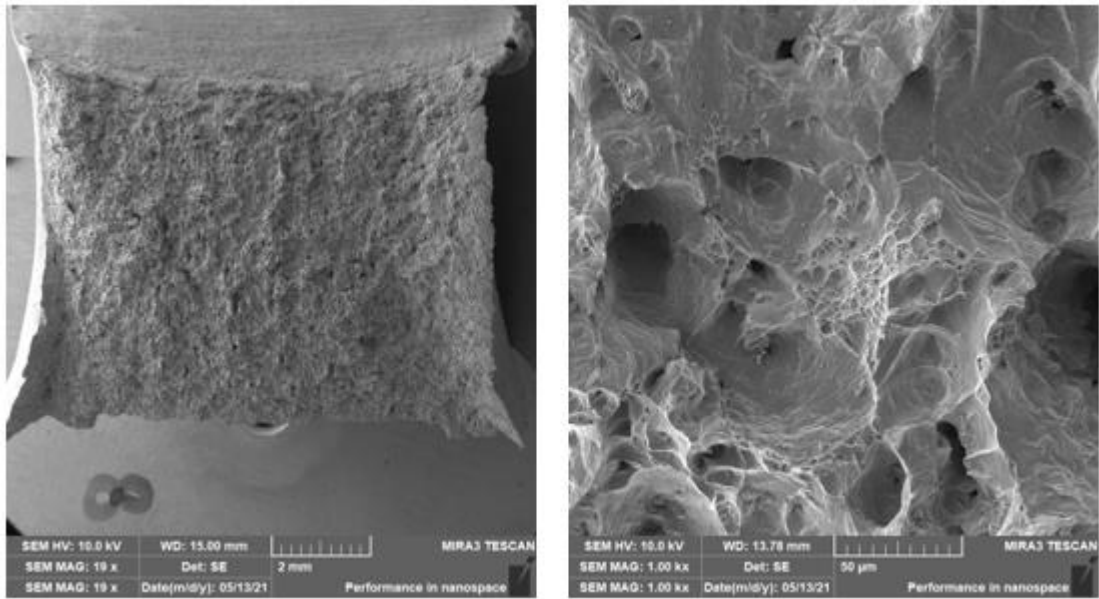
Přeražené vzorky po rázové zkoušce v ohybu byly nasnímány pomocí elektronového mikroskopu. Z fotografií na obr. 3.32, obr. 3.33, obr. 3.34, obr. 3.35 je patrné, že u všech stavů tepelného zpracování dochází k tvárnému lomu.



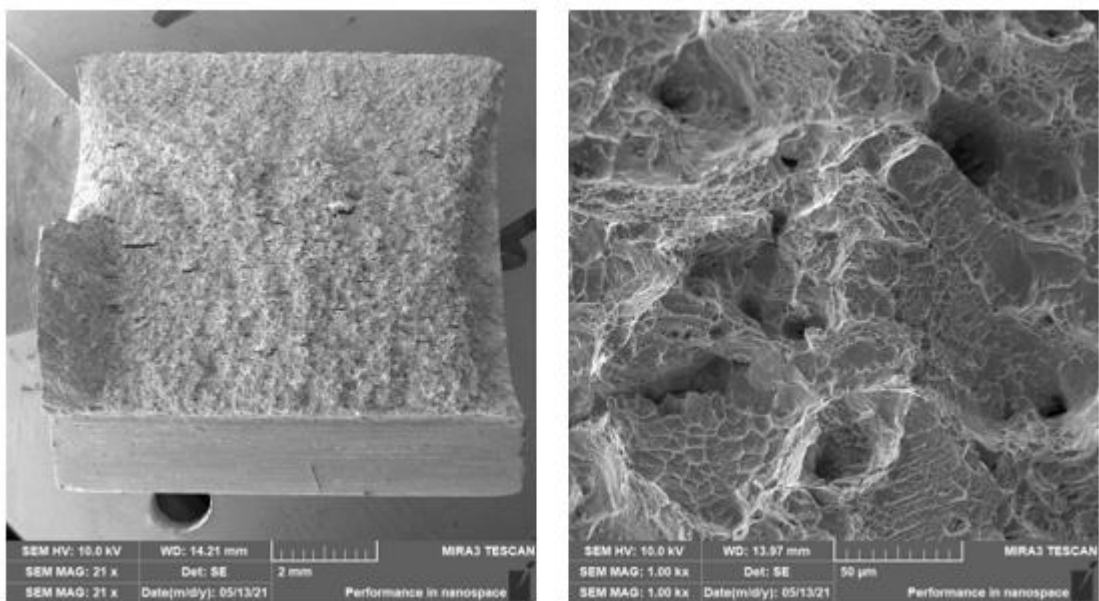
Obr. 3.32 Lom materiálu Inconel 718 po RŽI, vlevo celý vzorek, vpravo detail



Obr. 3.33 Lom materiálu Inconel 718 po TZ1, vlevo celý vzorek, vpravo detail



Obr. 3.34 Lom materiálu Inconel 718 po RŽ2, vlevo celý vzorek, vpravo detail

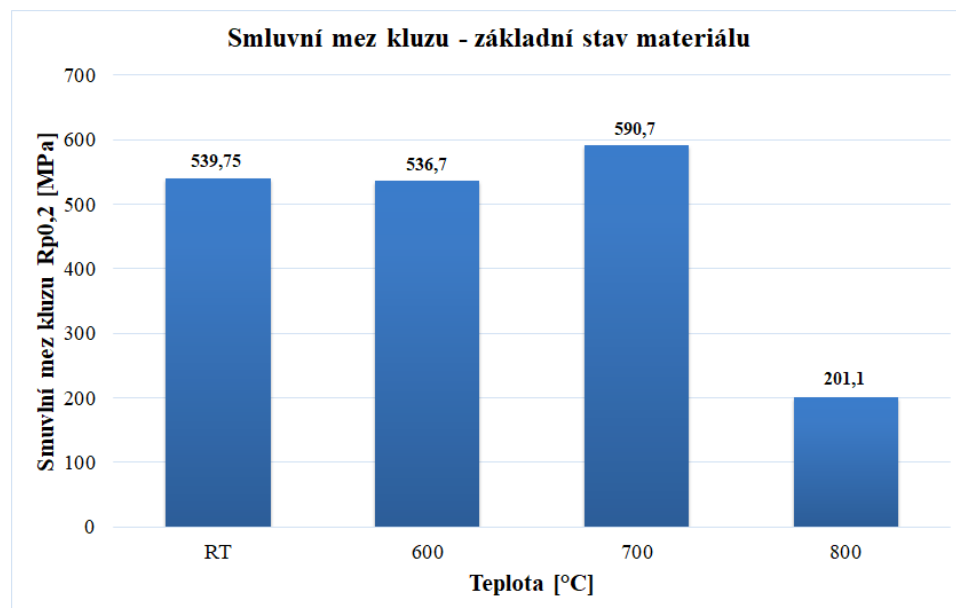


Obr. 3.35 Lom materiálu Inconel 718 po TZ2, vlevo celý vzorek, vpravo detail

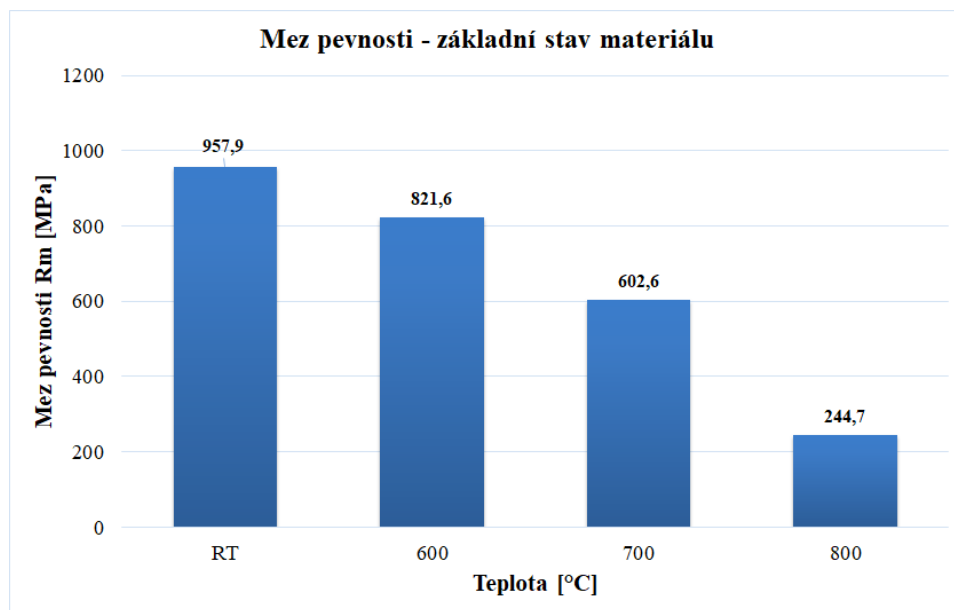
4. Diskuze výsledků

V rámci diplomové práce byla řešena problematika změny mechanických vlastností tvářené niklové slitiny Inconel 718, společně se změnou vnitřní struktury v závislosti na zvolené technologii tepelného zpracování. Mechanické vlastnosti byly posuzovány pomocí statické tahové zkoušky, rázové zkoušky ohybem a měření tvrdosti.

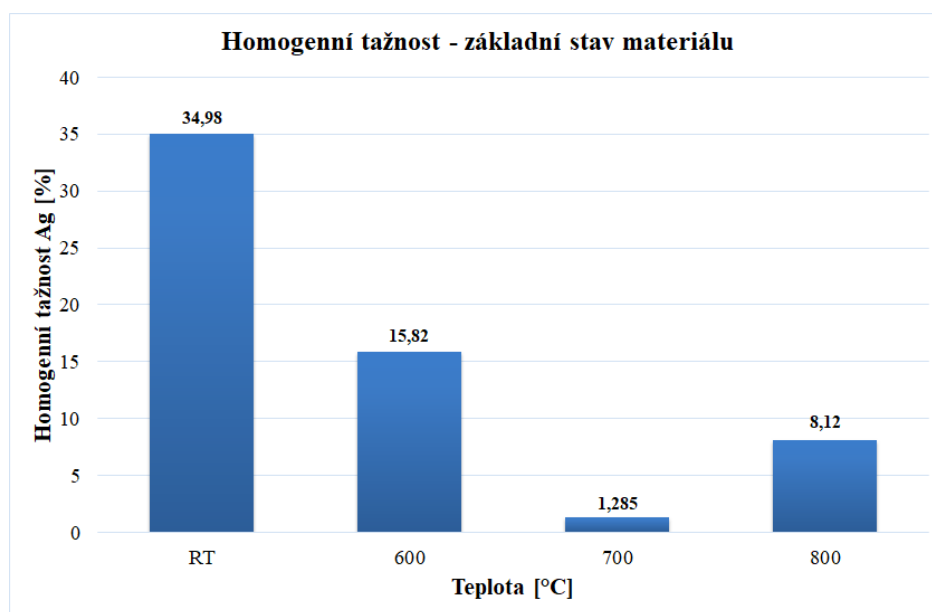
V první fázi experimentu byly nejprve sledovány mechanické vlastnosti a struktura dodaného materiálu. Zkouška tahem byla na materiálu v základním stavu provedena za pokojové teploty i za zvýšených teplot, u tepelně zpracovaných vzorků byla zkouška provedena pouze za teploty pokojové. Porovnání naměřených hodnot smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa], meze pevnosti R_m [MPa] a homogenní tažnosti A_g [%] pro jednotlivé stavy materiálu je uvedeno na následujících obrázcích. Na obr. 4.1 jsou souhrnně zobrazeny průměrné hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, na obr. 4.2 průměrné hodnoty meze pevnosti R_m a na obr. 4.3 průměrné hodnoty homogenní tažnosti A_g naměřené za pokojové (RT) i zvýšené teploty (600, 700 a 800 °C) pro základní stav materiálu.



Obr. 4.1 Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu pro základní stav materiálu



Obr. 4.2 Průměrné hodnoty meze pevnosti pro základní stav materiálu



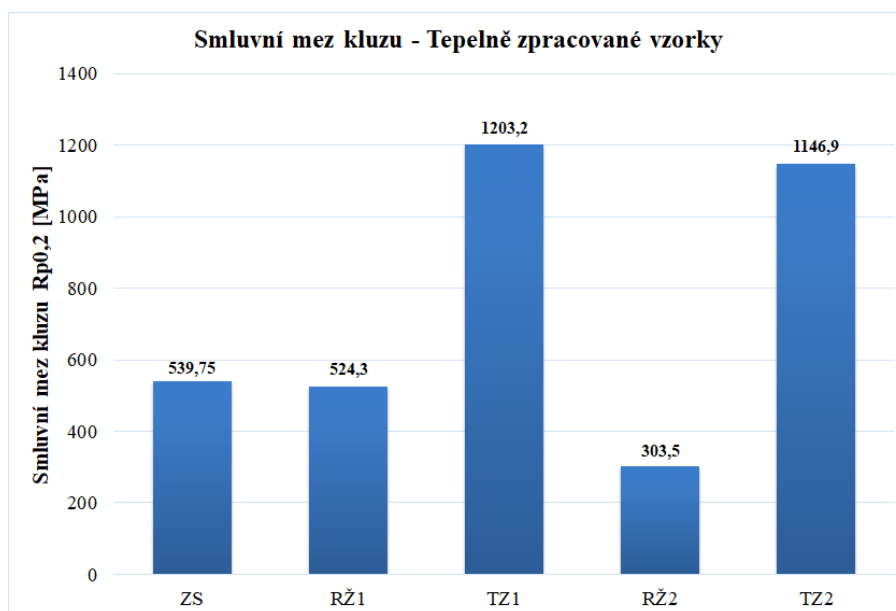
Obr. 4.3 Průměrné hodnoty homogenní tažnosti pro základní stav materiálu

Z výsledků měření získaných pomocí tahové zkoušky lze stanovit hned několik závěrů. Hodnoty meze kluzu u slitiny typu Inconel 718 v základním stavu se do teploty 700 °C téměř nemění a pohybují se okolo cca 540 MPa. Zajímavé je, že dosažením této teploty hodnota meze kluzu nepoklesne, ale naopak se zvýší, až o bezmála 50 MPa. Důvodem je v tomto případě fakt, že do teploty 700 °C, do které je možnost jejího konstrukčního využití, je vysoká strukturní stabilita materiálu. Nad touto teplotou pravděpodobně dochází k přesunu karbidů, což výrazně ovlivňuje jak hodnoty meze kluzu,

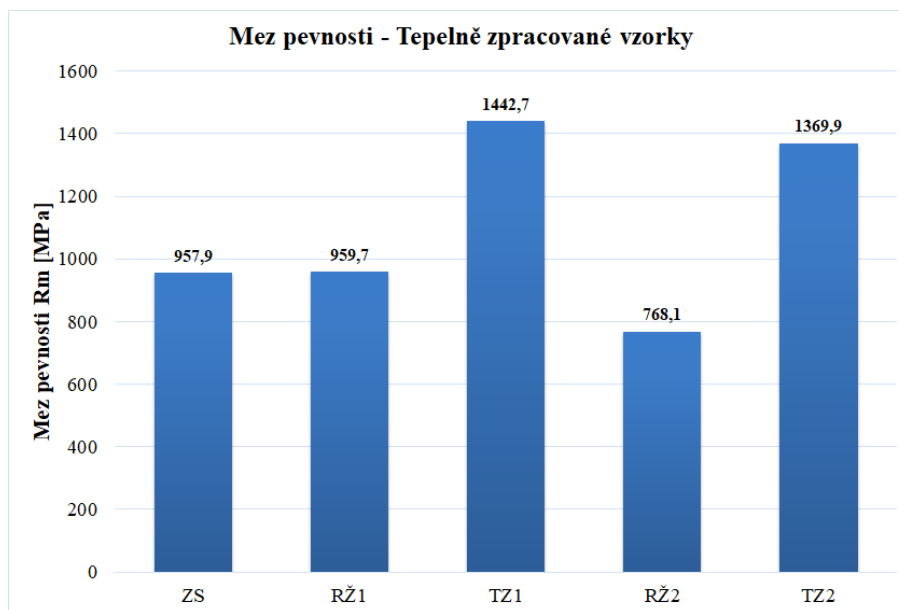
tak i homogenní tažnost. U této teploty lze také pozorovat velmi malý rozdíl mezi hodnotami meze kluzu a meze pevnosti. Při dosažení teploty 800 °C již dochází k velmi výraznému poklesu meze kluzu. O hodnotách meze pevnosti se dá říci, že mají v závislosti na teplotě téměř lineární klesající charakter. Klesající charakter vykazuje i homogenní tažnost, u které navíc dochází při teplotě 700 °C k anomálii. Při této teplotě dochází k výraznému poklesu tažnosti. Pro přesnější popis mechanických vlastností materiálu by bylo vhodné při dalším výzkumu oblast teploty 700 °C podrobněji prozkoumat, tzn. statickou zkoušku v tahu provést např. při teplotách 680 a 720 °C.

V další fázi experimentu byly porovnávány mechanické vlastnosti dodaného materiálu (po rozpouštěcím žhání bez další specifikace – ZS), s vlastnostmi získanými po tepelném zpracování. Jak již bylo podrobně popsáno v kap. 3, na vzorky byly aplikovány dva způsoby tepelného zpracování, které se lišily výší teploty rozpouštěcího žhání (RŽ1 a RŽ2) a poté i teplotou a dobou výdrže umělého vytvrzování (TZ1 a TZ2).

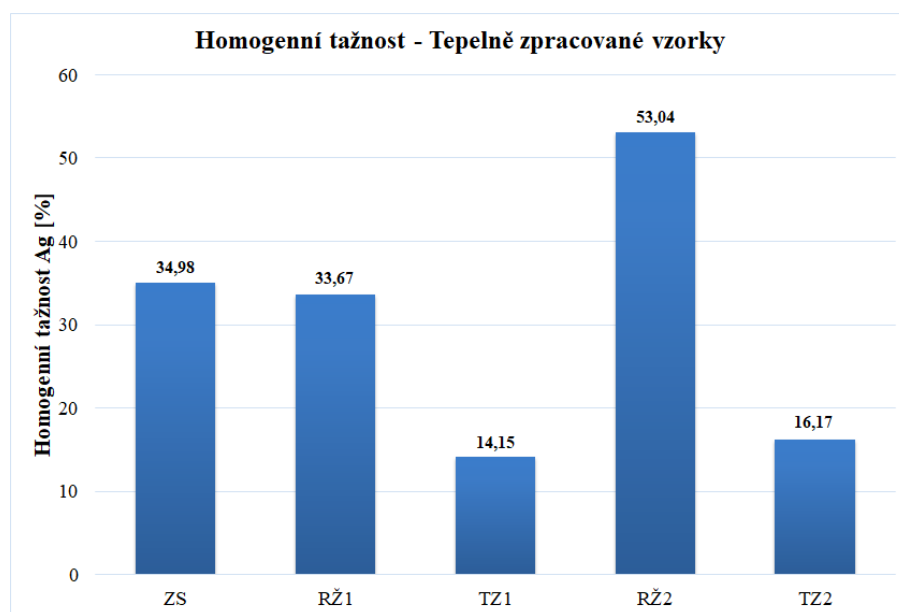
Na následujících obrázcích jsou graficky zpracovány naměřené hodnoty vzorků, na kterých bylo provedeno tepelné zpracování. Na obr. 4.4 jsou zobrazeny průměrné hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, na obr. 4.5 průměrné hodnoty meze pevnosti R_m a na obr. 4.6 průměrné hodnoty homogenní tažnosti A_g naměřené při pokojové teplotě (RT).



Obr. 4.4 Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu po TZ



Obr. 4.5 Průměrné hodnoty meze pevnosti po TZ



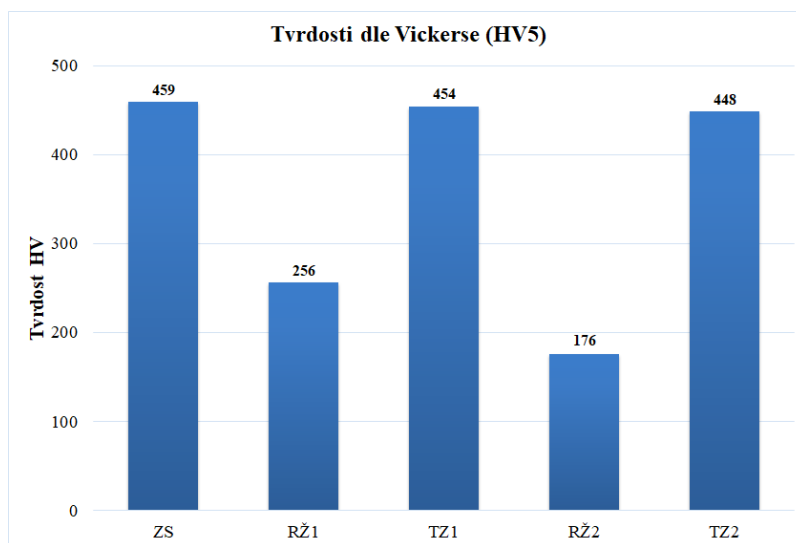
Obr. 4.6 Průměrné hodnoty homogenní tažnosti po TZ

Ze získaných výsledků u tepelně zpracovaných vzorků lze stanovit, že rozpouštěcí žíhání při teplotě 970 °C (RŽ1) po dobu 1 hodiny nemá na smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_g žádný vliv. Při sledování struktury materiálu bylo zjištěno, že v případě RŽ1 zůstala průměrná velikost zrna stanovená metodou EBSD ve srovnání se základním stavem materiálu zachovaná (cca 9,17 μm). Z výše uvedeného lze usuzovat, že dodaný materiál byl zpracován právě tímto způsobem.

Rozpouštěcí žíhání při teplotě 1050 °C (RŽ2) po dobu 1 hodiny vedlo ke snížení smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a R_m , a k růstu tažnosti A_g . Oproti RŽ1 šlo o snížení $R_{p0,2}$ o 42 % a R_m o 20 %. To potvrzuje i struktura materiálu uvedená na obr. 3.21. V porovnání se základním stavem došlo ke zhrubnutí zrna, průměrná velikost zrna činila 40,78 μm .

Nejvyšších hodnot meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m bylo dosaženo aplikováním prvního postupu tepelného zpracování (TZ1), které se skládá z rozpouštěcího žíhání na teplotě 970 °C po dobu 1 h a následného dvou-cyklického vytvrzování na teplotě 720 °C po dobu 8 h a dále na teplotě 620 °C po dobu dalších 8 h. Hodnoty meze kluzu po tomto tepelném zpracování se pohybují okolo 1200 MPa, ve srovnání se základním stavem došlo ke zlepšení přibližně o 120 %, u hodnot meze pevnosti došlo ke zlepšení o 50 %. Homogenní tažnost vůči základnímu stavu naopak poklesla o 60 %. Po tepelném zpracování TZ2 byla hodnota $R_{p0,2}$ a R_m ve srovnání s TZ1 nižší cca o 5 %. Homogenní tažnost A_g byla naopak naměřena o 14 % vyšší.

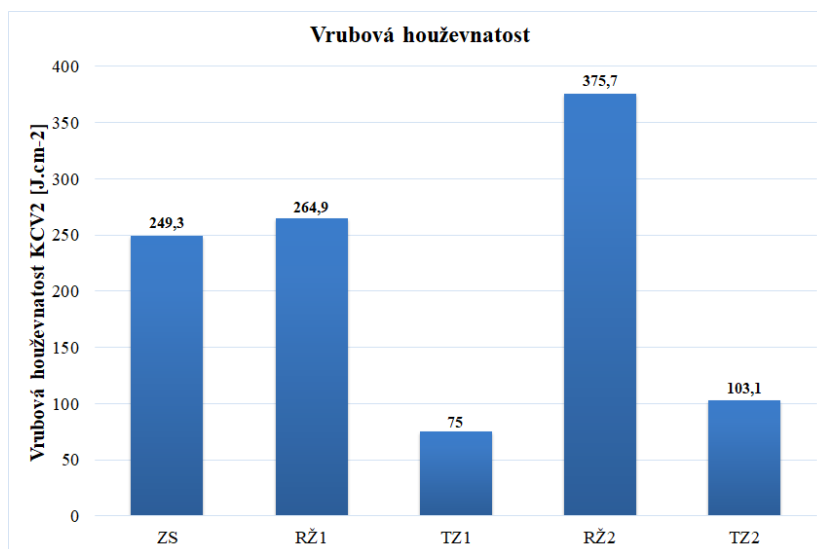
Dále byl hodnocen vliv tepelného zpracování na tvrdost výsledné struktury. Grafické zpracování výsledků je uvedeno na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Průměrné hodnoty tvrdosti HV5

Z výsledných průměrných hodnot tvrdosti dle Vickerse metodou HV5, viz obr. 4.7, je patrné, že aplikováním tepelného zpracování (TZ1 a TZ2) nedochází ke zvýšení tvrdosti materiálu ve srovnání se základním stavem. Příčinou jsou pravděpodobně shluky karbidů. Obecně je doporučováno pro hodnocení tvrdosti neželezných slitin používat metodu HBW. Jak již bylo uvedeno, v rámci experimentu však nemohla být vzhledem k velikosti vzorků použita.

V poslední fázi experimentu byla hodnocena absorbovaná energie KV_2 [J] a vrubová houževnatost KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$]. Grafické zpracování průměrných hodnot vrubové houževnatosti je pro jednotlivé stavy zobrazeno na obr. 4.8.



Obr. 4.8 Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti

Z naměřených výsledků je zřejmé, že nejhouževnatějšího materiálu bylo dosaženo aplikováním rozpouštěcího žíhání (RŽ2) na teplotě 1050 °C po dobu 1 hodiny, kde hodnota KCV_2 dosáhla 375 [$J \cdot cm^{-2}$]. Oproti základnímu stavu došlo k nárůstu přibližně o 50 %. Následným vytvrzováním, které je součástí tepelného zpracování (TZ2) dle druhého postupu, došlo k poklesu hodnot vrubové houževnatosti o 73 %. Ve srovnání s hodnotami tepelného zpracování (TZ1) dle prvního postupu jsou hodnoty vyšší o 25 %.

Na základě experimentu lze říci, že absorbovaná energie KV_2 [J] a vrubová houževnatost KCV_2 [$J \cdot cm^{-2}$] korespondují s naměřenými hodnotami mechanických vlastností ($R_{p0,2}$, R_m a A_g) materiálu po tepelném zpracování. S rostoucí pevností klesá hodnota absorbované energie, resp. vrubové houževnatosti. I přes vysoké pevnostní charakteristiky je vrubová houževnatost KCV_2 velmi vysoká. Při pevnostech R_m okolo cca 1440 MPa dosahuje vrubová houževnatost 75 $J \cdot cm^{-2}$ a při pevnosti 1370 MPa dokonce 103 $J \cdot cm^{-2}$.

Na závěr lze konstatovat, že aplikací obou typů tepelného zpracování bylo dosaženo velmi vysokých hodnot mechanických vlastností při dostatečné tažnosti a vrubové houževnatosti. Volba typu tepelného zpracování (TZ1 nebo TZ2) pak bude záviset na předpokládaném aplikačním použití slitiny Inconel 718.

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat jednak strukturu a mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718 a jednak změny těchto vlastností v závislosti na technologických parametrech následného tepelného zpracování.

S ohledem na téma diplomové práce byly v teoretické části popsány typy a vlastnosti niklových slitin používaných v průmyslové praxi. Samotná kapitola byla zaměřena na problematiku tepelného zpracování těchto slitin.

V rámci experimentální části byl nejprve popsán a hodnocen základní stav testovaného materiálu. V další fázi byla posuzována možnost využití dilatometrie pro simulaci navrženého tepelného zpracování v ochranné atmosféře. Byl použit kalící dilatometr DIL 805L, který sloužil nejen pro tepelné zpracování, ale i pro stanovení součinitele tepelné roztažnosti α . V poslední části experimentu byl nedříve posuzován rozdíl mezi tepelně zpracovanými vzorky v ochranné atmosféře a mimo ni a následně byly tepelně zpracované vzorky podrobeny zkouškám na zjištění mechanických vlastností společně s mikroskopickým rozbořem struktury.

Na základě provedených a vyhodnocených experimentů lze konstatovat, že:

- Základní materiál vykazuje stabilní průběh mechanických vlastností až do teploty 700 °C, při které dochází ke skokové změně.
- Volbou technologických parametrů rozpouštěcího žíhání lze ovlivnit strukturu a mechanické vlastnosti dodaného materiálu. Volba teploty rozpouštěcího žíhání bude záviset na dalším použití materiálu. S rostoucí teplotou RŽ se snižují mechanické vlastnosti a tvrdost struktury, což bude mít vliv např. na obrábělnost.
- Při rozpouštěcím žíhání při teplotě 970 °C zůstala střední velikost zrna zachována (cca 9,17 μm). Rozpouštěcí žíhání při teplotě 1050 °C však způsobilo proti základnímu stavu růst zrna z počátečních 9,17 μm na 40,78 μm .
- Aplikací obou typů tepelného zpracování (TZ1 a TZ2) bylo dosaženo velmi vysokých hodnot mechanických vlastností při dostatečné tažnosti a vrubové houževnatosti.
- Volba typu tepelného zpracování (TZ1 nebo TZ2) bude záviset na předpokládaném aplikačním použití slitiny Inconel 718.

Pro další výzkum v této oblasti lze doporučit podrobnější prozkoumání chování materiálu při teplotách okolo 700 °C.

Použitá literatura

- [1] SPARROW, G. *Nickel*. New York: Benchmark Books/Marshall Cavendish, 2005. Elements (Benchmark Books). ISBN 07-614-1811-3.
- [2] EVERHART, J., L. *Engineering properties of nickel and nickel alloys*. New York: Plenum press, 1971. ISBN 978-1-4684-1886-6.
- [3] *Nickel* [online]. [cit. 12.1. 2021]. Dostupné z: <https://en.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/basismetalle/nickel/>
- [4] DAVIS, J., R. *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys*. ASM Ohio, USA, 2000. ISBN 0-87170-685-7.
- [5] *Nikl* [online]. [cit. 13.1. 2021]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/28.html>
- [6] ROSENBERG, S., J. *Nickel and Its Alloys*. Washington, D.C.: Institute for Materials Research, National Bureau of Standards, 1968.
- [7] SILBERNAGEL, A. *Nauka o kovech pro SPŠ hutnické*. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] *Nikl: kov bez kterého by průmysl nebyl průmyslem* [online]. 2013 [cit. 13.1. 2021]. Dostupné z: <https://www.investicniweb.cz/investice/komodity/nikl-kov-bez-ktereho-prumysl-nebyl-prumyslem>
- [9] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. [1. vyd.]. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [10] CHOTĚBORSKÝ, R. *Nauka o materiálu*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra materiálu a strojírenské technologie, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [11] POLOCH, A. *Hodnocení mechanických vlastností při statickém a proměnlivém zatěžování niklové superslitiny Inconel 718 připravené pokročilou technologií DMLS*. [Diplomová práce]. Praha: ČVUT – Fakulta strojní, 2019.
- [12] *Specialmetals* [online]. [cit. 19.1. 2021]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/tech-center/alloys.html>

- [13] *Specialmetals* [online]. [cit. 19.1. 2021]. Dostupné z: https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/PCC-8064%20SM%20AlloyHandbook_v07.pdf
- [14] *Tepelné zpracování niklových supeslitin* [online]. 2003 [cit. 25.1. 2021]. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_03/papers/52.pdf
- [15] Technická univerzita v Liberci: Katedra materiálu. *Studijní podklady: Nauka o materiálu II* [online]. Technická univerzita v Liberci: Katedra materiálu, 2010. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm
- [16] Vysokoteplotní slitiny [online]. ČVUT, Fakulta strojní, 2014 [cit. 26.1. 2021]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/>
- [17] SMITH, W. *Structure and properties of engineering alloys*. New York: McGraw-Hill, 1981. ISBN 00-705-8560-1.
- [18] ŠMÍD, Miroslav. *Současné působení únavy a creepu u Ni superslitiny a slitiny TiAl*. [Disertační práce]. Brno: VUT – Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [19] *Machinability analysis of Inconel 601, 625, 718 a 825 during electro-discharge machining* [online]. 2019 [cit. 3.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119300740?via=ihub>
- [20] *Inconel alloy 600* [online]. [cit. 3.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-600.pdf>
- [21] *Inconel alloy 625* [online]. [cit. 3.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [22] *Inconel alloy 718* [online]. [cit. 8.2. 2021]. Dostupné z: https://www.haraldpihl.com/globalassets/pdf/059_inconel-alloy-718.pdf
- [23] *Defect analysis and fatigue design basis for Ni-based superalloy 718 manufactured by selective laser melting* [online]. 2018 [cit. 12.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112318303438#s0010>

- [24] *Creep property of Inconel 718 superalloy produced by selective laser melting compared to forging* [online]. 2020 [cit. 13.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509320310194>
- [25] *INCONEL alloy 718: Properties and applications* [online]. 2018 [cit. 14.2. 2021]. Dostupné z: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/inconel-alloy-718-properties-and-applications>
- [26] *Nickel Inconel 718* [online]. [cit. 6.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.techsteel.net/alloy/nickel/inconel-718>
- [27] *EOS NickelAlloy IN718 for EOSINT M 270 Systems* [online]. [cit. 10.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.3axis.us/matetials/dmls/inconel-718-mds.pdf>
- [28] VONDRÁČEK, Jiří. *Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu*. [Bakalářská práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní, 2019.
- [29] VOLKMANOVÁ, Julie. *Využití dilatometrie při tepelném zpracování vysoce pevných ocelí*. [Diplomová práce]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta strojní, 2020.
- [30] *Termická analýza* [online]. VŠCHT, Praha 2012 [cit. 15.3. 2021]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [31] *Snímače IR MEMS Thermopile Array* [online]. 2016 [cit. 18.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:26125/z-aktualniho-vydani-casopisu-snimace-ir-mems-thermopile-array>
- [32] *Metodika sestavování rozpadových diagramů typu CCT a DCCT* [online]. [cit. 20.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.fmt.vsb.cz/export/sites/fmt/633/cs/studium/navody-k-cviceni/deformacni-chovani-materialu/cviceni-12/Doc/cv12.pdf>
- [33] *Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment* [online]. 2017 [cit. 21.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150931730223X>

- [34] *Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost* [online]. 2014 [cit. 18.3. 2021]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
- [35] *Application of LVDT sensor data acquisition system based on PCI-1716* [online]. Shanghai, China 2011 [cit. 24.3. 2021]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5952738/references#references>
- [36] *Study of Magnetic Interference on an LVDT: FEM Modeling and Experimental Measurements* [online]. 2011 [cit. 24.3. 2021]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/js/2011/529454/>
- [37] NOVÁKOVÁ, Iva. *Dilatometrická měření a tvorba ARA diagram materiálu GX23CrMoV12-1*. Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie, 2017.
- [38] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. ZEROSS. ISBN 80-85771-63-2.