



Možnosti použití plazmové nitridace pro díly z materiálu Inconel 718

Diplomová práce

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. David Vaníček

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Totka Bakalova, Ph.D.

Katedra materiálu





Zadání diplomové práce

Možnosti použití plazmové nitridace pro díly z materiálu Inconel 718

Jméno a příjmení: **Bc. David Vaníček**
Osobní číslo: S20000218
Studijní program: N0715A270015 Materiály a technologie
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se slitinami Ni a jejich základním rozdělením, vlastnostmi a využitím.
2. Prostudujte problematiku plazmové nitridace povrchů a proveďte rešerši současného stavu poznání v oblasti plazmové nitridace slitiny Inconel 718.
3. Seznamte se s možnostmi a podstatou tribologických metod hodnocení povrchu materiálu.
4. Navrhněte základní experimenty k vyhodnocení vlastností nitridovaného povrchu materiálu Inconel 718 a proveďte posouzení vlivu plazmové nitridace na vlastnosti povrchu.
5. Proveďte zhodnocení výsledků a diskuzi.

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

obrázky, tabulky, grafy
cca 50 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [2] NOORANI, R. *Rapid Prototyping: principles and applications*. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
- [3] MACHOVČÁK, P. a kol. *Legování vysoce legovaných ocelí plynným dusíkem*. 2013.
- [4] *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*. 2003 ASM International.
- [5] *Tribology Handbook, Friction wear Lubrication, Vol. 1*, Edited by Prof. I. V. Kragelsky and V. V. Alisin (Translated from the Russian by Felix Palkin and Valerian Palkin), English translation, Mir Publishers, 1981.
- [6] Tribologické zkoušení dle norem ASTM G99 (ASTM G99-95), ASTM G133 a DIN 50324

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

Ing. Totka Bakalova, Ph.D.
Katedra materiálu

Datum zadání práce:

30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

30. května 2023

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.

23. května 2022

Bc. David Vaníček

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním tribologických vlastností vzorků vyrobených z materiálu Inconel 718. Vzorky byly zhotoveny pomocí tváření a 3D tisku metodou SLM. Vzorky byly navíc plazmově nitridovány.

V teoretické části práce jsou popsány niklové slitiny s detailnějším popisem slitin Inconel. Dále popis nitridace s podrobnějším zaměřením na plazmovou nitridaci. Závěr teoretické práce je věnován tribologickým zkouškám s detailněji popsanou metodou Ball-on-Disc.

Cílem experimentální části bylo stanovit, jaký má plazmová nitridace vliv na tribologické vlastnosti materiálu Inconel 718. Pro tribologické zkoušky bylo využito metody Ball-on-Disc, což sloužilo pro vyhodnocení třecích vlastností a odolnosti povrchu materiálu vůči opotřebení. Toto měření probíhalo při pokojové teplotě a za zvýšených teplot.

Klíčová slova

Inconel 718, plazmová nitridace, nikl, metoda Ball-on-Disc

Abstract

The aim of this diploma thesis is to compare tribological properties of specimens made of Inconel 718 material. The samples were produced by forming and 3D printing using SM method. In addition, the samples were plasma nitrided.

In the theoretical part of the work, nickel alloys are described with a more detailed description of Inconel alloys. Furthermore, a description of nitriding is given with a more detailed focus on plasma nitriding. Finally, the theoretical work is devoted to tribological tests with a more detailed description of the method Ball-on-Disc.

The aim of the experimental part was to determine the effect of plasma nitriding on the tribological properties of Inconel 718. The Ball-on-Disc method was used for tribological tests, which was used to evaluate the frictional properties and wear resistance of the material surface. This measurement was carried out at room temperature and at elevated temperatures.

Keywords

Inconel 718, plasma nitriding, nickel, method Ball-on-Disc

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, trpělivost a mnoho cenných rad při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Totce Bakalové, Ph.D. za pomoc při měření a zpracování dat z tribologických zkoušek, panu Ing. Ladislavu Lemberkovi, Ing. Martinu Švecovi, Ph.D. za pomoc při laboratorních experimentech.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali v průběhu mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část	11
2.1 Niklové slitiny	11
2.1.1 Konstrukční niklové slitiny.....	12
2.1.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.....	13
2.1.3 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny.....	14
2.1.4 Slitiny Inconel.....	15
2.2 Nitridace kovů	18
2.2.1 Nitridace ocelí.....	18
2.2.2 Nitridace niklových slitin	21
2.2.3 Způsoby nitridace kovů	22
2.2.3.1 Plazmová nitridace niklové slitiny Inconel 718.....	27
2.3 Tribologické zkoušky	31
3 Experimentální část.....	36
3.1 Měření tloušťky nitridované vrstvy.....	38
3.2 Tribologické zkouška metodou Ball-on-Disc.....	39
3.2.1 Hodnocení koeficientu tření	42
3.2.2 Hodnocení míry opotřebení třecí dvojice v závislosti na teplotě a způsobu zpracování materiálu	46
3.2.2.1 Hloubka profilu opotřebení zkušebního materiálu	47
3.2.2.2 Šířka profilu opotřebení zkušebního materiálu.....	52
3.2.2.3 Stanovení opotřebení kuličky Si_3N_4	55
4 Diskuze výsledků	59
5 Závěr	63

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Název	Jednotky
A	Nejmenší průměr brusné stopy	[mm]
B	Rozměr stopy kolmý na nejmenší průměr	[mm]
D	Průměr kuličky	[mm]
F_n	Normálová síla	[N]
F_t	Tečná síla	[N]
HV	Tvrdist podle Vickerse	[kp·mm ⁻²]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
RT	Teplota okolí	[°C]
T	Teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
V_{ball}	Objem opotřeбенí kulového vzorku	[mm ³]
μ	Koeficient tření	[-]
γ'	Fáze gamma'	
γ''	Fáze gamma''	
α	Fáze alfa	
γ	Fáze gamma	
ε	Fáze epsilon	
ζ	Fáze théta	
HCP	Hexagonálně těsně uspořádaná mřížka	
Ni ₃ (Ti, Al)	Sloučenina niklu s titanem a hliníkem	
Ni ₃ Nb	Sloučenina niklu s niobem	
SLM	Selective laser melting	

1 Úvod

Nároky na kovové materiály se s vývojem techniky každým dnem zvyšují. Proto je zapotřebí vyvíjet pořád nové materiály a úpravy materiálů, aby bylo dosaženo potřebných vlastností. Příkladem mohou být součásti pracující za vysokých teplot v chemicky nepříznivém prostředí, které mohou být navíc zatěžovány. Do skupiny materiálů schopných za těchto podmínek správně fungovat patří právě niklové slitiny.

Niklové slitiny, konkrétně žáruvzdorné a žárupevné slitiny, které jsou také nazývány jako superslitiny. Jsou to materiály speciálně vyvinuté pro práci za extrémních podmínek, které splňují kombinaci žárupevnosti, žáruvzdornosti a korozní odolnosti. Příkladem mohou být niklové slitiny Inconel 600, Inconel 625 nebo Inconel 718. Dokáží pracovat za vysokých teplot, a přitom udržet vysokou pevnost, korozivzdornost a rozměrovou stálost. Vzhledem k ceně niklu a přídavných prvků, které se do slitiny přidávají, se jedná o velmi drahý konstrukční materiál. Proto se využívají za podmínek, kdy není možné využít vysoce legované korozivzdorné ocele, které dokáží pracovat do teploty zhruba 600 °C. Při vyšších teplotách je nutné použít niklové superslitiny. Prvotní uplatnění těchto materiálů bylo v oblasti leteckého průmyslu a kosmonautiky. V dnešní době se tyto materiály navíc používají například v energetickém a petrochemickém průmyslu.

Pro dosažení lepších povrchových vlastností, jako je korozní odolnost, otěruvzdornost nebo dalších specifických vlastností, jsou zpravidla použity povrchové úpravy materiálu. Jednou s možností zvýšení otěruvzdornosti a tvrdosti povrchu materiálu je nitridace, jenž se řadí mezi chemicko-tepelné zpracování. Zároveň při tvorbě nitridační vrstvy, vlivem sycení povrchu dusíkem vznikají v tenké vrstvě na povrchu tlaková napětí, které mají za následek zvýšení mechanických vlastností zejména při dynamickém namáhání.

Cílem diplomové práce bylo stanovení tribologických vlastností tvářeného a 3D tisknutého materiálu Inconel 718 a posouzení vlivu plazmové nitridace na vlastnosti jeho povrchu.

2 Teoretická část

Teoretická část práce se zabývá niklovými slitinami, jejich vlastnostmi a problematikou nitridace. Hlavní pozornost je pak věnována zejména plazmové nitridaci. Samostatná kapitola je dedikována tribologickým zkouškám, které lze použít pro hodnocení opotřebení materiálu.

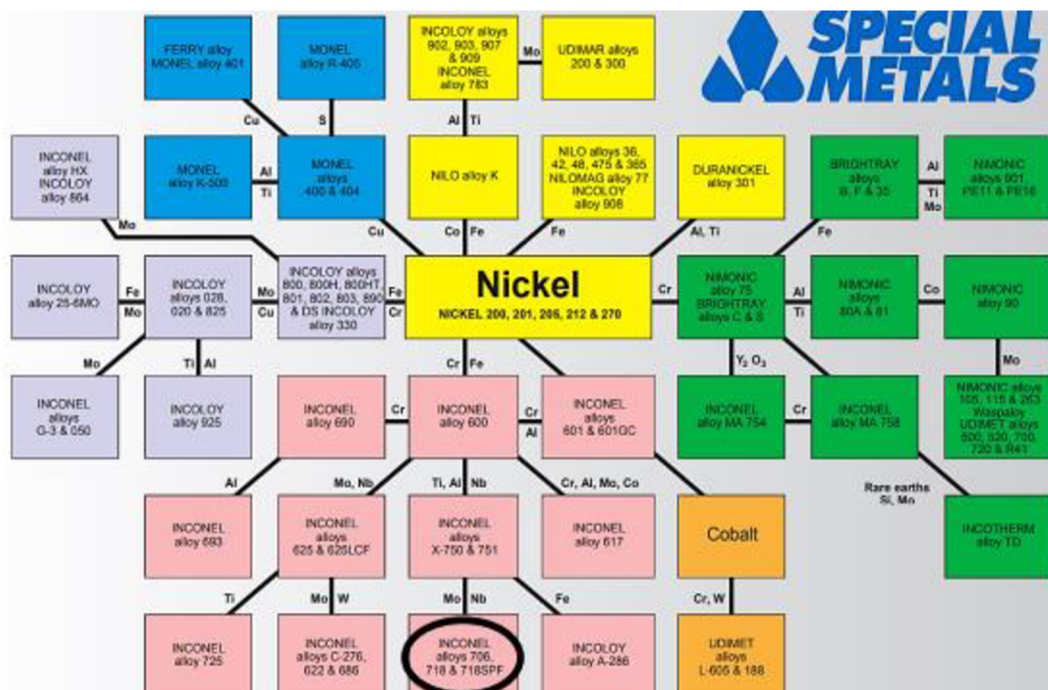
2.1 Niklové slitiny

Slitiny niklu jsou významné jejich pevností v tahu, tvrdostí a houževnatostí oproti většině slitin neželezných kovů a velkému množství ocelí. Žádaných vlastností slitin se docílí přidáním hlavních legujících prvků, mezi které patří především chrom, měď, železo, titan, niob a molybden. Vzhledem k velké škále niklových slitin se tyto prvky využívají jako hlavní přísadové prvky nebo jako doplňující prvky pro zlepšení vlastností slitiny. Dalšími přísadovými prvky mohou být wolfram, hliník, beryllium a kobalt [1].

Výroba a zpracování těchto slitin jsou taktéž velmi důležité pro jejich výsledné vlastnosti. Niklové slitiny je možné zpracovávat pomocí tváření za studena, nebo technologií přesného lití na vytavitelný model, které je využíváno především pro žárupevné slitiny. Při zpracování niklových slitin dochází vlivem tváření k rychlému zpevnění. Z toho důvodu je důležité brát v potaz, že při zpracování těchto slitin je zapotřebí mohutnějších zařízení pro kování, lisování a válcování [2].

Niklové slitiny se obvykle rozdělují podle jejich použití – slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné a žárupevné [3].

Dále lze niklové slitiny rozdělit podle zastoupení nejvýznamnějších prvků, které obsahují např. Ni-Cu, které jsou vyznačeny na obr. 1 modrou barvou a Ni-Cr, které jsou vyznačeny zelenou barvou. Jak si lze povšimnout, niklové slitiny jsou legovány velkou škálou prvků. Značné zastoupení má soubor slitin s obchodní značkou Inconel. Předložená práce je věnována materiálu Inconel 718, který je na obr. 1 zakroužkován [4].



Obr. 1 - Grafický přehled niklových slitin [4]

2.1.1 Konstrukční niklové slitiny

Nejvýznamnějším zástupcem konstrukčních niklových slitin jsou Ni-Cu slitiny, dle obchodního názvu Monely, ve kterých se měď nachází v rozmezí od 27 do 34 %. Nikl a měď společně tvoří jednofázovou binární slitinu, díky jejich dokonalé vzájemné rozpustnosti. Mezi další legující prvky obsažené v těchto slitinách patří železo, křemík, mangan a uhlík. Používají se také prvky, jako jsou titan nebo hliník. Po přidání těchto prvků je možné tyto slitiny niklu vytvrdit. Lepších mechanických vlastností u slitin bez Al nebo Ti je možné dosáhnout pouze pomocí tváření. Slitiny určené k odlévání obsahují vyšší obsah křemíku pro lepší slévárenské vlastnosti. Nežádoucím prvkem ve slitinách niklu je síra, která je však obsažena v sulfidické rudě, ze které se následně získává nikl. Síra se ve slitinách nachází na hranicích zrn a snižuje mechanické vlastnosti. Eliminace nežádoucího účinku síry se provádí přidáním manganu. V průmyslu jsou využívány především tři druhy – Molen-400, Monel R-405 a Monel K-500 [5].

Monel-400 je slitina s vysokou pevností, houževnatostí v širokém teplotním rozsahu a výbornou odolností proti koroznímu prostředí. Mezi další vlastnosti patří dobrá tažnost, svařitelnost a dobré mechanické vlastnosti při teplotách pod nulou až do 550 °C [6]. Zpracovávají se především tvářením za tepla nebo za studena, ale dají se i odlévat. Pro zvýšení mechanických vlastností se slitiny vytvrzují tvářením. Slitiny tvářené za studena

dosahují pevnosti až 830 MPa. Vzhledem k jejich vlastnostem se tyto slitiny používají v petrochemickém, chemickém a lodním průmyslu [7].

Monel R-405 je slitina je význačná vyšším obsahem síry, díky které se značně zlepšuje obrobitelnost. Vlastnosti této slitiny jsou téměř totožné jako u Monel-400, avšak drobný rozdíl se projevuje ve snížených mechanických vlastnostech. Nejběžněji se používá pro výrobu součástí měřidel, ventilů, v prostředí, kde se vyskytuje kyselina sírová a jako spojovací materiál [8].

Monel K-500 je precipitačně vytvrditelná slitina s výbornou korozní odolností a zároveň s vysokou pevností a tvrdostí. Pomocí precipitačního vytvrzení lze dosáhnout pevnosti v tahu až 1100 MPa. Zvláštní vlastností této slitiny je nemagnetičnost až do teploty -100 °C. Využívá se například pro výrobu nářadí pro ropné vrty, lékařské nástroje a hřídele lodních šroubů [9].

Mimo monely se využívají i jiné konstrukční slitiny niklu například Ni-Be slitiny, které po vytvrzení mohou dosahovat pevnosti až 1800 MPa při dostatečné tažnosti a dobré korozní odolnosti. Dále existují ještě konstrukční slitiny na bázi Ni-Mn, Ni-Mo nebo Ni-Al [2].

2.1.2 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Mezi tyto slitiny se řadí termočláňkové slitiny, odporové slitiny a magneticky měkké slitiny.

Termočláňkové slitiny jsou slitiny na bázi Ni-Cr (9 až 12 % Cr), které jsou známé pod názvem chromel [3]. Slouží pro měření teplot, přičemž je využíváno podstaty Seebeckova jevu. Díky tomu vlivem teplotního rozdílu vzniká elektrické napětí. Chromel se využívá v teplotním rozpětí od 0 do 1000 °C [3]. Dále existuje niklová slitina s názvem Alumel, která má rozsah měřených teplot od 300 do 1300 °C [5].

Odporové slitiny jsou slitiny na bázi Ni-Cr (cca. 20 % Cr) [3]. Nejčastěji se používají pro výrobu topných odporů až do teploty 1200 °C [10]. Slitiny jsou dobře tvárné a homogenní, takže je lze zpracovat do formy drátů a tyčí. Náklady na výrobu lze snížit přísadou 25 % Fe. Železo zároveň snižuje negativní účinky síry, ale naopak snižuje rozsah použití do cca 1000 °C [3]. Odporové slitiny jsou známé pod obchodními názvy nichrom, chromnikl a pyrochrom [10].

Magneticky měkké slitiny jsou slitiny známé pod názvem permaloy. Hlavním přísadovým prvkem je železo v rozmezí 22 až 64 %, případně při menším obsahu železa také Mo, Cu, Cr a Si. Vysokých magnetických vlastností je dosaženo použitím velmi čistých

prvků a poměrně náročné výrobní technologie, což zapříčiňuje vysokou cenu těchto slitin. Využívají se pro jádra transformátorů měřících zařízení a přístrojů [3].

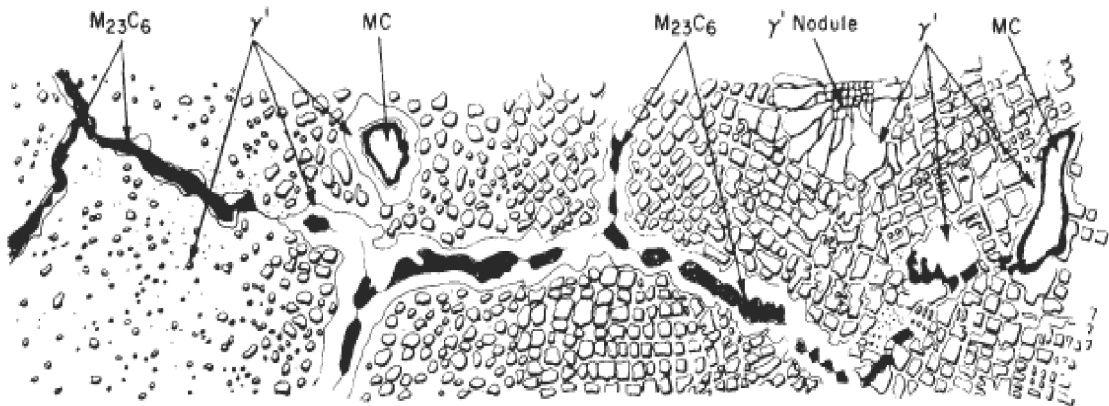
2.1.3 Žárovzdorné a žárupevné slitiny

Žárovzdorné slitiny jsou na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Nikl společně s chromem tvoří soustavu s úplnou rozpustností v tuhém stavu. Podmínkou žárovzdornosti je přísadový prvek chrom, který v těchto slitinách bývá zastoupený v rozmezí od 15 do 30 % [11]. Je možné snížit pořizovací náklady těchto slitin přidáním až 20 % Fe [3]. Struktura těchto slitin je tvořena tuhým roztokem s plošně středěnou krychlovou mřížkou. Zpevněn je pouze substitučně, a proto nelze zajistit bezpečné použití při mechanickém zatížení za vysokých teplot [11].

Slitiny žárupevné jsou založeny opět na bázi tuhého roztoku Ni-Cr. Pro dosažení žárupevnosti je slitina legována hliníkem, titanem a niobem. Ty vytváří hlavní vytvrzující fázi společně s prvky karbidotvornými, které substitučně zpevňují niklovou matici a tvoří vlastní karbidy. Při rozpouštěcím žhání přecházejí přísadové prvky do tuhého roztoku. Při následném ochlazení vznikne metastabilní tuhý roztok, ze kterého se při následném rozpadu (stárnutí) vylučují vysoce disperzní precipitáty intermetalických sloučenin (fází). Titan vytváří sloučeninu Ni_3Ti a hliník sloučeninu Ni_3Al [3]. Jestliže se ve slitině nacházejí oba prvky, vzniká fáze $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, kterou lze pokládat za tuhý roztok ve sloučenině Ni_3Al , a která je vyznačena symbolem γ' . Niob, který se nachází ve větším množství (4,75 – 5,5 %) ve slitinách Inconel 718, vytváří sloučeninu Ni_3Nb a značí se symbolem γ'' . Žárupevnost těchto slitin je pak ovlivněna rovnoměrností rozdělení fáze γ' nebo γ'' v podobě jemného precipitátu [12].

Obsah uhlíku se u tvářených slitin vyskytuje v rozmezí od 0,02 do 0,2 % a u litých slitin přibližně 0,6 %. Navzdory pozitivním vlastnostem, které karbidy nabízí, se je snažíme v těchto slitinách potlačovat [4]. Uhlík ve slitině reaguje s karbidotvornými prvky jako jsou wolfram, niob, titan, molybden a tantal a tvoří s nimi tzv. primární karbidy označované jako MC. Karbidy se tvoří po hranicích zrn ale i uvnitř zrn, viz obr. 2, a zvyšují pevnost a křehkost. Jestliže se karbidy nevyklučují po hranicích zrn, dojde ke snížení pevnostních vlastností slitiny a k poklesu odolnosti vůči porušení při creepovém namáhání. Pokud jsou v opačném případě hranice zrn obsazeny souvislými řetězci karbidů, slitina pozbývá svou plastičnost a může docházet k nežádoucím štěpným lomům při tepelném a únavovém

namáhání [13]. Vlivem tepelného zpracování pak vznikají karbidické fáze typu $M_{23}C_6$, M_7C_3 nebo M_6C [3].



Obr. 2 Fáze ve struktuře niklové slitiny [13]

Pro dosažení vysoké žárupevnosti je nutná přítomnost značně jemných precipitátů fáze γ' , které jsou rovnoměrně rozloženy v celém objemu slitiny. Vzhledem k vysokému obsahu fáze γ' klesá tvárnost těchto slitin, což výrazně zužuje možnosti jejich zpracování [13]. Žárupevné slitiny se z velké části zpracovávají metodou přesného lití nebo práškovou metalurgií. Slitiny, u kterých je zapotřebí zajistit zvláště odolnost za vysokých teplot, a u kterých je možné pozbyt pevnosti vlastnosti, mají nižší obsah intermetalických fází, což umožňuje zpracování pomocí tváření za studena [5].

Žárupevné slitiny jsou určeny pro použití na součásti využívané v prostředí, kde jsou jak tepelně, tak pevnostně zatěžovány. Pro dlouhodobé použití mohou být využívané až do teplot dosahujících 950 °C. Žáruvzdorné slitiny, které nejsou mechanicky namáhané lze použít až do teplot 1150 °C. Z ekonomického hlediska se žárupevné a žáruvzdorné slitiny niklu používají od teplot 550 °C a výše. Při použití za nižších teplot je vhodnější využití jiných (levnějších) konstrukčních slitin, převážně oceli [3]. Žárupevné a žáruvzdorné slitiny jsou pak rozděleny do jednotlivých skupin, dle druhu a legur. Podle obchodního značení se pak jedná o slitiny Inconel, Hastelloy, Incoloy nebo Nimonic [5].

2.1.4 Slitiny Inconel

Slitiny s obchodním značením Inconel jsou vysokoteplotní superslitiny na bázi niklu s chromem. Materiály jsou nejen mechanicky odolné při použití za zvýšených teplot, ale mají také dobrou korozní a chemickou odolnost. Tyto slitiny mají široké spektrum použití např. v námořním, jaderném, chemickém, leteckém a petrochemickém průmyslu [14].

Nejběžněji používané slitiny v průmyslu jsou pak Inconel 600, Inconel 625 a Inconel 718. Tyto slitiny mají výrazně rozdílné chemické složení, a proto mají v praxi rozlišné použití [4].

Inconel 600 je slitina na bázi niklu, chromu a železa, která se využívá v prostřední vyžadujícím vysokou korozní odolnost za zvýšených teplot. Zároveň má slitina výborné mechanické vlastnosti a dobrou zpracovatelnost. Slitina není precipitačně vytvrditelná a její mechanické vlastnosti lze zlepšit pouze pomocí tváření za studena. Co se týče teplotního rozsahu použití těchto slitin, je možné je využívat při teplotách pod bodem mrazu až do 1095 °C. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tab. 1 [15]. Využívají se pro výrobu součástí pecí, v leteckém průmyslu pro součásti motorů nebo jako konstrukční materiál v jaderných elektrárnách [16].

Tab. 1 Chemické složení niklové slitiny Inconel 600 [15]

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. 0,5	max. 0,5

Inconel 625 je slitina niklu a chromu, která je používána pro svou vysokou pevnost, vynikající zpracovatelnost (včetně spojování pomocí svařování) a mimořádné odolnosti proti korozi. Samotná pevnost slitiny je způsobena přidavkem molybdenu a niobu, které vytvrzují matici materiálu, díky čemuž mohou slitiny dosahovat pevnosti až 1000 MPa bez potřeby precipitačního vytvrzení. Celkové chemické složení je uvedeno v tab. 2. Inconel 625 má vynikající odolnost proti široké škále korozivních prostředí. Provozní teplota může být od záporných teplot až do teploty cca 980 °C [17]. Tato slitina má v průmyslu široké spektrum upotřebení. Využívá se v lodním průmyslu na výrobu kotevnicích lan, součástí pomocných motorů ponorek a opláštění podmořských komunikačních kabelů. V leteckém a kosmonautickém průmyslu pak na výrobu výfukových systémů, palivové a hydraulické potrubí a trubky výměníků tepla [16].

Tab. 2 Chemické složení niklové slitiny Inconel 625 [17]

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

Inconel 718 je vysokoteplotní, precipitačně vytvrditelná slitina niklu a chromu. Tato slitina má širokou oblast využití, díky své vysoké pevnosti, odolnosti proti korozi a odolnosti proti creepovému tečení za vyšších teplot. Zároveň je poměrně dobře svařitelná a dobře odolává následnému porušení po spojení. Lze tuto slitinu využít v teplotním rozmezí od -253 °C až do 700 °C [18]. Mechanické vlastnosti je možné efektivně zvýšit za pomoci tepelného zpracování, které se skládá z žihání, precipitačního vytvrzování a následného stárnutí. Po tomto cyklu může slitina dosahovat pevnosti v tahu až na hranici 1700 MPa [4]. Hlavním rozdílem, oproti ostatním slitinám na bázi Ni-Cr jsou precipitáty ve formě Ni₃Nb označenými symbolem γ'' a pouze v okrajovém množství ve formě Ni₃Ti nebo Ni₃Al. Celkové chemické složení je uvedeno v tab. 3 [19].

Tab. 3 Chemické složení niklové slitiny Inconel 718 [18]

Prvek	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu
Obsah [%]	50,0 - 55,0	17,0 - 21,0	zbytek	max. 0,08	max. 0,35	max. 0,35	max. 0,3
Prvek	Mo	Nb	Al	Ti	Co	B	S
Obsah [%]	2,8 - 3,3	4,75 - 5,5	0,2 - 0,8	0,65 - 1,15	max. 1,0	max 0,006	max. 0,015

Materiál Inconel 718 je možné zpracovávat pomocí tváření za studena, kdy při kombinaci s tepelným zpracováním lze dosáhnout vysokých mechanických vlastností. Slitina jde taktéž zpracovat technologií tváření za tepla. Tváření probíhá při teplotě v rozmezí od 900 do 1120 °C. Vzhledem k vysoké pevnosti slitiny je pro dosažení potřebných tlaků zapotřebí velmi výkonných lisů a strojních zařízení [18]. Obrobitelnost je u těchto slitin velmi špatná, což je zapříčiněno zpevňováním materiálu během obrábění, dále také velkou tepelnou vodivostí a tvrdostí materiálu. Eliminace obrábění bývá uskutečněna

využitím technologie přesného lití, které odstraní potřeby následovného opracování [5]. Nejnovějším trendem výroby součástí z tohoto materiálu je technologie 3D tisku [4].

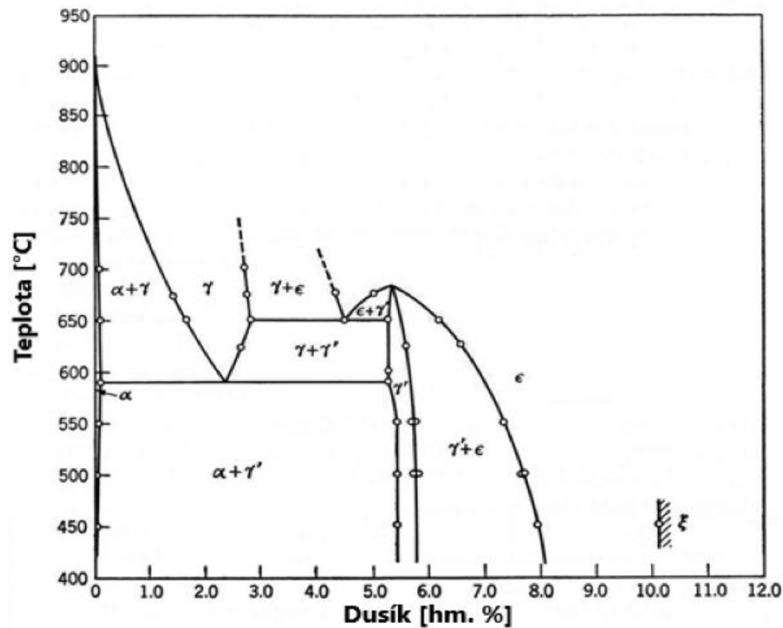
Vzhledem k vysoké pevnosti, korozní odolnosti a možnosti použití za vysokých teplot má tato slitiny velmi široké spektrum použití. Své vlastnosti uplatňuje v leteckém průmyslu, kde se používá na výrobu plynových turbínových motorů, kryogenních nádrží, pláště a plechových dílů letadel. Dále se objevuje v raketoplánech v podobě různých součástí [18].

2.2 Nitridace kovů

Nitridace je chemicko-tepelné zpracování, kde dochází k sycení povrchu kovu dusíkem. Sycení může probíhat v plynném nebo kapalném prostředí při teplotě A_{c1} (nejčastěji v teplotním rozsahu 470 až 580 °C). Požadované vlastnosti jsou dosaženy již při nasycování povrchu dusíkem a není zapotřebí provádět následné tepelné zpracování. Nitridaci lze využít nejen pro ocele, ale i pro žáruvzdorné slitiny kovů (např. slitiny titanu, niklu apod.). Vzhledem k vyšším teplotám je rychlost difúze malá, a proto je nitridace poměrně časově náročná a výrazně se mění tloušťka vrstvy, která se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,8 mm. Záměrem nitridace je vytváření povrchové vrstvy obsahující vysoce disperzní nitridy slitinových prvků s vysokou afinitou k dusíku (např. Al, Cr, W, V, Ti apod.), jež si udrží vysokou tvrdost a odolnost proti otěru i při vyšších teplotách [20].

2.2.1 Nitridace ocelí

Nitridace, jako úprava povrchové vrstvy, je převážně využívána právě pro ocele. Při výběru ocele pro nitridaci je předem nutné znát účel upravované součásti. Oceli využitelné pro nitridaci musí obsahovat charakteristické legující prvky. Nitridační ocele obvykle obsahují hliník, chrom, molybden, vanad, nikl nebo wolfram. Spolu s vhodným materiálem je velmi důležitý přesný pracovní proces, který je dán teplotou, časem a dle metody nitridace také dalšími charakteristickými nastaveními [21]. Strukturu nitridované vrstvy popisuje rovnovážný diagram Fe-N, viz obr. 3.



Obr. 3 - Rovnovážný diagram Fe-N [22]

Z diagramu je patrné, že lze rozlišit pět základních fází železa s dusíkem:

Fáze α je čistý ferit s rozpuštěným dusíkem, jde tedy o tuhý roztok dusíku v železe α . Rozpustnost dusíku v této fázi je max. 0,11 hm. % [23]. Jde o měkkou, málo otěruvzdornou vrstvu. Naopak má výbornou houževnatost a odolnost proti lomu, čímž je zvýšena i únavová pevnost. Mřížka je kubická plošně středěná [24].

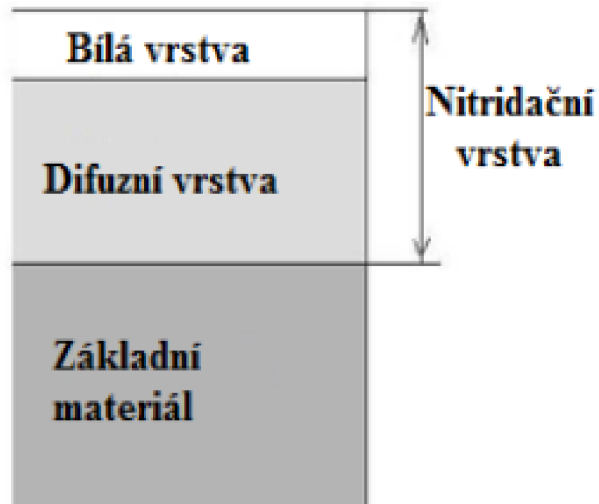
Fáze γ je tuhý roztok dusíku v železe γ (dusíkový austenit). Tato fáze vzniká při teplotách vyšších jak 590 °C do obsahu dusíku 2,8 hm. %. Mřížka je kubická plošně středěná [23].

Fáze γ' je tuhý roztok dusíku v železe, který je označován jako nitrid Fe_4N . Z diagramu, viz obr. 3, je patrné, že jeho koncentrace se pohybuje od 5,3 do 5,75 hm. % dusíku. Fáze je stabilní do teploty 672 °C. Má opět kubicky plošně středěnou mřížku. Přítomnost uhlíku tento nitrid silně omezuje [23]. Na rozdíl od γ dosahuje mnohem zajímavějších vlastností v podobě vysoké otěruvzdornosti, nejvyšší tvrdosti ze všech fází Fe-N a poměrně dobré houževnatosti [24].

Fáze ϵ je tuhý roztok dusíku v železe, který se v tomto případě označuje jako nitrid Fe_2N [24]. Dle diagramu se objevuje v koncentračním rozmezí od 4,35 do 11 hm. % dusíku. Na rozdíl od ostatních doposud zmíněných fází má mřížku hexagonální s nejtěsnějším uspořádáním atomů. Při tvorbě nitridační vrstvy je tato fáze žádaná vzhledem k nízkému koeficientu tření. Otěruvzdornost má poněkud horší, ale má výbornou odolnost proti korozi [23].

Fáze ζ je nitrid Fe_2N s ortorombickou mřížkou. Jedná se o eutektoid při teplotě $590\text{ }^\circ\text{C}$, který též bývá označován jako brownit. Je velmi křehký, a proto je nežádoucí [24].

Nitridační vrstva na oceli se skládá ze dvou částí – z bílé vrstvy na povrchu a difúzní vrstvy nacházející se mezi bílou vrstvou a základním materiálem, viz obr. 4.



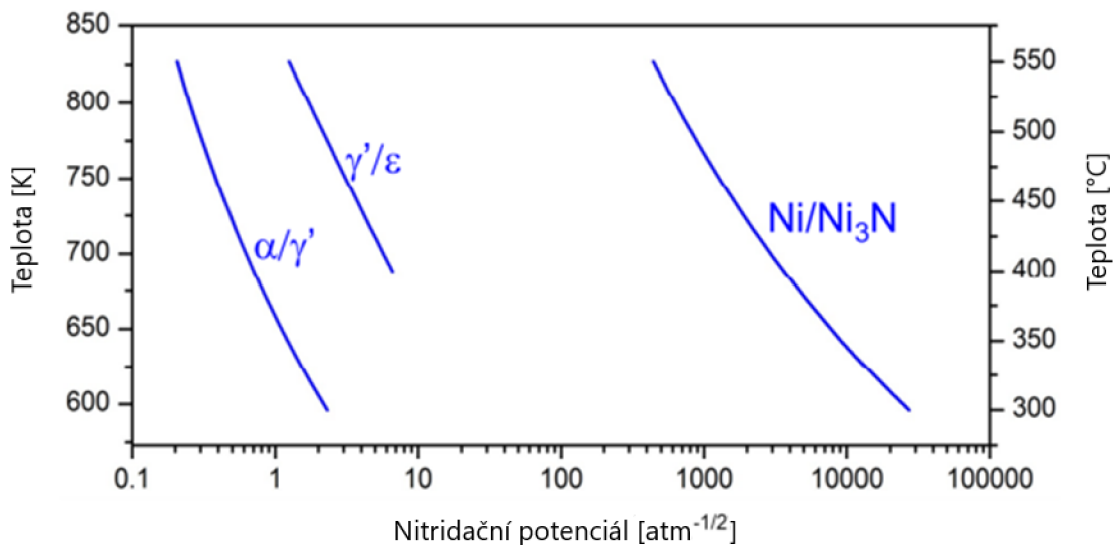
Obr. 4 - Struktura nitridované vrstvy [25]

Bílá vrstva nacházející se přímo na povrchu daného materiálu je velmi bohatá na dusík. Běžně je tvořena fází ϵ , která se komponuje z precipitátů Fe_{2-3}N . Hloubka, které tato vrstvička dosahuje, je v rozmezí od 0,01 do 0,05 mm [26]. K vytvoření takovéto vrstvičky je zapotřebí, aby se v nitridační atmosféře nacházelo přibližně 0,5 % uhlíku. Naopak, pokud nebude nitridační atmosféra obsahovat uhlík žádný, dojde na povrchu k vytvoření souvislé vrstvičky fáze γ' , která se skládá z nitridů Fe_4N . Při nitridaci v plynném prostředí mohou vznikat kombinace těchto fází ($\epsilon + \gamma'$). Této směsi fázi je však nutné se vyvarovat, jelikož obě fáze mají rozdílné krystalické mřížky a může díky tomu docházet k vnitřnímu pnutí mezi těmito vrstvami a následnému vytváření trhlin na povrchu strojní součásti [22].

Difúzní vrstva je tvořena fázemi α a γ' . Dusík se zde nachází ve formě intersticiálního tuhého roztoku nebo ve sloučenině železa a legujících prvků. V takovém případě se tvoří síť nitridů podél hranic zrn nebo se dusík vylučuje ve formě nitridů uvnitř zrn. Oproti bílé vrstvě je tato výrazně měkčí, méně ořezavá, ale za to houževnatější a výrazněji odolává proti lomovému zatížení [26]. Tloušťka difúzní vrstvy může být od několika setin až po desetiny milimetru. Zde záleží na obsahu nitridotvorných prvků, které s větším množstvím snižují tloušťku difúzní vrstvy [22].

2.2.2 Nitridace niklových slitin

Nitridace niklových slitin je na rozdíl od nitridování oceli poněkud složitější, díky výrazně odlišnému chemického složení jednotlivých slitin niklu. Při nitridaci niklu nebo niklových slitin je zapotřebí mnohem větší nitridační potenciál, než je potřeba u nitridace ocelí. Lehrerův fázový diagram pro nitridaci niklu v plynném prostředí je uveden na obr. 5. Z obrázku je patrný rozdíl velikosti potenciálu mezi fázemi niklu $r_n(\text{Ni}/\text{Ni}_3\text{N})$ a fázemi železa dle diagramu Fe-N. Konkrétně mezi fázemi $r_n(\alpha/\gamma')$ a $r_n(\gamma'/\varepsilon)$, které jsou podrobněji popsány v podkapitole výše [27].



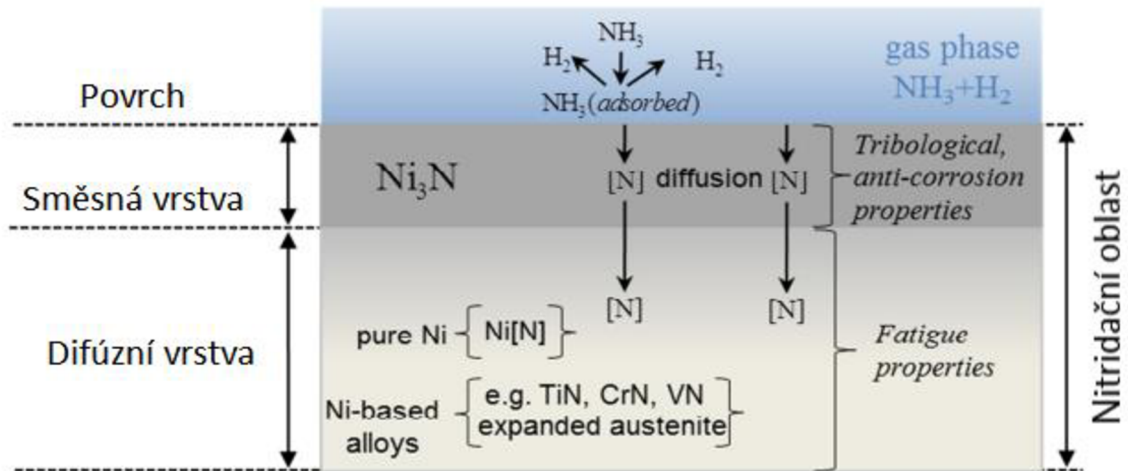
Obr. 5 Lehrerův diagram pro porovnání nitridačního potenciálu fází niklu a železa [27]

Při nitridaci čistého niklu nebo slitin niklu za teplot pod 550 °C a v závislosti na použití nitridačního potenciálu se objevuje nitridační vrstva, viz obr. 6, kterou pak lze rozdělit na 2 základní části:

Na povrchu součásti se nachází směsná vrstva o tloušťce přibližně do 15 μm. Tato povrchová vrstva je převážně složena z nitridu Ni₃N, kde jsou atomy niklu uspořádány do hexagonálně těsně uspořádané mřížky (HCP) a atomy dusíku obsazují oktaedrická místa. Při dlouhých dobách nitridace (a vyšších teplotách) může vznikat značná pomezita vlivem působení N₂, díky čemuž dochází k rozkladu metastabilního nitridu uvnitř pevné látky [27].

Difúzní vrstva dosahuje tloušťky až 50 μm. Pokud se jedná o čistý nikl, tak je dusík rozpuštěn v niklu jako tuhý roztok dusíku Ni[N]. V případě slitin niklu dochází k vytváření nitridů s legujícími prvky, které mají vysokou afinitu k dusíku. Těmi jsou například titan, chrom, vanad a niob [27]. Při vhodné volbě parametrů nitridace pro niklové slitiny,

především za nižší nitridační teploty, může v nitridované oblasti vznikat tzv. expandovaný austenit (S-fáze) bez nitridových precipitátů [28].



Obr. 6 Schéma nitridační vrstvy čistého niklu nebo niklové slitiny [27]

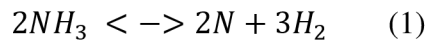
Vývoj povrchových úprav niklových slitin přináší zlepšení vlastností jako je opotřebení, tvrdost, únava a odolnost proti korozi, viz obr. 6. Vytvoření složené vrstvy na povrchu technické součásti může zlepšit zejména tribologické vlastnosti. Expandovaný austenit vzniklý nitridací slitin na bázi niklu je extrémně tvrdý. Tvrdost povrchu může být sedmkrát vyšší než tvrdost substrátu. Kromě toho expandovaný austenit vytvořený v niklových slitinách vykazuje velmi dobré únavové a korozní vlastnosti [27].

2.2.3 Způsoby nitridace kovů

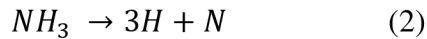
V dnešní době se nejčastěji využívají čtyři metody nitridace a to: nitridace v plynném prostředí, nitridace v solných lázních, nitridace v prášku a neposlední řadě plazmová (iontová nitridace).

Nitridace v plynném prostředí je technologie, při které je pro vznik nitridačního procesu využito plynného prostředí. Plyn nacházející se v pracovním prostoru, je tvořen buď technicky čistým čpavkem nebo směsnou atmosférou čpavku s dusíkem. Jedná se o kombinaci tepelného a chemického zpracování. Aby k samotnému procesu nitridace došlo, je zapotřebí dodržet určité základní parametry. Vůbec nejdůležitějšími parametry jsou teplota v peci, čas nitridace a průtok plynu. Teplota pece se pohybuje v rozmezí od 500 do 570 °C. Teplota se běžně odvozuje podle potřebné tvrdosti a tloušťky nitridované vrstvy. Z pohledu chemického je proces ovlivněn tzv. stupněm disociace. Ta se volí dle procesní teploty a je řízena pomocí průtoku čpavku. Pokud je stupeň disociace nízký, dojde

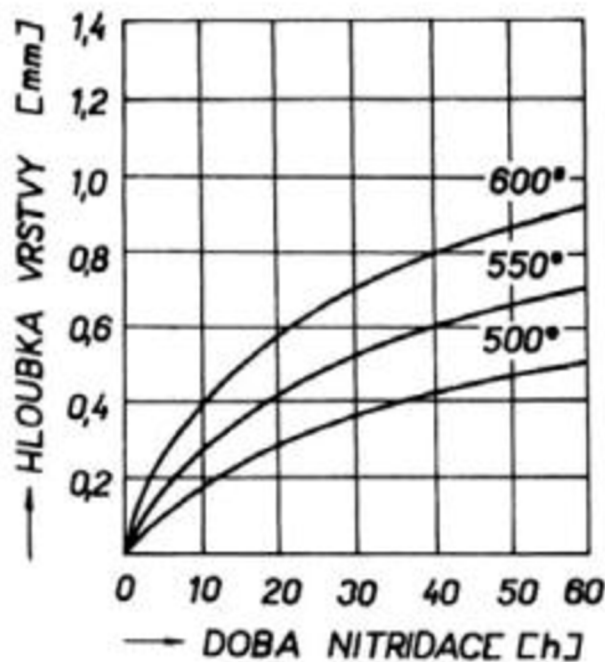
k přesycení povrchu dusíkem a vznikne výrazná nitridační vrstva. Naopak při vysokém stupni disociace nevznikne vrstva žádná [20]. Čpavek je při takto zvýšené teplotě nestabilní a dochází k jeho rozkladu dle následující rovnice [3]:



Další rovnice popisují průběh nitridace povrchu materiálu:



Vlastní proces nitridace probíhá tak, že se suché a odmaštěné součástky rozmístí do pece tak, aby byl možný přístup procesní atmosféry nitridace. Prostor pece se následně uzavře a zaplní plynným čpavkem. Následně se pec vytopí na potřebnou nitridační teplotu. Nitridační proces pak může trvat od 5 do 72 hodin dle parametrů nitridace a potřebné tloušťky vrstvy, viz obr. 7. Po dokončení vlastní nitridace se nechají součástky vychladnout a poté se vyjmou z nitridační pece [20].



Obr. 7 Vliv teploty a doby nitridace na tloušťku nitridované vrstvy [29]

Nitridace v solných lázních je technologie nitridace, která se původně prováděla v kyanidových lázních (25 % NaCN, 75 % KCNO) provzdušňovaných vzduchem. V dnešní době se lázeň skládá z 25–35 % kyanidů (NaCN, KCN), 30–40 % kyanatanů (NaCNO, KCNO) a soli. Tyto lázně pak za působení vzdušného kyslíku nebo samovolné oxidace

podléhají rozkladu a uvolňují atomární dusík. Po spuštění nitridačního procesu nelze proces nikterak ovlivňovat, a proto je zapotřebí dodávat neustále novou sůl do lázně. Teplota lázně se pohybuje v rozmezí od 520 do 570 °C a proces nitridace trvá od 60 do 120 minut pro dosažení tenkých vrstev [20].

Výhodou této metody je zejména nižší ekonomická zátěž oproti ostatním technologiím nitridace. Nákupní cena lázni není příliš velká a jejich provoz je také poměrně levný. Problematika ovšem nastává při likvidaci lázně vzhledem k využívaným látkám a poměrně špatně kontrolovatelnému procesu nitridace [21].

Nitridace v prášku je metoda založená na stejném principu jako prášková cementace. Tato metoda je zajímavá z důvodu nízké technologické náročnosti, rychlosti nitridace a obecné dostupnosti. Nitridační plyn vzniká vně žáruvzdorné krabice, která je v peci zahřívána na zhruba 560 °C [30]. Pro iniciaci nitridace je zapotřebí použít nitridační prášek spolu s aktivátorem a box uzavřít. V boxu pak při pracovní teplotě dochází k chemické reakci mezi práškem a aktivátorem a vzniká dusíková atmosféra, která umožňuje vznik nitridační vrstvy [31].

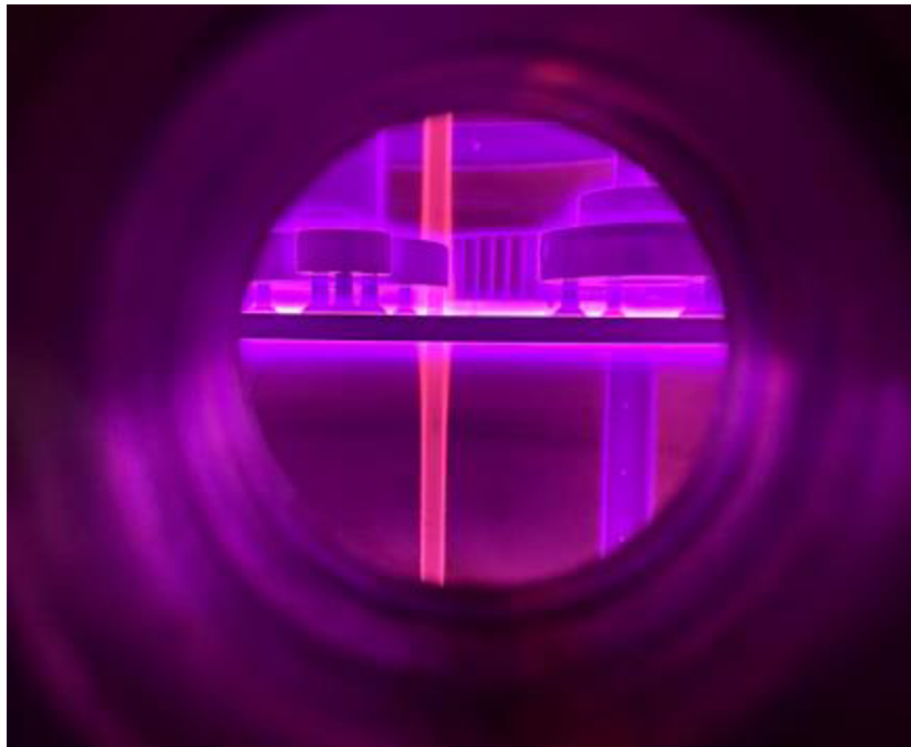
Prášek využívaný při nitridaci se nemění. Aktivita procesu nitridace úzce souvisí s procentem aktivátoru, který se přidává pro iniciaci prášku a vznik dusíkové atmosféry. Pro dosažení dobré nitridační vrstvy s patřičnými vlastnostmi je nutné optimálně navolit metodu, teplotu a dobu nitridace. Při delší době nitridace může docházet k popouštění a tím ke snížení pevnosti základního materiálu [31].

Plazmová (iontová) nitridace je technologie, která je využita v experimentální části této práce, a proto bude důkladněji popsána. Plazmová nitridace, také známá pod názvem iontová nebo nitridace v doutnavém výboji, je metoda, při které se v plynné atmosféře vytvoří elektrický výboj.

Proces plazmové nitridace spočívá v sycení povrchu předmětu dusíkem a zčásti ionizovaným plazmatem, které je složeno z iontů a elektronů ale i nemalého počtu neutrálních částic. Předměty určené k nitridaci jsou umístěny vně vakuové nádoby (recipientu) a následně zapojeny jako katoda. Recipient je zapojený jako anoda a uvnitř je udržován snížený tlak zředěné směsi plynů, které jsou potřebné pro funkční proces nitridace [18]. Jako směs plynů se nejčastěji využívá ($N_2 + H_2$), ale je možné použít také ($NH_3, NH_3 + N_2$) [31].

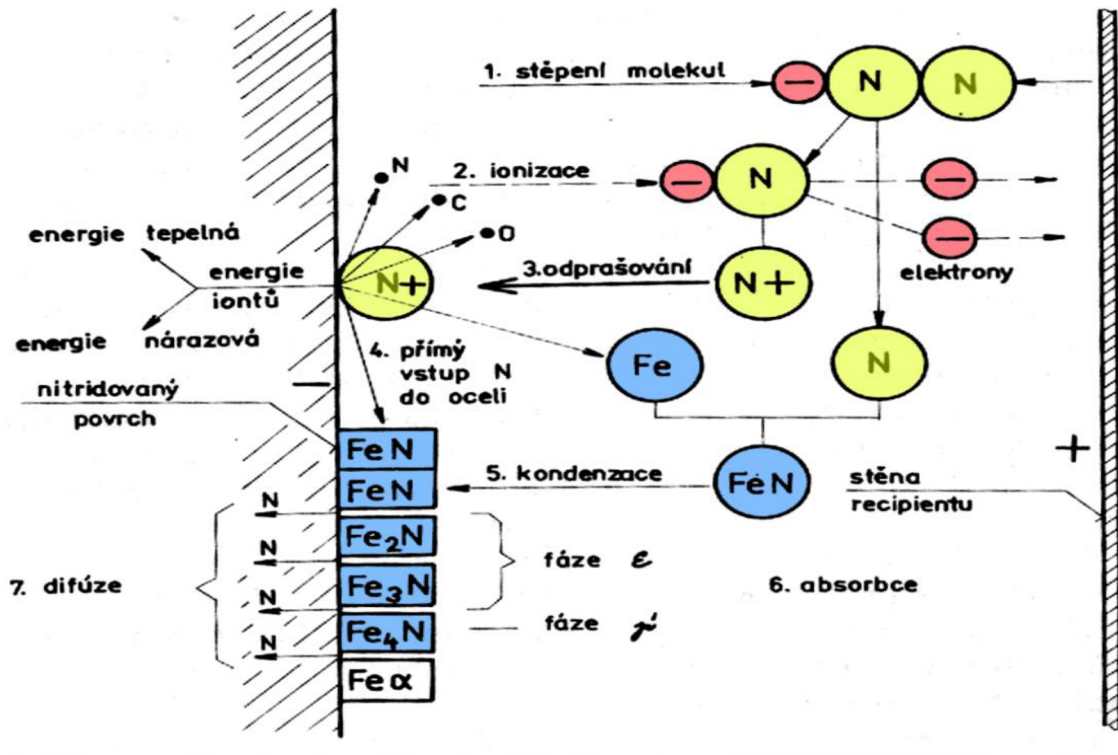
Jakmile je vše připraveno, je do obvodu připojen stejnosměrný proud o napětí v rozmezí od 400 až do 1000 V. Následně dojde ke vzniku elektrického pole mezi stěnou

recipientu (anodou) a povrchem součásti (katodou). Ovládací systém pak upravuje elektrické pole tak, aby parametry (napětí, tlak, proud) byly v oblasti vhodné pro anomální doutnavý výboj. Současně v elektrickém poli dochází k četnému přesunu molekul zředěného plynu a při jejich vzájemných nárazech dochází ke štěpení a ionizaci. Kladně nabitě ionty jsou zrychlovány směrem ke katodě, tudíž k povrchu nitridované součásti. K vysokému nárůstu kinetické energie dochází v blízkosti povrchu nitridovaných součástí v oblasti katodového úbytku napětí, díky tomu vykazuje anomální výboj plošný charakter a jeho svítící korona kopíruje povrch nitridovaných součástí, viz obr. 8 [20].



Obr. 8 PLATEG-PULSPLASMA NITRIDING MONO PLANT PP200 – pohled do pracovního prostoru při plazmové nitridaci [32]

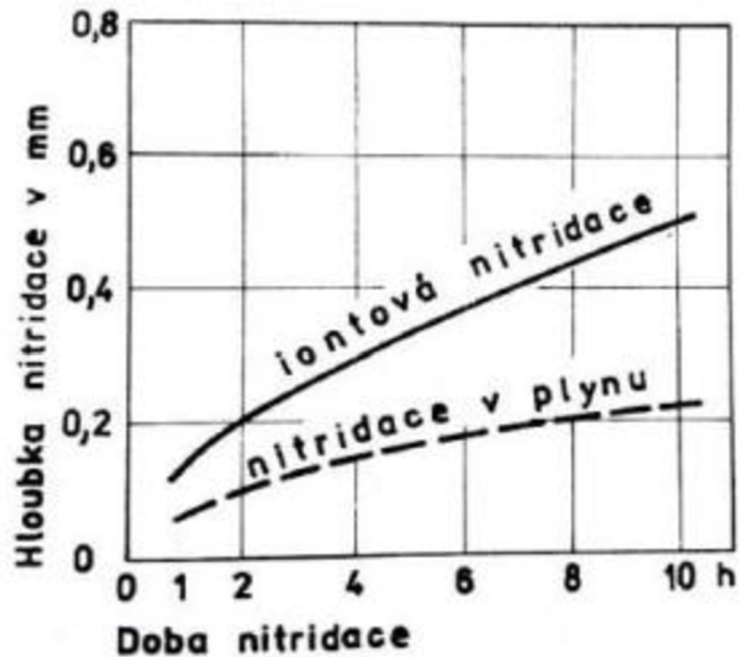
Na obr. 9 je schematicky zobrazen děj, ke kterému dochází při nitridaci na povrchu železného předmětu. Kladné ionty nepřetržitě narážejí na povrch součásti a při dopadu se určitý poměr kinetické energie transformuje na teplo a dochází k ohřevu součástí. Kromě ohřevu dochází vlivem dopadajících iontů také k vyrážení atomů železa a dalších prvků obsažených v oceli. Tomuto jevu se říká oprašování nebo také katodové odprašování a je považován za klíčový děj v procesu plazmové nitridace. Při dopadu iontů na povrch výrobku dojde k odprašení atomů, což způsobí reakci, při které dojde k vytvoření nitridů železa. Kondenzací těchto nitridů je vytvářena absorpční povrchová vrstvička s velkou koncentrací dusíku. Povrchová vrstva nitridů s vysokým obsahem dusíku se rozpadá na nižší složky, zatímco část dusíku difunduje hlouběji do povrchu součásti, viz obr. 9 [20].



Obr. 9 Schéma dějů při plazmové nitridaci na povrchu ocelové součásti [33]

Proces plazmové nitridace a tvorbu samotné nitridové povrchové vrstvičky lze v podstatě ovládat pomocí vhodně zvolených podmínek (např. napětí, plošná hustota proudu, tlak a v neposlední řadě složení atmosféry). Vlivem odprašování oxidů vzniká dokonalá depasivace povrchu součásti a jsou zlepšeny předpoklady pro správně fungující nitridaci, a to zvláště u vysoce legovaných ocelí [20].

Plazmová nitridace v porovnání s ostatními metodami má jisté výhody i nevýhody. Jedna z podstatných výhod je odvozena z procesu, kdy se z velké kinetické energie iontů dopadajících na povrch součásti část přemění na teplo. Takto vzniklé teplo je dostatečné pro zahřátí na nitridační teplotu, a proto není zapotřebí externího vytápění pece. Oproti ostatním metodám je další velkou výhodou rychlost vzniku nitridační vrstvy, viz obr. 10. Z metalurgického hlediska je možné u plazmové nitridace nastavit parametry nitridace a s jejich automatickou kontrolou a korekcí lze poměrně dobře zajistit opakovatelnost procesu. Navíc oproti nitridaci v plynu má menší spotřebu plynů a je šetrnější vůči životnímu prostředí a nevyžaduje žádné speciální bezpečnosti nebo hygienická opatření [21].



Obr. 10 Porovnání tloušťky nitridované vrstvy za čas pro plazmovou nitridaci a nitridaci v plynu [26]

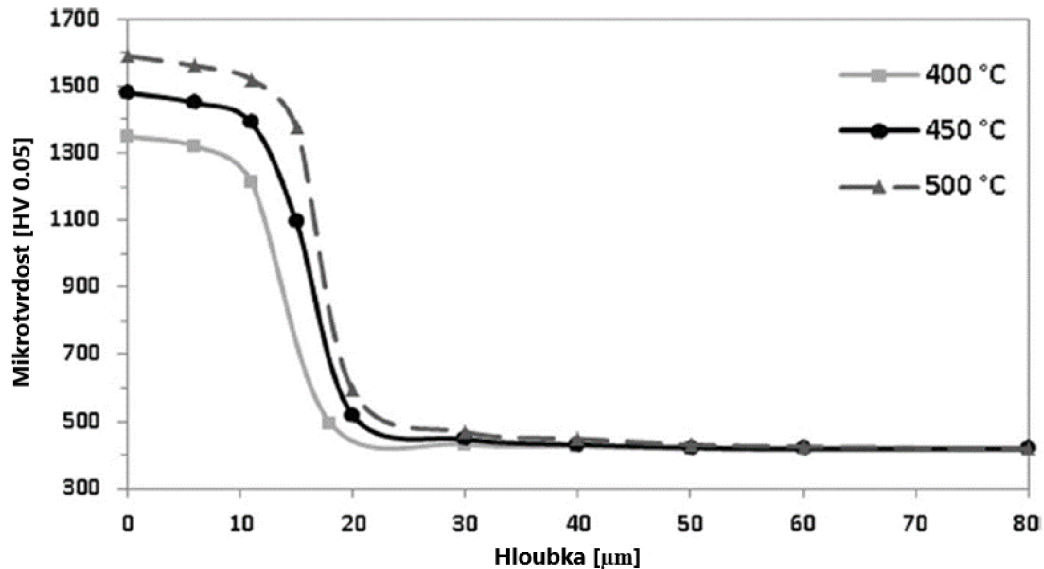
K hlavním nevýhodám této metody patří nutnost vakua při procesu plazmové nitridace. Spolu s tím souvisejí řídicí systémy a jednotky, které v celkovém důsledku značně zvyšují pořizovací cenu celého zařízení. Za nevýhodu lze také považovat obtížnější nitridaci drážek, závitů apod., kde je zapotřebí použít dodatečných anod pro zajištění požadované nitridační vrstvy. Obdobně na tom jsou tzv. „kritická“ místa, kde dochází k lokálním svítivým výbojům, díky kterým dochází přehřívání v daném místě. Pro eliminaci tohoto efektu lze využít vložky nebo kryty, kterými se kritická místa překryjí [20].

2.2.3.1 Plazmová nitridace niklové slitiny Inconel 718

Nitridace se převážně využívá pro ocele, ale díky svým příznivým vlastnostem se začíná využívat i pro neželezné slitiny jako jsou slitiny niklu, hliníku a titanu. U těchto slitin je snaha dosáhnout lepší otěruvzdornosti povrchu, vyšší tvrdosti povrchu, lepší korozní odolnosti apod. k vlastnostem základního materiálu.

Problematikou plazmové nitridace na materiálu Inconel 718 se zabývali autoři vědeckého článku [34]. Autoři článku zkoumali, zdali plazmová nitridace zlepšit tvrdost povrchu a zvýší odolnost proti opotřebení a korozi. Vzorky byly plazmově nitridovány při teplotách 400, 450 a 500 °C po dobu 6 hodin. Na obr. 11 jsou graficky zpracovány výsledky

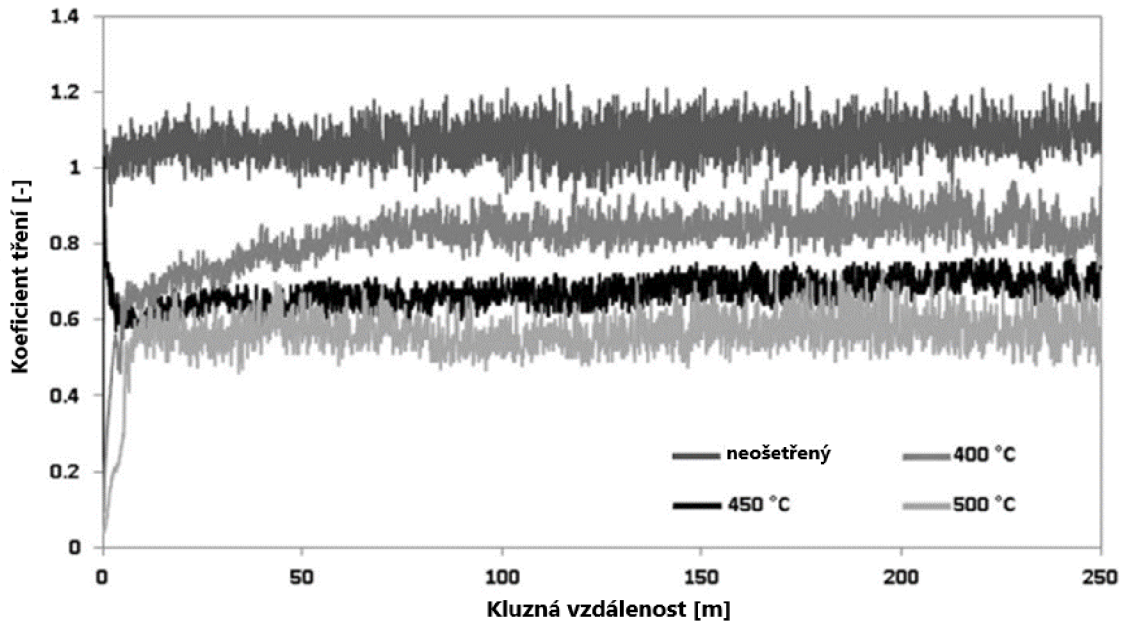
měření mikrotvrdomosti na povrchu materiálu Inconel 718 naměřené po nitridaci za výše uvedených parametrů.



Obr. 11 Mikrotvrdomost povrchu Inconelu 718 plazmově nitridovaném při různých teplotách po dobu 6 hodin [34]

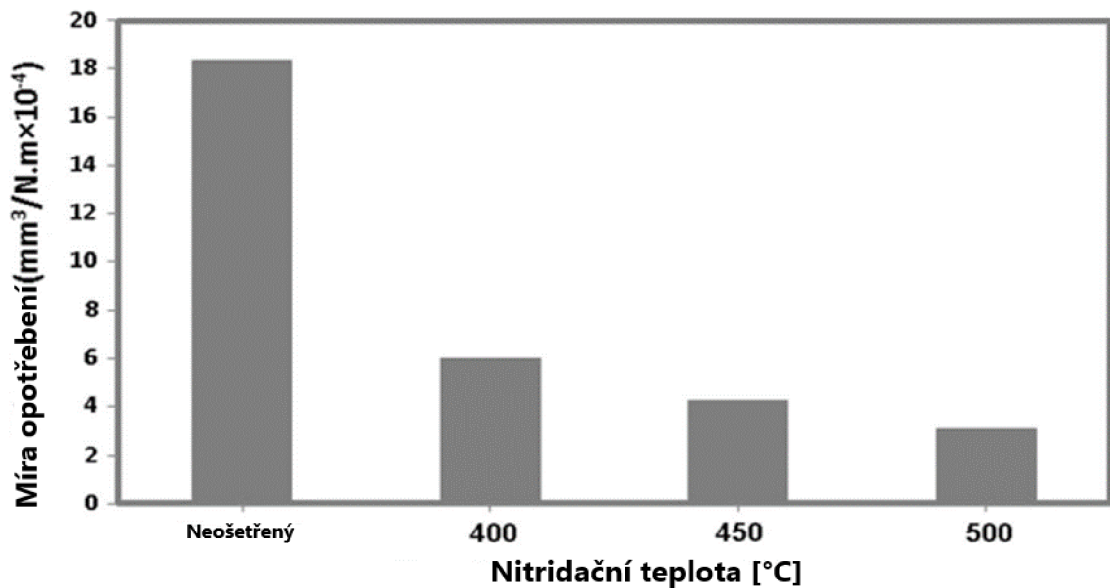
Z obr. 11 je jasné, že při zvyšující se teplotě dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu nitridované vrstvy. Zároveň lze konstatovat mírný nárůst tvrdé povrchové nitridační vrstvy, které se pohybuje v rozmezí od 8 do 13 μm dle nitridační teploty. V experimentu bylo dosaženo mikrotvrdomosti od 1340 až do 1600 $\text{HV}_{0.05}$, přičemž nejvyšší hodnoty bylo dosaženo nitridací při teplotě 500 °C. Oproti běžnému Inconelu 718 bez nitridace byla tvrdost povrchu zhruba tři krát vyšší. Tato tvrdost je způsobena tvorbou nitridované vrstvy s fází γN , která se vyznačuje zvýšenou tvrdostí. Zároveň se při vyšší teplotě nitridace může zvyšovat tvrdost CrN [34].

Kromě zvýšení tvrdosti povrchu došlo také ke zlepšení koeficientu tření, viz obr. 12. Ten s postupným nárůstem teploty nitridace klesal. Pokles koeficientu tření byl důsledkem vyšší tvrdosti povrchu a zmenšené styčné plochy mezi kolíkem a zkoušeným vzorkem. Vzorek nitridovaný při teplotě 500 °C po dobu 4 hodin pak vykazoval nejnižší koeficient tření díky větší a tvrdší vrstvě, avšak s největším kolísáním. To bylo pravděpodobně způsobeno tvorbou CrN nitridu a nejvyšší drsností povrchu [34].



Obr. 12 Porovnání koeficientu tření Inconelu 718 bez a s nitridací v závislosti na uražené dráze [34]

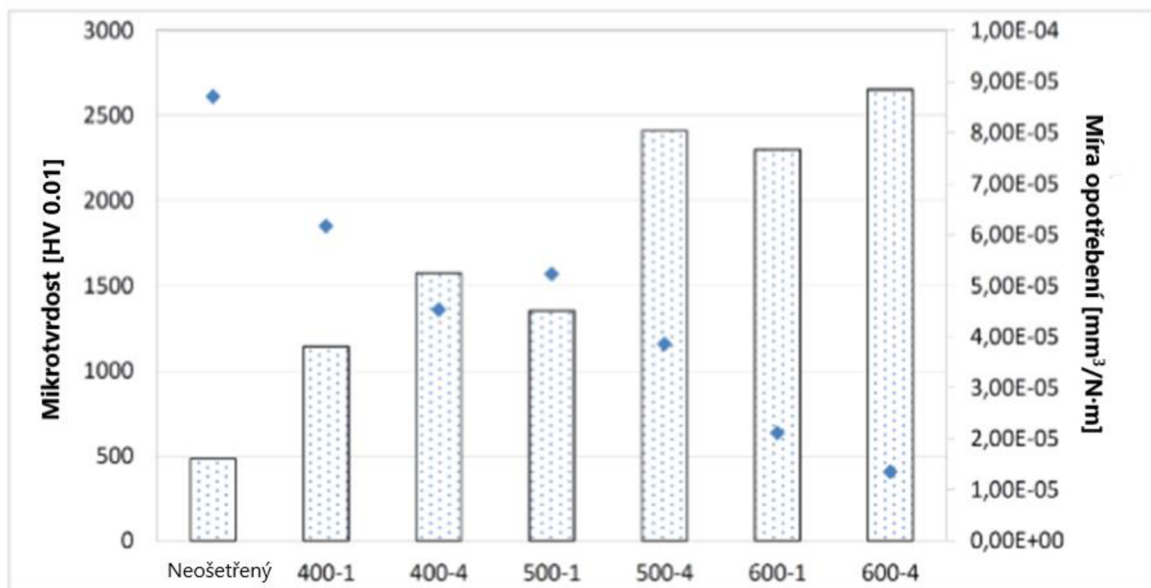
Na obr. 13 se nachází porovnání opotřebení na jednotlivých vzorcích po testování koeficientu tření. Míra opotřebení vzorků nitridovaných při teplotě 400 °C a 450 °C byla zhruba 3 krát a 4 krát nižší ve srovnání se vzorkem bez nitridace. Ve výzkumu bylo prokázáno, že rozšířená FCC struktura ve slitinách na bázi niklu zlepšuje odolnost proti opotřebení. Vzorek při teplotě nitridace 500 °C dosáhl nejnižšího stupně opotřebení, a to pravděpodobně v důsledku silnější nitridované vrstvy [34].



Obr. 13 Porovnání opotřebení vzorků z Inconelu 718 bez a s nitridací [34]

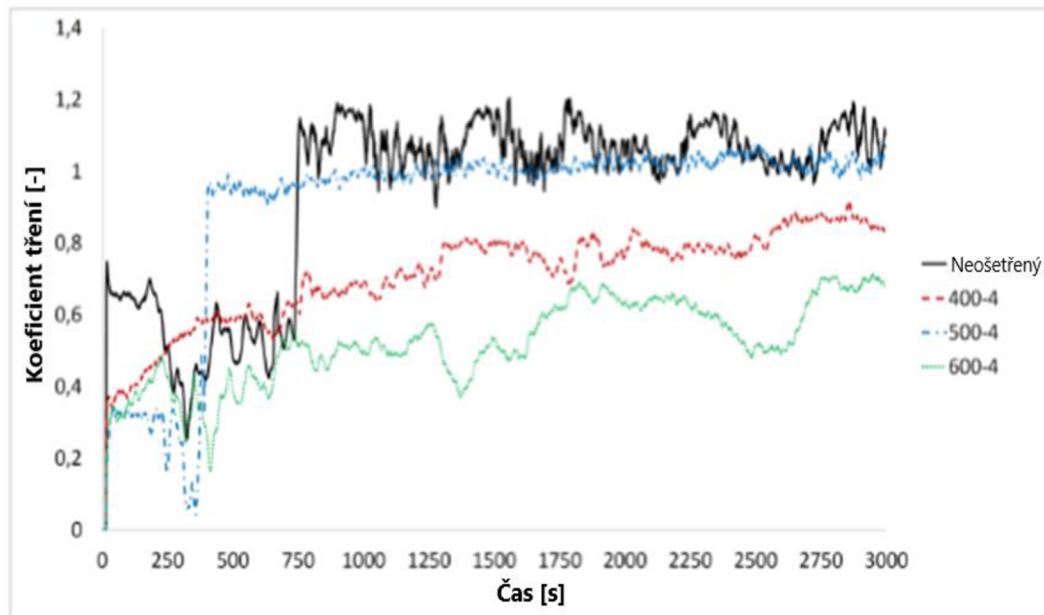
Problematikou plazmové nitridace na materiálu Incoel 718 se také zabývali autoři vědeckého článku [35], kteří se věnovali opotřebení plazmově nitridovaných dílů z materiálu Inconel 718. Vzorky použité při experimentu byly nitridovány při teplotách 400, 500 a 600 °C po dobu jedné a čtyř hodin.

Na obr. 14 jsou ukázány hodnoty mikrotvrdosti a opotřebení pro jednotlivé vzorky. Při měření mikrotvrdosti bylo použito $HV_{0.01}$, což odpovídá zatížení 10 g. Nejnižší tvrdost byla zjištěna u vzorku bez nitridace, kdy tvrdost dosahovala hodnot okolo 500 $HV_{0.01}$. Naopak nejvyšších hodnot dosahoval vzorek nitridovaný při teplotě 600 °C po dobu 4 hodin, kde se mikrotvrdost dostala až na 2600 $HV_{0.01}$. Dále lze konstatovat, že se tvrdost zvyšuje jak teplotou nitridace, tak i dobou nitridace. Co se týče míry opotřebení vzorků, tak nejhůře opět dopadl vzorek bez nitridace a nejlépe vzorek s nitridací při teplotě 600 °C. Míra opotřebení se stejně jako tvrdost zlepšuje s rostoucí teplotou nitridace a časem nitridace [35].



Obr. 14 Porovnání mikrotvrdosti a opotřebení pro vzorky z Inconelu 718 bez a s nitridací při různých teplotách a časech nitridace [35]

Výsledky třecích zkoušek pro vzorky nitridované po dobu 4 hodin se nacházejí na obr. 15. Při bližším prozkoumání lze zjistit, že koeficienty tření se po nitridačním procesu snižují s narůstající tvrdostí povrchu nitridované vrstvy. Tudiž nejnižší dosažený koeficient tření byl zjištěn u vzorku nitridovaného při teplotě 600 °C po dobu 4 hodin. To bylo způsobeno odtržením nitridované vrstvy během klouzání pinu po povrchu vzorku, což způsobilo abrazivní účinek při opotřebení [35].



Obr. 15 Koefficient tření v závislosti na čase pro vzorky nitrídané po dobu 4 hodin [35]

2.3 Tribologické zkoušky

Tribologické zkoušky se řadí mezi zkoušky hodnotící opotřebení materiálů. Využívají se pro zkoumání opotřebení povrchu a povrchových vrstev.

Tribologie je vědní obor a technologie zabývající se vzájemnou interakcí mezi dvěma až třemi materiály. Obvykle jsou to dva pevné materiály v mechanickém kontaktu za vzájemného relativního pohybu spolu se třetím materiálem (v pevném nebo kapalném stavu), jež je umístěn mezi základní dva pevné materiály. Tím je dosaženo změny třecích vlastností. Relativní pohyb mezi hlavní materiálovou dvojicí může být ve formě kluzného pohybu, valení, kmitání nebo nárazu. S tribologií se lze setkat v mnoha technologických odvětvích, jelikož se tření objevuje téměř všude [36].

Cílem tribologie je, aby docházelo při vzájemné interakci materiálů, k co nejmenší ztrátě energie a samotného materiálu. Hlavním výsledkem tribologické zkoušky bývá koefficient tření a opotřebení, které při tomto procesu vznikne. Tyto výsledné vlastnosti jsou závislé na typu tření a na mechanismu opotřebení [37].

Tribologické zkoušky za vyšších teplot se využívají pro materiály, u kterých se předpokládá využití na součásti operujících za zvýšených teplot. Materiály, které se testují za vyšších teplot, mohou mít velmi rozdílné tribologické vlastnosti jak za teploty okolí. Zvýšená teplota neovlivňuje pouze základní třecí dvojici, ale mění také vlastnosti maziva, které při opravdu vysokých teplotách nelze využívat. Zkoušky probíhající za vysokých teplot

se provádějí v tribometrech vybavených pecí. Měření lze provádět až do teploty 1200 °C [36].

Při vzájemném pohybu dvou objektů nastává ve styčné ploše odpor, který se nazývá tření nebo třecí odpor. Styčné plochy testovaných vzorků se zvětšují spolu se zvyšujícím se zatížením, které je vyvíjeno na vzorky. Tento jev silně ovlivňuje tření. Tření je také závislé na materiálové dvojici (zkušební vzorek a tělísko) a na podmínkách tření, kterými mohou být například: drsnost povrchu, teplota okolí, použití maziva (vazelína, olej apod.), vlhkost atd. [37].

Tření můžeme rozdělit do tří skupin a to [37]:

1. Dle charakteru

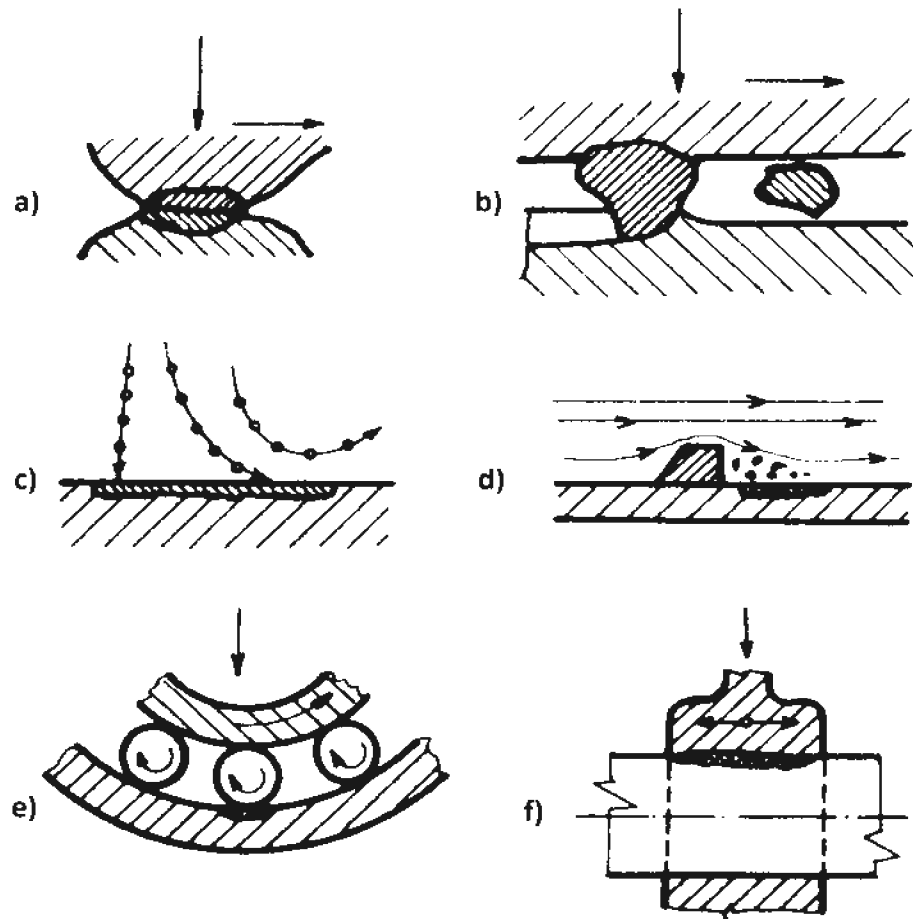
- Vnitřní tření – pohyb mezi vnitřními částicemi látek (pevné, plynné, kapalné)
- Vnější tření – tření působící mezi dvěma tělesy během pohybu

2. Dle přítomnosti maziva

- Fyzikální suché tření – tření pouze mezi dvěma povrchy (ve vakuu)
- Technické suché tření – povrchy mohou být pokryty oxidy apod.
- Smíšené tření – občasné dotyky nerovností povrchu za působení maziva
- Kapalinové tření – bezdotykové tření, mezi povrchy se nachází mazivo

3. Dle vzájemného pohybu zkušebního vzorku a tělesa

- Kluzné tření – dvě tělesa ve vzájemném kontaktu, které se vůči sobě pohybují, styk těles je v omezeném počtu malých oblastí.
- Valivé tření – jedno těleso je odvalováno (koeficient tření má menší hodnoty)



Obr. 16 Druhy opotřebení [a) adhezivní, b) abrazivní, c) erozivní, d) kavitační, e) únavové, f) vibrační] [38]

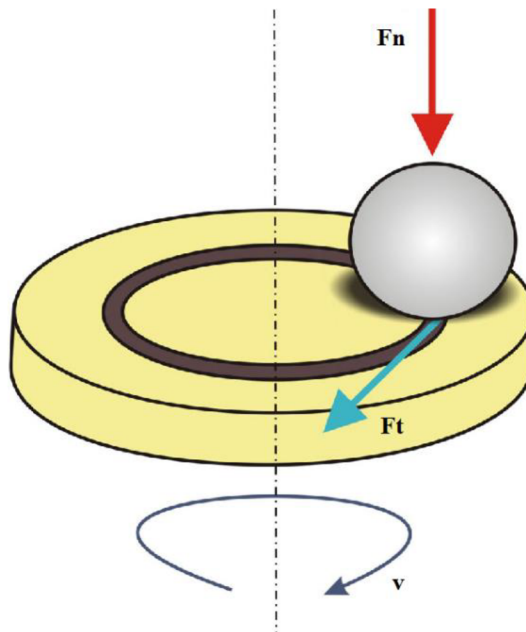
Při tření dochází k opotřebení vzorku a zkušebního tělesa a dochází k vzájemnému úbytku materiálu. Většina degradačních procesů je v tribologii zapříčiněna abrazivním opotřebením, viz obr. č. 16b, kdy je jeden z dvojice materiálů výrazně tvrdší. V průběhu tření mezi dvojicí materiálů tak dochází k odtrhávání povrchu měkčího materiálu a tzv. rýhování, kdy jemné částice vytvořené během procesu opotřebení dále přispívají k poškození povrchu. Rýhování mohou také způsobit cizí částice nacházející se mezi dvěma materiály. Rozsah poškození povrchu pak ovlivňuje míra zatížení, teplota, délka dráhy, tvrdost materiálů, podmínky okolí apod. [39].

Tribologické zkoušky se provádí za účelem zjišťování povrchových vlastností materiálů při různých podmínkách. Proto je využíváno různých metod pro dosažení co nejbližšího porovnání vůči skutečnému použití. Mezi základní tribologické zkoušky patří např. Scrath test, zkouška metodou Ball-on-Disc a metoda Block on ring, které jsou popsány dále.

Scratch test (zkouška poškrábáním) je jednoduchá zkušební metoda pro zjištění odolnosti proti otěru a opotřebení povrchové vrstvy materiálu. Dále se posuzuje adhezní spoj mezi dvěma povrchy (např. základní materiál a tenká vrstva). Rýha vzniklá při scratch testu je vytvořená pomocí nástroje ve tvaru tyčky s diamantovým hrotem [40]. Je možné použít i indentor pro zkoušení podle Rockwella apod [41]. Zkouška může probíhat při statickém zatížení nebo progresivním zatížení. Indentor je po materiálu přetahován v přímočarém směru [40].

Block on ring je metoda sloužící pro stanovení odolnosti materiálů vůči kluznému opotřebení. Princip metody spočívá v přitlačování testovaného bloku materiálu na prstenec z druhého materiálu, který zároveň vykonává rotační pohyb. Pomocí této metody lze vyhodnocovat charakteristiku kluzného opotřebení za různých podmínek. Zkoušku lze provádět s různými materiály, při proměnném zatížení a různých rychlostí posuvů. Zároveň lze zkoušku provádět s mazivem nebo bez maziva. Výsledky měření pak poskytují možnost porovnání různých materiálových dvojic z hlediska jejich kluzných vlastností za různých podmínek [42].

Metoda **Ball-on-Disc** je tribologickou zkouškou, která bude použita v experimentální části této diplomové práce. Zkouška probíhá tak, že těleso ve tvaru kuličky je pevně upnuto a vlačování definovanou silou do zkušební vzorku, viz obr. 17. Zkoušku lze provádět i za použití mazacích kapalin, kdy je vzorek spolu s mazadlem umístěn v misce. Vzorek je při zkoušce otáčen předem zvolenými otáčkami po určitém poloměru. Délka testu se odvíjí od potřebného počtu rotačních cyklů nebo požadované délky dráhy [39]. Při zkoušce na vzorku začne díky přitlačované kuličce vznikat stopa (rýha). Z profilu a hloubky opotřebení je následně možné určit otěruvzdornost vzorku apod. Z velké části se tato metoda používá pro zjištění koeficientu tření, který je stanoven z průběhu testu naměřených normálových a tečných sil. Metoda Ball-on-Disc se využívá ve velkém rozsahu teplot, kdy lze testovat vzorky při teplotách pod nulou nebo až do 1200 °C [43].



Obr. 17 - Princip tribologické metody Ball-on-Disc [44]

Koeficient tření μ lze za předpokladu působení přitlačné síly tělesa (kuličky) F_n a odporové síly F_t , která působí proti směru otáčení vzorku vypočítat dle následujícího vztahu (5):

$$\mu = \frac{F_n}{F_t} [-] \quad (5)$$

Kde značí:

- μ – koeficient tření [-],
- F_n – normálová síla [N],
- F_t – tečná síla [N].

Z výsledků dosažených při zkoušce Ball-on-Disc lze stanovit koeficient tření v závislosti na čase nebo v závislosti na počtu uražených cyklů a v neposlední řadě dle uražené vzdálenosti. Dále se zkoumá objem opotřebení vrchlíku tělesa (kuličky) a na vzorku je zkoumána šířka a hloubka stopy opotřebení a způsob opotřebení [43].

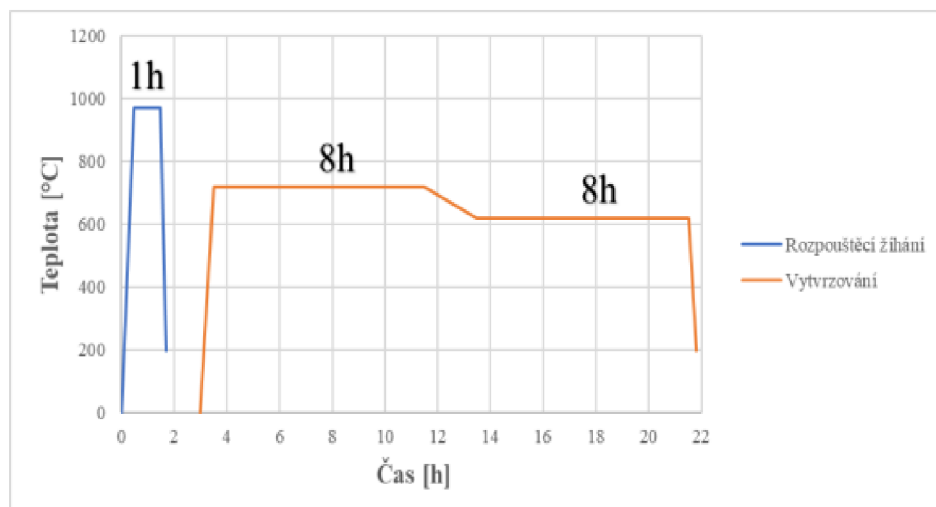
3 Experimentální část

Cílem experimentální části diplomové práce bylo posoudit vliv plazmové nitridace na vlastnosti povrchu materiálu Inconel 718. V rámci experimentu byly zjišťovány nejprve tribologické vlastnosti tvářeného materiálu a materiálu vyrobeného metodou SLM v základním stavu a po tepelném zpracování. Následně potom vlastnosti nitridovaného povrchu těchto materiálu.

Slitina Inconel 718 se ve většině případů používá tepelně zpracovaná. Proto jsou v experimentu zahrnuty i takto upravené vzorky. Na oba typy materiálu (tvářený i SLM) bylo aplikováno rozpouštěcí žihání, zchlazení a následné precipitační vytvrzení. Parametry tepelného zpracování se nacházejí v tab. 4. Proces tepelného zpracování spočívá v ohřátí na teplotu 1050 °C po dobu 1 hodiny. Následuje ochlazení ponořením do vody. První část precipitačního vytvrzování probíhá při teplotě 760 °C po dobu 10 hodin, po které následuje dvou hodinové ochlazení na teplotu 650 °C a výdrž na této teplotě po dobu 8 hodin. Finálním krokem je ochlazení na vzduchu. Grafický průběh tohoto tepelného zpracování je na obr. 18.

Tab. 4 Proces tepelného zpracování

Proces	Teplota	Čas cyklu
Rozpouštěcí žihání	1050 °C	1 hod
Vytvrzování 1. část cyklu	760 °C	10 hod
Vytvrzování 2. část cyklu	650 °C	8 hod



Obr. 18 Grafický průběh tepelného zpracování [5]

Vzorky tvářeného materiálu Inconel 718, také označovaného jako 2.4468 dle evropské normy, byly dodány ve formě desek, ze kterých byly následně obrobeny dle požadovaného tvaru, viz obr. 19. Struktura a mechanické vlastnosti tvářeného materiálu jsou popsány v práci [5].

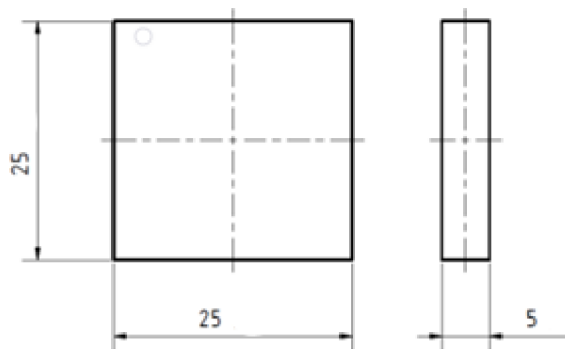
Vzorky 3D tisknuté byly vyrobeny metodou SLM (Selective laser melting) v laboratoři prototypových technologií a procesů Technické univerzity v Liberci. Výroba byla zajištěna na 3D tiskárně od firmy SLM Solutions Group AG s označením SLM280HL, jež lze využít pro tisknutí slitin kovů. Pro samotný tisk Inconelu 718 bylo využito prášku od firmy SLM Solutions Group AG. Tisk probíhá tak, že je prášek natavován ve vrstvách pomocí laserové jednotky s maximálním výkonem 400 W. Pracovní plocha stroje je 280 x 280 x 350 mm a pro celý pracovní prostor tiskárny je využíváno ochranné atmosféry argonu nebo dusíku. Struktura a mechanické vlastnosti 3D tisknutého materiálu jsou uvedeny v práci [45].

Plazmová nitridace, které byla aplikována na vzorcích tvářených a 3D tisknutých byla provedena ve firmě Jimalu s.r.o. Parametry plazmové nitridace jsou popsány v tab. 5.

Tab. 5 Parametry plazmové nitridace

Parametry plazmové nitridace pro materiál Inconel 718						
Proces	Čištění povrchu			Plazmová nitridace		
	Teplota [°C]	Čas [hod]	Poměr plynů H ₂ /N ₂	Teplota [°C]	Čas [hod]	Poměr plynů H ₂ /N ₂
	420	1	100/0	560	30	80/20

Vliv plazmové nitridace na vlastnosti povrchu byl hodnocen pomocí tribologické zkoušky, metodou Ball-on-Disc, jež byla popsána v teoretické části práce, viz kap. 2.3 a geometrie zkušební vzorku pro testování je ukázána na obr. 19.



Obr. 19 Zkušební vzorek pro tribologické zkoušky

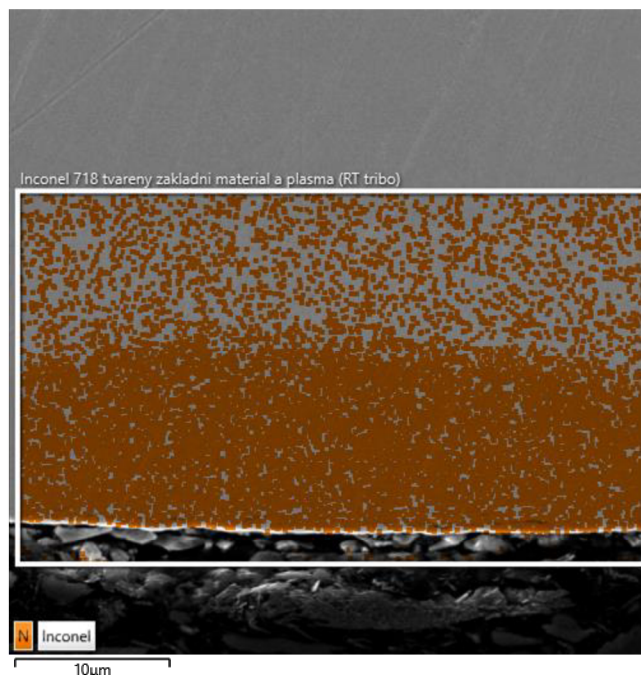
V rámci řešení práce byly provedeny experimenty zaměřené na stanovení tribologických vlastností, určení koeficientu tření a zejména hodnocení velikosti opotřebení kontaktních ploch:

1. Tvářeného materiálu Inconel 718 - při teplotě RT, 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C, a to pro základní stav materiálu, po tepelném zpracování, po plazmové nitridaci a po tepelném zpracování s plazmovou nitridací do teploty 700 °C.
2. Vzorků Inconel 718 vyrobeného metodou SLM při teplotě RT, 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C, a to pro základní stav materiálu, po plazmové nitridaci a po tepelném zpracování s plazmovou nitridací do teploty 700 °C.

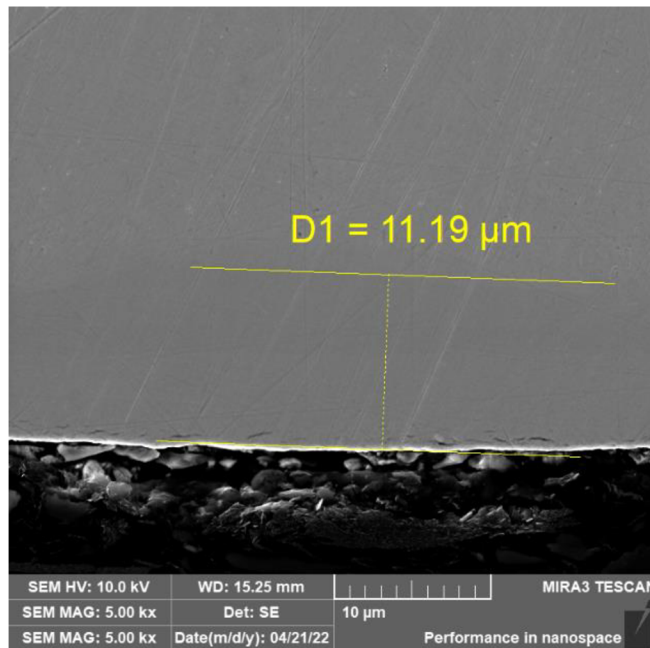
3.1 Měření tloušťky nitridované vrstvy

Tloušťka nitridované vrstvy je často předepsaná, kvůli pozdější aplikaci výrobku. Vrstva nitridace výrazně mění vlastnosti povrchové vrstvy výrobku, a to především odolností proti opotřebení. Měření tloušťky nitridované vrstvy se nejčastěji provádí metalograficky.

Vzorky byly připraveny běžným metalografickým postupem a měření tloušťky nitridované vrstvy probíhalo na elektronovém mikroskopu MIRA 3 TESCAN za pomoci EDX detektoru Ultim Max 65. Obr. 20 a obr. 21 ukazují průnik dusíku do základního materiálu. Na materiálu po plazmové nitridaci vznikla nitridační vrstva o tloušťce cca 11 μm .



Obr. 20 Koncentrace dusíku v nitridované vrstvě pro základní materiál + plazmová nitridace

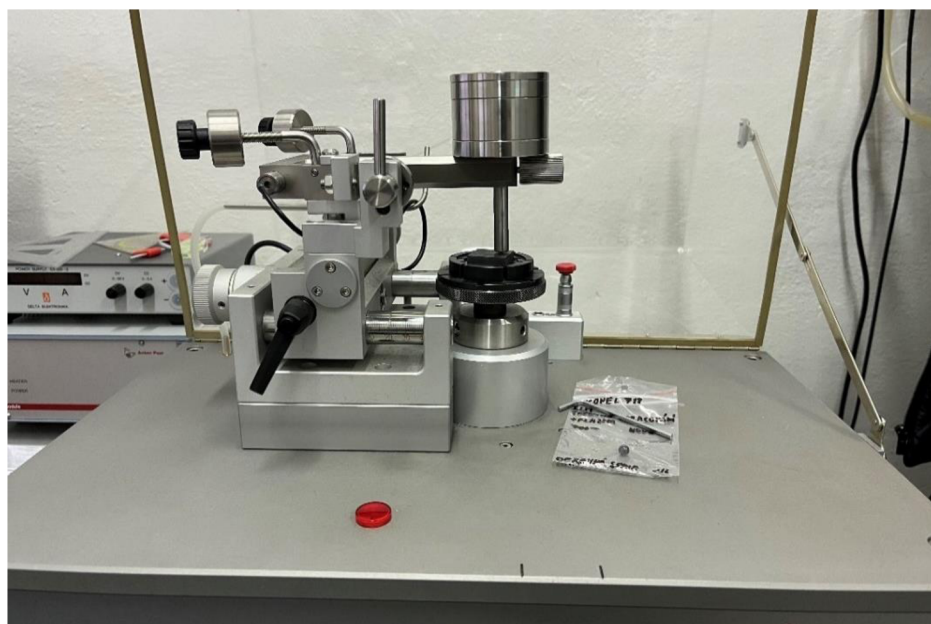


Obr. 21 Nitridovaná vrstva na materiálu Inconel 718

3.2 Tribologické zkouška metodou Ball-on-Disc

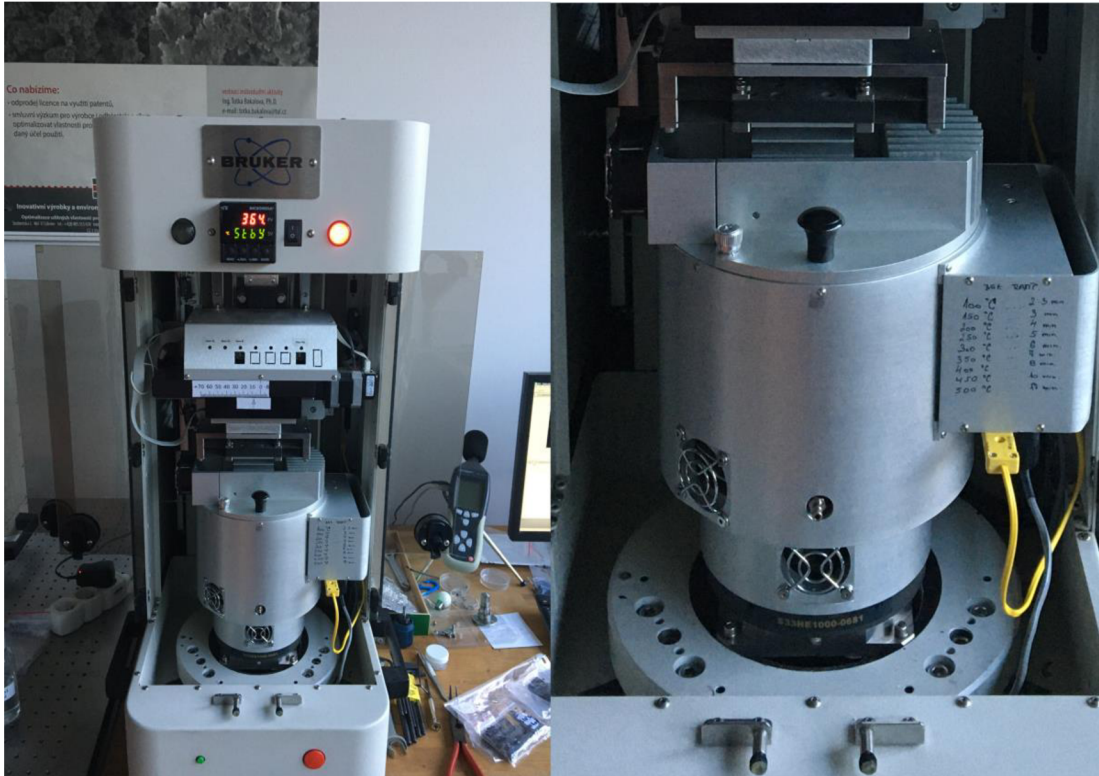
Naplánovaný experiment byl velice rozsáhlý, probíhalo měření pro 7 skupin vzorků. Každá skupina obsahovala 5–6 vzorků, které byly testovány při teplotě okolí (RT) a za zvýšených teplot 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C.

Experimenty uskutečněné za teploty okolí byly provedeny na tribometru pro suché i kapalně prostředí od firmy Anton Paar, viz obr. 22. Tohoto tribometru lze využívat pro testování třecí dvojice za použití maziva.



Obr. 22 Tribometr pro suché a kapalně prostředí

Pro tribologické testování za vyšších teplot bylo využito tribometru CETR UMI Multi-specimen Test system, který je znázorněn na obr. 23. Toto zařízení umožňuje provádět tribologické testy až do teploty 1000 °C.

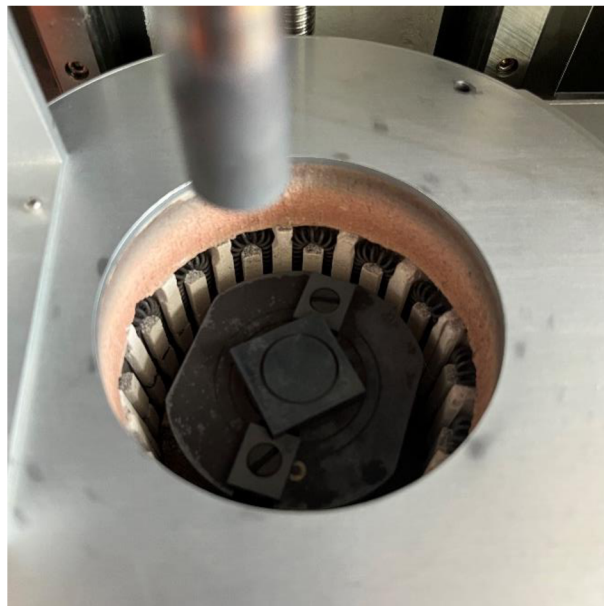


Obr. 23 Tribometr CETR UMI Multi-specimen Test system (vlevo), detailní pohled na ohřívací komoru (vpravo)

Jako protikus (druhé těleso) byla zvolena keramická kulička s průměrem 6 mm. Kulička je vyrobena z materiálu Si_3N_4 , má tvrdost HV 10 více než 1500 HV, teplotní odolnost až do 1300 °C a její měrná hmotnost je $3,21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kulička byla pevně upevněna v držáku, viz obr. 24, a přitlačována na vzorek silou 10 N. Vzorek byl umístěn na stole přístroje, viz obr. 25, jenž se otáčel po dobu 60 minut rychlostí otáčení $60 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 24 Vzorek a kulička z materiálu Si_3N_4 upnuta v držáku



Obr. 25 Upnutí vzorku uvnitř ohřívací komory

Před začátkem testu bylo zapotřebí upnout třecí dvojici do tribometru a uzavřít pracovní komoru tribometru. Následně proběhlo nastavení parametrů testování, kde se nastavovala teplota ohřevu, doba trvání experimentu, zatížení působící na vzorek, rychlost a poloměr otáčení vzorku. Pro tento experiment byla zvolena doba testu 60 minut. Před samotným začátkem tribologického testu byl vzorek rovnoměrně ohřát na požadovanou teplotu, což trvalo od 15 do 40 min v závislosti na teplotě testu. Závěr testu spočíval v ochlazování topné komory spolu se vzorkem. Vzhledem k vysokým teplotám testování a ochlazování na okolní teplotu zabralo chlazení od 1,5 hodiny do 3 hodin. Celková doba jednoho testu trvala v průměru 3 hodiny a 40 minut.

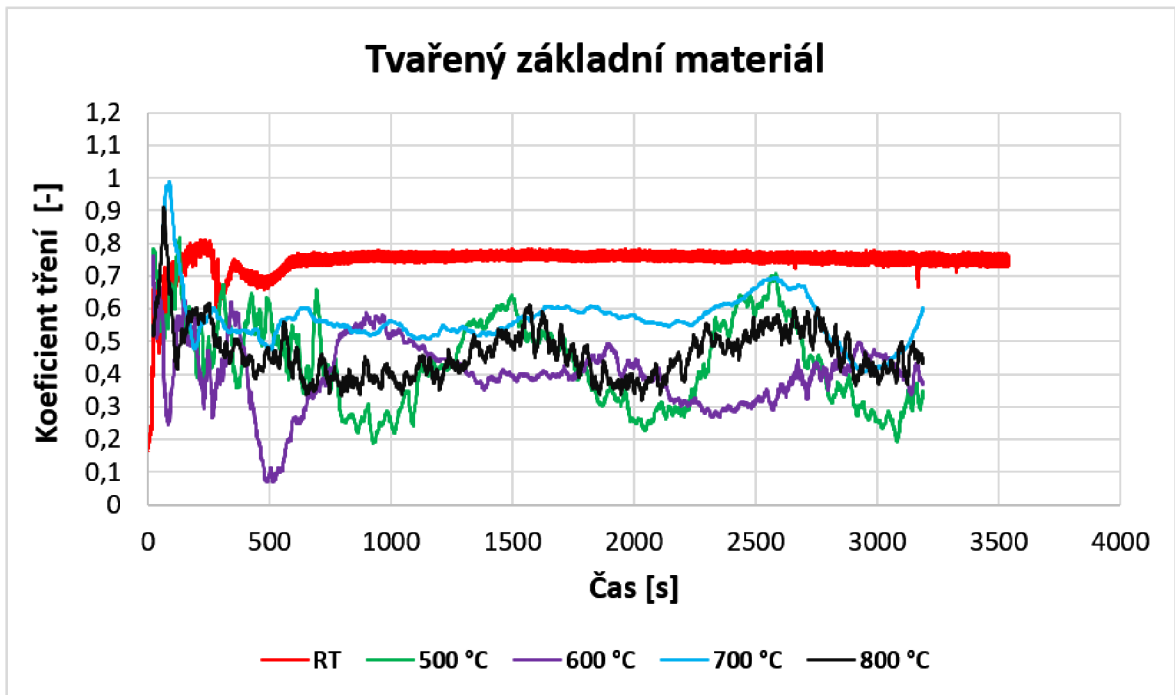
3.2.1 Hodnocení koeficientu tření

Změna koeficientu tření při kontaktu protitělesa se vzorkem byla vyhodnocována v průběhu tribologické zkoušky. Koeficient tření je nedílnou součástí pro fungování strojních součástí. Pro tělesa, která se vůči sobě pohybují a třou o sebe navzájem, je vyžadována co nejnižší hodnota koeficientu tření, jenž vede ke snížení opotřebení. V této práci je tedy testováno, zdali má plazmová nitridace a další úpravy, ať už způsob výroby nebo jiné tepelné zpracování vliv na koeficient tření, a jak velký tento rozdíl je. Dále byl sledován vliv modifikací na velikosti opotřebení třecí dvojice, která byla v kontaktu při zvolené teplotě.

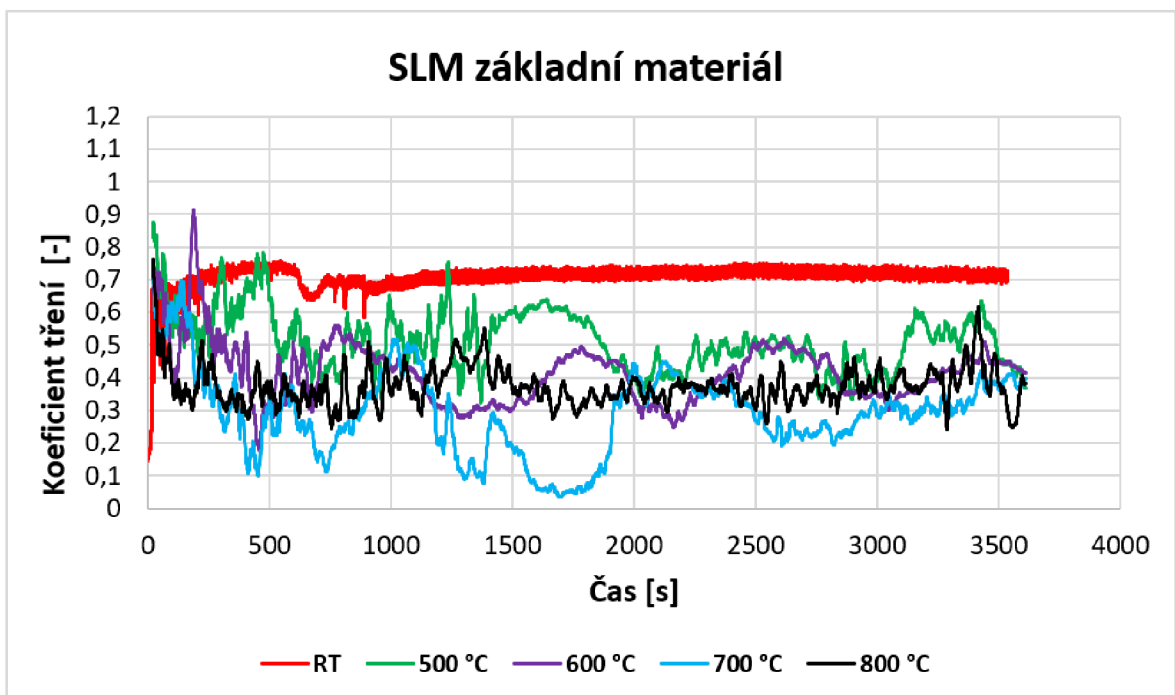
Vyhodnocení bylo provedeno celkem na 33 vzorcích, a to při teplotě okolí RT a za zvýšených teplot 500, 600, 700 a 800 °C. Hodnoty koeficientu tření všech těchto vzorků včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 6. Průběhy koeficientu tření pro jednotlivé skupiny při různých teplotách jsou ukázány na obr. 26 až 32.

Tab. 6 Průměrná hodnota koeficientu tření pro tvářené a SLM vzorky při různých teplotách

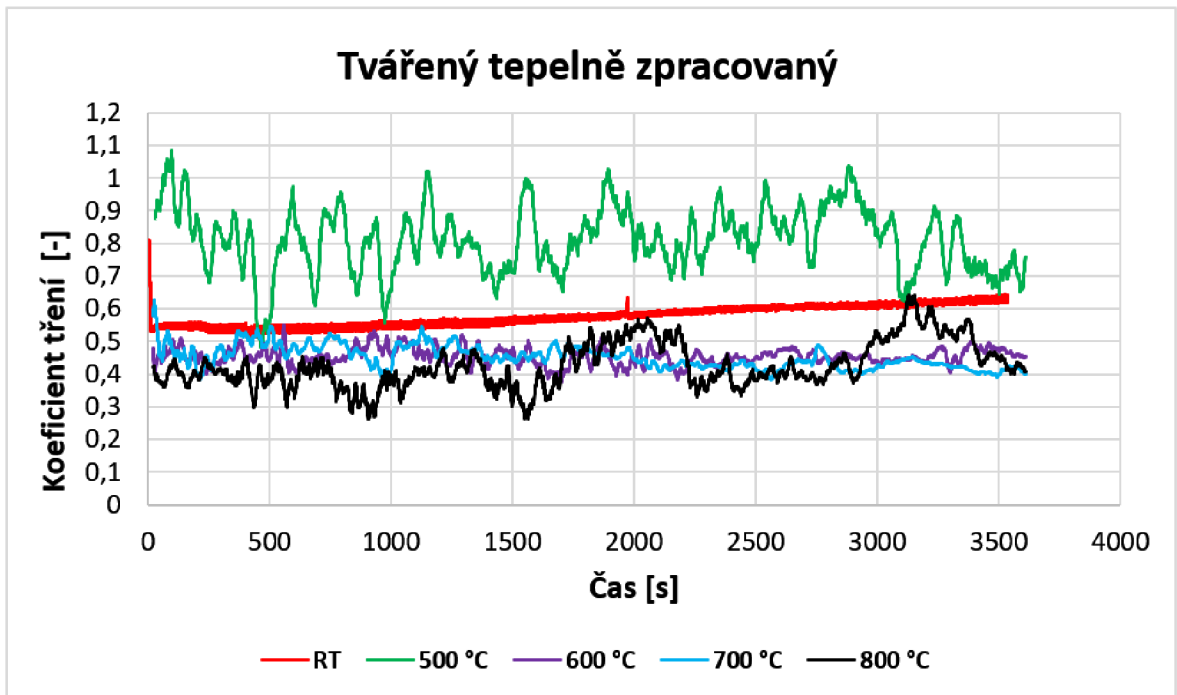
	Tvářený základní materiál					SLM základní materiál				
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
CoF[-]	0,746	0,436	0,400	0,566	0,461	0,709	0,514	0,410	0,294	0,375
Smodch.	0,091	0,174	0,144	0,114	0,133	0,071	0,160	0,134	0,158	0,113
Tvářený tepelně zpracovaný										
Teplota [°C]	RT	500		600		700		800		
CoF[-]	0,577	0,812		0,454		0,451		0,426		
Smodch.	0,036	0,193		0,054		0,048		0,112		
Tvářený základní materiál + plazmová nitridace										
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
CoF[-]	0,711	0,451	0,503	0,547	0,306	0,793	0,499	0,334	0,382	0,397
Smodch.	0,086	0,059	0,068	0,082	0,093	0,130	0,005	0,114	0,272	0,060
Tvářený tepelně zpracovaný + plazmová nitridace										
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
CoF[-]	0,574	0,457	0,325	0,452	x	0,660	0,459	0,393	0,324	x
Smodch.	0,028	0,008	0,113	0,178	x	0,098	0,007	0,004	0,109	x



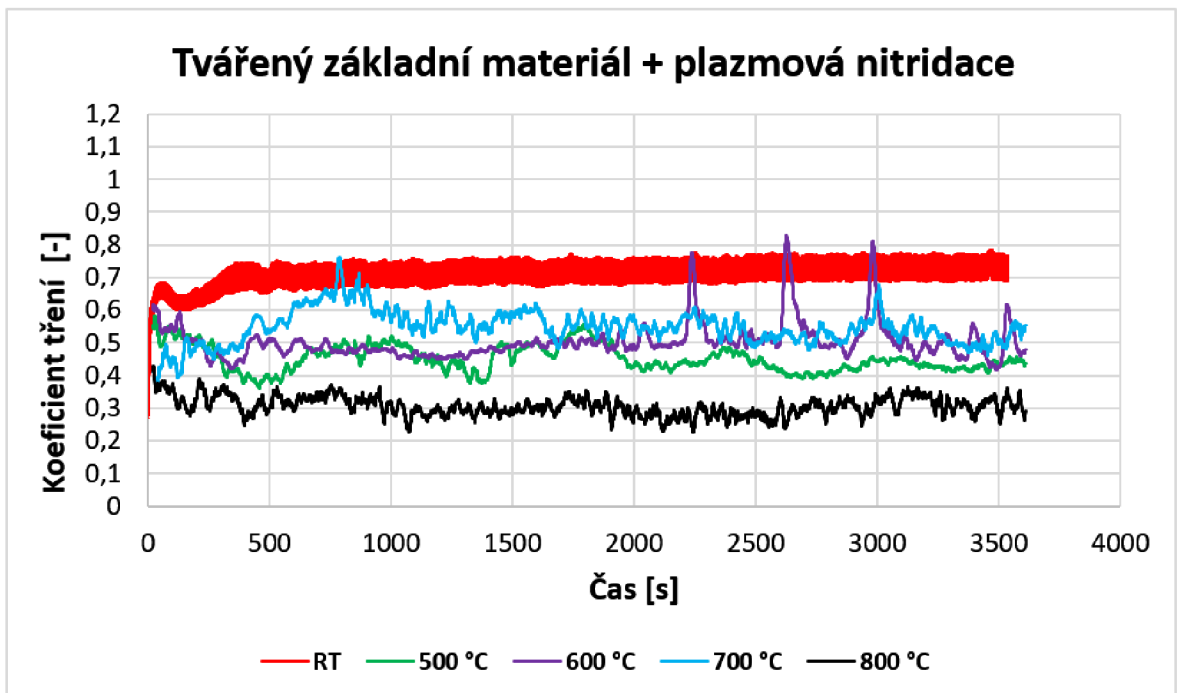
Obr. 26 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – tvářený základní materiál



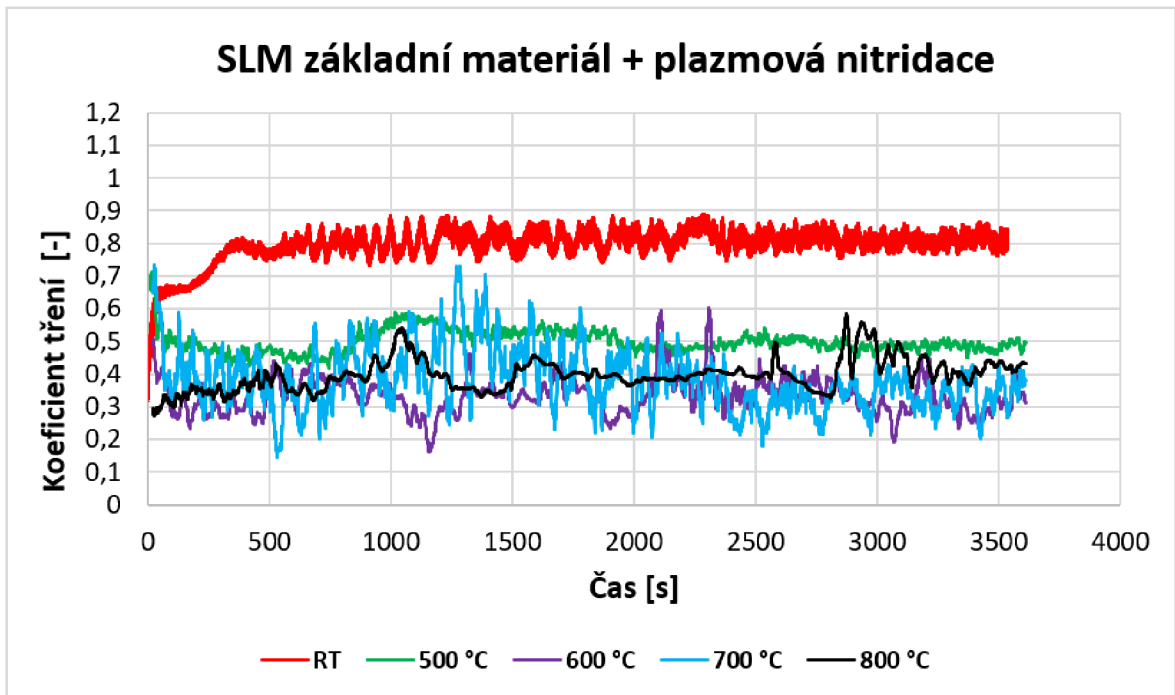
Obr. 27 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – SLM základní materiál



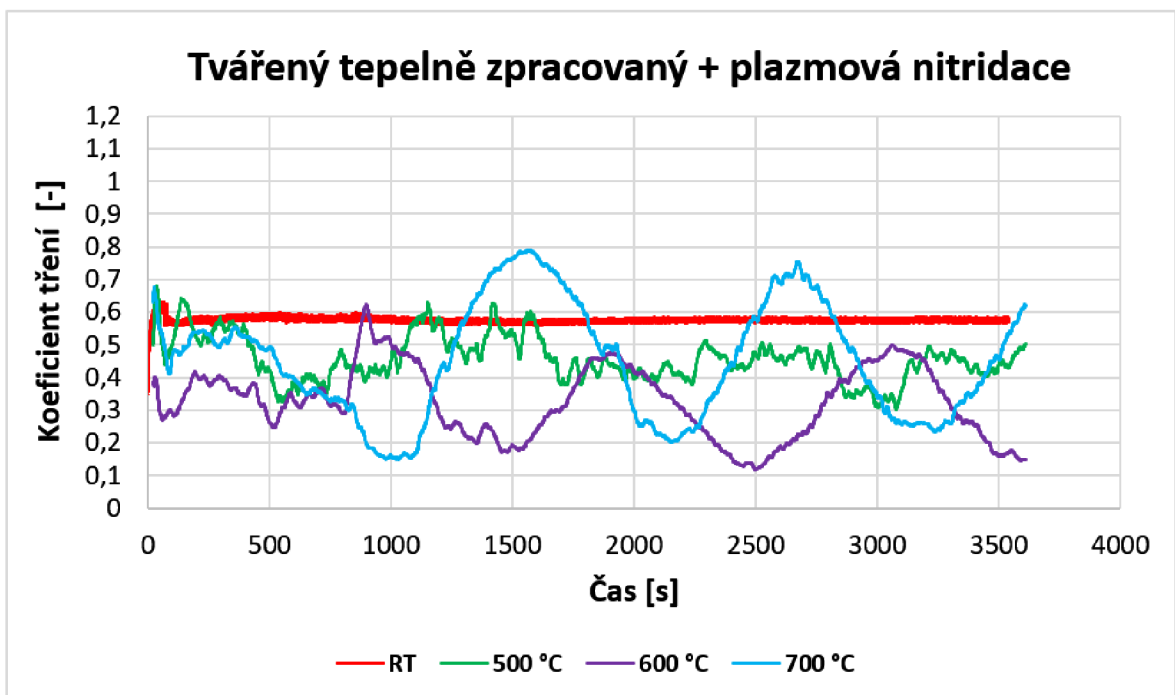
Obr. 28 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – tvářený materiál po tepelném zpracování



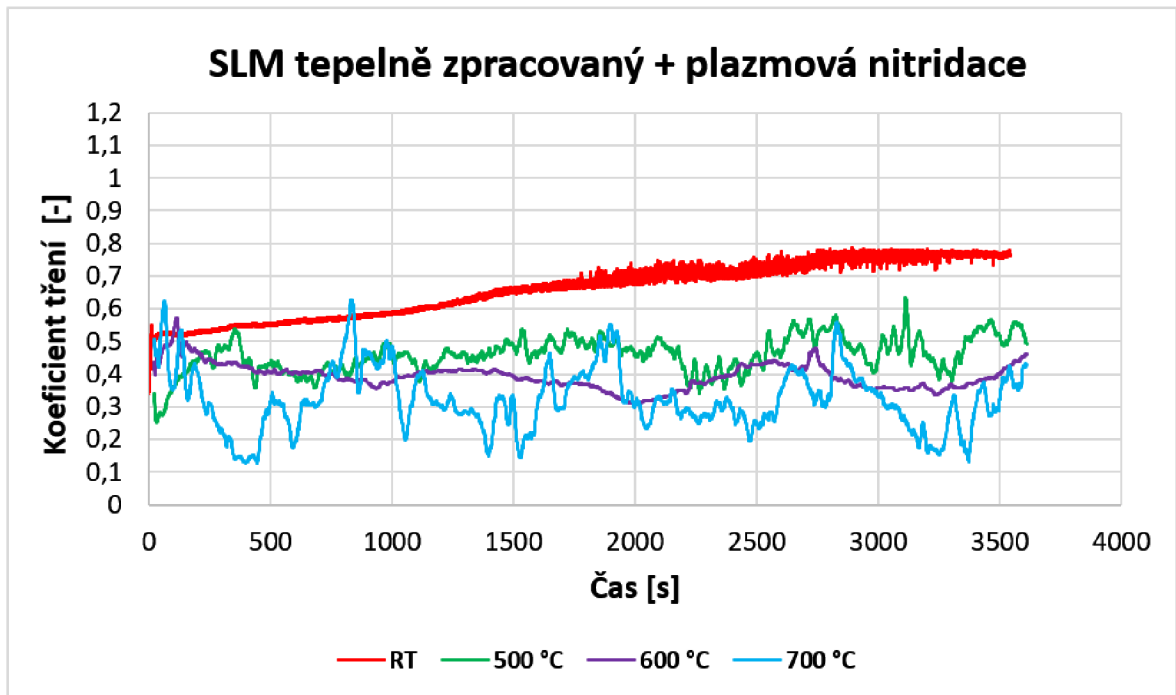
Obr. 29 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – tvářený základní materiál + plazmová nitridace



Obr. 30 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – SLM základní materiál + plazmová nitridace



Obr. 31 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – tvářený tepelně zpracovaný + plazmová nitridace

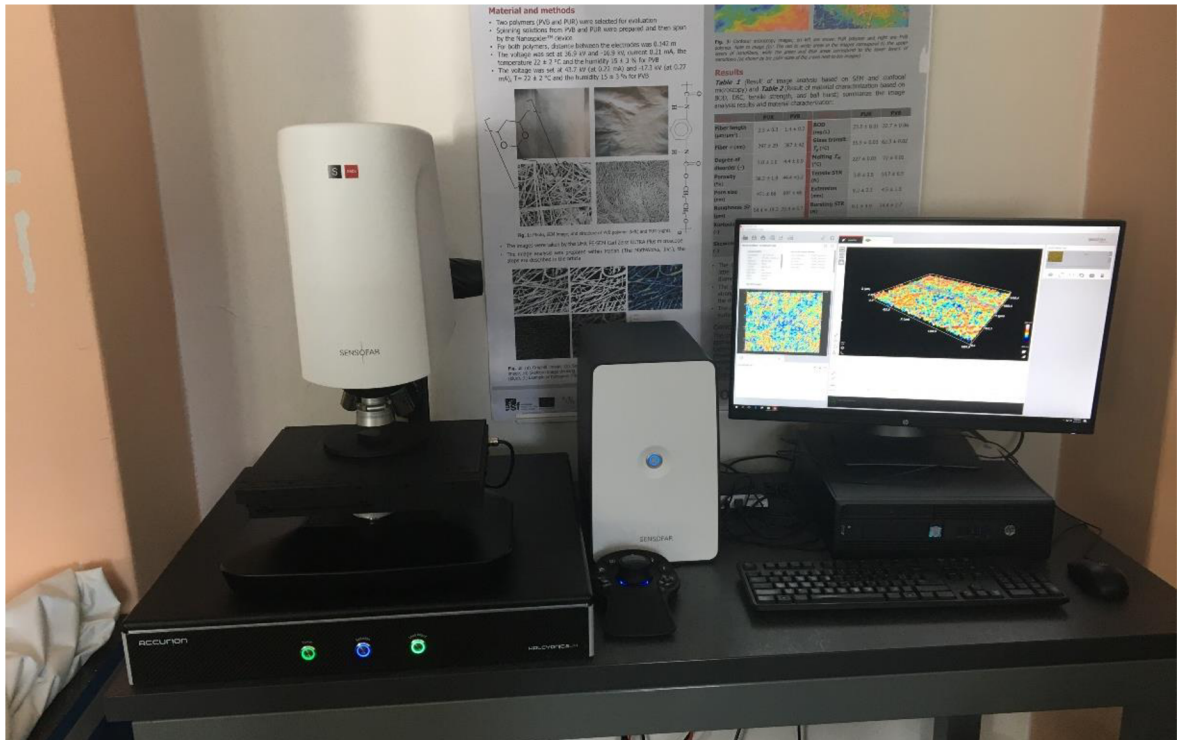


Obr. 32 Průběh koeficientu tření materiálu Inconel 718 – SLM základní materiál + plazmová nitridace

3.2.2 Hodnocení míry opotřebení třecí dvojice v závislosti na teplotě a způsobu zpracování materiálu

V průběhu tribologické zkoušky metodou Ball-on-Disc byla vytvořena na vzorku tzv. stopa, která slouží k vyhodnocení míry opotřebení. Tato stopa opotřebení má charakteristický geometrický tvar, ze kterého je měřena hloubka a šířka. Zároveň se také měří objem opotřebení na protikus (kuličce) pro možnost porovnání třecí dvojice.

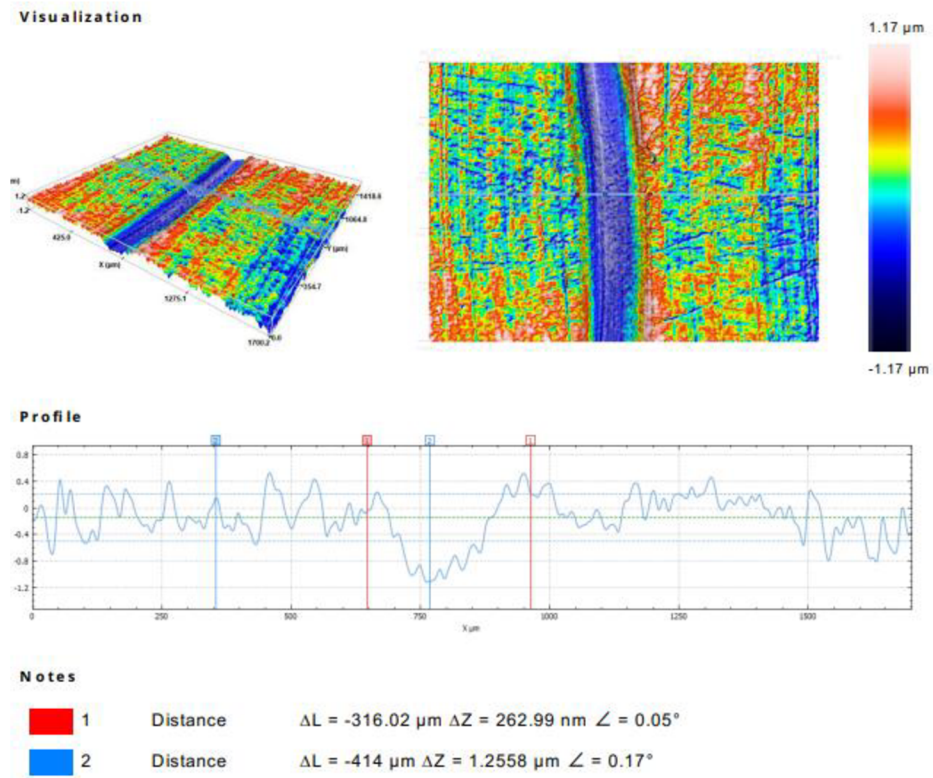
Po dokončení tribologické zkoušky všech vzorků bylo pomocí mikroskopu SENSO FAR S Neox vyhodnocena míra opotřebení vzorků a velikost obroušeného kulového vrchlíku na kuličce. Následně byl vypočten objem opotřebení kuličky. Mikroskop SENSO FAR S Neox, jenž je uveden na obr. 33, slouží pro bezkontaktní skenování (měření) povrchů prostřednictvím konfokální a interferometrické metody. Mikroskop umožňuje posuv v rovinách X, Y a Z a fungovat ve 2D a 3D režimu. Lze provádět automatické měření pomocí měřicích programů nebo manuální, kde si je možné nastavit více parametrů. Kromě vyhodnocení, které bylo použito pro tento experiment je možné mikroskop využít na měření plošné a profilové drsnosti povrchu dle norem ISO, měření tloušťek vrstev, výškové mapy a analýzu povrchové geometrie.



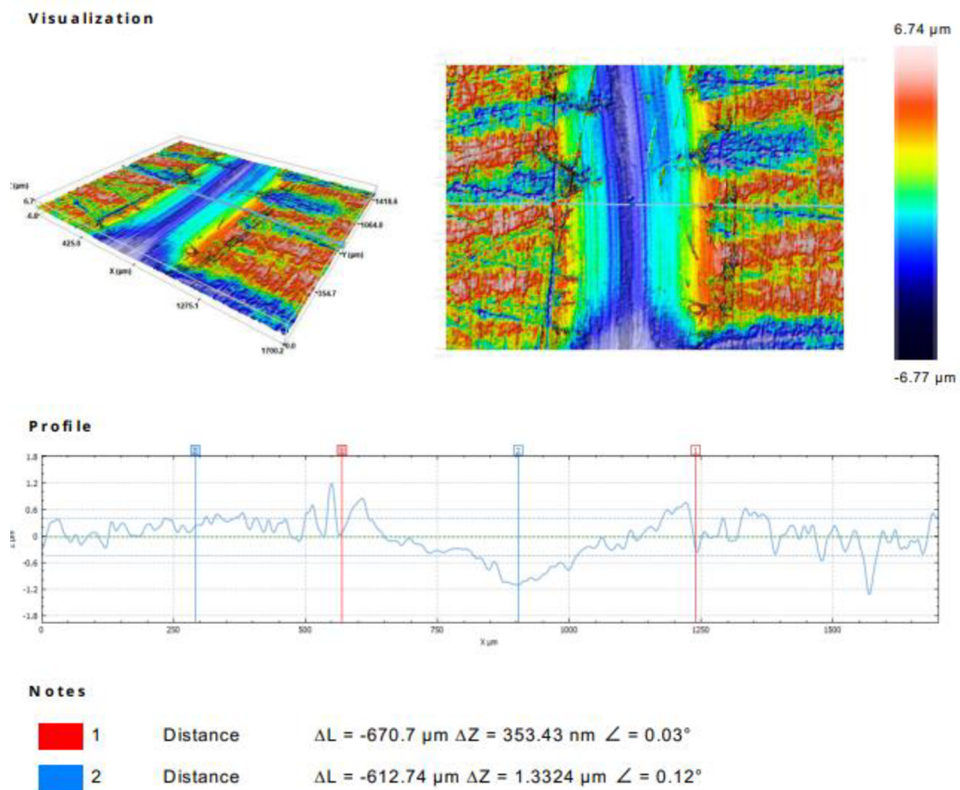
Obr. 33 Konfokální mikroskop SENSOFAR S Neox

3.2.2.1 Hloubka profilu opotřebení zkušebního materiálu

Hloubka profilu je jednou z vyhodnocovaných charakteristik opotřebení na vzorku. Měření hloubky probíhá na jednom vzorku na čtyřech místech, která jsou vzájemně pootočená o 90° . Z těchto hodnot byly následně vypočteny průměrné hodnoty jednotlivých profilů se směrodatnými odchylkami. Na ukázkou je na obr. 34 je uvedena stopa profilu pro tvářený vzorek s plazmovou nitridací testovaném při teplotě okolí. Následně na obr. 35 je uvedena stopa profilu pro SLM vzorek s plazmovou nitridací také při teplotě okolí.



Obr. 34 Opatřebenění zkušebního vzorku – tvářený základní materiál + plazmová nitridace při teplotě RT

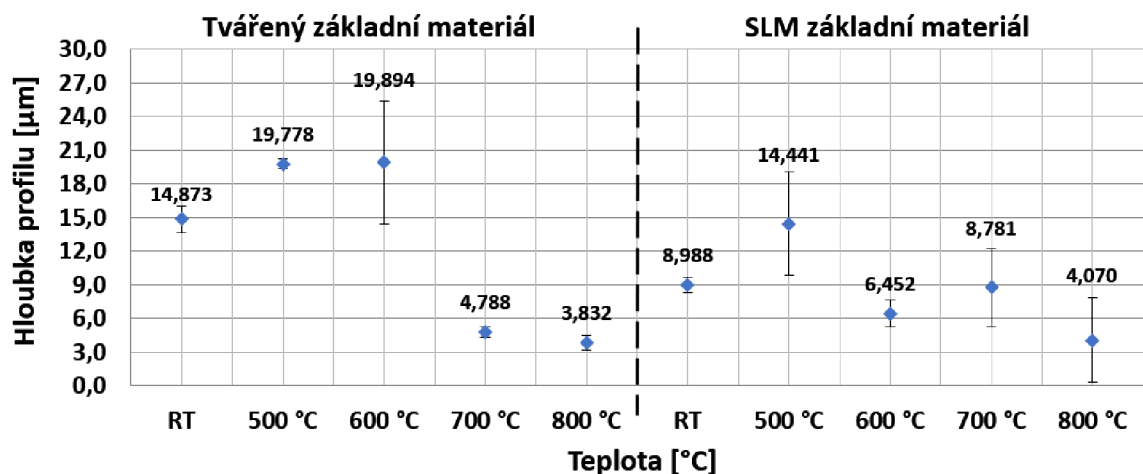


Obr. 35 Opatřebenění zkušebního vzorku – SLM základní materiál + plazmová nitridace při teplotě RT

V tab. 7 jsou uvedeny hodnoty hloubky profilu tvářeného základního materiálu a SLM základního materiálu z jednotlivých měření na 4 místech, jak bylo popsáno výše. Dále obsahuje průměrnou hodnotu těchto čtyř měření spolu se směrodatnou odchylkou. Na obr. 36 je pak grafické shrnutí průměrných hodnot včetně směrodatných odchylek.

Tab. 7 Hloubka profilu pro tvářený základní materiál a SLM základní materiál

Hloubka profilu [μm]	Tvářený základní materiál					SLM základní materiál				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	16,62	20,04	25,67	4,86	3,79	9,53	20,44	6,75	7,98	3,12
měření 2	14,09	20,16	23,47	5,41	3,11	9,34	14,45	6,01	13,13	2,25
měření 3	14,52	19,72	15,14	4,39	3,80	8,09	13,64	7,95	4,74	9,60
měření 4	14,26	19,20	15,30	4,50	4,63	9,00	9,23	5,11	9,27	1,32
Průměr	14,87	19,78	19,89	4,79	3,83	8,99	14,44	6,45	8,78	4,07
Smoch.	1,18	0,43	5,48	0,46	0,62	0,64	4,61	1,20	3,47	3,76

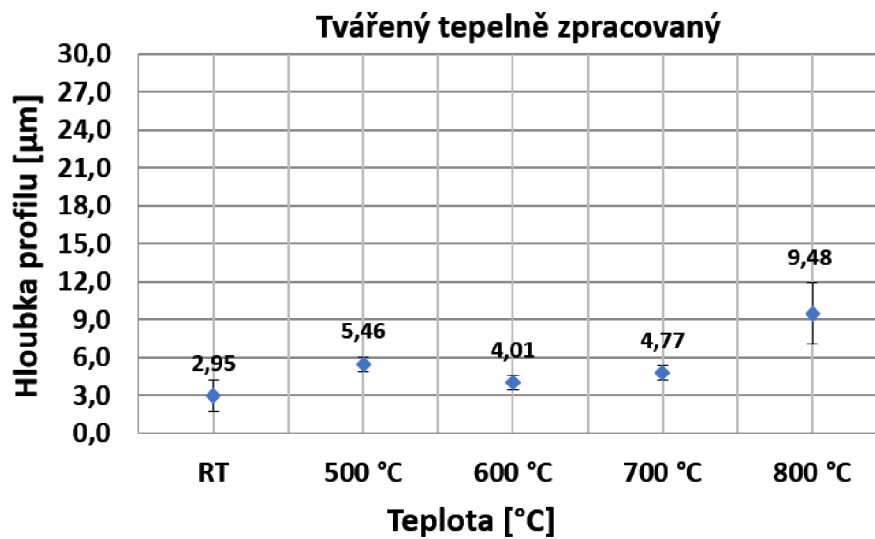


Obr. 36 Hloubka profilu pro tvářený základní materiál a SLM základní materiál

V následující tab. 8 jsou uvedeny hodnoty hloubky profilu tvářeného tepelně zpracovaného materiálu, v tab. 9 hodnoty pro vzorky tvářené spolu s SLM, které jsou plazmově nitridovány a v tab. 10 hodnoty pro vzorky tepelně zpracované s plazmovou nitridací, jak pro tvářené, tak SLM. Veškeré průměrné hodnoty jsou opět graficky znázorněny na obr. 37, kde se nacházejí tepelně zpracované vzorky, na obr. 38, které znázorňují plazmově nitridované vzorky tvářené tak i SLM a na obr. 39 tepelně zpracované s plazmovou nitridací pro tvářené i SLM vzorky, a to vše včetně směrodatných odchylek.

Tab. 8 Hloubka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál

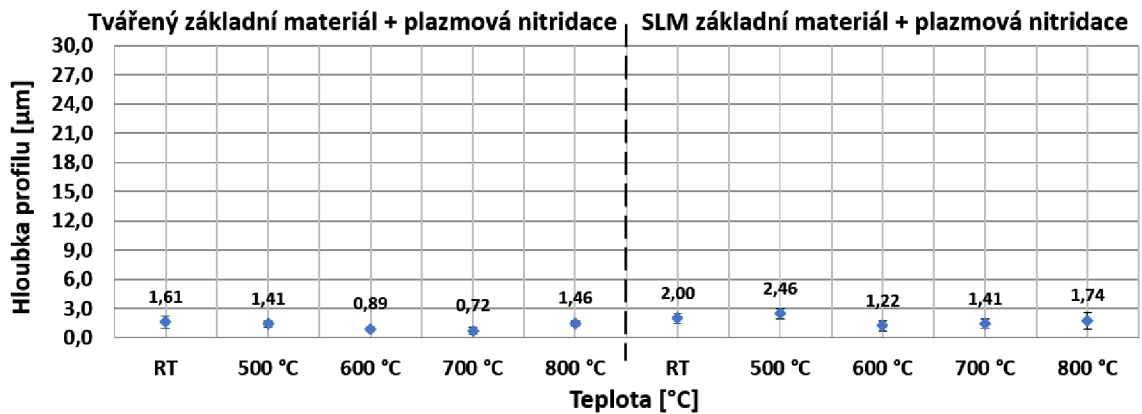
Hloubka profilu [μm]	Tvářený tepelně zpracovaný				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	1,14	4,82	3,46	4,03	13,05
měření 2	3,73	5,22	4,74	5,30	8,88
měření 3	3,31	5,90	4,20	5,18	7,87
měření 4	3,62	5,90	3,66	4,56	8,13
Průměr	2,95	5,46	4,01	4,77	9,48
Smodch.	1,22	0,53	0,58	0,59	2,41



Obr. 37 Hloubka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál

Tab. 9 Hloubka profilu pro základní materiál s nitridací a SLM základní materiál s nitridací

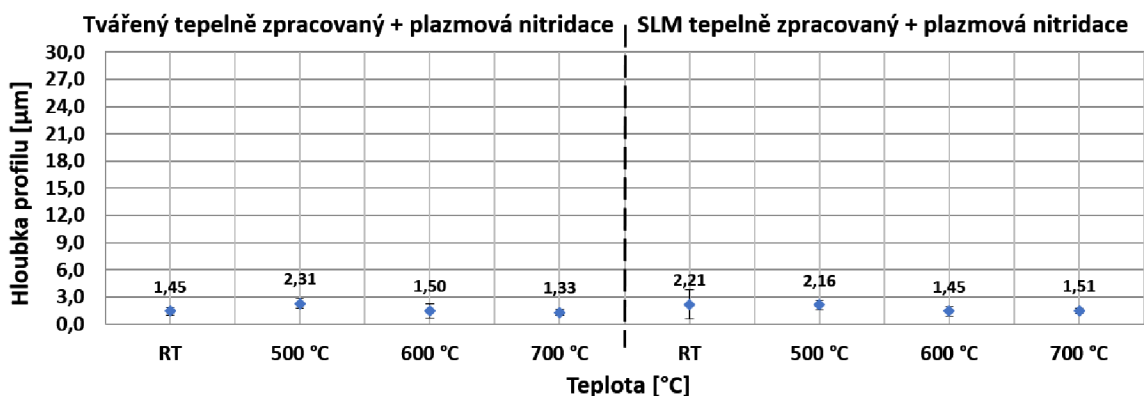
Hloubka profilu [μm]	Tvářený základní materiál + plazmová nitridace					SLM základní materiál + plazmová nitridace				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	1,26	1,62	1,10	0,58	1,28	1,33	2,27	0,68	1,05	1,27
měření 2	1,38	1,15	0,65	1,28	1,35	1,97	1,95	1,82	1,29	1,11
měření 3	1,27	1,79	0,86	0,62	1,82	2,61	2,51	0,96	1,18	1,60
měření 4	2,53	1,09	0,95	0,40	1,37	2,08	3,11	1,44	2,12	2,99
Průměr	1,61	1,41	0,89	0,72	1,46	2,00	2,46	1,22	1,41	1,74
Smodch.	0,62	0,35	0,19	0,39	0,25	0,53	0,49	0,50	0,48	0,86



Obr. 38 Hloubka profilu pro tvářený základní materiál s nitridací a SLM základní materiál s nitridací

Tab. 10 Hloubka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál s nitridací a SLM tepelně zpracovaný materiál s nitridací

Hloubka profilu [µm]	Tvářený tepelně zpracovaný + plazmová nitridace				SLM tepelně zpracovaný + plazmová nitridace			
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C
měření 1	1,62	2,66	0,91	0,96	3,54	2,80	2,21	1,18
měření 2	1,96	1,66	0,71	1,14	3,66	2,43	1,35	1,32
měření 3	0,94	2,07	2,02	1,39	0,69	1,75	1,21	1,72
měření 4	1,29	2,85	2,35	1,81	0,95	1,67	1,03	1,84
Průměr	1,45	2,31	1,50	1,33	2,21	2,16	1,45	1,51
Smodch.	0,44	0,55	0,81	0,37	1,61	0,55	0,52	0,32



Obr. 39 Hloubka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál s nitridací a SLM tepelně zpracovaný materiál s nitridací

Z obr. 36–39 plyne, že nejnižší hodnoty opotřebení materiálu dle hloubky profilu vzniklo na nitridovaných vzorcích. Jedná se o několika násobný rozdíl vůči základnímu materiálu i tepelně zpracovanému materiálu. Při teplotě 600 °C je tento rozdíl mezi tvářeným základním materiálem a tvářeným základním materiálem s plazmovou nitridací více jak

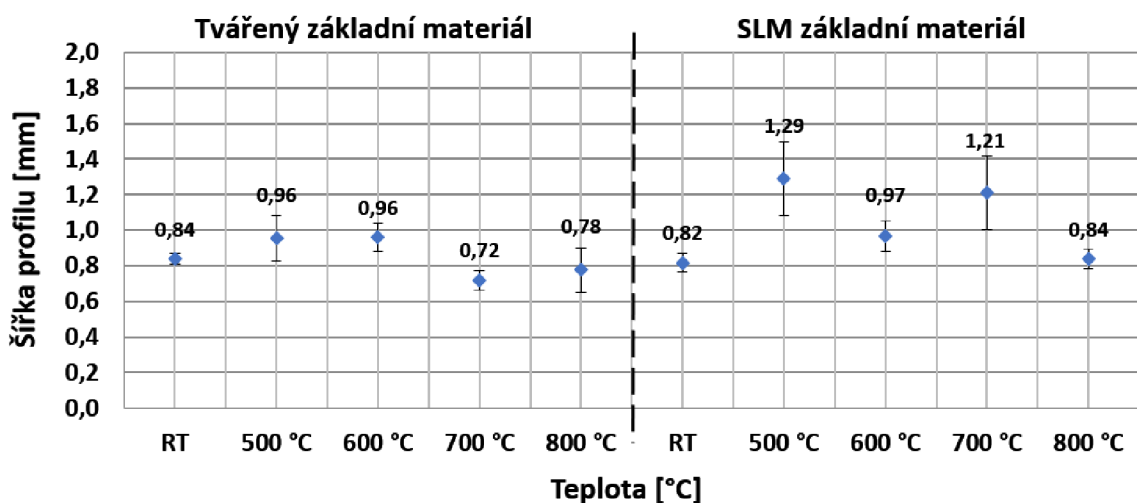
dvacetinásobný. Zároveň se u nitridovaných vzorků zachovala v průřezu teplot podobná hodnota hloubky profilu, oproti vzorkům bez plazmové nitridace. Největšího opotřebení, tedy hloubky profilu bylo dosaženo u tvářeného základního materiálu při teplotě RT okolí a při teplotách 500 a 600 °C, viz obr. 36.

3.2.2.2 Šířka profilu opotřebení zkušebního materiálu

Pro vyhodnocení opotřebení materiálu byla kromě hloubky profilu zkoumána také šířka, která byla stejně jako hloubka vyhodnocována z výškového profilu zobrazeného na obr. 34 a 35. Hodnocení probíhalo stejně, jako hloubka profilu. Měřena byla na čtyřech místech vzájemně pootočených o 90°. Hodnoty jednotlivých měření byly zprůměrovány a včetně směrodatných odchylek, viz tab. 11–14. Stejně jako u hloubky jsou tyto průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou graficky znázorněny na obr. 40–43.

Tab. 11 Šířka profilu pro tvářený základní materiál a SLM základní materiál

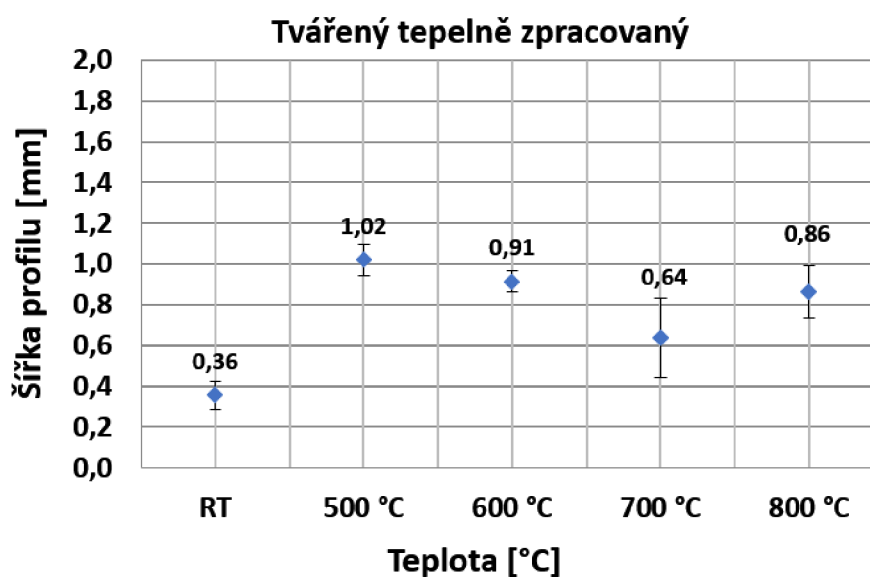
Šířka profilu [mm]	Tvářený základní materiál					SLM základní materiál				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	0,82	0,89	1,07	0,78	0,73	0,82	1,49	0,94	1,52	0,84
měření 2	0,86	1,11	0,94	0,74	0,76	0,89	1,43	0,93	1,07	0,89
měření 3	0,81	1,00	0,89	0,72	0,66	0,77	1,19	1,10	1,09	0,86
měření 4	0,87	0,81	0,93	0,64	0,95	0,78	1,05	0,91	1,16	0,76
Průměr	0,84	0,96	0,96	0,72	0,78	0,82	1,29	0,97	1,21	0,84
Smoch.	0,03	0,13	0,08	0,06	0,12	0,05	0,21	0,09	0,21	0,06



Obr. 40 Šířka profilu pro tvářený základní materiál a SLM základní materiál

Tab. 12 Šířka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál

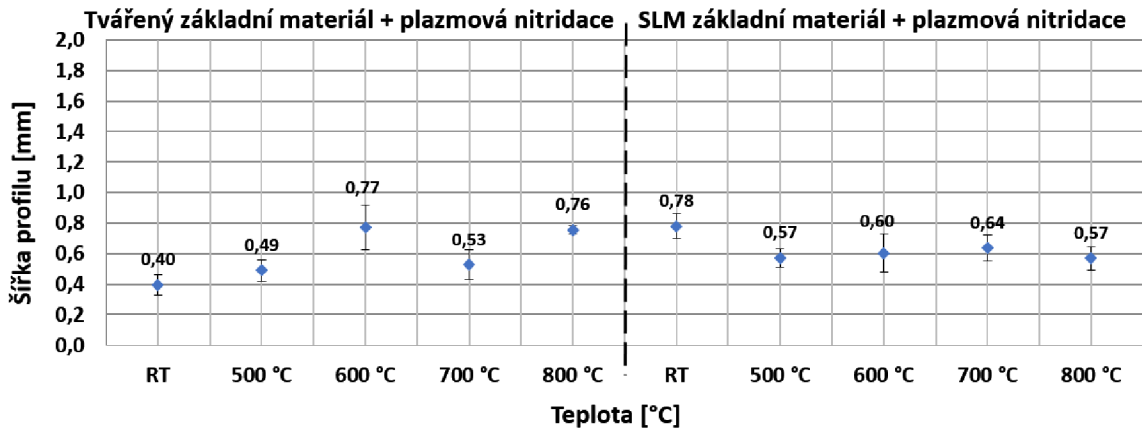
Šířka profilu [mm]	Tvářený tepelně zpracovaný				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	0,34	1,05	0,93	0,43	0,83
měření 2	0,43	1,11	0,97	0,90	1,03
měření 3	0,27	0,94	0,84	0,66	0,72
měření 4	0,38	0,98	0,91	0,58	0,89
Průměr	0,36	1,02	0,91	0,64	0,86
Smodch.	0,07	0,07	0,05	0,19	0,13



Obr. 41 Šířka profilu pro tvářený tepelně zpracovaný materiál

Tab. 13 Šířka profilu pro tvářený a SLM základní materiál s nitridací

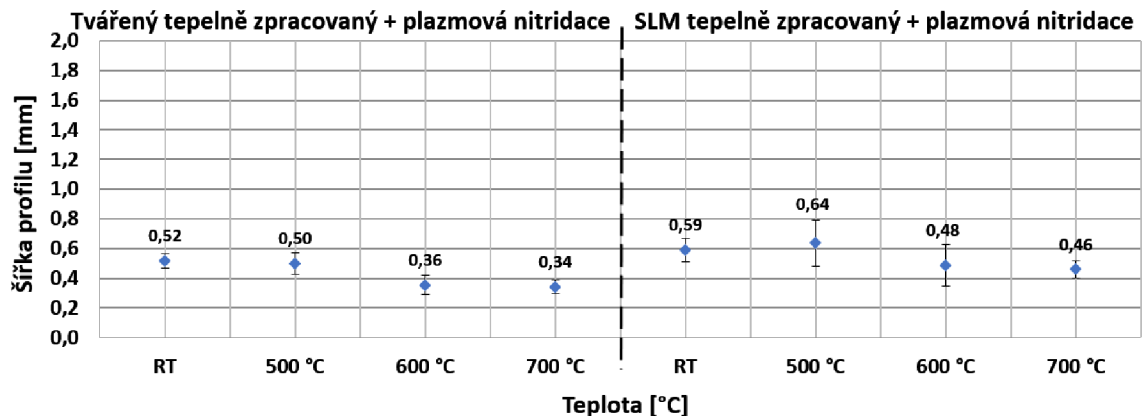
Šířka profilu [mm]	Tvářený základní materiál + plazmová nitridace					SLM základní materiál + plazmová nitridace				
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
měření 1	0,32	0,40	0,92	0,48	0,78	0,67	0,54	0,48	0,73	0,61
měření 2	0,38	0,49	0,77	0,58	0,74	0,77	0,64	0,55	0,64	0,49
měření 3	0,41	0,52	0,57	0,64	0,72	0,86	0,50	0,61	0,52	0,65
měření 4	0,47	0,56	0,83	0,42	0,78	0,82	0,60	0,78	0,65	0,52
Průměr	0,40	0,49	0,77	0,53	0,76	0,78	0,57	0,60	0,64	0,57
Smodch.	0,07	0,07	0,15	0,10	0,03	0,08	0,06	0,13	0,09	0,08



Obr. 42 Šířka profilu pro tvářený a SLM základní materiál s nitridací

Tab. 14 Šířka profilu pro tvářený a SLM tepelně zpracovaný materiál s nitridací

Šířka profilu [μm]	Tvářený tepelně zpracovaný + plazmová nitridace				SLM tepelně zpracovaný + plazmová nitridace			
	RT	500 °C	600 °C	700 °C	RT	500 °C	600 °C	700 °C
měření 1	0,58	0,40	0,34	0,38	0,50	0,79	0,41	0,52
měření 2	0,46	0,56	0,40	0,38	0,69	0,75	0,33	0,48
měření 3	0,52	0,49	0,41	0,33	0,59	0,51	0,62	0,45
měření 4	0,51	0,54	0,27	0,28	0,59	0,50	0,58	0,38
Průměr	0,52	0,50	0,36	0,34	0,59	0,64	0,48	0,46
Smodch.	0,05	0,07	0,07	0,05	0,08	0,15	0,14	0,06

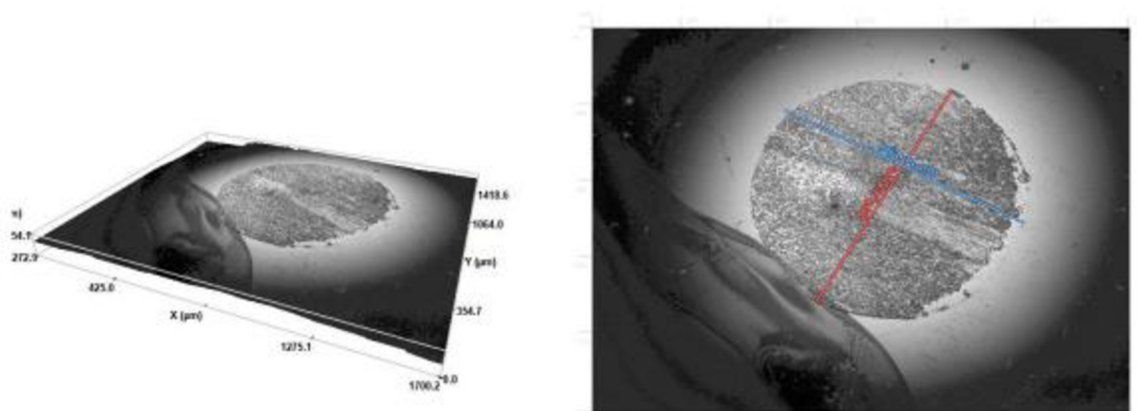


Obr. 43 Šířka profilu pro tvářený a SLM tepelně zpracovaný materiál s nitridací

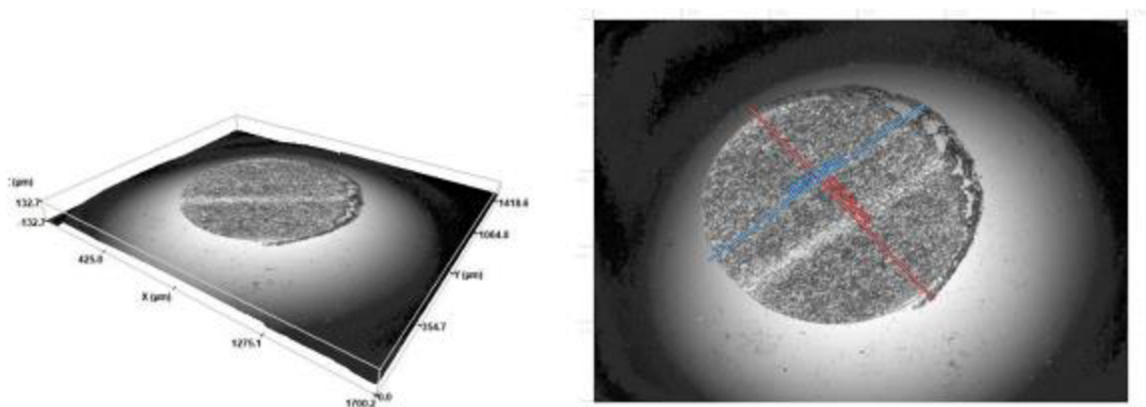
Z obr. 40–43 plyne, že stejně jako u hloubky profilu bylo nejnižších hodnot je dosaženo u vzorků s nitridací. Platí to pro základní materiál i tepelně zpracovaný materiál s nitridací. Šířka opotřebení u těchto vzorků je relativně podobná v průřezu teplot na rozdíl od ostatních typů vzorků. Nejhorší výsledky pak vykazoval SLM základní materiál, kde byly při teplotách 500 a 700 °C zaznamenány největší hodnoty šířky opotřebení profilu.

3.2.2.3 Stanovení opotřebení kuličky Si_3N_4

Opotřebení vzniklé při tribologické zkoušce se neprojevuje pouze na testovaném materiálu, ale také na protikus. V tomto experimentu byla jako protikus zvolena kulička z materiálu Si_3N_4 . Vyhodnocení opotřebení kulového vrchlíku (dle normy ČSN EN 1071-13) bylo taktéž provedeno na konfokálním mikroskopu. Ukázka opotřebení kuličky, viz obr. 44, kde je zobrazena ploška vytvořená kontaktem se základním materiálem s plazmovou nitridací a obr. 45, který zobrazuje opotřebení vzniklé kontaktem s SLM materiálem s nitridací.



Obr. 44 Opotřebení kuličky vzniklé při teplotě RT pro tvářený základní materiál s nitridací



Obr. 45 Opotřebení kuličky vzniklé při teplotě RT pro SLM základní materiál s nitridací

Opotřebení kuličky (pinu) je hodnoceno podle chybějícího objemu, který je možné matematicky dopočítat podle vztahu (6). Před výpočtem je nutné na kuličce změřit nejmenší průměr brusné stopy (A) a rozměr stopy kolmý na nejmenší průměr (B). Objem opotřebení je následně možné vypočítat dle rovnice (6):

$$V_{pin} = \frac{\pi \cdot A^3 \cdot B}{32 \cdot D} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (6)$$

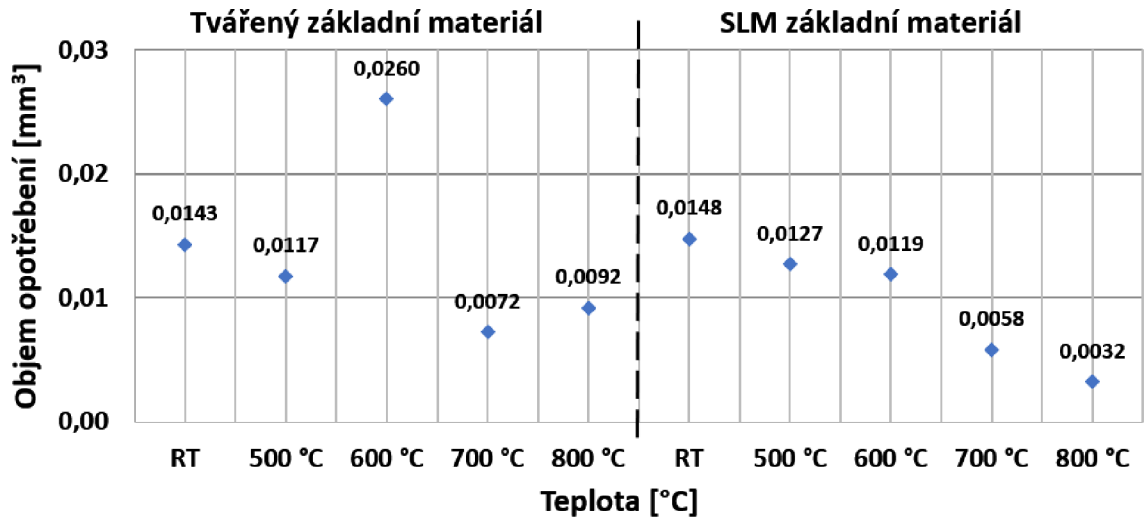
Kde značí:

- V_{ball} – objem opotřebení kulového vzorku [mm³]
 A – nejmenší průměr brusné stopy [mm],
 B – rozměr stopy kolmý na nejmenší průměr [mm],
 D – průměr kuličky [mm].

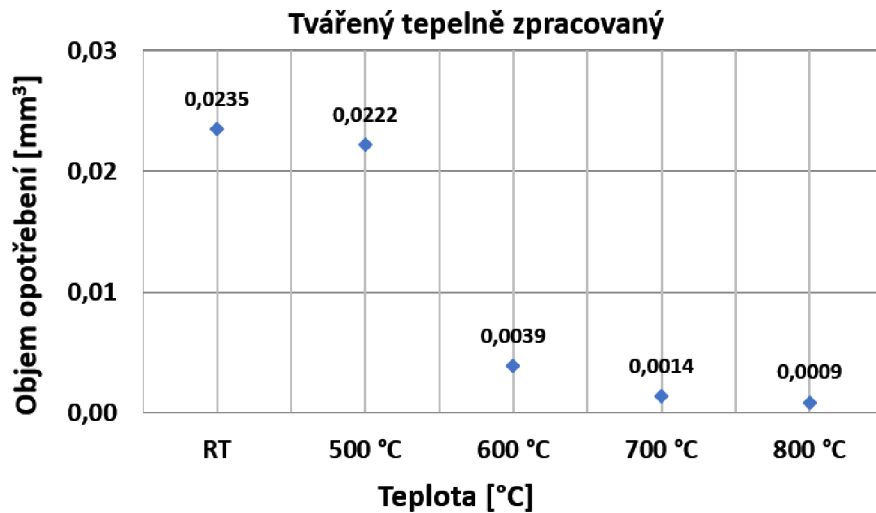
Výsledné hodnoty chybějícího objemu kuličky jsou uvedeny v tab. 15 pro všechny tvářené i 3D tisknuté vzorky metodou SLM. Dále pak jsou tyto hodnoty graficky shrnuty na obr. 46–49 pro dané skupiny vzorků (základní materiál, tepelné zpracování, základní materiál s plazmovou nitridací a tepelné zpracování s plazmovou nitridací).

Tab. 15 Opotřebení kuliček pro veškeré typy vzorků

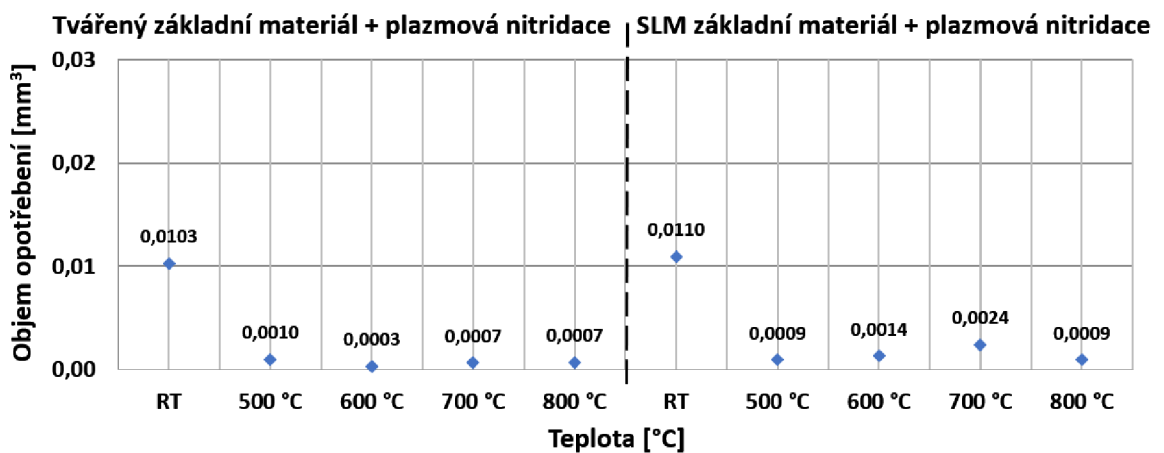
	Tvářený základní materiál					SLM základní materiál				
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
V_{ball} [mm ³]	0,0143	0,0117	0,0260	0,0072	0,0092	0,0148	0,0127	0,0119	0,0058	0,0032
Tvářený tepelně zpracovaný										
Teplota [°C]	RT		500		600		700		800	
V_{ball} [mm ³]	0,0235		0,0222		0,0039		0,0014		0,0009	
	Tvářený základní materiál + plazmová nitridace					SLM základní materiál + plazmová nitridace				
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
V_{ball} [mm ³]	0,0103	0,0010	0,0003	0,0007	0,0007	0,0110	0,0009	0,0014	0,0024	0,0009
	Tvářený tepelně zpracovaný + plazmová nitridace					SLM tepelně zpracovaný + plazmová nitridace				
Teplota [°C]	RT	500	600	700	800	RT	500	600	700	800
V_{ball} [mm ³]	0,0051	0,0026	0,0004	0,0007	-	0,0074	0,0026	0,0006	0,0007	-



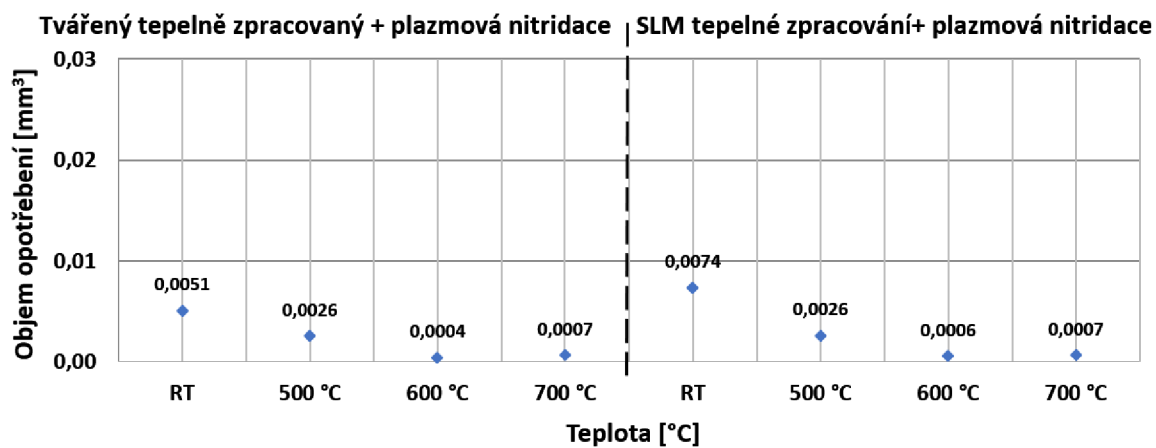
Obr. 46 Objem opotřebení kuličky pro základní materiál tvářený a SLM



Obr. 47 Objem opotřebení kuličky pro tvářený tepelně zpracovaný materiál



Obr. 48 Objem opotřebení kuličky pro tvářený a SLM základní materiál s plazmovou nitridací



Obr. 49 Objem opotřebení kuličky pro tvářené a SLM tepelně zpracované vzorky s plazmovou nitridací

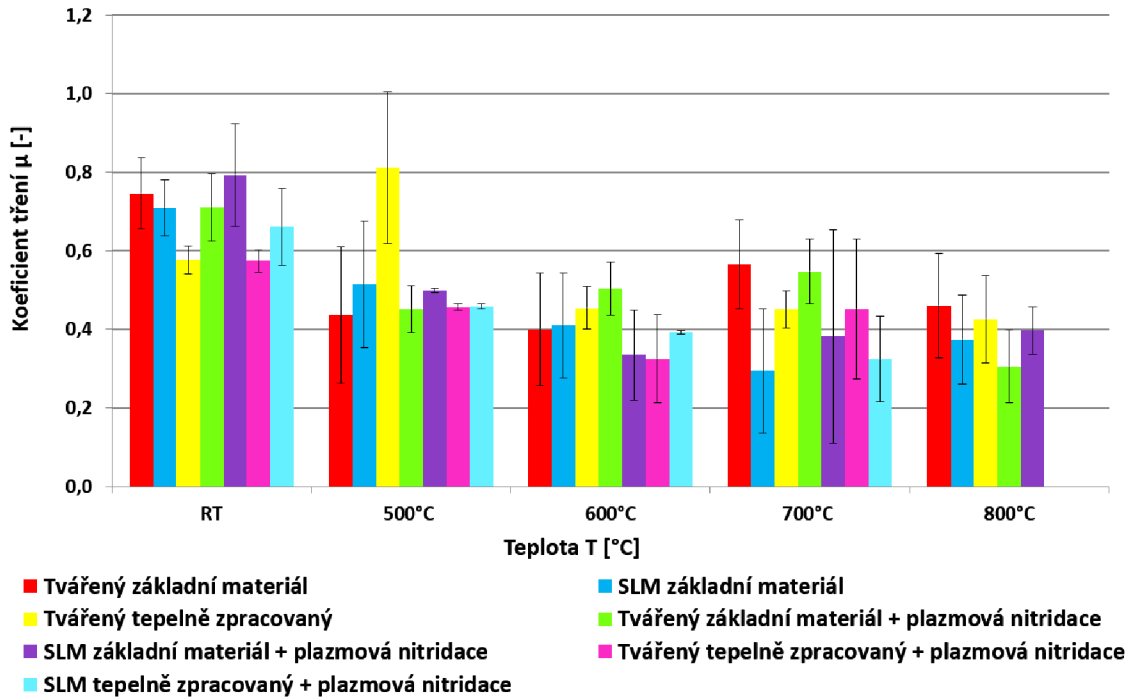
4 Diskuze výsledků

Cílem diplomové práce bylo posouzení vlivu plazmové nitridace na tribologické vlastnosti nitridovaného povrchu materiálu Inconel 718. V rámci experimentální části byla testována míra opotřebení tvářeného a 3D tisknutého materiálu Inconel 718 v základním stavu, po tepelném zpracování a po plazmové nitridaci.

Tribologické zkoušky byly v rámci této práce provedeny za účelem hodnocení třecích vlastností a odolnosti povrchu materiálu vůči opotřebení. Zkoušky byly uskutečněny metodou Ball-on-Disc za teploty okolí RT a při vyšších teplotách 500, 600, 700, 800 °C, výjimkou jsou tepelně zpracované tvářené a SLM vzorky s plazmovou nitridací, u kterých byla zkouška provedla pouze do teploty 700 °C. U nitridovaného tvářeného materiálu bylo provedeno také orientační měření tloušťky nitridované vrstvy. Tloušťka nitridační vrstvy byla cca 11 μm.

Na základě provedených experimentů byl vyhodnocen koeficient tření, třecí stopa na vzorcích a velikost opotřebení kuličky z materiálu Si₃N₄.

Hodnoty koeficientu tření pro jednotlivé vzorky za dané teploty (tvářený a SLM materiál, tvářený tepelně zpracovaný, tvářený a SLM materiál s plazmovou nitridací, tepelně zpracovaný tvářený a SLM materiál s plazmovou nitridací) jsou graficky znázorněny na obr. 50. Koeficient tření při teplotě okolí RT byl v porovnání tvářeného základního materiálu, SLM základního materiálu a tvářeného základního materiálu s plazmovou nitridací téměř bez rozdílu. Při zvýšených teplotách koeficient tření mezi tvářeným základním materiálem a tvářeným základním materiálem s plazmovou nitridací kolísá při jednotlivých teplotách. Tvářený základní materiál při teplotě okolí RT dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu tření, přičemž do teploty 600 °C klesal a při teplotě 700 °C vzrostl. Tvářený základní materiál s plazmovou nitridací obdobně jako tvářený základní materiál dosahoval nejvyšší hodnoty koeficientu tření za teploty okolí RT. Při teplotě 500 °C se snížil a mírně stoupal do teploty 700 °C, kde dosahoval podobné hodnoty, jako tvářený základní materiál. Při teplotě 800 °C pak hodnota koeficientu tření u toho plazmově nitridovaného vzorku klesla na nejnižší hodnotu ze všech měřených vzorků.

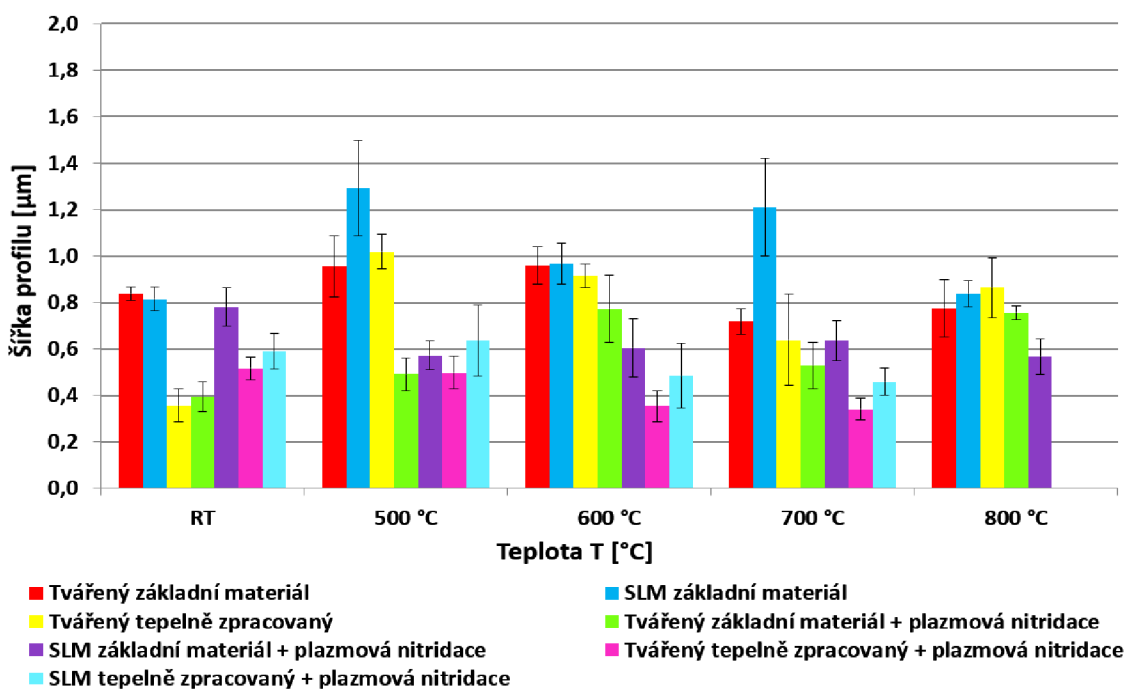


Obr. 50 Změna koeficientu tření v závislosti na zkušební teplotě pro tvářené a SLM vzorky

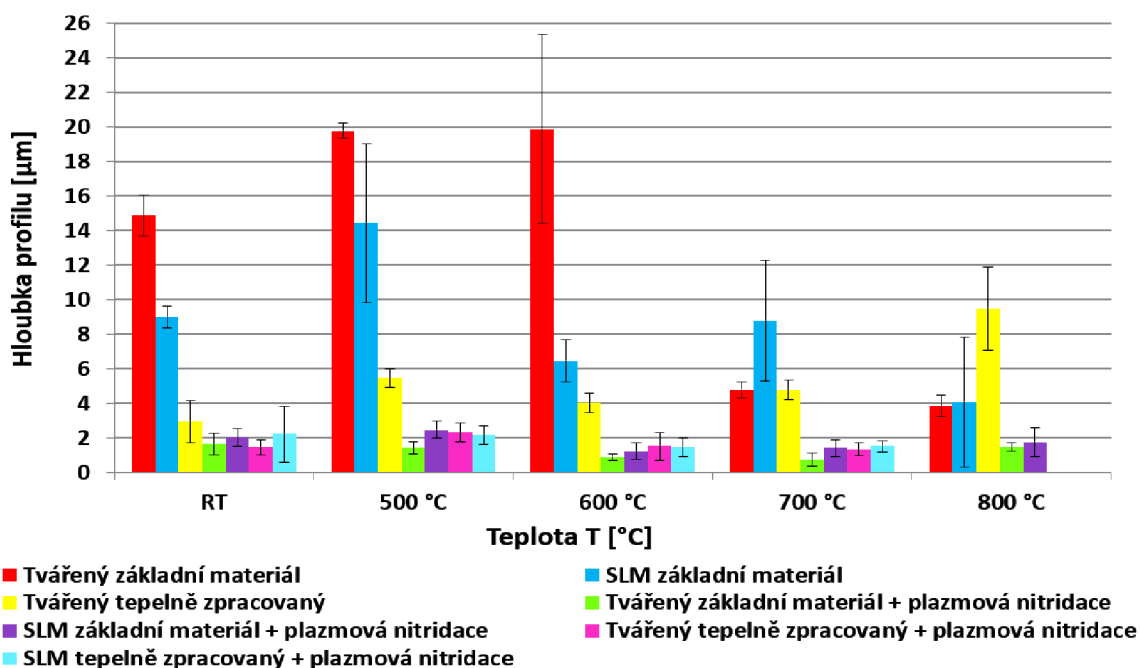
Na obr. 51 a 52 jsou graficky uvedeny hodnoty šířky a hloubky profilu pro jednotlivé skupiny vzorků za dané teploty zkoušky. Při okolní teplotě RT byla zjištěna nejmenší šířka opotřebení (stopy) na vzorku tvářeném s tepelným zpracováním a pro tvářený základní materiál s plazmovou nitridací. Ta byla cca 2x nižší než u vzorku tvářeného, SLM základního materiálu a SLM základního materiálu s plazmovou nitridací. Při teplotě 500 °C byla šířka profilu pro tvářený základní materiál s plazmovou nitridací cca 2x nižší než u tvářeného základního materiálu. Při zvýšených teplotách dosahoval tvářený základní materiál s plazmovou nitridací nižších hodnot šířky opotřebení oproti tvářenému základnímu materiálu. Nejlepších výsledků v průřezu teplot od teploty okolí RT do teploty 700 °C vykazoval vzorek tvářený tepelně zpracovaný s plazmovou nitridací, který dosahoval nejnižší šířky profilu v rozsahu teplot 500–700 °C a zároveň se stoupající teplotou mírně klesala šířka stopy.

V případě hloubky profilu bylo zjištěno, že při okolní teplotě RT vykazuje tvářený základní materiál s plazmovou nitridací cca 7x nižší hloubku opotřebení než tvářený základní materiál a cca 4x nižší než SLM základní materiál. SLM základní materiál s plazmovou nitridací vykazuje při teplotě okolí RT snížení hloubky opotřebení v porovnání s SLM základním materiálem cca 4,5x. V rozmezí teplot 500–600 °C tento rozdíl mezi tvářeným základním materiálem a tvářeným základním materiálem s plazmovou nitridací roste

až cca 12x. Při zvyšující se teplotě tento rozdíl výrazně klesl a při teplotě 700 °C byl tento rozdíl cca 6,5x a při teplotě 800 °C pouze dvojnásobný. Celkově pak veškeré vzorky s plazmovou nitridací mají mnohdy několikanásobně menší hloubku opotřebení oproti vzorkům bez plazmové nitridace. Při sjednocení šířky profilu a hloubky profilu do jednotného měřítka opotřebení vzorků lze konstatovat, že plazmová nitridace výrazně zlepšuje (snižuje) opotřebení vzniklé na kontaktních površích vzorků.

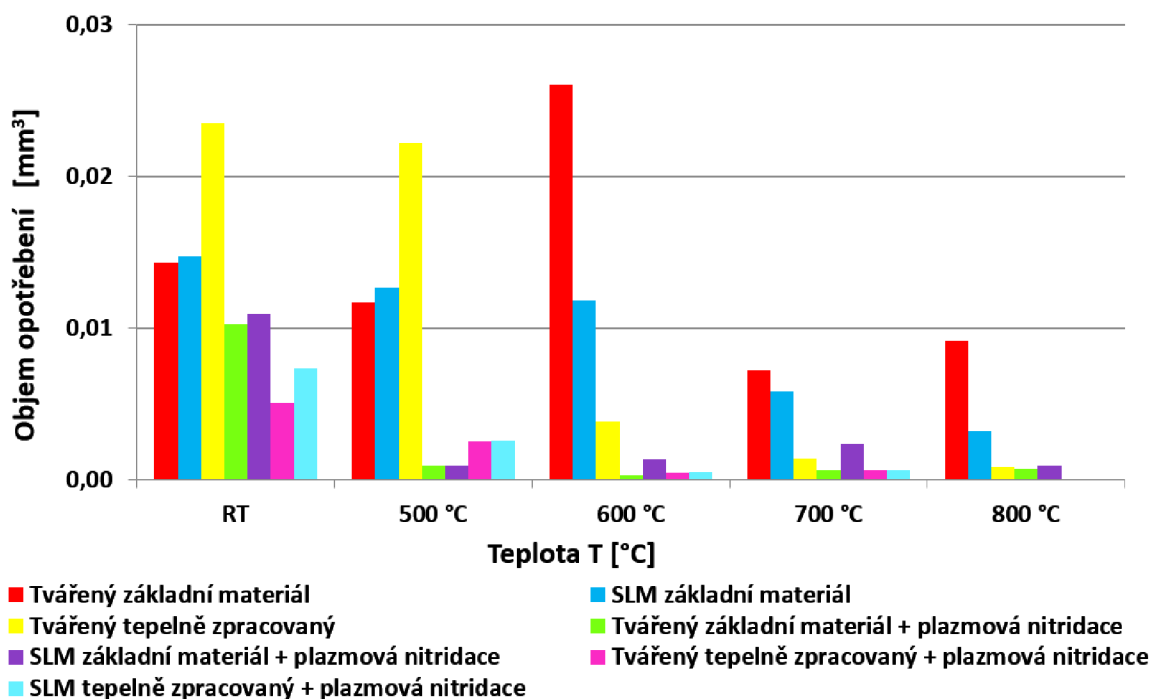


Obr. 51 Změna šířky profilu v závislosti na zkušební teplotě pro tvářené a SLM vzorky



Obr. 52 Změna hloubky profilu v závislosti na zkušební teplotě pro tvářené a SLM vzorky

Závěrečnou hodnocenou veličinou vycházející z tribologického testování je opotřebení Si_3N_4 kuličky, jež byla použita jako protikus. Na obr. 53 jsou graficky zaznamenány hodnoty objemu opotřebení zkušební kuličky pro jednotlivé skupiny vzorků za dané teploty. Obdobně jako u hloubky opotřebení, tak tvářený základní materiál s plazmovou nitridací vykazuje za pokojové teploty RT cca 1,4x nižší hodnoty opotřebení, než je tomu u tvářeného základního materiálu. Při porovnání SLM základního materiálu s SLM základním materiálem s plazmovou nitridací vykazuje nitridovaný vzorek taktéž snížení hloubky opotřebení cca 1,4x. Při vyšších teplotách se tento rozdíl výrazně zvýšil a při teplotě 700 °C je cca desetinásobný.



Obr. 53 Změna objemu opotřebení kuličky v závislosti na zkušební teplotě pro tvářené a SLM vzorky

Lze konstatovat, že plazmová nitridace má výrazný vliv na opotřebení vzniklé při tribologických zkouškách v celé škále teplot. Ke zlepšení došlo u všech čtyř kombinací způsobu výroby a tepelného zpracování.

Výsledky provedených experimentů potvrdily, podobně jako výsledky publikací [34,35], že plazmová nitridace povrchu materiálu Inconel 718 vede ke snížení opotřebení.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo stanovení tribologických vlastností materiálu Inconel 718 a posouzení vlivu plazmové nitridace na vlastnosti jeho povrchu.

Teoretická část práce je věnována popisu typů a vlastností vybraných niklových slitin. Samostatná kapitola je věnována nitridaci s detailnějším popisem postupu plazmové nitridace. Hlavní pozornost je věnována problematice nitridace materiálu Inconel 718. V neposlední řadě jsou popsány tribologické zkoušky.

V experimentální části byl zprvu popsán testovaný materiál (tvářený a SLM) a provedené tepelné zpracování, které bylo použito pro některé skupiny vzorků. Následně byly popsány parametry provedené plazmové nitridace a zhodnocena tloušťka nitridované vrstvy.

Pro možnost posouzení vlivu plazmové nitridace na vlastnosti povrchu materiálu Inconel 718 byly připraveny vzorky z tvářeného materiálu a materiálu vyrobeného metodou SLM. Tribologické zkoušky byly provedeny jak pro vzorky tvářené, a tak pro SLM. Vzorky tvářené byly testovány v základním stavu, po plazmové nitridaci, tepelném zpracování a tepelném zpracování s plazmovou nitridací. SLM vzorky pak v základním stavu, po plazmové nitridaci a po tepelném zpracování s plazmovou nitridací. Testování bylo provedeno při teplotě okolí a za zvýšených teplot.

Získané poznatky lze shrnout do následujících bodů:

- Výsledky šířky opotřebení při teplotě RT u tvářeného základního materiálu s plazmovou nitridací vykazují cca 50 % snížení oproti tvářeným a SLM vzorkům v základním stavu. Při teplotě 700 °C byl tento rozdíl v porovnání s tvářeným materiálem v základním stavu o cca 26 % nižší a pro SLM materiál v základním stavu cca o 56 %.
- Výsledky hloubky opotřebení při teplotě RT u tvářeného základního materiálu s plazmovou nitridací vykazují snížení o cca 86 % hloubky profilu oproti základnímu tvářenému materiálu a vůči SLM základnímu materiálu cca 77 %. Při teplotě 700 °C byl tento rozdíl v porovnání s tvářeným materiálem v základním stavu o cca 85 % nižší a pro SLM materiál v základním stavu cca o 92 %.
- Opotřebení protikusu při teplotě RT pro tvářený materiál s plazmovou nitridací bylo v porovnání s tvářeným a SLM vzorkem v základním stavu o cca 28 % nižší. Při teplotě 700 °C byl tento rozdíl v porovnání s tvářeným materiálem v základním stavu o cca 90 % nižší a pro SLM materiál v základním stavu cca o 88 %.

Literatura

- [1] *Nikl a jeho slitiny Titan a jeho slitiny: SMA – 2. přednáška* [online]. Česká zemědělská univerzita v Praze [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [2] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [4] POLOCH, Adam. *Hodnocení mechanických vlastností při statickém a proměnlivém zatěžování niklové superslitiny Inconel 718 připravené pokročilou technologií DMLS* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85103?show=full>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Fakulta strojní ČVUT v Praze.
- [5] KUBÍN, Martin. *Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti slitiny Ni – typ 718* [online]. Liberec, 2021 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160731/Diplomova_prace_KUBIN.pdf?sequence=1. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní.
- [6] *Alloy 400* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/generate-alloy-pdf/?id=12308>
- [7] *MONEL® alloy 400* [online]. Special Metals Corporation, 2005 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-400.pdf>
- [8] *MONEL® alloy R-405* [online]. Special Metals Corporation, 2004 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-r-405.pdf>
- [9] *MONEL® alloy K-500* [online]. Special Metals Corporation, 2004 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/monel-alloy-k-500.pdf>
- [10] *Nickel Chrome (NiCr) Resistance Alloys* [online]. www.heating-element-alloy.com, 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.heating-element-alloy.com/article/nickel-chrome-resistance-alloys.html%20%5b9>

- [11] Vysokoteplotní slitiny [online]. ČVUT, Fakulta strojní, 2014 [[cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/>
- [12] *Full Record for Micrograph 718* [online]. University of Cambridge: Rolls-Royce University Technology Centre, Department of Materials Science and Metallurgy, 2003 [cit. 2022-04-15].
- [13] SMITH, William. *Structure and properties of engineering alloys*. New York: McGraw-Hill, 1981. ISBN 00-705-8560-1.
- [14] *High-Performance Alloys* [online]. Special Metals, 2008 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://archive.ph/20121208171938/http://www.specialmetals.com/products/index.php#selection-577.0-574.2>
- [15] *INCONEL® alloy 600* [online]. Special Metals Corporation, 2008 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-600.pdf>
- [16] *PRODUCT HANDBOOK OF HIGH-PERFORMANCE NICKEL ALLOYS* [online]. Special Metals Corporation [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/nickel-alloy-handbook.pdf>
- [17] *INCONEL® alloy 625* [online]. Special Metals Corporation, 2008 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
- [18] *INCONEL® alloy 718* [online]. Special Metals Corporation, 2007 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
- [19] TUCHO, Wakshum M., Priscille CUVILLIER, Atle SJOLYST-KVERNELAND a Vidar HANSEN. Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2017, **689**, 220-232 [cit. 2022-04-15]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2017.02.062
- [20] KRAUS, CSC., Ing. Václav. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ A SLINOVÁNÍ PŘEDNÁŠKY. *Docplayer* Dostupné z: <https://docplayer.cz/18081046-Tepelne-zpracovani-a-slinovani-prednasky.html>
- [21] PYE, David. *Practical NITRIDING and Ferritic Nitrocarburizing*. Ohio: ASM International, 2003. ISBN 0-87170-791-8.

- [22] Equilibrium phase diagram for binary Fe-N system presented over T-C coordinate. In: *Www.researchgate.net* [online]. ResearchGate, 2017 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Equilibrium-phase-diagram-for-binary-Fe-N-system-presented-over-T-C-coordinate_fig3_314094894
- [23] FORMANOVÁ, Ludmila. *Vliv kryogenního zpracování na vlastnosti nitridační vrstvy* [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31624/1/DP_Formanova.pdf.
DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ.
- [24] DAĐOUREK, Karel. Vybrané technologie povrchových úprav. *Http://www.kmt.tul.cz/* [online]. 2006 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/09nitridace.pdf
- [25] ROHLÍNKOVÁ, Marie. ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI STŘIŽNÝCH NOŽŮ [online]. BRNO, 2016 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/44401948.pdf>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [26] JÁNSKÝ, Tomáš. *Zlepšení vlastností povrchů slitiny CoCrMo oxidací a nitridací* [online]. PRAHA, 2019 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85097/F2-DP-2019-Jansky-Tomas-DP_Jansky_Tomas.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ.
- [27] FONOVIĆ, Matej. *Nitriding behavior of Ni and Ni-based binary alloys* [online]. Stuttgart, 2015 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: http://www.riteh.uniri.hr/media/filer_public/1d/74/1d74fbd0-e612-4ecc-84fd-b2274f0b36b4/nitriding_behavior_of_ni_and_ni-based_binary_alloys.pdf.
Disertační práce. Univerzita Stuttgart.
- [28] MAKISHI, Takashi a KAZUHIRO Nakata. Surface Hardening of Nickel Alloys by Means of Plasma Nitriding. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A* [online]. 2004, JANUARY 2004, (35 A), 227–238 [cit. 2022-04-15].
- [29] BARÁK, Pavel. *Vliv parametrů plazmové nitridace materiálů 42CrMo4, 34CrMo4 a 50CV4TQS na povrchovou tvrdost nitridační vrstvy* [online]. Liberec, 2005 [cit.

- 2022-04-17]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/79129/V_01706_S.pdf?sequence=1&isAllowed=y. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní.
- [30] NITRIDAČNÍ A BORIDOVACÍ PRÁŠKY. <https://azprokal.cz/> [online]. Srbská 116/4 612 00 Brno, 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://azprokal.cz/cs/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/nitridacni-a-boridovaci-prasky/>
- [31] LETÁK, Radek. *Korozní odolnost slitin neželezných kovů nitridování* [online]. Plzeň, 2021 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/44492>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ.
- [32] *Mikropulzní plazmová nitridace* [online]. Beethovenova 1269/68, 430 01 Chomutov, 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.jimalu.cz/wp-content/uploads/2021/06/pulzni-plazmova-nitridace.pdf>
- [33] Anomální doutnavý výboj. In: *Docplayer* [online]. Král, 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/109981174-Anomalni-doutnavy-vyboj.html>
- [34] MANIEE, Arash, Farzad MAHBOUBI a Reza SOLEIMANI. Improved Hardness, Wear and Corrosion Resistance of Inconel 718 Treated by Hot Wall Plasma Nitriding. *Metals and Materials International* [online]. 2020, **26**(11), 1664-1670 [cit. 2022-04-15]. ISSN 1598-9623. Dostupné z: doi:10.1007/s12540-01900476z
- [35] KOVACI, Halim, Hojjat GHAHRAMANZADEH ASL, Çiğdem ALBAYRAK a Akgün ALSARAN. WEAR PROPERTIES OF PLASMA NITRIDED INCONEL 718 SUPERALLOY. *International Conference on Plasma Surface Engineering* [online]. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2012, **13th**, 333–337 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://wcc.ep.liu.se/index.php/PSE/article/view/462/376%20%5b31>
- [36] *COATINGS TRIBOLOGY: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Second Edition. Sheffield: The University of Sheffield, 2009. ISBN 978-0-444-52750-9.
- [37] BAKALOVA, Totka. VLIV MATERIÁLOVÝCH A TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ OBRÁBĚNÍ NA NAPĚTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ A VLASTNOSTI DYNAMICKY NAMÁHANÝCH STROJNÍCH SOUČÁSTÍ.

- Liberec, 2010. Disertační práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [38] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov: celoštátna vysokoškolská učebnica pre hutnicke a strojárské fakulty vysokých škôl*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia hutníckej literatúry.
- [39] MADĚRA, Jan. *Posouzení mechanických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z materiálu AISI 316L* [online]. Liberec, 2020 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160659>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní.
- [40] *Measurement Good Practice Guide: The Scratch Test: Calibration, Verification and the Use of a Certified Reference Material* [online]. 54. Teddington, Middlesex, United Kingdom, TW11 0LW: National Physical Laboratory, 2002 [cit. 2022-04-15]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: <https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/mgpg54>
- [41] VANÍČEK, David. *Možnosti použití plazmové nitridace pro tvářené a 3D tisknuté díly z materiálu AISI 316L* [online]. Liberec, 2020 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160668>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní.
- [42] SMAZALOVÁ, Eva, Šárka HOUDKOVÁ a Michal SVANTER. Tribological effects of discontinuous Block-on-Ring test. In: *23rd International Conference on Metallurgy and Materials* [online]. METAL, 2014, s. 1004-1010 [cit. 2022-04-15].
- [43] BAKALOVA, Totka, Petr LOUDA, Lukáš VOLESKÝ a Lucie KŘIKLAVOVÁ. *The impact of natural nanoadditiv on the tribological and chemical properties of process fluids* [online]. In: Sinaia: Petroleum-Gas University of Ploiesti Publishing House, 2014, 30thOct. -1stNov.2014, s. 143-148 [cit. 2022-04-15]. ISBN ISBN 978-973-719-570-8. Dostupné z: https://cxi.tul.cz/files/pages/other/V%C3%BDzkumn%C3%A9%20projekty/Preseed/Envitech/05_The%20impact%20of%20natural%20nanoadditiv%20on%20the%20tribological%20and%20chemical%20properties%20of%20.pdf
- [44] IWONA, Sulima. *Schematic of the ball-on-disk wear test system* [online]. In: . 2014 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-ball-on-disk-wear-test-system-25_fig1_269109028

- [45] BURDA, David. Vliv tepelného zpracování na mechanických vlastnosti 3D tisknutého materiálu Inconel 718. Liberec, 2022. Bakalářská práce. Technické univerzita v Liberci - Fakulta strojní.