



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ TĚŽKO O BROTITELNÝCH MATERIÁLŮ

MACHINING OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Varhaník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Matúš Varhaník**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením těžkoobrobitelných materiálů, příčinami jejich zhoršené obrobitelnosti, návrhem experimentálních zkoušek, jejich vyhodnocením.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor problému
- Návrh experimentálních zkoušek
- Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení
- Diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2-50-2.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. AB Sandvik Coromant. Praha. Scientia, s.r.o., 1997. ISBN 91-972299-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.

PÍŠKA, M. a POLZER, A. Wear of coated solid carbide end mills when machining of hardened steels in dry conditions. In: Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.-22.5.2003. ISBN 80-7318-135-56.

SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford University Press, 2005. pp. 651. ISBN 0-1-514206-3.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. Slovensko, Trenčín: TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne. 112 s. ISBN 80-8075-013-0.

BARÁNEK, I. a ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. Trenčín: TnUAD, 2004. 212 s. ISBN 80-8075-013-0.

MARINESCU, I.D. et al. Tribology of abrasive machining processes. William Andrew, Norwich, 2004. pp. 724. ISBN 0-8155-1490-5.

LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed. Willet-VCH, Köln, 2005. p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Globálne hľadisko diplomovej práce bolo zamerané na obrábanie materiálov so zhoršenou obrobiteľnosťou. V teoretickej časti boli rozdelené a špecifikované typy vyššie spomenutých materiálov. Boli uvedené spôsoby klasifikácie a vyhodnocovania obrobiteľnosti. Príčiny zhoršenej obrobiteľnosti boli definované spolu s návrhom možných technologických riešení, ktoré ich eliminujú. Lievikovitou štruktúrou práce bola zabezpečená selekcia problému, ktorou sa zaoberala experimentálna časť. Jednalo sa o sústruženie niklovej superzliatiny Inconel® 718, s cieľom navýšenia produktivity procesu. Nevyhnutými teoretickými predpokladmi k jeho optimalizácii boli poznatky o vhodných typoch materiálu rezného nástroja. Cieľ bol dosiahnutý nahradením povlakovaného spekaného karbidu reznou keramikou typu SiAlON. Rezná hrana definovaného nástroja bola testovaná so zámerom nájdenia vhodného kompromisu medzi trvanlivosťou a objemom odobraného materiálu. Zmerané rezné sily, generované obrábacím procesom referenčnej a optimalizovanej technológie, boli spracované pomocou simulačného softvéru. Následným štatistickým vyhodnotením boli získané podrobnosti o deformácii súčasti vplyvom zaťaženia od rezného nástroja. Záverečným výstupom diplomovej práce je technicko-ekonomické hodnotenie predmetných technologických prístupov.

Kľúčové slová

obrobiteľnosť, ťažkoobrobiteľné materiály, materiál rezného nástroja, sústruženie reznou keramikou SiAlON, rezné sily

ABSTRACT

General perspective of this diploma thesis was aimed at machining of hard-to-machine materials. Theoretical part contains division and specification of these types of materials. Ways of classification and evaluation were also listed. Causes of worsened machinability were defined with the design of possible technological solutions, which eliminates these features. The main target of experimental part was turning nickel-based superalloy Inconel® 718 with the purpose of increase process productivity. Knowledge about appropriate types of cutting tool material and his coating were necessary for process optimization. It was achieved by replacing reference cutting tool material (coated carbide inserts) with SiAlON ceramic. Cutting tool edge was tested with an intention to discover appropriate deal between tool life and volume of material removed. Measured cutting forces, generated by machining of reference and optimize

technology, were processed by using simulation software. Total deformation of workpiece material was statistically evaluated. The conclusion of diploma thesis is technical-economic evaluation of both options.

Key words

machinability, hard-to-machine materials, cutting tool material, turning with Sialon ceramic, cutting forces

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VARHANÍK, M. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktoré tvoria prílohu tejto práce.

V Brne 25. mája 2018

.....

Bc. Matúš Varhaník

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa touto cestou poďakovať vedúcemu diplomovej práce, prof. Ing. Miroslav Píška, CSc., za vedenie a cenné pripomienky pri jej vypracovaní. Poďakovanie rovnako patrí ďalším pracovníkom Ústavu strojárenskej technológie FSI Brno, menovite Jiří Čech a Dagmar Polzerová. Ďakujem spoločnosti IMI CCI Brno, predovšetkým zamestnancom Ing. Pavel Klimčík a Ing. Radek Potůček, za ich rady a podporu pri vykonaní experimentu. Za pomoc pri konzultácií nižšie uvedenej problematiky, ďakujem Ing. Petr Vrbka, zo spoločnosti Kennametal ČR.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA	6
ČESTNÉ PREHLÁSENIE	7
POĎAKOVANIE	8
OBSAH.....	9
ÚVOD	11
1 OBROBITEL'NOSŤ MATERIÁLOV	12
1.1 Hodnotenie obrobiteľnosti	13
1.2 Skúšky obrobiteľnosti.....	14
2 DELENIE ŤAŽKOBRITEL'NÝCH MATERIÁLOV	16
2.1 Nehrdzavejúca oceľ	16
2.1.1 Feritická a martenzitická nehrdzavejúca oceľ.....	17
2.1.2 Austenitická nehrdzavejúca oceľ	18
2.1.3 Duplexná nehrdzavejúca oceľ	19
2.1.4 Zásady pri obrábaní nehrdzavejúcich ocelí	20
2.2 Titán a jeho zliatiny	21
2.2.1 Zliatiny alfa	22
2.2.2 Zliatiny beta	22
2.2.3 Heterogénna α - β zliatina	22
2.2.4 Obrobiteľnosť titánových zliatin	23
2.3 HRSA materiály	23
2.3.1 Obrobiteľnosť zliatin na báze kobaltu	24
2.3.2 Obrobiteľnosť zliatin na báze niklu	25
3 SUPERZLIATINA NIKLU – INCONEL® 718.....	27
3.1 Inconel 718 ako konštrukčný materiál.....	27
3.2 Obrobiteľnosť Inconelu 718	29
3.2.1 Rezné sily pri sústružení Inconelu 718.....	30
3.2.2 Aplikácia procesných kvapalín	32
3.2.3 Tepelné spracovanie Inconelu 718	34
4 VOĽBA MATERIÁLU REZNÉHO NÁSTROJA.....	36
4.1 Spekaný karbid	39
4.1.1 Mikroštruktúra rezného materiálu v závislosti od danej skupiny.....	40
4.1.2 Obrábanie superzliatiny spekaným karbidom.....	41
4.2 Polykryštalický kubický nitrid bóru	42
4.3 Rezná keramika	44

4.3.1 Vlastnosti oxidickej keramiky.....	45
4.3.2 Vlastnosti neoxidickej keramiky.....	45
4.3.3 Vystužená keramika	46
4.3.4 Zhrnutie vlastností rezných keramik.....	46
4.3.5 Nasadenie reznej keramiky pri obrábaní Inconelu 718.....	47
4.4 Opatrenie rezného nástroja	49
4.4.1 Mechanizmy a formy opotrebenia nástroja.....	50
4.4.2 Typické opotrebenie nástroja pri obrábaní Inconelu 718.....	52
5 REALIZÁCIA EXPERIMENTU	54
5.1 Definícia použitých strojov a prístrojov.....	54
5.2 Testovaný rezný nástroj a definícia podmienok obrábania	56
5.2.1 Definícia sorty KYS 30	57
5.2.2 Definícia sorty KYS 25	58
5.3 Návrh experimentálnej skúšky	58
5.3.1 Odber dát pri sústružení Inconelu 718	58
5.3.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt.....	59
5.4 Prezentácia nameraných dát	59
5.5 Simulácia v softwari ANSYS Workbench.....	68
5.5.1 Postup výpočtu.....	70
5.5.2 Prezentácia vypočítaných hodnôt.....	72
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOTENIE	75
6.1 Technické hodnotenie.....	75
6.2 Ekonomické hodnotenie.....	77
7 DISKUSIA	79
7.1 Návrh pokračovania riešenia	79
ZÁVER	80
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	81
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	89
ZOZNAM PRÍLOH.....	91

ÚVOD

Už v praveku počas doby železnej, kedy sa bežne začali používať železné nástroje, ľudstvo zistilo, že rozvoj jednotlivých buniek spoločnosti, vtedajších kmeňov, bude zabezpečený zdokonaľovaním nástrojov určených na lov či dobývanie nových území.

Rovnako v dnešnej technicky vyspelej dobe mnohé aplikácie leteckého, chemického, automobilového či vojenského priemyslu kladú čoraz vyššie požiadavky na charakteristiky mechanických vlastností a spoľahlivosti jednotlivých strojných súčastí, zostáv a konštrukcií. S vývojom nových materiálov, ktoré spĺňajú konštrukčne nevyhnutné charakteristiky pre dané aplikácie, prichádza otázka, ako tieto materiály spracovávať ekonomicky, ekologicky a s efektívnym využitím ľudských zdrojov. Ďalším nemenej dôležitým aspektom v dnešnej ekonomicky turbulentnej dobe je stabilita výrobného procesu. Iba kombináciou vyššie spomenutých vlastností dokážeme zabezpečiť udržateľný rozvoj technických riešení a tým aj celkové napredovanie spoločnosti.

Takmer všetky procesy spojené so spracovaním akéhokoľvek druhu materiálu, od plastu cez kovy a nekovy, sa dotýkajú oboru strojárenskej technológie. Tento aspekt bol jedným z dôvodov, prečo som sa rozhodol zamerať svoje štúdium práve na túto oblasť strojného inžinierstva. K prevedeniu konštrukčného návrhu v reálny produkt využívame mnohé technologické procesy, počnúc odlievaním či tvárnením materiálu, trieskovým obrábaním, chemicko-tepelným a tepelno-chemickým spracovaním, končiac finalizáciou zostáv za pomoci zvarovacích či montážnych technológií s následnou povrchovou úpravou. Na všetky uvedené technológie má zásadný vplyv typ použitého materiálu. Materiálová charakteristika sa odvíja od mikro-zloženia a obsahu jednotlivých prvkov, od štruktúr a ich percentuálneho zastúpenia v danom materiáli. Oblasť, na ktorú sa v mojej záverečnej práci budem zameriavať, je spojená s obrobiteľnosťou, respektíve zhoršenou obrobiteľnosťou materiálu. Tie sa vo všeobecnosti vyznačujú týmito vlastnosťami – vysoká tvrdosť, nízka hustota, čo vedie k nízkej hmotnosti materiálu a korózna odolnosť. Experimentálna časť práce sa bude zaoberať použitím reznej keramiky pri obrábaní niklovej superzliatiny.

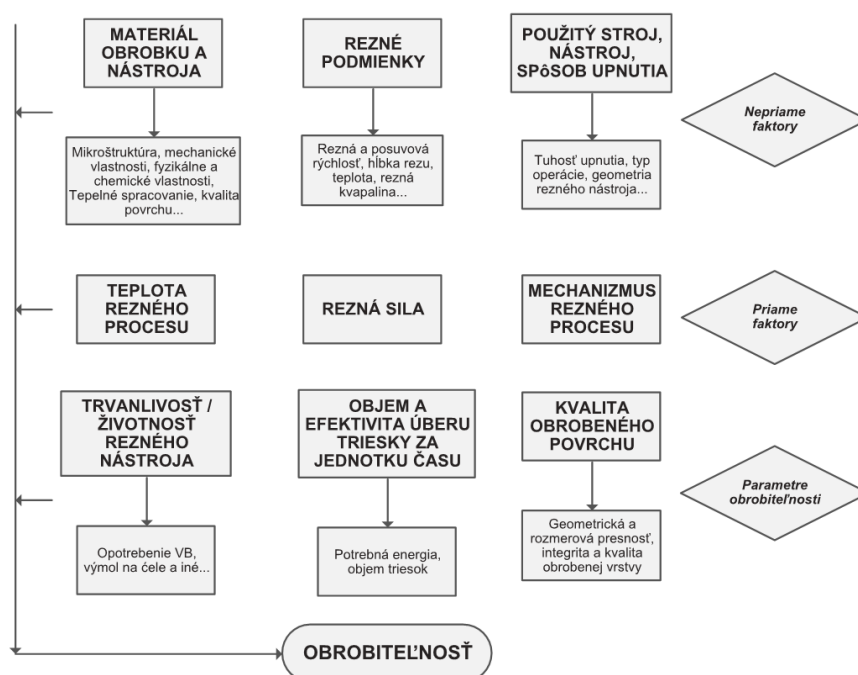
Z vyššie uvedených dôvodov je nevyhnutné skupinu ťažkoobrobiteľných materiálov ďalej skúmať a študovať s cieľom lepšieho prebádania jednotlivých skupín vlastností a následného pochopenia generovaných príčin a dôsledkov ako celku. Štúdium by tiež malo reflektovať požiadavky trhu, medzi ktoré patria ekonomickosť a stabilita jednotlivých procesov, ekologické hľadisko spracovania materiálu, ale tiež následná likvidácia nebezpečných látok, ktoré boli k aplikácii danej technológie použité.

1 OBROBITEL'NOSŤ MATERIÁLOV

Obrobiteľnosť materiálu je v strojárenskej technológii frekventovaným pojmom. Môžeme tvrdiť, že obrobiteľnosť materiálu vyjadruje ako „ľahko“ prípadne ako „ťažko“ dokážeme daný polotovar obrobiť pomocou daného rezného nástroja a technológie. Túto vlastnosť priamo či nepriamo ovplyvňuje množstvo vstupných hodnôt, na ktorých sa podieľajú [1–4]:

- mikroštruktúra obrábaného materiálu,
- chemické zloženie obrábaného materiálu,
- fyzikálne a mechanické vlastnosti obrábaného materiálu,
- spôsob výroby a tepelné spracovanie obrábaného materiálu,
- metóda obrábania,
- geometria a materiál nástroja,
- pracovné prostredie.

Prienikom týchto vlastností získavame údaj, ktorý pojednáva o celkovej obrobiteľnosti. Hodnotenie prebieha porovnávaním referenčnej - etalónovej hodnoty k ďalším materiálom za presne určených technologických podmienok. Ako hlavné kritérium môžeme voliť kvalitu obrobenej vrstvy, množstvo odobraného materiálu za danú časovú jednotku, životnosť rezného nástroja, hodnoty maximálnych rezných síl, teplotu a tvar triesky, energiu potrebnú na úber vopred definovanej vrstvy a podobne. K lepšiemu pochopeniu vzťahov medzi vstupnými a výstupnými veličinami obrobiteľnosti nám pomôže diagram faktorov obrobiteľnosti (Obr. 1.1) [2–4].



Obr. 1.1 Faktory ovplyvňujúce obrobiteľnosť materiálu [2].

„Z hľadiska technológie obrábania je obrobiteľnosť jednou z najdôležitejších vlastností materiálu, a je hlavným činiteľom pre voľbu rezných podmienok a pre funkciu nástroja pri všetkých metódach obrábania [5].“

1.1 Hodnotenie obrobiteľnosti

Voľba etalónového materiálu môže obsahovať viacero kvalitatívnych či kvantitatívnych kritérií. Etalónom môže byť materiál, ktorý vykazuje pre zvolenú technológiu najpriaznivejšie výsledky, prípadne môže byť zvolený materiál s najvyšším kvantitatívnym zastúpením v sortimente výrobnjej spoločnosti. Hodnotené materiály sú následne klasifikované ako odklon od vlastností etalónu. Výsledky môžu byť prezentované pomocou grafov alebo tabuliek. Hodnotenie obrobiteľnosti musí byť úzko previazané s hodnotením rezivosti nástroja. Rezivosť je z veľkej miery vlastnosťou nástrojového materiálu. Z hľadiska charakteristík je možné obrobiteľnosť, respektíve rezivosť rozdeliť na absolútnu a relatívnu [5, 6, 7].

- Absolútna obrobiteľnosť – je charakterizovaná funkčným vzťahom alebo určitou veľkosťou danej veličiny, ktorá charakterizuje obrobiteľnosť. Obvyklou absolútnou veličinou býva objem odobraného materiálu či veľkosť obrobenej plochy [6,8];
- Relatívna obrobiteľnosť – je popisovaná bezrozmernými číslami, ktoré udávajú pomer veľkosti určitej vlastnosti, prípadne súhrnu viacerých vlastností obrobiteľnosti k etalónovému materiálu [5].

Ako príklad je uvedená, tabuľka (Tab. 1.1) skupín materiálov a tried obrobiteľnosti spolu so značením, ktorá je uvedené v Strojníckych Tabuľkách [6]. Tieto tabuľky boli spracované na základe dlhodobých skúšok obrobiteľnosti a rozdelené do jednotlivých tried. Kritériom bola závislosť reznej rýchlosti na trvanlivosti po dobu 15 minút. Túto závislosť uvádza vzťah indexu obrobiteľnosti i_o (1.1) uvedený v literatúre [8].

$$i_o = \frac{V_{c15}}{V_{c15et}} \quad (1.1)$$

Tab. 1.1 Materiály a triedy obrobiteľnosti [6, 8].

Druh materiálu	Kategória materiálu	Trieda obrobiteľnosti etalónového materiálu	Rozsahy tried obrobiteľnosti	Etalónový materiál
Zliatiny	a	10a	1–14	42 2420
Ocele	b	14b	1–20	12 051.1
Ťažké neželezné kovy a zliatiny	c	11c	2–15	42 3213.21
Ľahké neželezné kovy a zliatiny	d	10d	4–16	42 4380.11

Pri feritickej oceli má najzávažnejší vplyv na jej obrobitelnosť obsah uhlíku. So stúpajúcim obsahom tohto prvku sa obrobitelnosť feritickej ocele zhoršuje. Síra je naopak prvok ktorý má priaznivú afinitu k obrobitelnosti, čo sa spolu s nízkym obsahom uhlíku odzrkadľuje na automatových oceliach. Všeobecný vplyv legujúcich prvkov na obrobitelnosť ocele je uvedený v tabuľke (Tab 1.2) [9].

Tab. 1.2 Vplyv legujúcich prvkov na obrobitelnosť ocele [9].

Pozitívny vplyv	Pb, S, P, C (0,3–0,8) %
Negatívny vplyv	Mn, Ni, Co, Cr, V, Mo, Nb, W C < 0,3 %, C > 0,6 %

1.2 Skúšky obrobitelnosti

Z časového hľadiska sa skúšky rozdeľujú na dlhodobé a krátkodobé. Krátkodobé skúšky obrobitelnosti sú rozdelené v závislosti na charaktere danej metódy na priame a nepriame. Priame metódy krátkodobých skúšok obrobitelnosti sú založené na požiadavke obrábacieho procesu. Pri nepriamych skúškach využívame poznatky spojitosti mechanicko-fyzikálnych vlastností s parametrom obrobitelnosti [5, 7, 4].

Dlhodobá skúška obrobitelnosti je v podstate iba jedna. Kvalitatívnym kritériom je hodnota reznej rýchlosti. Používané technologické operácie pre tento druh experimentu sú sústruženie alebo frézovanie vopred dohodnutými, konštantnými reznými podmienkami. Typ a geometria nástroja je taktiež konštantná. Rezné rýchlosti sú odstupňované a technologický proces je zastavený a vyhodnotený na medzi optimálneho otupenia reznej hrany. Pre relevanciu skúšky je vhodné zvoliť aspoň 3-4 stupne reznej rýchlosti. Sledovaným parametrom opotrebenia je opotrebenie chrpta rezného nástroja VB [5].

Proces sa vyhodnocuje na základe notoricky známych vzťahov (1.2), závislosti trvanlivosti rezného nástroja na reznej rýchlosti, publikovaných Taylorom začiatkom dvadsiateho storočia. Dlhodobá skúška obrobitelnosti je považovaná za elementárny typ skúšky a na základe jej výsledku sa hodnotí miera objektivity ostatných skúšok [5].

$$T \cdot v_c^m = c_T \quad (1.2)$$

Rezné materiály dnešných dní predbehli možnosti obrábacích strojov. Aj preto počas dlhodobých skúšok obrobitelnosti dochádza k veľkým úberom testovaného materiálu, s čím súvisia zvýšené náklady na potrebnú energiu a obsluhu stroja. Ekonomické hľadisko a rovnako hľadisko efektivity krátkodobých testov obrobitelnosti je výrazne výhodnejšie v porovnaní s testami dlhodobými. Stanovenie výsledkov je rýchle a dostatočne presné pre rôzne aplikácie (napríklad rýchle zatriedenie materiálov do skupín). Toto sú dôvody, prečo sme ochotní prijať menšiu mieru objektivity

krátkodobých skúšok oproti skúškam s vyššou relevanciou no zároveň vyššou časovou a finančnou náročnosťou [4, 5].

Priame metódy zisťovania parametru obrobitel'nosti počas krátkodobých testov, sú [5, 7, 10]:

- čelná krátkodobá skúška,
- mikroskúška trvanlivosti,
- zníženie miery opotrebenia,
- použitie nástroja so zníženou rezivosťou,
- zvýšenie reznej rýchlosti,
- skúška konštantným tlakom podľa Boulgera.

Medzi nepriame metódy zisťovania parametru obrobitel'nosti, počas krátkodobých skúšok, zaraďujeme [5]:

- meranie síl pri obrábaní – takzvaná „dynamická metóda,“
- meranie tvrdosti obrobku,
- mikrometrická metóda (pri rovnakej hodnote drsnosti),
- hodnotenie tvaru triesky,
- metóda obrobitel'nosti podľa Leyensettera,
- vrtanie pri konštantom tlaku,
- hodnotenie na základe teploty rezného procesu,
- meranie hĺbky spevnenej vrstvy.

2 DELENIE ŤAŽKO OBRÁBATEĽNÝCH MATERIÁLOV

Príčiny spôsobujúce zhoršenú obrábateľnosť môžu mať chemický alebo fyzikálny charakter [4,11]:

- chemické zloženie a vplyv jednotlivých legúr,
- tvar a tvorba triesky,
- chemická reaktivita materiálu vzhľadom k reznému nástroju,
- teplo generované pri procese rezania – tepelná vodivosť materiálu (s nízkou tepelnou vodivosťou narastá množstvo generovaného tepla),
- primárne mechanické vlastnosti materiálu (tvrdosť, húževnatosť),
- sekundárne mechanické vlastnosti materiálu – spôsobené samotným procesom obrábania (mechanické spevnenie povrchovej vrstvy).

Uvedené charakteristiky majú vplyv na náročnosť obrábacieho procesu či už z hľadiska potrebnej energie, veľkosti rezných síl, alebo životnosti nástrojov. V zásade je možné rozdeliť ťažkoobrábateľné materiály na tri hlavné skupiny. Jednou sú nehrdzavejúce ocele, ďalšou sú zliatiny a superzliatiny titánu a poslednou kategóriou, tou ktorej sa bude týkať experimentálna časť tejto diplomovej práce, sú zliatiny a superzliatiny niklu, ktoré sú podskupinou žiaruvzdorných HRSA (*heat resistant super alloys*) materiálov [12].

2.1 Nehrdzavejúca oceľ

Legovaná oceľ obsahujúca minimálne 11,5 % chrómu, sa nazýva nehrdzavejúcou. Pri prekročení daného obsahu chrómu v tuhom roztoku dochádza ku skokovému nárastu rezistencie materiálu voči elektrochemickej korózii v oxidačnom prostredí. Tento jav je spôsobený tým, že minimálny 11,5 % obsah legúry chrómu je dostačujúci na to, aby sa na povrchu materiálu vytvorila pasivačná vrstva. Túto kategóriu ocelí upravuje norma ČSN EN 10088. Typickým znakom nehrdzavejúcich ocelí je nízky obsah uhlíku (nižší ako 0,08 %), s výnimkou ocelí s martenzitickou štruktúrou. Nízky obsah uhlíku musí byť zaručený z dôvodu vyššej difúznej rýchlosti voči chrómu. Vysoká difúzna rýchlosť uhlíku v kombinácii s jeho vyšším percentuálnym zastúpením by mohla spôsobovať zníženie obsahu chrómu v tuhom roztoku, čoho následkom by bola nižšia korózna odolnosť. Ďalším problémom pri zvýšenom obsahu uhlíku je nukleácia medzikryštalickej korózie vyskytujúca sa hlavne po zvarovaní v TOO (tepelne ovplyvnená oblasť). Pokiaľ by sme nedokázali v oceli zaručiť dostatočne nízky obsah uhlíku, je možné tento problém eliminovať legovaním prvkami s vyššou afinitou k uhlíku než je afinita k chrómu. Týmto bude zaručené, že obsiahnutý uhlík sa naviaže na dané prvky (Nb, Ta, Ti) a dôjde k precipitácii karbidov. Takýto typ materiálu sa nazýva stabilizovaná nehrdzavejúca oceľ [9, 13].

Vplyv legujúcich prvkov, má zásadný dopad na výslednú štruktúru nehrdzavejúcich ocelí a následne aj obrábiteľnosť. Legúry delíme na austenitotvorné a feritotvorné prvky. Pri obsahu chrómu okolo 12 % sa uzatvára v binárnom diagrame železo – uhlík, oblasť austenitu. Z tohto dôvodu, nedôjde pri zliatinách s vyšším obsahom chrómu k prekryštalizácii na austenit a výsledná štruktúra bude feritická s vylúčenými karbidmi. Pri obsahu chrómu nižšom ako 12 % dochádza k javu samokaliteľnosti a austenit sa pri chladnutí transformuje na tvrdú martenzitickú štruktúru. Oblasť austenitu rozširujú prvky ako nikel, dusík, mangán a uhlík. Nikel je, mimo chrómu, druhým najdôležitejším prvkom v tejto skupine ocelí. Naopak feritotvornými prvkami sú chróm, molybdén, wolfrám, vanád a kremík. Na základe vzniknutej štruktúr, uvedená norma ČSN EN 10088 delí nehrdzavejúce ocele na tieto typy [13]:

- feritické,
- martenzitické a vytvrditeľné,
- austenitické,
- duplexné ocele s austeniticko-feritickou štruktúrou.

Typických zástupcov jednotlivých typov ocelí uvádzame v tabuľke (Tab. 2.1), ktorá je zostavená na základe literatúry [14].

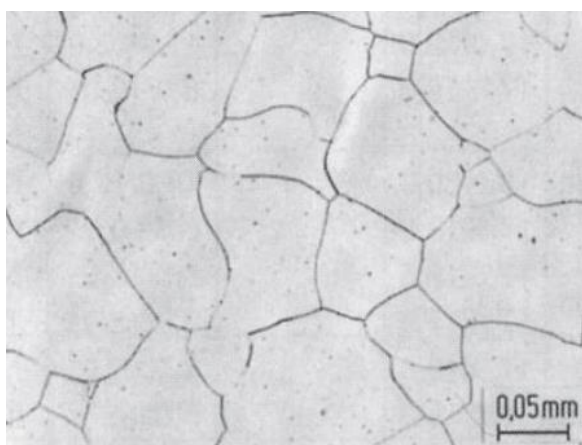
Tab. 2.1 Vybrané typy nehrdzavejúcich ocelí [14].

Vybraní zástupcovia daného materiálu	Feritická štruktúra	Martenzitická štruktúra	Austenitická štruktúra	Duplexná štruktúra
	X6Cr13, X6Cr17, X3CrTi17, X6CrMoS17	X12Cr13, X20Cr13, X30Cr13, X17CrNi16-2	X2CrNi19-11, X6CrNiTi18-10, X5CrNiMo17-12-2, X6CrNiMoTi17-12-2	X2CrNiMoN22-5-3

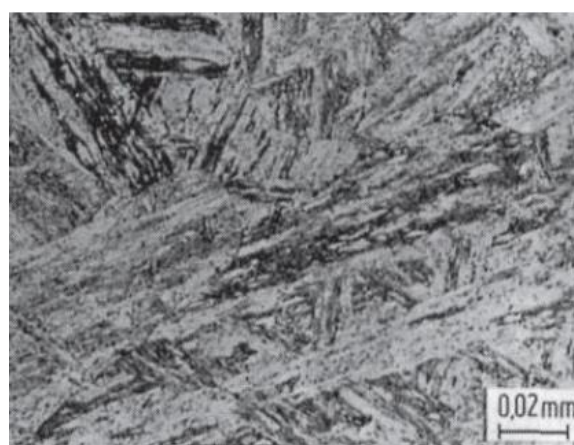
2.1.1 Feritická a martenzitická nehrdzavejúca oceľ

Z hľadiska použitia má každý typ ocele iné aplikačné schopnosti. Z pohľadu obrábiteľnosti sú vlastnosti oboch typov ocele podobné. Obsah uhlíku nehrdzavejúcej martenzitickej ocele sa bežne pohybuje od 0,08 až po 1 %. Aby boli zaručené ich odolnostné vlastnosti proti elektrochemickej korózii, musí byť obsah chrómu zvýšený na úroveň 17–19 %. Typickým tepelným spracovaním je kalenie, za ktorým musí byť bezpodmienečne zaradené popúšťanie na teplote zhruba 200–300 °C. Takto tepelne spracovaná nehrdzavejúca oceľ s martenzitickou štruktúrou dosahuje tvrdosť až 58 HRC. Pre zvýšenie plastických vlastností a húževnatosti sa zaraďuje sekundárne popustenie materiálu na teplote 600 až 700 °C. Typickými aplikáciami martenzitickej ocele je výroba čepelí, chirurgických nástrojov, časti vodných strojov a sú tiež vhodné

pre nasadenie v morskej vode. Feritické ocele majú uzavretú oblasť austenitu, preto sa pri ohreve feritická štruktúra nepremení na austenit, z čoho vyplýva, že tento typ ocele je nekaliteľný. Pri ohreve a následnom chladnutí materiálu nenastávajú objemové zmeny, preto sa s výhodou používajú ako žiaruvzdorné. Nevýhodou týchto ocelí je známa teplota 475 °C, pri ktorej dochádza k maximu krehnutia. Praktický význam tohto poznatku je dôležitý hlavne pri zvarovaní. U ocele s nízkym obsahom uhlíku a obsahom chrómu 24 % až 30 % je krehnutie výrazne potlačené. Typickými aplikáciami feritickej ocele sú hriadele čerpadiel, parné a vodné turbíny či časti kotlov. Výhodou je ich cena, ktorá je nízka aj vďaka nízkemu obsahu niklu. Obrázky (Obr. 2.1, 2.2), prezentujú štruktúru feritickej a martenzitickej nehrdzavejúcej ocele [13,15].



Obr. 2.1 Typická štruktúra feritickej nehrdzavejúcej ocele [12].



Obr. 2.2 Typická štruktúra martenzitickej nehrdzavejúcej ocele [12].

Obrobiteľnosť feritickej a martenzitickej nehrdzavejúcej ocele, ako sme uviedli vyššie, je podobná a v porovnaní s ostatnými ťažko-obrobiteľnými materiálmi takmer bezproblémová. Podľa stupňa obrobiteľnosti sú zaradené medzi materiály, kde je obrobiteľnosť zrovnateľná s nízkolegovanou ocelou. Táto skupina je podľa normy ISO 513 označená písmenom P. Martenzitická oceľ sa obrába v nekalenom stave. Obrobiteľnosť feritickej ocele môžeme zvýšiť obsahom síry, ktorá má dobré mazacie schopnosti. Na druhej strane obsah síry zhoršuje jej odolnostné charakteristiky voči korózii. Pri obrábaní dochádza k opotrebeniu chrbta nástroja a tvorbe výmoľu na čele. Pri nižších rezných rýchlostiach sa môžeme stretnúť s tendenciou tvorby nárazku na reznej hrane [9, 15].

2.1.2 Austenitická nehrdzavejúca oceľ

Tento typ materiálu predstavuje najviac používanú skupinu nehrdzavejúcich ocelí. Najbežnejšie chemické zloženie je 18 % Cr a 8 % Ni, tieto ocele sú označované ako typ 18/8. Vyššiu odolnosť voči korózii zaručí prídanie 2–3 % molybdénu. Takto legovaná oceľ je označovaná ako kyselinovzdorná. Obyčajne sa dodávajú v stave

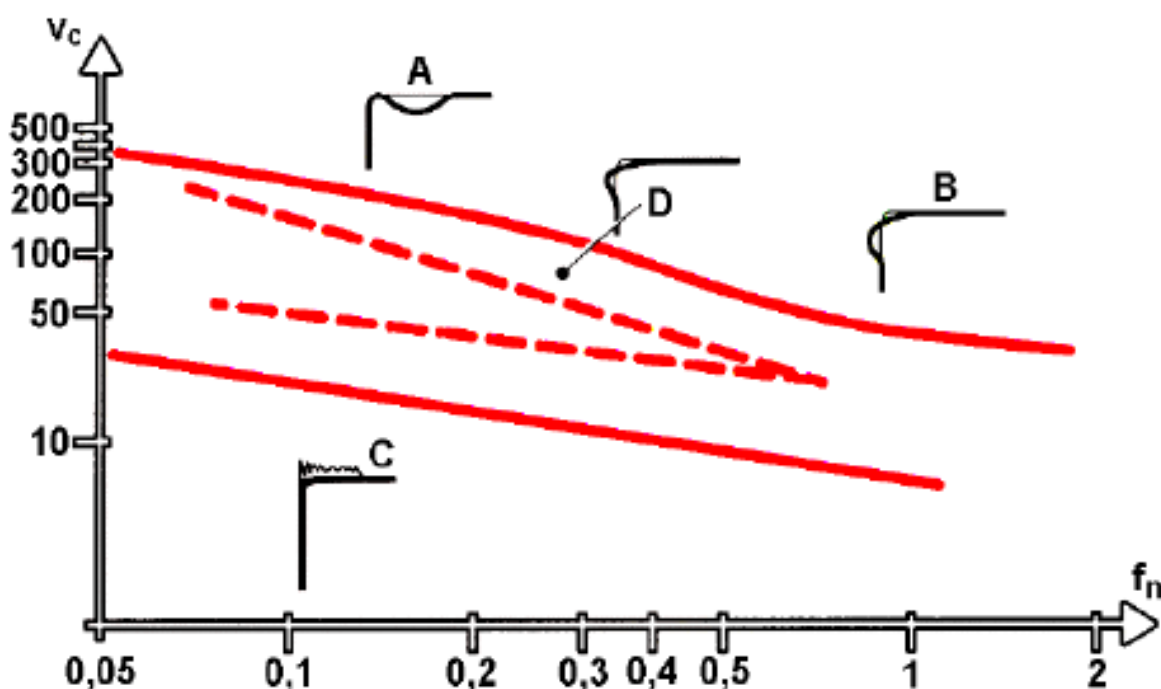
žíhanom na mäkko alebo ťahané za studena. Z hľadiska obröbitel'nosti je tento stav výhodný hlavne čo sa týka integrity obröbenej plochy. Austenitickú štruktúru charakterizuje vysoký efekt spevňovania za studena a nízka tepelná vodivosť. Spevňovanie za studena je z veľkej časti spôsobené tým, že dochádza k premene austenitickej štruktúry na martenzit, vplyvom vysokých deformačných rýchlostí. Vytvrdená vrstva dosahuje tvrdosť 400–500 HB a hĺbku okolo 0,1 mm. Tieto charakteristiky spôsobujú značné problémy pri obrábaní. K rezu musí dochádzať pod spevnenou vrstvou materiálu za konštantnej hĺbky. Odporúča sa voliť pozitívnu geometriu rezného nástroja, čo znižuje rezné odpory a zabezpečí kontrolovateľnejší odchod triesky. Odrezávaný materiál tvorí húževnatú dlhú a spojitú triesku. Pri obrábaní dochádza k problémom s odlupovaním povlaku a vytrhávaním substrátu rezného materiálu, čo je spôsobené odchodom vytvrdenej triesky po čele nástroja. Prejavuje sa tiež adhézne opotrebenie a vznik nárazku, čoho dôsledkom môže byť až krehký lom nástroja. Vplyvom nízkej tepelnej vodivosti je čelo nástroja vystavené vysokým teplotám, čo spôsobuje problémy s tvrdosťou rezného materiálu a tiež s jeho chemickou stabilitou. Tento typ materiálu je podľa ISO 513 zaradený do skupiny M. Typické uplatnenie si austenitická nehrdzavejúca oceľ vďaka svojim výborným koróziivzdorným vlastnostiam a dobrej zvariteľnosti nachádza v aplikáciách chemického, farmaceutického či potravinárskeho priemyslu [9, 15].

2.1.3 Duplexná nehrdzavejúca oceľ

Pridaním niklu do feritickej nehrdzavejúcej ocele na báze chrómu sa otvorí oblasť austenitu a vďaka tomu môže vzniknúť kombinovaná, duplexná štruktúra. Táto štruktúra prináša zmes výhod feritickej a austenitickej ocele, ktoré sa prejavujú vo vysokej pevnosti v ťahu a vysokom stupni koróznej odolnosti. Ďalšími pojmami v tejto skupine materiálov sú super-duplex prípadne hyper-duplex. Tieto názvy naznačujú zvýšený obsah legujúcich prvkov a ešte lepšiu koróznú odolnosť. Kombinácia týchto vlastností je výhodná pre petrochemický, energetický, chemický a potravinársky priemysel. S výhodou sa ich nasadenie používa v pobrežných oblastiach pri ťažbe ropy a plynu. Kombinácia nadpriemerných úžitkových vlastností materiálu si vyberá svoju daň v podobe zlej obröbitel'nosti. Jedným z problémov je vysoká medza sklzu a pevnosť v ťahu. Ďalšie problémy so sebou prináša obsiahnutá austenitická štruktúra. Veľké množstvo vzniknutého tepla môže viesť k plastickej deformácii nástroja, prípadne naštartovaniu chemických a difúzných procesov. Pri obrábaní dochádza vplyvom zasekávania pevnej triesky k výkyvom rezných síl, čo zhoršuje integritu povrchu obröbenej súčiastky. Dochádza tiež k pomerne rýchlemu opotrebeniu v tvare žliabku na čele nástroja. Zvyšovaním podielu feritickej štruktúry sa obröbitel'nosť zlepšuje [15, 16].

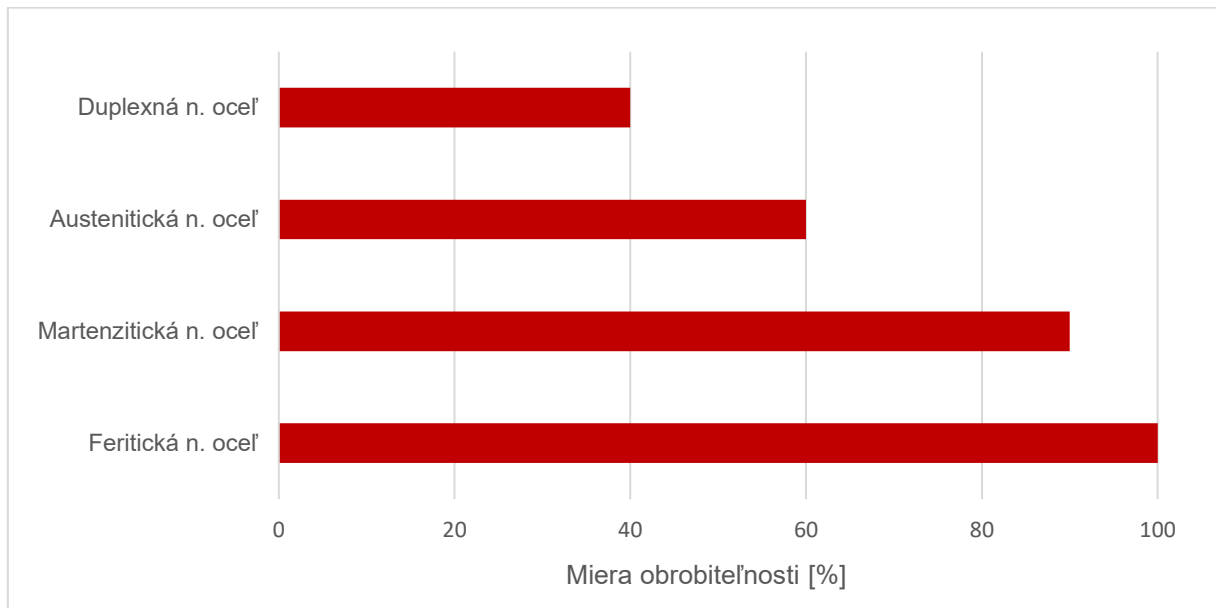
2.1.4 Zásady pri obrábaní nehrdzavejúcich ocelí

Pri obrábaní tohto typu materiálu by mali byť nasadené stroje s vysokou tuhosťou. Musí byť zaručená vysoká stabilita sústavy S-N-O (stroj-nástroj-obrobok). Nadmerne veľký polomer špičky nástroja zvyšuje riziko vibrácií. Použiť geometriu nástroja, ktorá zlučuje vysokú ostrosť a zároveň dostatočnú spoľahlivosť reznej hrany. Voliť pozitívny uhol čela a veľký uhol chrčta. Pri hrubovacích operáciách použiť väčšiu hĺbku rezu, čo vedie k rozloženiu teploty a tlaku na špičku nástroja a eliminujeme riziko jeho poškodenia. Opotrebovaná rezná hrana sa prejavuje väčším stupňom tvárnenia materiálu a dochádza k vytvrdeniu do väčšej hĺbky. Je vhodné voliť nastavenie hlavného ostria menšie ako 90° . Nehrdzavejúce ocele sa vyznačujú zónou, kde dochádza pri použití nevhodnej reznej rýchlosti k tvorbe nárastku. Táto zóna leží v oblasti reznej rýchlosti medzi 90 až 180 m/min. Bezpečná oblasť sa pohybuje v rozmedzí 40–90 m/min a v rozmedzí 180–400 m/min. Podrobnejšie oblasti uspokojivej obrábiteľnosti uvádza (Obr. 2.3), publikovaný v literatúre [16].



Obr. 2.3 Vymedzenie oblasti uspokojivej obrábiteľnosti nehrdzavejúcich ocelí a znázornenie typov generovaného opotrebenia [16].

V dnešnej dobe poznáme množstvo nehrdzavejúcich ocelí, ktorých vlastnosti obrábiteľnosti sa môžu rapídne líšiť aj v rámci jednej triedy. Pre všeobecné zorientovanie nám ale dobre poslúži graf (Obr. 2.4) [9].



Obr. 2.4 Relatívna obrábiteľnosť nehrdzavejúcich oceľí [9].

2.2 Titán a jeho zliatiny

Siedmy najrozšírenejší prvok vyskytujúci sa na planéte Zem. Medzi najvýznamnejšie nerasty, v ktorých sa titán prirodzene nachádza, sú oxid titaničitý, tiež nazývaný rutil a oxid železnatotitaničitý, nazývaný ilmenit [12, 17].

Vynikajúce konštrukčné vlastnosti tohto lesklo bieleho kovu, ako je nízka merná hmotnosť v kombinácii k vysokej mernej pevnosti, vysoká korózná odolnosť a schopnosť spoľahlivo pracovať za zvýšených teplôt (až 600 °C), podnietili jeho skúmanie a následné nasadenie v oblasti kozmického priemyslu. Praktické použitie prvých titánových zliatin sa datuje do obdobia studenej vojny medzi USA a Ruskom. Biokompatibilita predurčila jeho ďalšie nasadenie v oblasti farmaceutického, potravinárskeho, chemického priemyslu a tiež v medicíne. V dnešnej dobe sa zliatiny titánu stali jedným z najdôležitejších konštrukčných materiálov v oblasti produkcie vojenských a dopravných lietadiel, prúdových motorov a všade tam, kde sú vyžadované vynikajúce pevnostné a odolnostné vlastnosti za pôsobenia vysokých teplôt, prípadne agresívneho prostredia. Vďaka použitiu titánu ako konštrukčného materiálu sa pri stavbe lietadiel ušetrilo odhadom až 40 % celkovej hmotnosti. Najrozšírenejšou zliatinou titánu je materiál Ti₆Al₄V s alfa-beta štruktúrou. Tvorí až 70 % svetovej produkcie titánových zliatin. Tento materiál je z hľadiska teploty aplikácie použiteľný do 400 °C. Disponuje vysokou medzou sklzu R_{p02}, až 910 MPa a medzou pevnosti v ťahu až 1125 MPa. Zliatiny titánu, podobne ako nehrdzavejúce ocele, delíme na základe ich výslednej štruktúry, ktorá je ovplyvnená obsahom a počtom legujúcich prvkov. Cena titánu je vysoká, čo je spôsobené aj faktom, že ho nie je možné vyrobiť bežnými metalurgickými metódami. Príčinou je reaktivita s plynmi za vysokých teplôt. Najčastejšie sa titán vyrába Krollovým procesom [17], pri ktorom

dochádza k redukcii pár chloridu titaničitého vplyvom pôsobenia horčíku v inertnej ochrannej atmosfére. Ako inertný plyn sa používa Argón. Takto vyredukovaný titán je potrebné ďalej čistiť, aby sme z neho odstránili nezreagované zbytky horčíku a chloridu horečnatého. Chemická reakcia Krollého procesu (2.1).



Titán má dve alotropické modifikácie. Modifikácia alfa je stabilná do teploty 882,5 °C. Modifikácia beta s kryštalografickou mriežkou typu BCC, je stabilná v rozmedzí 882,5 °C do teploty tavenia (1668 °C). Odborná literatúra uvádza delenie až na 5 typov zliatin titánu [13, 17, 18]:

- zliatina alfa (α),
- zliatiny pseudo alfa (obsahujú maximálne 6 hm. % beta fázy),
- zliatiny alfa + beta,
- zliatiny pseudo beta (obsahujú minimálne množstvo alfa fázy),
- zliatiny beta (β).

Typickejším delením, hlavne z hľadiska praktických aplikácií, je rozdelenie materiálu na alfa, beta zliatiny a kombinovanú alfa-beta zliatinu.

2.2.1 Zliatiny alfa

Hlavné legujúce prvky týchto zliatin, nazývané tiež alfa stabilizátory, sú hliník, kyslík, dusík a uhlík. Praktický význam pre otvorenie alfa fázy má v podstate iba hliník, pretože prvky O, N, C sú nekovy a pôsobia ako nečistoty. Z toho dôvodu je potrebné udržať ich hodnotu na minime. Zliatiny alfa sa vyznačujú dobrou pevnosťou a odolnosťou voči krehkému porušeniu. Táto vlastnosť ich predurčuje pre použitie v aplikáciách, ktoré pracujú v oblasti nízkych teplôt [13].

2.2.2 Zliatiny beta

Homogénna beta štruktúra materiálu je dosiahnutá vďaka použitiu beta stabilizátorov. Medzi tieto prvky sa zaraďuje molybdén, tantal, niob a vanád. Pri dostatočne vysokom obsahu uvedených legúr zostava tuhý roztok β fázy zachovaný až do normálnej teploty ako stabilný. Hlavnou prednosťou týchto materiálov je dobrá schopnosť tvárnenia za studena, čo je spôsobené BCC mriežkou. Nevýhodou je vyššia hmotnosť spôsobená legujúcimi prvkami a tiež cena. Pevnosť v ťahu po vytvrdení, môže dosahovať hodnoty až 1400 MPa [13].

2.2.3 Heterogénna α - β zliatina

Kombinácia priaznivých vlastností alotropických modifikácií alfa a beta generuje materiál s najväčším podielom v praktických aplikáciách. Pridaním legúr Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co a Ni sa tuhý roztok β fáze pri nízkej teplote rozpadne eutektoidnou

premenou a vznikne finálna „kombinovaná štruktúra“. Beta štruktúra so sebou prináša lepšiu tvárnosť v žíhanom stave oproti alfa štruktúre, lepšiu únavovú odolnosť a je možné ich ďalej tepelne spracovávať a zvyšovať tak ich mechanické vlastnosti. Na druhej strane, zvariteľnosť a odolnosť voči creepu je horšia ako u čistej alfa zliatiny. Typickými aplikáciami sú zubné implantáty, lopatky turbín, spojovacie elementy, časti lietadiel, rôzne typy endoprotéz, ale tiež časti športových náčiní [13, 17].

2.2.4 Obrobiteľnosť titánových zliatin

Zliatiny titánu sa obvykle obrábajú v stave po umelom starnutí alebo po žíhaní na mätko. Nízky modul pružnosti prináša so sebou problém, že obrobok je vplyvom tlaku od procesu obrábania náchylný k deformácii. Obrobiteľnosť titánových zliatin sa zhoršuje smerom od alfa štruktúry k štruktúre beta. Korózna odolnosť titánu je spôsobená tvorbou vrstvy oxidu titánu TiO_2 pri reakcii so vzduchom. Táto vrstva má hrúbku približne 0,01 mm. Po jej narušení dochádza k okamžitej reakcii s kyslíkom a vytvoreniu novej vrstvy. Tento jav je pre obrobiteľnosť materiálu značne nevýhodný. Vplyvom rýchlej chemickej reakcie na povrchu dochádza k zvyšovaniu pravdepodobnosti difúzneho chovania rezného nástroja. Vytvorená vrstva je navyše krehká. Odchádzajúca segmentovaná trieska pôsobí abrazívne na čelo nástroja. Vplyvom nízkej teplotnej vodivosti a vysokej pevnosti za zvýšených teplôt dochádza k generovaniu značného tepla pri reznom procese. Teplota triesky vystavuje chemickú stabilitu nástroja namáhaniu a vďaka vysokej reaktivite titánu hrozí jej vzplanutie. Vplyvom teploty a rezných síl hrozí plastická deformácia reznej hrany. Titán má zlé trecie vlastnosti, a preto je dôležité konštantné zásobovanie procesnou kvapalinou ideálne pod vysokým tlakom. Odchádzajúca trieska sa správa adhézne a je náchylná k tvorbe nárazku na reznej hrane nástroja. Vplyvom nerovnomernej plastickej deformácie dochádza k náchylnosti na vznik vibrácií. Tá je spôsobená tým, že titánové zliatiny sú citlivé na spevňovanie za studena, aj keď v menšej miere ako austenitická štruktúra. Preto je potrebné zaručiť zvýšenú stabilitu systému S-N-O. Rezné rýchlosti sa pohybujú okolo 60 m/min. Obvyklým nástrojom je nepovlakovaný jemnozrný spekaný karbid s pozitívnou geometriou a veľkým uhlom chrbta. Je dôležité prijať kompromis, kedy si pozitívna geometria zachováva ešte dostatočnú húževnatosť [9, 12, 16].

2.3 HRSA materiály

Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny, nazývané HRSA materiály, sú skupina zlučujúca vlastnosti ako tvrdosť a pevnosť za zvýšených teplôt (žiarupevné) a korózna odolnosť za zvýšených teplôt (žiaruvzdorné). Tieto vlastnosti predurčujú ich použitie v aplikáciách kozmického, energetického, ťažobného priemyslu a v medicíne. Fyzikálne vlastnosti a priebeh obrábania jednotlivých zliatin v tejto skupine sa značne

líši. Aj z tohto dôvodu bolo potrebné rozdeliť HRSA materiály do skupín, založených na obsahu dominantného chemického prvku [19]:

- zliatiny na báze železa,
- zliatiny na báze niklu,
- zliatiny na báze kobaltu.

Pre porovnanie, priemerná merná rezná sila u HRSA zliatin sa pohybuje medzi 2400–3100 N/mm², u titánových zliatin je to v rozmedzí 1300–1400 N/mm². Zliatiny na báze železa sú skupina s najlepšou obrobiteľnosťou HRSA materiálov. Ich základným prvkom je železo s pridaním veľkého množstva legúr chrómu a niklu. Obrobiteľnosťou sa najviac podobajú nehrdzavejúcim oceliam. Preto im v tejto kapitole nebude venovaná zvýšená pozornosť. Podstatne horšou obrobiteľnosťou sa vyznačujú zliatiny na báze niklu a najvyššie požiadavky na proces obrábania kladú materiály na báze kobaltu [9, 16].

2.3.1 Obrobiteľnosť zliatin na báze kobaltu

Kobalt je feromagnetický polymorfný kov, ktorý v kombinácii s Cr, Ni, Mo, W tvorí žiarupevné zliatiny s vysokou tvrdosťou. Jeho alotropická modifikácia alfa, ktorá je tvorená hexagonálnou kryštalografickou mriežkou, je stabilná do teploty 417°C. Nad touto teplotou sa nachádza alotropická modifikácia beta, s FCC mriežkou. Kobalt má veľký význam pri výrobe spekaných karbidov, kde pôsobí ako spojovací materiál tvrdých karbidických fází. Typickým predstaviteľom kobaltových zliatin sú materiály s označením Stellit 21, Stellit 31 alebo Vitalium HS–21. Využitie zliatiny Vitalium HS-21 nachádzame v oblasti dentálnych účelov, pretože kombinuje vlastnosti dostatočnej mechanickej pevnosti, koróznej odolnosti a disponuje dobrou zbiehavosťou pri odlievaní. Typické použitie Stellitov je v podobe žiarových nástrekov, prípadne návarov na základný materiál. Cieľom tejto aplikácie je zvýšenie tvrdosti, oteruvzdornosti, žiaruvzdornosti a žiarupevnosti materiálu. Kobaltové zliatiny, z pomedzi všetkých HRSA materiálov, dosahujú najvyššie hodnoty koróznej odolnosti a technických vlastností za tepla. Pri procese obrábania tieto vlastnosti kladú vysoké nároky na rezný nástroj, stroj, stabilitu procesu. Kobaltové zliatiny disponujú vysokou pevnosťou za tepla, silným sklonom k spevňovaniu materiálu za studena a nízkou tepelnou vodivosťou, čo generuje vysoké teploty rezného procesu. Tepelným spracovaním, typickým pre HRSA materiály, je precipitačné vytvrdzovanie a starnutie. Týmto procesom je možné zlepšiť obrobiteľnosť len minimálne. Typickým opotrebením pri obrábaní kobaltových zliatin je plastická deformácia, abrazívne poškodenie a výmol na čele nástroja. Literatúra od spoločnosti Sandvik Coromant AB, doporučuje použitie väčších rádiusov špičky VBD (vymeniteľná britová doštička), ideálne použitie

kruhových doštičiek. Rezná rýchlosť pri obrábaní týchto materiálov sa pohybuje okolo 50–70 m/min [13, 19].

2.3.2 Obrobiteľnosť zliatin na báze niklu

Z celkovej produkcie vyrábaného niklu sa asi 25 % spotrebuje na výrobu zliatin. Ďalších 60 % je spotrebovaných vo forme legúr do ocelí a zvyšok tvorí skupina polotovarov (plechy, tyče, drôty...). Zliatiny niklu sa vyznačujú vysokou koróznou odolnosťou, žiaruvzdornosťou, žiarupevnosťou a tiež vysokým elektrickým odporom. Ďalšou prednosťou niklových zliatin je jeho chemická stabilita na vzduchu a vysoká hodnota húževnatosti pri nízkych teplotách. Typické aplikácie pre niklové zliatiny sú výroba častí leteckých motorov, výroba lopatiek turbín, bezpečnostných usmerňovacích ventilov v oblasti energetiky, dielov v oblasti ťažobného priemyslu. Zaujímavosťou je, že približne 50 % hmotnosti leteckého motoru je zastúpených zliatinami na báze niklu. Obvyklé delenie niklových zliatin závisí na parametre ich použitia. Poznáme konštrukčné zliatiny a zliatiny so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami [12, 13, 16].

Medzi **konštrukčné zliatiny** sa zaraďujú [12, 13]:

- zliatiny Ni-Cu, nazývané tiež Monely. Tento typ materiálu je ďalej legovaný prísadami kremíku, mangánu a železa a v závislosti na tom dosahuje pevnosti 500 až 1200 MPa. Monely s prísadou legúry hliníku je možné vytvrdzovať až na hodnotu 1400 MPa;
- zliatiny Ni-Be, obsahujú do 2 hmotnostných percent berýlia a ich použitie je vhodné do teploty približne 500 °C. Tieto materiály sú vytvrditeľné na hodnotu približne 1800 MPa. Typické je ich použitie pre trysky, pružiny alebo membrány;
- zliatiny Ni-Mn a ďalšími prísadami kremíku prípadne chrómu, výborne odolávajú pôsobeniu prostredia sírnych zlúčenín a používajú sa napríklad na výrobu elektród zapalovacích sviečok;
- zliatiny Ni-Mo, obvyklé použitie týchto materiálov je v zlievarenstve. Odliatky odolávajú pôsobeniu kyseliny soľnej a pôsobeniu chloridov. Hmotnostný obsah molybdénu môže dosahovať až 35 %. Typické je použitie v potravinárstve.

Medzi **zliatiny so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami** sa zaraďujú [13]:

- termočlánkové zliatiny niklu a chrómu, prípadne niklu a hliníku. Chromel spolu so zliatinou Alumel tvoria termočlánok pracujúci v rozsahu 300 až 1000 °C;
- odporové zliatiny s obsahom chrómu asi 20 hmotnostných percent. Ich obchodné označenie je Nichrom, Chrómnikel prípadne Pyrochróm. Použitie týchto výhrevných odporov je vhodné do teploty 1150 °C;

- magneticky mäkké zliatiny, pod obchodným označením Permaloy, obsahujú ako druhý hlavný prvok železo. Zastúpenie Fe je významné, v rozsahu 22 až 64 hm. %. Tieto materiály sa používajú ako jadrá transformátorov meracích prístrojov. Ich nevýhodou je vysoká cena;
- zliatiny žiaruvzdorné, žiarupevné a superzliatiny niklu. Do tejto kategórie spadá materiál s výnimočným koróznou-odolnosťami, respektíve pevnosťami vlastnosťami, pracujúci za vysokých teplôt. Základná báza týchto materiálov je kombinácia Ni-Cr, ktorá je doplnená legúrami kobaltu, železa, hliníku či titánu, v závislosti na požadovaných výsledných vlastnostiach. Vysoká žiarupevnosť zliatin niklu je závislá od obsahu jemných precipitátov tuhého roztoku titánu v zlúčenine Ni_3Al . K žiarupevnosti tiež prispieva disperzia karbidov. Superzliatiny niklu sa vyznačujú dobrou odolnosťou voči creepu.

Ďalšie delenie niklových zliatin je na základe obsahu jednotlivých prvkov. Poznáme 3 hlavné skupiny, zastúpené kombináciou prvkov Ni-Cu, Ni-Cu-Fe, Ni-Ti. Typické je tiež obchodné značenie ako Inco, Monel, Inconel, Nilo, Waspoloy, Astroloy a iné [9].

Obrobiteľnosť niklu a niklových zliatin, je obmedzená nízkou tepelnou vodivosťou materiálu a náchylnosťou austenitickej štruktúry na spevňovanie za studena. Typické je opotrebenie čela nástroja v tvare žliabku, abrazívne opotrebenie chrbta nástroja, tvorba „mikrozvarov“ vplyvom adhézne odhadzajúcej triesky, prípadne plastická deformácia reznej hrany. Odporúča sa materiál obrábať v zušľachtenom stave, pretože je možné dosiahnuť lepšiu kvalitu povrchu. Pre zníženie účinku spevňovania za studena je výhodné materiál podrobiť rozpúšťaciemu žihaniu, používať rezné nástroje s pozitívnou geometriou aby sa zabránilo efektu valcovania obrábanej plochy. Opotrebenie čela nástroja je možné eliminovať malým uhlom nastavenia hlavného ostria κ_r , ideálne v rozsahu 25° až 60° [12, 16].

3 SUPERZLIATINA NIKLU – INCONEL® 718

V nasledujúcej kapitole budú uvedené vlastnosti konštrukčného materiálu s obchodným označením Inconel® 718 (ďalej ako „Inconel 718“). Následne upriamime pozornosť na oblasti aplikácie tejto superzliatiny a hlavné dôvody jej nasadenia. V ďalšom kroku budú uvedené charakteristiky spadajúce pod pojem obrobiteľnosť, čo bude vhodným vodítkom pre realizáciu experimentu. Ďalšia kapitola bude nadväzovať na popísané teoretické vlastnosti, ktoré budú využité pri voľbe rezného nástroja.

3.1 Inconel 718 ako konštrukčný materiál

Nesporné výhody tohto konštrukčného materiálu si nachádzajú uplatnenie hlavne v strojoch a zariadeniach pracujúcich za zhoršených prevádzkových podmienok. Môže sa jednať o nasadenie v agresívnom prostredí, kde je vyžadovaná korózna odolnosť, v prostredí s extrémne vysokou teplotou, kde je vyžadovaná pevnosť a odolnosť voči creepu, prípadne v prostredí s teplotami hlboko pod bodom mrazu, kde je predpokladom stability dostatočná húževnatosť. Materiály kombinujúce uvedené vlastnosti sú obvykle zliatiny viacerých prvkov. Nie je to inak ani v prípade Inconelu 718, ktorý je zliatinou niklu a chrómu s prímiesou ďalších legúr. Výnimočné konštrukčné vlastnosti a aplikačné schopnosti vyžadujú použitie výnimočných technologických prístupov pri ich spracovaní. Kombináciou poznatkov z viacerých vedeckých smerov môžu byť ťažkoobrobiteľné materiály spracovávané s dostatočnou produktivitou a efektivitou. Inconel 718 sa úspešne používa v rozsahu pracovných teplôt od -250°C až do teploty $+750^{\circ}\text{C}$. Typické komponenty z tohto materiálu sú časti leteckých motorov, lopatky turbín, časti kompresorov, rôzne typy ventilov usmerňujúcich paru, diely pre ropný a plynárenský priemysel, komponenty pre použitie v medicíne [20, 16, 19, 21].

Chemické zloženie každej zliatiny má určité rozsahy. Hraničné hodnoty obsahu jednotlivých chemických prvkov superzliatiny niklu, ktorá nesie obchodné označenie Inconel 718, je uvedené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 3.1). Zloženie zodpovedá AMS (aerospace material standard) špecifikácii. V tabuľke (Tab. 3.2), sú uvedené základné fyzikálne konštanty materiálu [22].

Tab. 3.1 Chemické zloženie Inconelu 718 [20].

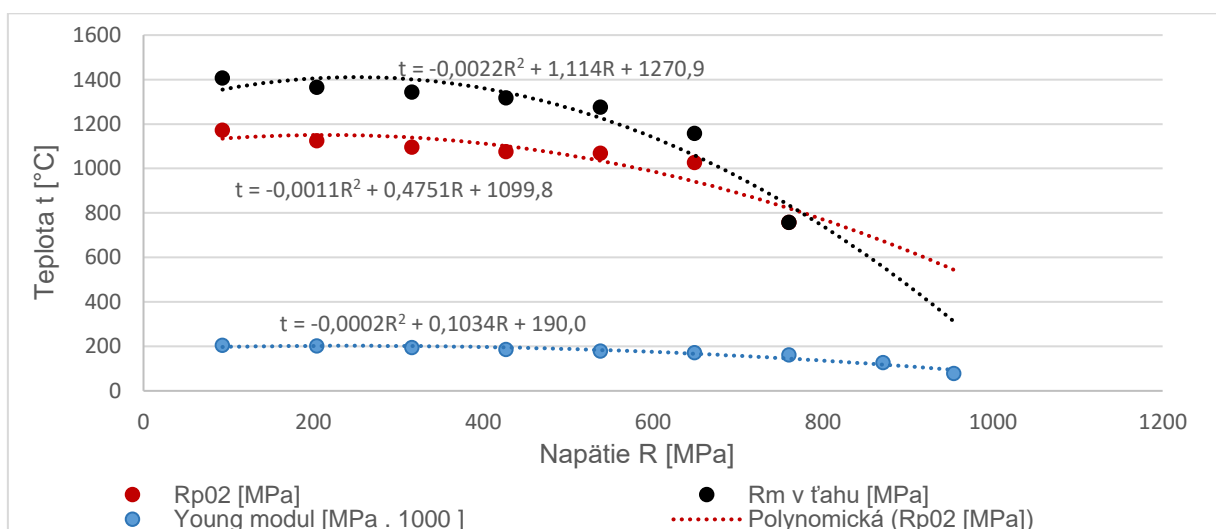
Chemický prvok	Percentuálne zastúpenie [%]
Nikel (Ni)	50,00–55,00
Chrómu (Cr)	17,00–21,00
Železo (Fe)	Premenlivá hodnota
Niob + Tantál (Nb + Ta)	4,75–5,50
Molybdén (Mo)	2,80–3,30

Titán (Ti)	0,65–1,15
Hliník (Al)	0,20–0,80
Kobalt (Co)	Max. 1,00
Uhlík (C)	Max. 0,08
Mangán (Mn)	Max. 0,35
Kremík (Si)	Max. 0,35
Fosfor (P)	Max. 0,015
Síra (S)	Max. 0,015
Bór (B)	Max. 0,006
Meď (Cu)	Max. 0,30

Tab. 3.2 Fyzikálne vlastnosti Inconelu 718 [22].

Fyzikálna vlastnosť	Charakteristická hodnota
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	8,19
Teplota tavenia materiálu [$^{\circ}\text{C}$]	1260–1336
Tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	435
Priemerná hodnota tepelnej rozťažnosti [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	13
Tepelná vodivosť [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	11,4
Pevnosť v ťahu [MPa]	1240
Youngov modul pružnosti [GPa]	200

Ďalšou, pre konštruktéra zaujímavejšou alternatívou ako špecifikovať materiál, sú jeho mechanické vlastnosti. Ich vývoj v závislosti na rozvoji teploty aplikácie popisuje (Obr. 3.1) [23].



Obr. 3.1 Mechanické vlastnosti materiálu, ako funkcia teploty, na základe literatúry [23].

Namerané hodnoty mechanických vlastností sa vzťahujú na kruhovú tyč o priemere 12,7mm po tepelnom spracovaní žihania a umelého starnutia materiálu.

3.2 Obrobiteľnosť Inconelu 718

V kapitole 2.3.2, bol uvedený celkový pohľad na obrobiteľnosť zliatin na báze niklu. V tejto kapitole budú detailnejšie špecifikované parametre obrobiteľnosti pre Inconel 718. V základnej orientácii bude nápomocná tabuľka (Tab. 3.3), publikovaná v literatúre [4], ktorá zatrieďuje zliatiny niklu do šiestich skupín.

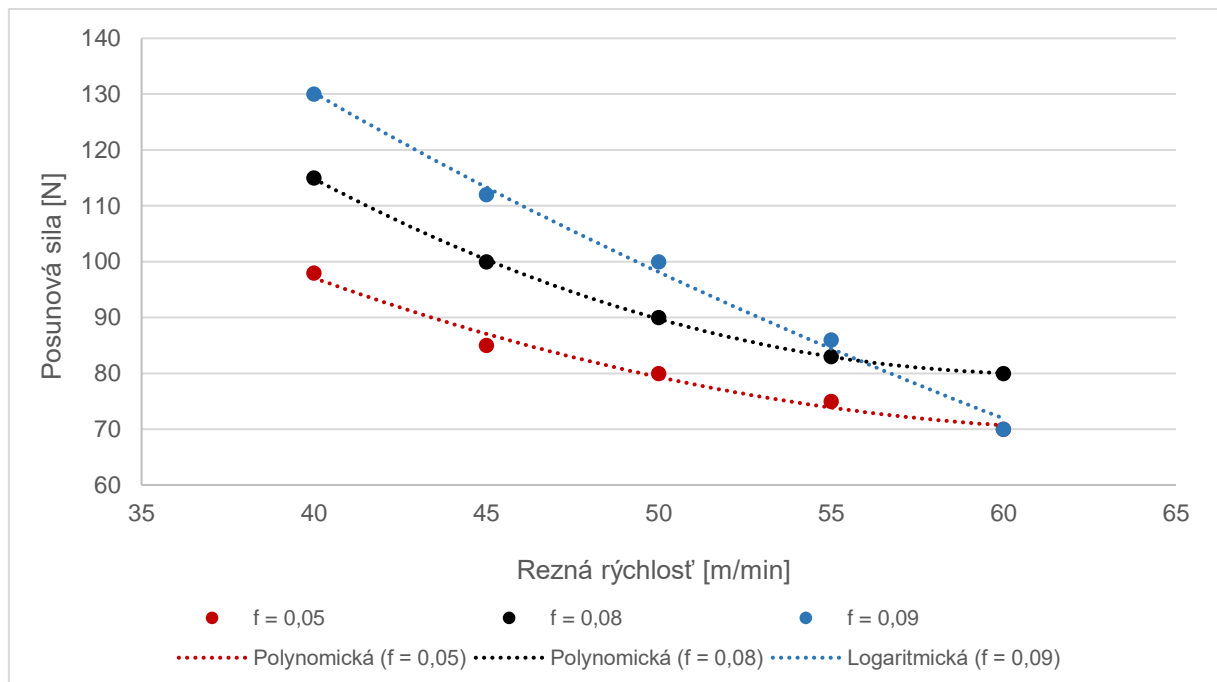
Tab. 3.3 Klasifikácia niklových zliatin na parametroch obrobiteľnosti [4].

Skupina obrobiteľnosti	Označenie materiálu
A	Nickel 200, 201, 204, 205, 211, 220, 230, 233
B	Monel 400, 401, 402, 403, 404 Monel 501 grafitizovaný
C	Nickel 270 Monel K-500 Inconel 600, 604 Incoloy 800, 801, 804, 825
D-1	Permanikel 300 (nevystarnutý) Duranickel 301 (nevystarnutý) Ni-span-C 902 (nevystarnutý)
D-2	Permanikel 300 (vystarnutý) Duranickel 301 (vystarnutý) Monel K-500 (vystarnutý) Inconel 700, 702, 718, 721, 722, X-750, 751
E	Monel R-405

Kategória A obsahuje zliatiny s obsahom niklu väčším než 95 %, vytvrdené za studena. V tomto stave poskytujú najlepšie parametre obrobiteľnosti s dobrou kvalitou obrobenej plochy voči ostatným uvedeným triedam. Materiály v skupine B sú zliatiny na báze Ni-Cu. Tieto zliatiny majú vyššiu pevnosť a teda aj horšiu obrobiteľnosť voči materiálom zo skupiny A. Skupina C je zastúpená zliatinami na báze Ni-Cr-Fe, ktorých obrobiteľnosť je podobná austenitickej oceli. Najviac výhodný stav tepelného spracovania pre parametre obrobiteľnosti skupiny B a C je zliatina vyrobená ťahaním za studena, následne žíhaná. Skupina materiálov D je rozdelená na subskupiny 1 a 2. V skupine 1 sa nachádzajú materiály v nevystarnutom stave. V skupine 2 sú vystarnuté materiály, ktoré majú obzvlášť vysokú pevnosť. Hrubovacie operácie je ideálne vykonávať v zmäkčenom stave po žíhaní. Naopak obrábaniu na čisto by malo predchádzať starnutie materiálu, čím bude zabezpečená lepšia integrita povrchu. Skupina E obsahuje grafitizovanú zliatinu Niklu a Medi. Obrobiteľnosť je v tomto prípade dobrá. Zlepšuje ju prítomnosť neviazaného uhlíku v mikroštruktúre [4].

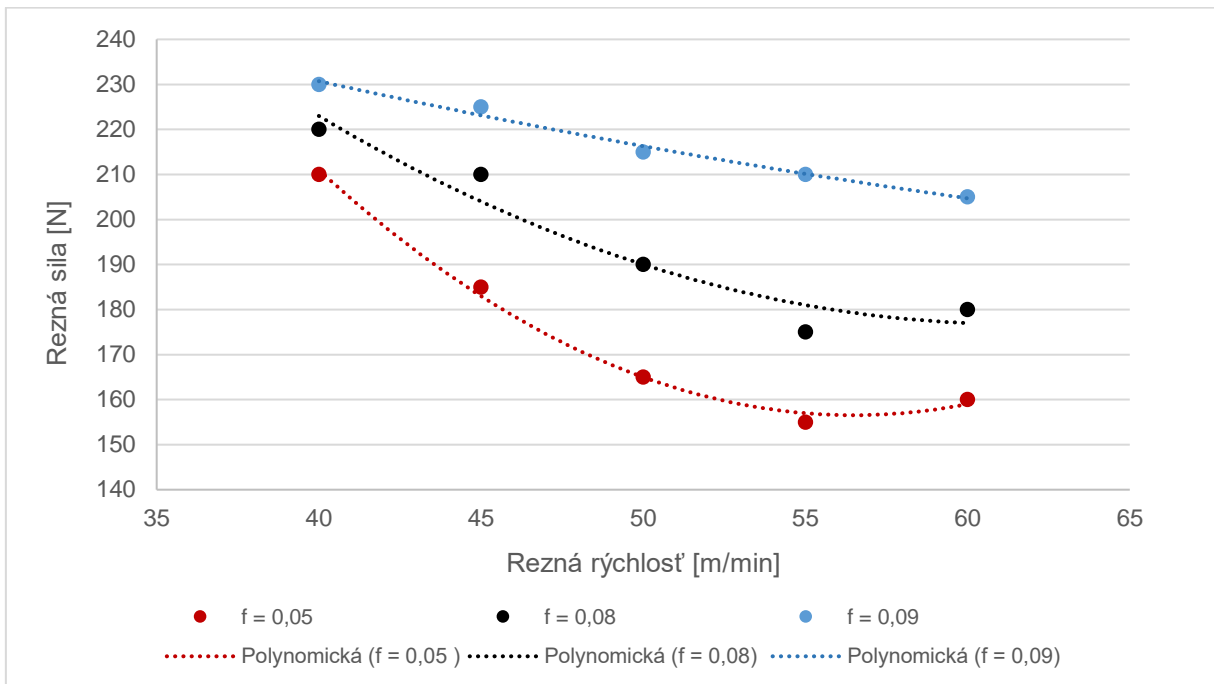
3.2.1 Rezné sily pri sústružení Inconelu 718

Rezná sila je jeden z parametrov, ktorý pomáha definovať mieru obrobiteľnosti daného materiálu. Preto je dôležité poznať vzťahy a prepojenia medzi hodnotami rezných podmienok a generovaných rezných síl. V publikácii z roku 2009 [22] sú tieto závislosti podrobne skúmané a budú použité ako relevantný zdroj informácií. Rezné sily boli merané pri obrábaní Inconelu 718 nástrojom zo spekaného karbidu. Dá sa predpokladať, že pri použití iného rezného materiálu prípadne iných rezných podmienok, budú priebehy síl podobné, posunuté k vyšším prípadne nižším hodnotám. Pri sústružení sa prejavujú 3 zložky sily. Najvýznamnejší podiel má rezná sila pôsobiaca v smere reznej rýchlosti, tangente na plochu obrobku. Ďalšou je posunová sila, ktorej smer korešponduje so smerom posuvu rezného nástroja. Poslednou je sila pasívna pôsobiaca kolmo do plochy obrobku. Táto sila je pri obrábaní zliatin s austenitickou štruktúrou významná, pretože ovplyvňuje mieru spevňovania materiálu. Všetky merania, prebehli za konštantnej hodnoty $a_p = 0,5$ mm. Postupne sa menili hodnoty posuvu v rozmedzí 0,05–0,09 mm na otáčku a reznej rýchlosti v rozmedzí 40 až 60 m/min. Závěry vyššie uvedenej práce boli premietnuté do grafov (Obr. 3.2, 3.3).



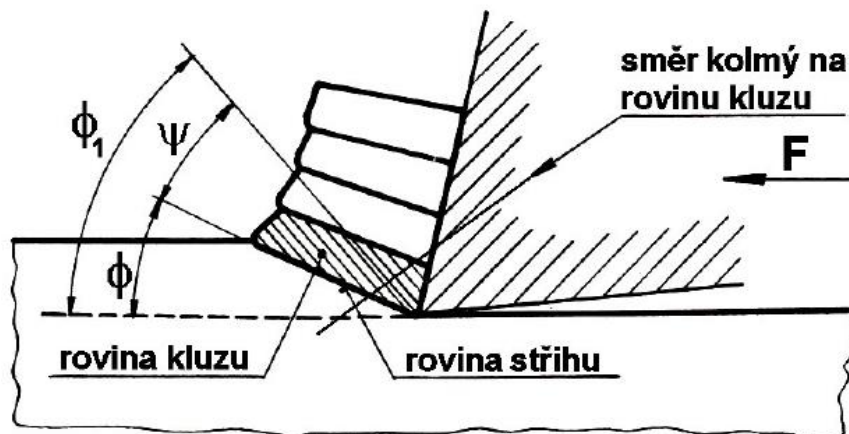
Obr. 3.2 Vyhodnotenie posunovej sily, na základe literatúry [22].

Priebeh pasívnej sily v závislosti na reznej rýchlosti je rovnako ako pri zvyšných 2 zložkách klesajúci. Nakoľko bude v experimentálne testovanom prípade šírka záberu hlavného ostria nástroja a posuv odlišný, numerické hodnoty síl nebudú porovnateľné.



Obr. 3.3 Vyhodnotenie reznej sily, na základe literatúry [22].

V grafe 3.3, dochádza pri rýchlosti 60 m/min k nárastu reznej sily. Príčinou je vysoká teplota procesu, ktorú spekaný karbid nedokázal uniesť. Celkový klesajúci charakter pôsobiacich síl je možné vysvetliť aj prechodom do oblasti HSC (*high speed cutting*) obrábania, ktoré je typické ich poklesom. Hlavný rozdiel medzi HSC a obrábaním klasickými reznými rýchlosťami spočíva v mechanizme, ktorým je tvorená trieska. Teplota odchádzajúcej triesky dosahuje približne teplotu tavenia materiálu. Tento jav spôsobuje odpevnenie v rovine strihu (Obr. 3.4), čo sa prejaví poklesom síl pôsobiacich na čelo nástroja. Ďalší pokles trecej sily a celkového rezného odporu je spôsobený zväčšením uhlu šmykovej roviny [24].



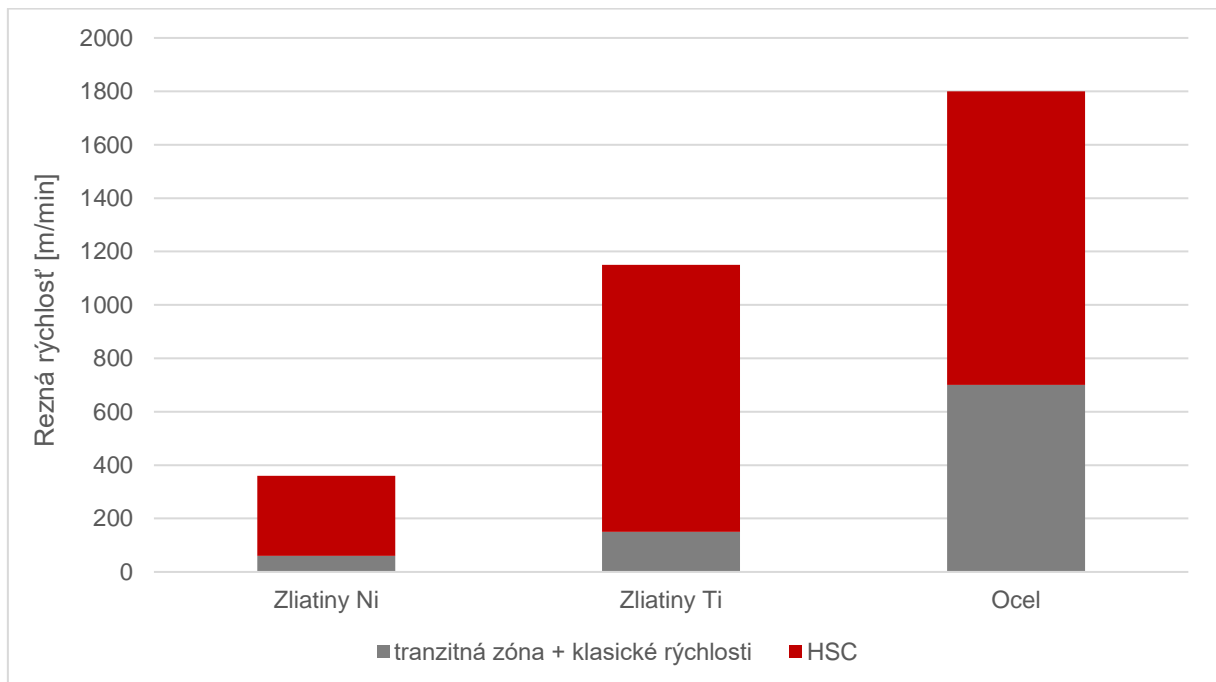
Obr. 3.4 Vznik triesky a znázornenie jednotlivých rovín [24].

Vplyvom poklesu rezných síl a poklesu prenosu tepla do nástroja a obrobní dochádza k spresneniu samotného obrábania. Znižuje sa tiež riziko vzniku vibrácií.

HSC obrábanie prebieha obvykle bez použitia procesných kvapalín prípadne s malým množstvom. Takýto proces sa označuje pojmom suché obrábanie [10, 25].

Obrábanie s použitím malého množstva reznej kvapaliny je nazývané ako MQL (*minimum quantity lubrication*) obrábanie. Princípom je prívod reznej kvapaliny do zariadenia, kde sa zmiešava s vysokým tlakom, ktorý prúdi z kompresoru. Následne prúdi molekulizovaná rezná kvapalina do trysky, z ktorej vychádza vo forme hmly priamo do miesta rezu. Vplyvom hmly nastane zníženie trenia medzi čelom nástroja a odchádzajúcou trieskou, čo zvyšuje jeho životnosť. Druhá zložka, prúdiaci vzduch, sa podieľa na chladení procesu a odstraňovaní triesky z miesta rezu [26].

Presun z oblasti klasických rezných rýchlostí do oblasti HSC obrábania závisí od materiálu polotovaru. V prípade zliatin niklu sú hodnoty reznej rýchlosti pomerne nízke (60–300 m/min). Naopak v prípade hliníkových zliatin musia byť dosiahnuté hodnoty 3000 až 6000 m/min. Oblasti vysokorýchlostného obrábania pre vybrané konštrukčné materiály reflektuje (Obr. 3.5) [25].



Obr. 3.5 Oblasti HSC obrábania vybraných materiálov [25].

3.2.2 Aplikácia procesných kvapalín

Efekt použitia reznej kvapaliny pri technológiách obrábania so sebou prináša mazacie, chladiace účinky a ich kombináciu. Okrem chladenia a mazania miesta rezu má použitie procesnej kvapaliny aj výplachový vplyv, ktorý pomáha k odstraňovaniu vzniknutej triesky z miesta rezu. Dôležitým je aj ochranný účinok, ktorý pôsobí ako konzervant hotových obrobkov [8, 24].

Forma prívodu kvapaliny do miesta rezu má vplyv na charakter samotného procesu obrábania. Kvapalina môže byť do miesta rezu privedená štandardným

spôsobom pomocou čerpadla a prírodného potrubia. Ďalším spôsobom je privedenie kvapaliny do miesta rezu priamo cez nástroj, ktorý je na to usposobený. Kvapalina môže byť privedená vo forme hmly prípadne pod vysokým tlakom. Ďalší zo spôsobov, ako zvýšiť výkon reznej kvapaliny je jej podchladzovanie. Moderné prístupy obrábania, tiež uvádzajú použitie plynnej atmosféry ako náhradu procesných kvapalín. V princípe má tento spôsob, hlavne efekt chladenia (stlačený CO₂) a odstraňovania (vyfukovania) triesky z miesta rezu [24].

Pri obrábaní predmetnej superzliatiny je možné použiť viacero prístupov, vzhľadom k procesným kvapalinám. Na základe odborných publikácií budú uvedené možnosti počnúc štandardným prívodom reznej kvapaliny, kryogénnym chladením, končiac prívodom procesnej kvapaliny pod vysokým tlakom. Tiež je možné využiť charakteristiky suchého obrábania a MQL chladenia hlavne v oblasti HSC. Výrazné zníženie reznej a posunovej sily pri procese sústruženia môžeme sledovať pri aplikácii hybridného spôsobu použitia procesnej kvapaliny. Najnovšie publikácie uvádzajú zlepšenie vlastností obrábateľnosti vplyvom kombinácie rôznych prístupov použitia procesných kvapalín a plynov.

Tazehkandi [27] porovnával obrábanie inconelovej zliatiny za rezných podmienok s procesnou kvapalinou a bez procesnej kvapaliny. Polotovár bol Inconel 725, rezným nástrojom bol spekaný karbid tvaru C. Zo záverov práce vyplýva, že rezná a tiež posunová sila pri obrábaní do rýchlosti 80 m/s mala klesajúci charakter. Nižšie rezné sily, respektíve odpory, boli namerané pri suchom obrábaní. Výnimkou bola iba oblasť medzi 60 až 80 m/s, kde boli hodnoty síl približne rovnaké. Lepšia drsnosť povrchu bola dosiahnutá v prípade suchého obrábania. Ďalší zo záverov tejto práce je, že použitie povlakovaného rezného materiálu je vzhľadom na pokles rezných síl a zlepšenie integrity povrchu výhodnejšie ako použitie procesnej kvapaliny [27].

V ďalšej z prác bol skúmaný vzťah procesnej kvapaliny k vzniku vibrácií. V tomto prípade bola ako polotovár použitá kalená oceľ. Zistilo sa, že použitie MQL chladenia vychádza v porovnaní s konvenčným chladením (5 litrov/min) z hľadiska vzniku vibrácií a rezného výkonu ako lepšia varianta. Ďalšie zlepšenie bolo možné dosiahnuť v prípade, že oblasť rezu bola konštantne „zaplavená“. K tomu dochádzalo pri prietoku procesnej kvapaliny vyššom ako 8 litrov za minútu a tlaku 100 barov [28].

Jedným zo spôsobov, ako zlepšiť priebeh obrábacieho procesu, je použitie vysokotlakového chladenia. V tomto prípade rezná kvapalina prúdi priamo cez nástroj a je smerovaná na čelo reznej hrany do miesta rezu. Vplyvom vysokého tlaku kvapaliny dochádza k lepšej tvorbe triesky a tiež k zníženiu opotrebenia na čele nástroja. Je to spôsobené tým, že kvapalina na čele nástroja vytvorí lubrikovanú vrstvu, po ktorej odchádza trieska. V prípade obrábania Inconelu 718 vzniká problém s tepelnou vodivosťou materiálu. Spôsob ako tento nedostatok materiálu eliminovať, je zvýšiť tepelnú vodivosť privádzanej reznej kvapaliny. Ako vieme, zvýšením

Reynoldsovo čísla sa dostávame do oblasti turbulentného prúdenia kvapaliny. V tejto oblasti dochádza k nárastu tepelnej vodivosti a teda lepšiemu odvádzaniu tepla z oblasti rezu. Publikácia [29] sa zaoberala úpravou geometrie kanálov v nástroji za cieľom vzniku turbulentného prúdenia. To sa podarilo v kombinácii s vysokým tlakom (13 MPa) dosiahnuť a zlepšiť tak parametre vysokotlakého chladenia [29].

Kryogénne chladenie Inconelu 718 so sebou prináša nárast integrity povrchovej vrstvy. Výrazne sa predlžuje životnosť súčiastky pretože do jej povrchu sú vnesené tlakové napätia, ktoré siahajú do hĺbky 70 μm . Oproti suchému obrábaniu je to nárast o 175 %. Zároveň sa tvrdosť povrchovej vrstvy vplyvom kryogénneho chladenia zvýšila z 500 HV na 800 HV. Ďalšou výhodou v porovnaní so suchým prípadne MQL chladením je to, že spevnená vrstva austenitickej štruktúry má síce vyššiu tvrdosť, ale je tenšia. To je s výhodou použiteľné pri ďalšom obrábaní (prejazde nástroja). Kryogénne chladenie tiež ovplyvňuje výslednú mikroštruktúru. Dochádza k zjemneniu zrna oproti klasickým metódam. Plastická deformácia povrchu, v smere reznej rýchlosti dosahuje 1–2 μm , čo je výrazne menej v porovnaní s MQL a suchým obrábaním (5–10 μm). Počas daného experimentu bol ako chladiace médium použitý skvapalnený dusík. Do trysky bol privádzaný pod tlakom 1,5 MPa a prietok činil 0,6 kg/min. Na povrch bol aplikovaný dvojicou trysiek, kedy jedna mierila do miesta rezu a druhá na chrbát nástroja [30].

Posledným prístupom je kombinácia viacerých technológií chladenia. Napríklad kryogénne chladenie + MQL alebo laser/plazma + kryogénne chladenie. Tento proces je označovaný ako hybridné obrábanie. Použitie laseru, prípadne plazmy zapríčini ohrev polotovaru tesne pred záberom nástroja do rezu. Nástroj je chladený pomocou skvapalneného dusíku pod tlakom 1,1 MPa. Táto kombinácia spôsobí výrazné zníženie všetkých rezných síl, proces sa stane stabilnejším a dochádza k pomalšiemu dynamickému nárastu hodnôt síl/odporov, vplyvom opotrebenia nástroja. Tento pokles činí v prípade posunovej aj reznej sily približne 60 % oproti bežnému spôsobu chladenia (v čase po 20 sekundách rezu). S nárastom času rezu a rozvojom opotrebenia sa rozdiely ešte zvyšujú v prospech hybridného spôsobu obrábania [25].

Z uvedených poznatkov vyplýva, že Inconel 718 je možné obrábať bez použitia procesnej kvapaliny prípadne za pomoci MQL chladenia. Rovnako môžeme procesnú kvapalinu použiť. V tomto prípade sa však odporúča privádzať kvapalinu pod vysokým tlakom, prípadne dodávať konštantne veľký objem. Samotnou kapitolou sú špeciálne metódy chladenia, ktoré však potrebujú aj špeciálne strojné vybavenie.

3.2.3 Tepelné spracovanie Inconelu 718

Pri zliatine Inconel 718 sú známe dva typy tepelného spracovania, ktoré sú aplikované v praxi. Sú to rozpúšťacieho žihanie a precipitačné vytvrdzovanie (často je používané synonymum ako starnutie, umelé starnutie). Precipitačné vytvrdzenie

Inconelu 718 funguje na princípe spevnenia sekundárnej gama fáze Ni₃ (Al, Ti) v kovovej matrici. Pre hrubovanie materiálu je ideálne obrábať v žíhanom, zmäkčenom stave. Naopak, ak chceme dosiahnuť dobré parametre integrity povrchu pri dokončovacom reze, je výhodné materiál podrobiť precipitačnému vytvrdeniu [9, 20, 13].

Všeobecne využívané procesy tepelného spracovania Inconelu 718 [20]:

- žíhanie a starnutie (precipitačné vytvrdenie) 930 °C–1010 °C,
- žíhanie a starnutie (precipitačné vytvrdenie) 1040 °C–1065 °C.

Tepelné spracovanie 930 °C až 1010 °C sa využíva pre aplikácie, ktoré vyžadujú vysokú životnosť voči praskaniu, dobrú odolnosť voči iniciácii trhliny a následnému šíreniu. Týmto tepelným spracovaním je možné dosiahnuť najvyššie hodnoty pevnosti materiálu za izbovej teploty. Tvrdosť pri 20 °C, činí 331 HB. Celý proces tepelného spracovania má nasledovný priebeh [20, 56]:

- rozpúšťacie žíhanie na teplote 930 – 1010 °C,
- rýchle chladnutie (obvyklým ochladzovacím médiom je voda),
- precipitačné žíhanie na teplote 720 °C, pod dobu 8 hodín,
- chladnutie v peci na teplotu 620 °C, s výdržou na teplote 18 hodín (starnutie),
- chladnutie na vzduchu.

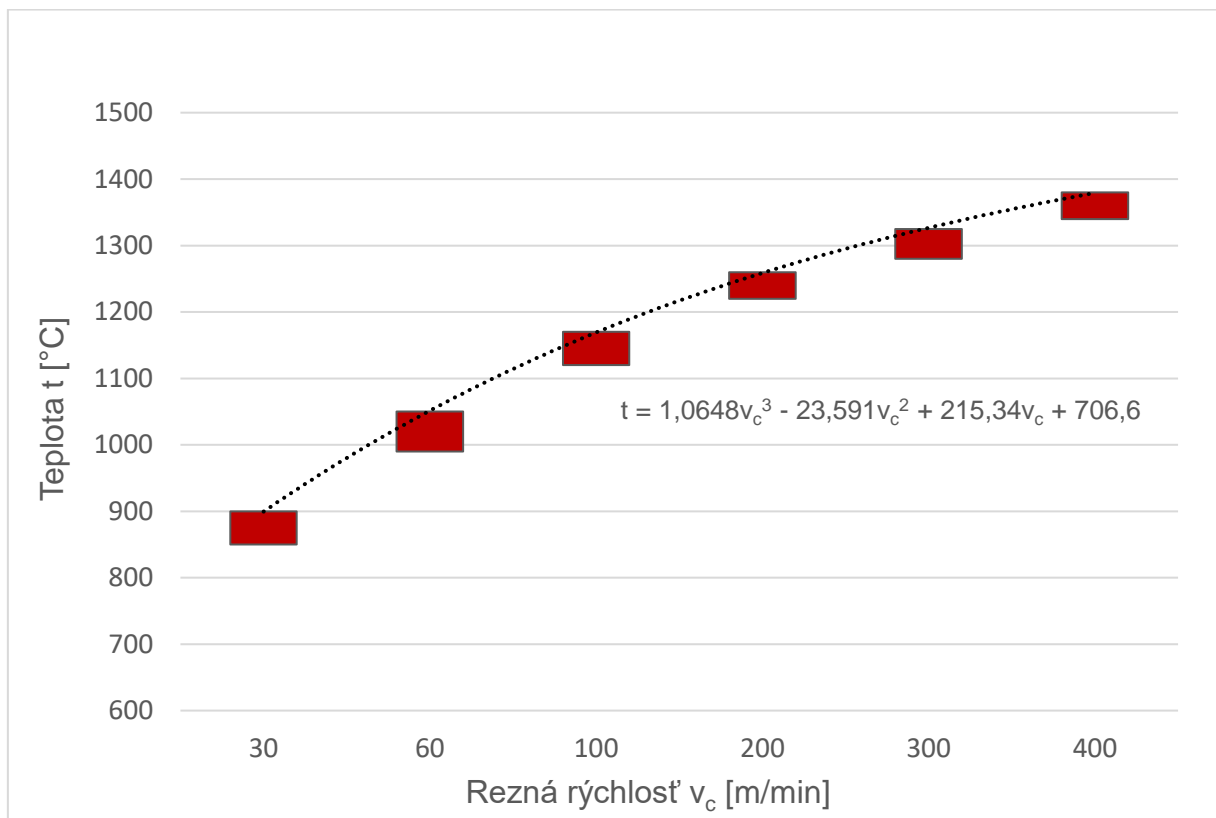
Tepelné spracovanie 1040 °C–1065 °C. Takto tepelne spracovaný materiál sa vyznačuje dobrou hodnotou húževnatosti v priečnom smere a preto je jeho použitie preferované v aplikáciách náročných na zaťaženie ťahovými silami. Disponuje tiež dobrou rázovou húževnatosťou. Na druhej strane má tendenciu spôsobovať vrubovú krehkosť na hranici pevnosti pri creepe (tečenie materiálu). Tvrdosť po tepelnom spracovaní, pri izbovej teplote dosahuje hodnotu 341 HB. Priebeh tepelného spracovania je uvedený v súlade s literatúrou [20, 56]:

- rozpúšťacie žíhanie na teplote 1040 až 1065 °C nasledované rýchlym chladnutím, obvykle vo vode,
- precipitačné vytvrdzovanie na teplote 760 °C po dobu 10 hodín,
- pomalé chladnutie v peci na teplotu 650 °C,
- výdrž na teplote 650 °C po dobu 20 hodín, nasledované chladnutím na vzduchu.

4 VOLBA MATERIÁLU REZNÉHO NÁSTROJA

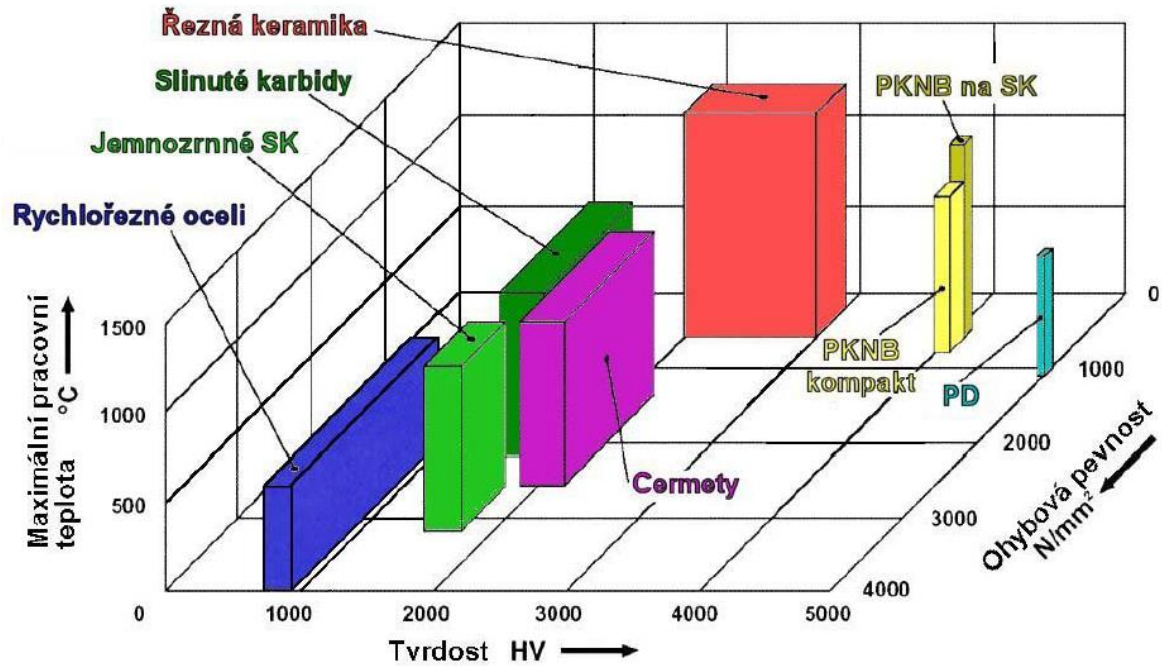
V závislosti na vyššie popísaných vlastnostiach materiálu obrobku je potrebné vhodne zvoliť materiál a geometriu rezného nástroja. V dnešnej dobe je na trhu veľké množstvo rezných materiálov. Rozlišujeme povlakované a nepovlakované nástroje a svoju rolu zohráva samotná technológia nanášania povlaku. Od vhodne zvoleného rezného nástroja závisí kvalita a rovnako aj cena výroby danej strojnej súčasti. Najväčším problémom pri obrábaní superzliatiny niklu je sekundárne spevňovanie povrchovej vrstvy, vysoká tvrdosť a nízka tepelná vodivosť materiálu, čo spôsobuje výrazné tepelné zaťaženie reznej hrany nástroja [31, 32].

Na základe podkladov z publikácií [33] a [35] je graficky popísané teplotné zaťaženie čela rezného nástroja pri obrábaní Inconelu® 718 v závislosti na reznej rýchlosti (Obr. 4.1). Merania sa vyznačovali rozptylom hodnôt, z tohto dôvodu bola vykonaná aproximácia.



Obr. 4.1 Teplotné zaťaženie nástroja pri sústružení Inconelu 718 [33, 35].

V súlade s teplotou rezného procesu bude zvolený nástrojový materiál. Závislosť pôsobenia teploty na tvrdosť a pevnosť nástrojového materiálu popisuje (Obr. 4.2), uvedený v literatúre [24].



Obr. 4.2 Aplikačné vymedzenia rezných materiálov [24]

Teplotná odolnosť nástroja je zvyšovaná rôznymi typmi povlakov. Tieto povlaky sa líšia ako metódou nanášania, tak aj generačným stupňom. Ich spoločnou charakteristikou, je zvyšovanie výkonu rezného nástroja vo forme znižovania rezných odporov – trení, zvyšovania teplotnej odolnosti, predlžovania životnosti. Metódy povlakovania delíme na základe procesu nanášania, ktorý je realizovaný chemickou alebo fyzikálnou cestou. V princípe poznáme nanášanie PVD (*Physical vapour deposition*) a CVD (*Chemical vapour deposition*). Hlavným technologickým rozdielom týchto dvoch metód, ktorý obmedzuje respektíve predurčuje vhodnosť ich použitia na nástrojový materiál, je teplota samotného procesu. Pri PVD metóde sa pohybuje s pracovnou teplotou pod 500 °C čo zaručuje, že nedôjde k tepelnému ovplyvneniu a následným štruktúrnym zmenám materiálu nástroja (hlavne HSS ocelí). Pracovná teplota CVD metódy sa pohybuje v rozmedzí 1000 až 1200 °C, preto je vhodná na povlakovanie materiálu, ktorý má zaručenú teplotnú odolnosť v tomto pásme. Príkladom sú spekané karbidy. Použitelnosť CVD metódy rozširujú jej rôzne modifikácie ako napríklad MTCVD (*Middle temperature chemical vapour deposition*), čo znamená aplikovanie technológie za znížených (stredných) teplôt [8, 18].

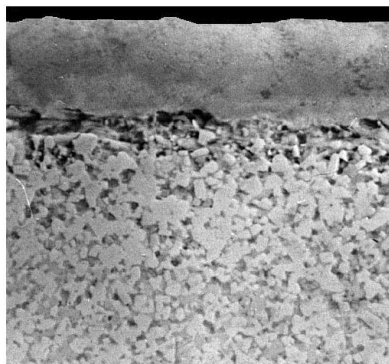
Realizácia CVD technológie môže principiálne prebiehať týmito metódami [18]:

- tepelná indukcia,
- indukcia plazmou,
- elektrónová indukcia (zväzok elektrónov),
- indukcia zväzkom fotónov (napríklad laser).

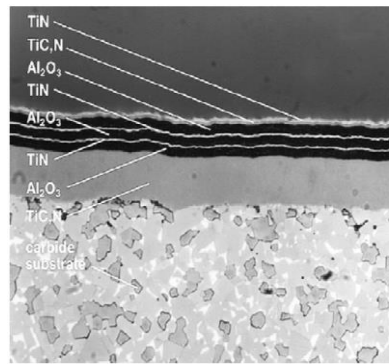
Realizácia PVD technológie je uskutočňovaná na základe princípov [18]:

- naparovania,
- naprašovania,
- iontovou implantáciou.

Z historického respektíve vývojového hľadiska delíme povlaky na niekoľko stupňov, kedy medzigeneračne došlo k zásadným zmenám. Posledný vývojový stupeň, ktorý sa vyznačuje takzvanými multivrstvovými povlakmi, kde nedochádza k výraznej hranici medzi jednotlivými vrstvami, zaraďujeme do štvrtej generácie. Bežne je nanášaných až 10 vrstiev (Obr. 4.5). Medzi najmodernejšie povlaky zaraďujeme diamantové, nanokompozitné, gradientné či supermriežkové, ktoré rovnako spadajú do posledného 4. generačného stupňa. Na obrázkoch (Obr. 4.3, 4.4), sú uvedené predchádzajúce generácie povlakov. V prípade 2. generácie došlo k odstráneniu problému nukleácie eta karbidu na rozhraní substrátu s povlakom. Povlakovacím materiálom boli karbidy TiC, TiCN, TiN o hrúbke 10 μm . Tretia generácia priniesla na trh viac-vrstvé povlaky karbidov TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN. Prvá vrstva sa vyznačovala dobrou príľnavosťou k substrátu (karbid titánu). Do poslednej vrstvy sa naopak aplikoval materiál s vysokou abraznou odolnosťou a nízkou chemickou reaktivitou (oxid hlinitý) [8, 37, 24, 36, 18].



Obr. 4.3 Povlak 2. generácie (Sandvik-Coromant Švédsko) [24].



Obr. 4.4 Povlak 3. generácie (Kennametal USA) [24].



Obr. 4.5 Povlak 4. generácie (Valenite USA) [24].

Základné vlastnosti vybraných typov povlakov sú prezentované v (Tab. 4.1), ktorá je publikovaná v literatúre [18].

Tab. 4.1 Vlastnosti vybraných typov povlakov [18].

Hodnotenie	Chemická stabilita	Odolnosť proti oxidácii	Tvrdosť	Tvrdosť za zvýšených teplôt
Najlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
▲ ▲ ▲	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al ₂ O ₃	TiCN
Najhorší	TiC	TiC	TiN	TiC

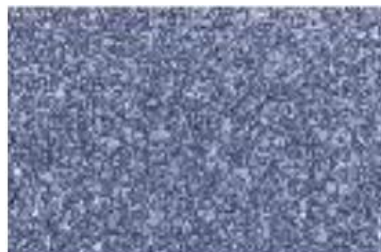
Z uvedených teoretických základov vyplýva, že nástrojový materiál vhodný na obrábanie Inconelu® 718, môže byť spekaný karbid v povlakovanom stave, rezná keramika v povlakovanom prípadne nepovlakovanom stave a tiež supertvrдый materiál, polykryštalický kubický nitrid bóru, ktorý sme v súčasnej dobe schopný ošetriť povlakovaním.

4.1 Spekaný karbid

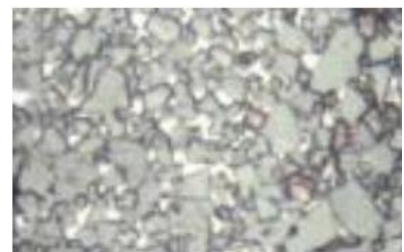
Spekané karbidy sú materiálom, ktorý je vyrábaný procesom práškovej metalurgie. Hlavnými zložkami sú karbid wolfrámu, tantalu, niobu a zložka spojujúceho kovu. Obsah častíc tvrdej karbidickej fázy dosahuje pre aplikácie obrábania minimálne 80 %. Pripravená prášková zmes je za pôsobenia tepla a tlaku vytvarovaná do požadovaného tvaru s definovanou reznou hranou a utváračom triesok. Tento tvar je možné docieľiť vstrekaním do formy, alebo lisovaním prášku. Takto pripravený polotovár je ďalej spracovávaný pôsobením tepla a tlaku až do jeho plnej hustoty kedy sa rozmer výšky, šírky a hĺbky zmrští o 17 až 20 %. V súčasnej dobe sa zrnitosť tvrdých častíc pohybuje v rozmedzí desiatín až jednotiek mikrometra. Na základe veľkosti zrn základnej zložky, karbidu wolfrámu, sú spekané karbidy rozdelené na strednú až veľkú zrnitosť, malú až submikroskopickú zrnitosť a gradientnú zrnitosť (Obr. 4.6, 4.7, 4.8) [8, 37, 9, 38].



Obr. 4.6 Stredná až veľká zrnitosť [37].



Obr. 4.7 Submikroskopická zrnitosť [37].



Obr. 4.8 Gradientná zrnitosť [37].

Základné delenie spekaných karbidov, popisuje značenie HW, HT a HC, ktoré korešponduje s literatúrou Sandvik Coromant AB. Význam týchto skratiek vysvetľuje nasledujúca tabuľka (Tab. 4.2).

Tab. 4.2 Základné typy spekaných karbidov [38].

HW	Nepovlakovaný spekaný karbid s prevažným obsahom karbidu wolofrámu.
HT	Nepovlakovaný spekaný karbid s prevažným obsahom karbidu titánu, nitridu titánu alebo ich kombináciou.
HC	Jedná sa o spekaný karbid s povlakom.

4.1.1 Mikroštruktúra rezného materiálu v závislosti od danej skupiny

Vzhľadom k svojmu mikro-zloženiu sa SK (spekané karbidy) delia na jednkarbidové (K), dvojkarbidové (P) a viackarbidové (M). V závislosti na obsahu daných zložiek sme schopní určiť vhodnosť rezného materiálu pre daný polotovár. Napríklad jednkarbidový SK skupiny K obsahuje karbid wolframu. Tento typ karbidu má pri izbovej teplote zrovnateľnú tvrdosť s karbidom titánu, tantalu alebo niobu. Za zvýšenej teploty jeho tvrdosť výraznejšie klesá a je preto vhodný pre obrábanie zliatiny, ktorá má krátku, drobivú triesku, nie sú potrebné veľké rezné sily a preto nie je generované veľké množstvo tepla [18]:

- **skupina K:**

WC (87–92) % + Co (4–12) % + (TaC, NbC)

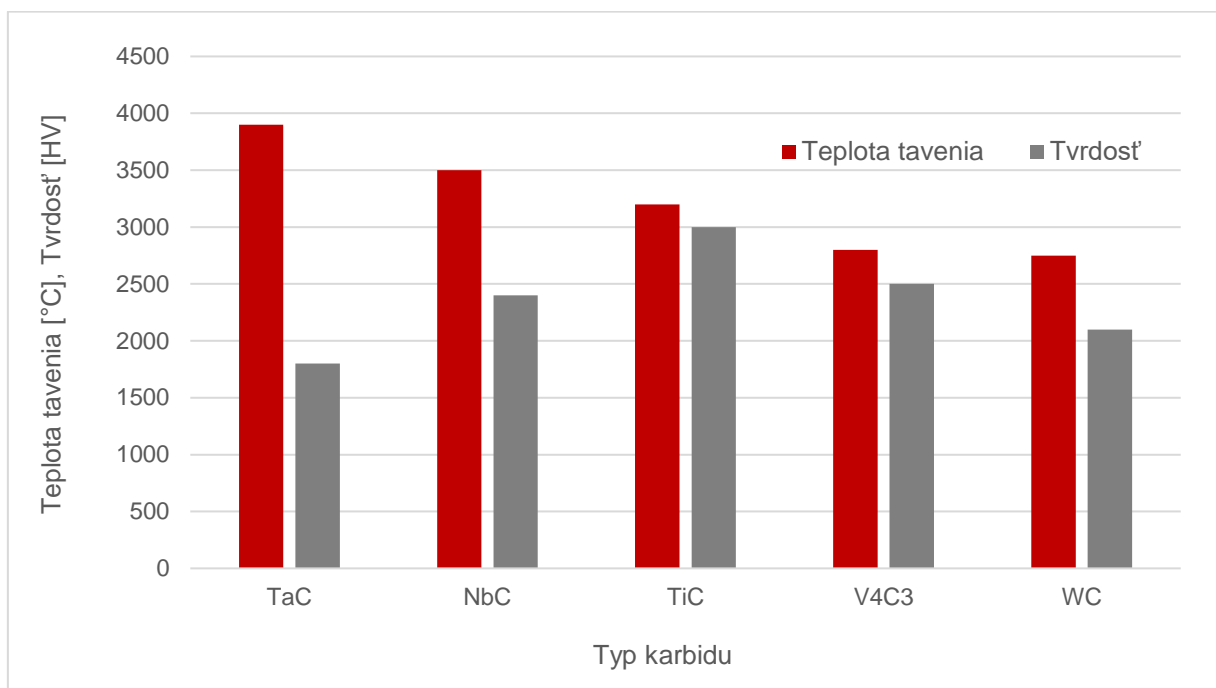
- **skupina P:**

WC (30–82) % + TiC (8–64) % + Co (5–17) % + (TaC, NbC)

- **skupina M:**

WC (79–84) % + TiC (5–10) % + TaC, NbC (4 – 7) % + Co (6–15) %

Pre obrábanie superzliatiny je určený viackarbidový materiál skupiny S, ktorý je odvodený od skupiny M. Podrobnejšie vlastnosti vybraných karbidov, ako je ich teplota tavenia a tvrdosť pri izbovej teplote popisuje (Obr. 4.9.).



Obr. 4.9 Vlastnosti vybraných karbidov [8].

4.1.2 Obrábanie superzliatiny spekaným karbidom

Každý typ materiálu má svoje vlastnosti, ktoré následne generujú špecifické požiadavky na nástrojový materiál. Z týchto dôvodov boli spekané karbidy, respektíve oblasť ich použitia v súlade s ISO 513 štandardami, rozdelené do 6 hlavných skupín (Obr. 4.10).



Obr. 4.10 Rozdelenie spekaných karbid podľa použitia na materiál obrobku [11].

ISO M – do tejto skupiny patria ocele s obsahom chrómu, ktorý je vyšší ako 12 %. Ďalšie významné legujúce prvky sú nikel a molybdén. Z hľadiska štruktúry sem patria feritické, martenzitické, austenitické a duplexné nehrdzavejúce ocele, ktorých spoločným aspektom pri obrábaní je vysoké tepelné zaťaženie reznej hrany nástroja. Materiály tejto skupiny tvoria dlhú až stredne dlhú triesku a preto je možné aj

univerzálne použitie nástrojov. Skupina M sa ďalej delí na podskupiny M01-M05-M10-M15-M20-M25-M30-M35-M40.

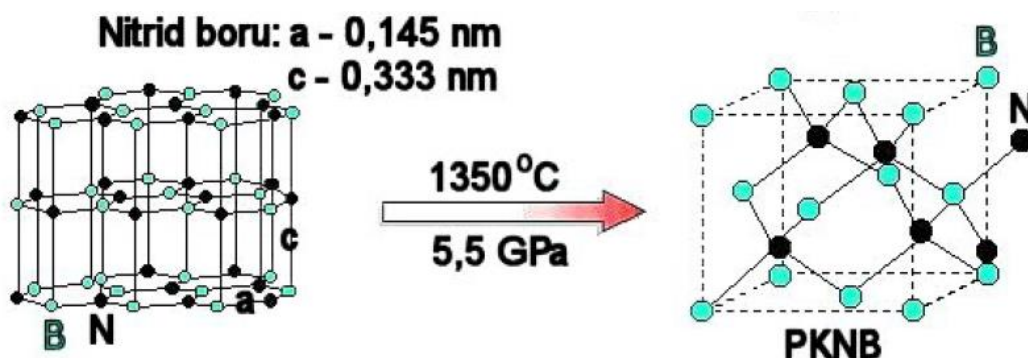
ISO S – kategória odvodená od skupiny M. Patria sem superzliatiny na báze titánu, niklu a kobaltu a niektoré typy vysokolegovaných ocelí. Problémy spojené s obrobiteľnosťou a životnosťou nástroja súvisia so spevňovaním materiálu obrodku, vysokým množstvom generovaného tepla a tvoriacim sa nárastkom na reznej hrane. Skupina S sa ďalej delí na podskupiny S01-S05-S10-S15-S20-S25-S30.

S rastúcim číslom podskupiny rastie obsah spojujúceho kovu, obvyklým je kobalt. Toto má za následok rastúcu húževnatosť a pevnosť v ohybe, naopak klesá tvrdosť a oteruvzdornosť rezného materiálu. Z hľadiska rezných podmienok klesá doporučená rezná rýchlosť v_c a naopak stúpa posunová rýchlosť v_f [8, 11, 18, 36].

Z uvedených poznatkov vyplýva, že pre obrábanie HRSA zliatin, v našom prípade Inconelu® 718, bude primárne určená viackarbidová vymeniteľná doštička s obsahom karbidu tantalu a niobu, čo predikuje jej odolnosť voči opotrebeniu za vysokých teplôt. Takáto rezná doštička môže podľa ISO 513 niesť označenie M alebo S, pretože vlastnosti obrábaných materiálov sa z hľadiska obrobiteľnosti (nehrdzavejúca oceľ, HRSA zliatiny) do značnej miery prekrývajú. Ako ideálny povlak pre danú aplikáciu by sme na základe poznatkov mohli označiť povlak 4.generácie s vrchnou vrstvou z materiálu Al_2O_3 .

4.2 Polykryštalický kubický nitrid bóru

Elementárnymi chemickými prvkami rezného materiálu sú bór a dusík. Zaraďuje sa do skupiny supertvrdých nástrojových materiálov. Polykryštalický kubický nitrid bóru (CBN) sa voľne v prírode nenachádza. Z atomárneho hľadiska má smerovú kovalentnú väzbu podobne ako diamant. Kryštalická mriežka CBN je zobrazená na (Obr. 4.11), ktorý je uvedený v literatúre [24].



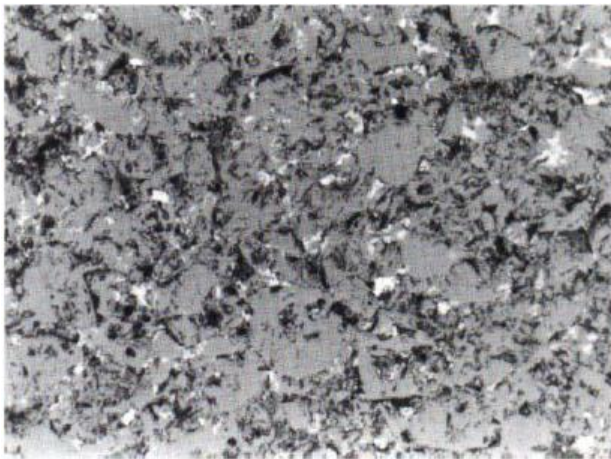
Obr. 4.11 Kryštalografická mriežka PKNB [24].

Tvrdosť materiálu sa pohybuje medzi 4000 až 5500 HV. Zároveň si zachováva odolnosť za extrémnych teplotných podmienok (2000°C). Je odolný voči abrazívnemu opotrebeniu a na rozdiel od diamantu sa vyznačuje chemickou stálosťou pri interakcii so železom alebo inými kovmi. Typickými príkladmi materiálu polotovaru pre použitie CBN sú oceľové výkovky, zakalená oceľ a zliatina, povrchovo kalené obrobky a HRSA zliatiny [8,37].

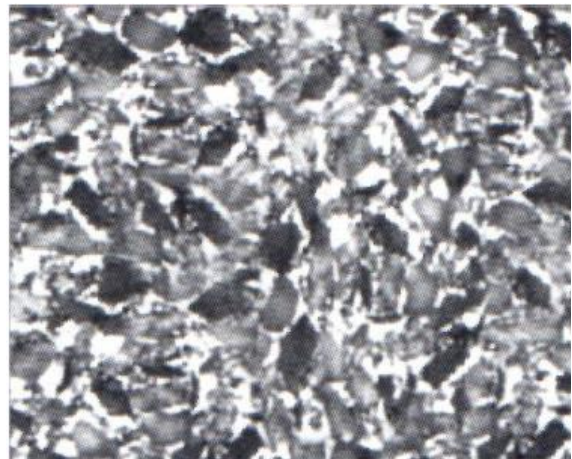
CBN sa vyrába pri vysokých tlakoch a teplotách pri ktorých dochádza k spojeniu kubických kryštálov bóru s keramickým alebo kovovými spojovacím materiálom. Konečné vlastnosti CBN môže ovplyvňovať zrnitosť kryštálu, množstvo a druh spojovacieho materiálu:

- nízky obsah CBN v kombinácii s keramickým materiálom vytvára obzvlášť chemicky stabilný materiál s väčšou odolnosťou proti opotrebeniu. Obsah CBN 40 až 60 % [37, 39];
- vysoký obsah CBN zaisťuje väčšiu húževnatosť a je vhodný pre obrábanie tvrdých HRSA zliatin. Množstvo CBN dosahuje hodnoty 85 až 100 % a môže obsahovať kovový spojovací materiál, ktorý sa ďalej podieľa na zvýšení húževnatosti [37, 39].

Mikroštruktúra CBN od rôznych výrobcov a teda s rôznou štruktúrou je prezentovaná na (Obr. 4.12) respektíve (Obr. 4.13), ktoré vo svojej literatúre publikuje Humár [24].



Obr. 4.12 CBN DBC50 od firmy Beers, JAR [24].



Obr. 4.13 CBN BX380 od firmy Toshiba Tungaloy, Japonsko [24].

CBN sa na nástrojoch vyskytuje v troch modifikáciách. Môže sa jednať o tenké povlaky s hrúbkou menšou ako 5 μm na karbidovom substráte. Ďalšou aplikáciou sú prispájkované špice z CBN na reznej doštičke. Poslednou možnosťou je kompaktná vymeniteľná doštička nalisovaná na nosiči zo spekaného karbidu. Typické rezné podmienky pri sústružení kaleného materiálu o tvrdosti 60–68 HRC sa pohybujú na úrovni reznej rýchlosti $v_c = 45$ až 60 m/min. a posuve na otáčku

0,2–0,4 mm. Ďalším plusom uvedeného materiálu je, že pri technológii sústruženia je možnosť dosiahnuť takú kvalitu povrchu, že tento proces sa stáva zaujímavou alternatívou k technológii brúsenia. Obmedzením pre nasadenie CBN je tvrdosť polotovaru, avšak na rozdiel od iných rezných materiálov sa jedná o jej minimálnu hranicu. Ak by sme chceli obrábať oceľ s hodnotou tvrdosti nižšou ako je 45 HRC, začal by sa nástroj výrazne opotrebovať. Tento jav vychádza z poznatku, že tieto ocele obsahujú vyššie množstvo feritu, ktorý má negatívny vplyv na odolnosť CBN proti oteru [8, 39].

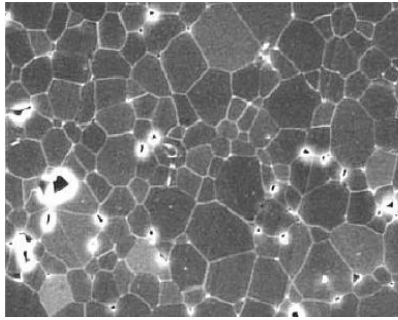
4.3 Rezná keramika

V minulosti sa pod širokým pojmom keramika rozumel oxid hlinitý Al_2O_3 . V tej dobe bola trvanlivosť keramického rezného nástroja tak krátka, že bol prakticky nepoužiteľný. Spôsobovalo to viacero aspektov, počnúc nedokonalosťou výroby reznej keramiky, metódami obrábania a končiac technickými obmedzeniami vtedajších obrábacích strojov, hlavne z hľadiska dosiahnutia dostatočnej reznej rýchlosti. Od tej doby sa vývoj keramiky posunul rapídny spôsobom vpred, kedy hlavnými aspektami zlepšených vlastností boli zníženie zrnitosti substrátu na úroveň jednotiek mikrometrov a zníženie porozity pod 1–2 %. V súčasnosti poznáme široké spektrum keramických materiálov vhodných pre nasadenie v technológiách obrábania. Hlavnými charakteristickými znakmi dnešnej keramiky sú vysoká tvrdosť, teplotná odolnosť, chemická stabilita aj v oblasti vysokých teplôt, nízka hmotnosť (oproti oceli je hustota keramiky na úrovni 33 %). Tieto vlastnosti nám pri správnom používaní zaručujú dlhú trvanlivosť reznej hrany, respektíve životnosť rezného nástroja, čo sa v kombinácii s vysokými reznými rýchlosťami prejaví do veľkého objemu úberu materiálu [8, 9].

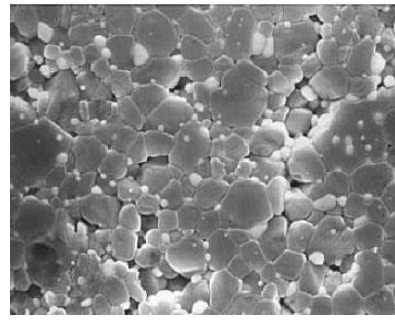
Rezná keramika je rozdelená do niekoľkých hlavných skupín [40, 9, 24]:

- oxidická keramika na báze oxidu hlinitého (Al_2O_3),
- neoxidická keramika na báze nitridu kremíku (Si_3N_4),
- vystužená keramika (oxidická alebo nitridová vystužená whiskermi SiC alebo Si_3N_4).

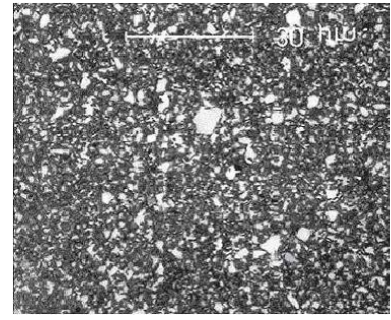
V prípade oxidickej keramiky existujú ďalšie podskupiny, ktorých názvy a štruktúru znázorňujú (Obr. 4.14, 4.15 a 4.16), uvedené v literatúre [24].



Obr. 4.14 Čistá keramika Al_2O_3 [24].



Obr. 4.15 Polozmesná keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\%(\text{ZrO}_2)$ [24].



Obr. 4.16 Zmesná keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ [24].

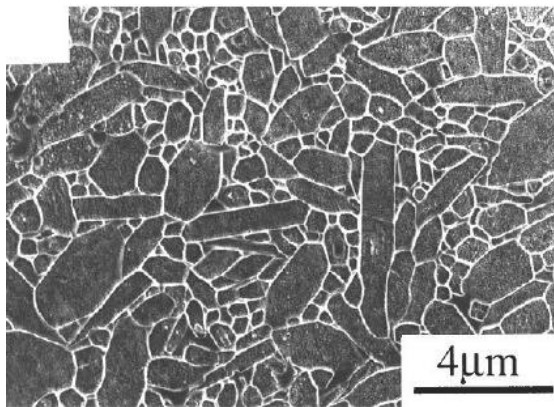
4.3.1 Vlastnosti oxidickej keramiky

Keramika na báze **čistého oxidu hlinitého** sa vyznačuje nízkou pevnosťou a húževnatosťou. Pevnosť v ohybe sa pohybuje v rozmedzí 400–500 MPa. Farba čistej keramiky sa líši v závislosti na spôsobe výroby. Pri lisovaní za studena je výsledný produkt biely, pri lisovaní za tepla má keramika šedú farbu. Tento typ keramiky je náchylný voči teplotným šokom. Uvedené vlastnosti naznačujú, že pri obrábaní týmto rezným materiálom dochádza k častým krehkým lomom reznej hrany nástroja, takzvanému vylamovaniu. Na druhej strane čistý oxid hlinitý má najvyššiu termo-mechanickú stabilitu medzi reznými materiálmi. Pridaním malého množstva oxidu zirkoničitého sa dostávame do oblasti **polozmesnej keramiky**, kde dochádza k výraznému zvýšeniu húževnatosti, čo rozširuje možnosti použitia tohto typu rezného materiálu. Odolnosť voči teplotným šokom zostáva stále na nízkej úrovni. Posledným typom oxidickej keramiky je materiál s prídavkom karbidu titánu TiC, nitridu titánu TiN, oxidu zirkoničitého ZrO_2 , prípadne ich kombináciou. Túto podskupinu nazývame **zmesná oxidická keramika**. Typickými predstaviteľmi sú keramiky zložené z kombinácii materiálov: ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$); ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$); ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC} + \text{TiN}$). Pevnosť v ohybe tohto rezného materiálu vzrástla pridaním ZrO_2 na 1000 MPa. Vďaka prídaniu kovovej fázy vzrástla odolnosť voči teplotným šokom a disponuje tiež zlepšenou tepelnou vodivosťou. Tieto vlastnosti zaručujú menšiu náchylnosť ku krehkým lomom [40, 24, 9].

4.3.2 Vlastnosti neoxidickej keramiky

Keramika na báze nitridu kremíku Si_3N_4 predstavuje ďalšiu skupinu rezných keramik. Geometria kryštálov tohto typu materiálu spôsobuje, že dochádza k procesu „samovystuženia“ a keramika disponuje vysokou húževnatosťou. Zároveň si v porovnaní so spekaným karbidom zachováva vysokú tvrdosť za tepla. Problém s ktorým sa tento typ keramiky stretáva je chemická stabilita. Z tohto dôvodu je jej nasadenie vhodné hlavne pre obrábanie šedej zliatiny, kde je možné dosiahnuť rezné

rýchlosti až 1000 m/min. Pri obrábaní iných typov materiálu sa tento nedostatok stáva vážnym problémom. Typickými predstaviteľmi tejto skupiny sú materiály: (Si_3N_4); ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$); ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$). Zvláštnu skupinu tvoria takzvané Sialony. Sialon je zložený z materiálov Si-Al-O-N. Tento materiál disponuje tvrdosťou 2000 HV, lepšou ohybovou pevnosťou (800 MPa) a je odolnejší voči teplotným šokom. Sialonová keramika je doporučená pre obrábanie HRSA zliatin a je možné jej chladenie počas procesu obrábania. Mikroštruktúru týchto materiálov si môžeme všimnúť na obrázkoch (Obr. 4.17 a 4.18) [8, 9, 40, 41].



Obr. 4.17 Neoxidická keramika Si_3N_4 [24].



Obr. 4.18 Keramika typu Sialon [24].

4.3.3 Vystužená keramika

Prvé vystužené keramiky tvorili kompozity oxidickej keramiky Al_2O_3 s whiskermi typu SiC_w s objemovým zastúpením 20–30 %. Tento rezný materiál bol vyvinutý zhruba v polovici 80. rokov minulého storočia. Vlákna whiskerov majú v priemere 1 až 2 μm a dosahujú dĺžku okolo 20 μm . Názov whisker je odvodený od vlákien kryštálu, ktoré nesú toto pomenovanie. Táto rezná keramika sa vyznačuje výrazným nárastom húževnatosti a odolnosti voči teplotným šokom, čo umožňuje použitie procesnej kvapaliny v procese obrábania. Kompozit sa môže skladať z oxidickej aj neoxidickej matrice, ktorá je doplnená vláknami kryštálu. S výhodou sa tento materiál používa pri obrábaní prerušovaným rezom. Je vhodný pre obrábanie HRSA zliatin, kalenej ocele ako aj šedej zliatiny [40, 24, 8, 9].

4.3.4 Zhrnutie vlastností rezných keramik

Vo všeobecnosti je vhodnosť nasadenia reznej keramiky vo veľkej miere závislá na podmienkach obrábania. Musíme zaručiť vysokú tuhosť a stabilitu systému S-N-O. Prispôbiť geometriu reznej hrany nástroja k spôsobu obrábania. Zvoliť vhodný typ keramického materiálu pre materiál polotovaru. Po splnení uvedených podmienok môžeme byť svedkami vysokej produktivity procesu obrábania. Najčastejšie sú keramické rezné nástroje využívané pre oblasť sústruženia, kde je možné zaručiť

neprerušovaný rez, no do popredia sa dostáva aj nasadenie tohto materiálu v technológii frézovania. Hlavnými nevýhodami reznej keramiky globálne patrí nízka odolnosť voči teplotným trhlinám a nízka lomová húževnatosť. Vhodnosť použitia jednotlivých typov keramik na materiál obrobku uvádza tabuľka (Tab. 4.3) [9, 40, 41].

Tab. 4.3 Priradenie nástrojového materiálu k materiálu polotovaru v aplikáciách reznej keramiky [9].

HODNOTENIE	Čistá oxidická keramika + polozmesná	Zmesná oxidická keramika	Vystužená keramika	Neoxidická keramika
Šedá zliatina	✓	✓		✓
HRSA zliatiny		✓	✓	✓ (Sialony)
Kalená oceľ		✓	✓	

Súhrnné porovnanie zásadných vlastností akými sú húževnatosť, tvrdosť, odolnosť proti teplotnému šoku a chemická stabilita pri obrábaní niklových zliatin, pre reznú keramiku prezentuje tabuľka (Tab. 4.4), ktorá je publikovaná v literatúre [9].

Tab. 4.4 Porovnanie vlastností jednotlivých druhov keramik [9].

HODNOTENIE	Húževnatosť	Tvrdosť	Odolnosť voči teplotným šokom	Chemická stabilita - Nikel
Najlepší	A ₃	B	B	A ₁
▲	B	A ₃ / A ₂	A ₃	A ₂
▲	A ₁	A ₃ / A ₂	A ₂	A ₃
NAJHORŠÍ	A ₂	A ₁	A ₁	B

$(Al_2O_3 + ZrO_2) \rightarrow A_1$

$(Al_2O_3 + whiskery) \rightarrow A_3$

$(Al_2O_3 + TiC) \rightarrow A_2$

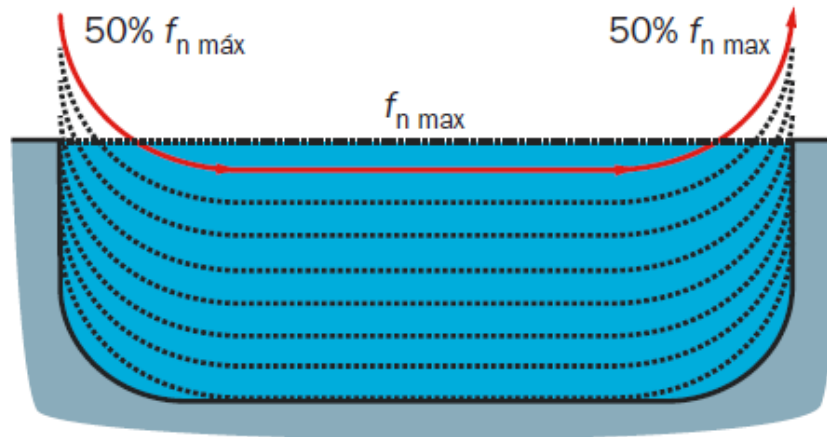
$(Si_3N_4 + prísady) \rightarrow B$

4.3.5 Nasadenie reznej keramiky pri obrábaní Inconelu 718

Experimentálna časť tejto práce, sa bude zaoberať nasadením reznej keramiky pri sústružení niklovej zliatiny, Inconelu 718. Cieľom je nahradenie aktuálny rezného materiálu, ktorým je spekaný karbid, s cieľom zvýšenia produktivity a spoľahlivosti rezného procesu. Na splnenie tohto cieľu je nevyhnutné byť oboznámený so základnými princípmi používania reznej keramiky pri obrábaní daného typu materiálu. Informácie sa budú týkať predovšetkým doporučených geometrií nástroja, ale tiež stratégií obrábania a prípravy polotovaru.

Pre sústruženie HRSA materiálov na báze niklu je možné použiť viacero druhov rezných keramik, tak ako uvádza tabuľka (Tab. 4.3 a 4.4). Na základe poznatkov vysokých hodnôt rezných síl by mala byť prvou voľbou vystužená, prípadne sialonová keramika. Pred začatím obrábania je vhodné zraziť hrany na obrobku, prípadne na

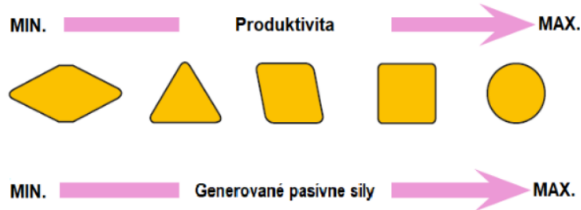
strojoch s plynulou reguláciou posunovej rýchlosti, znížiť rýchlosť posuvu pri nábehu a výbehu z materiálu. Vhodné je naprogramovať dráhy nástroja v zmysle „trochoidného sústruženia“. Tento pojem názorne vysvetľuje obrázok nižšie (Obr. 4.19), ktorý uvádza literatúra [19].



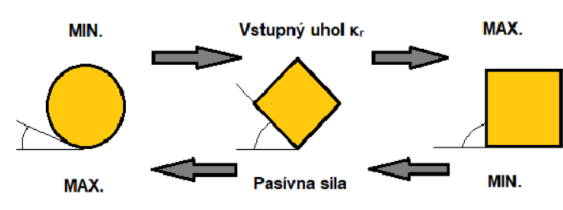
Obr. 4.19 Stratégia programovania dráh pri sústružení HRSA materiálov reznou keramikou [19].

Ak nedokážeme technologicky zaručiť nájazd a výjazd z materiálu po kružnici ďalšou možnosťou pohybu rezného nástroja, sú nájazdy a výjazdy z materiálu pod uhlom 45° za znížených hodnôt posuvu. Týmito opatreniami je možné efektívne zvýšiť trvanlivosť keramickej VBD. Hodnoty reznej rýchlosti sa pohybujú rádovo v stovkách metrov. Pomyselnou hornou hranicou pre Inconel 718 je rezná rýchlosť $v_c = 300$ m/min. Posunová rýchlosť sa volí v rozmedzí 0,1 až 0,3 milimetra na jednu otáčku obrobku. Hĺbka záberu hlavného ostria a_p sa pohybuje od 0,9 do 3 milimetrov, v závislosti od veľkosti reznej doštičky. Pri voľbe rezných podmienok, je potrebné brať do úvahy odporúčania výrobcu, ktoré budú na základe nadobudnutých poznatkov optimalizované. Voľba tvaru VBD je kompromisom medzi možným úberom materiálu a celkovou stabilitou procesu, vplyvom vznikajúcich rezných síl. Najvyššiu húževnatosť VBD a teda aj najefektívnejšie rezné podmienky by bolo možné dosiahnuť s doštičkou tvaru R, prípadne voľbou veľkého rádiusu špičky nástroja. Na druhej strane, generované pasívne sily sú v tomto prípade najvyššie (Obr. 4.20). Vhodný kompromis medzi produktivitou a stabilitou nám zaručí VBD tvaru C. Prvou voľbou z hľadiska geometrie by mal byť pri hrubovacích a polo-hrubovacích operáciách rezný nástroj s malým vstupným uhlom do rezu medzi hodnotami 45 až 60° . Vďaka tomu budeme schopní kombináciou parametru a_p a posuvu získať najvyššie hodnoty úberu materiálu [19].

Na druhej strane, musí byť zaručená dobrá tuhosť sústavy S-N-O, nakoľko so zmenšujúcim sa vstupným uhlom a zväčšujúcim sa rádiusom špičky reznej hrany narastá hodnota pasívnej sily (Obr. 4.21).



Obr. 4.20 Vplyv tvaru VBD na produktivitu [19].



Obr. 4.21 Vplyv nastavenia hlavného ostria na generovanú radiálnu silu.

Pri použití reznej keramiky je možné obrábanie bez použitia procesných kvapalín, s čím zároveň odpadá problém s jej likvidáciou. Húževnatosť a odolnosť voči teplotným šokom sialonovej a vystuženej keramiky, zároveň použitie procesnej kvapaliny dovoľuje, za predpokladu dostatočného prívodu. Dôležité je naplánovať stratégiu dráh nástroja tak, aby bolo zaťaženie reznej hrany takmer konštantné. To znamená obrábať počas celého procesu s konštantnou hodnotou šírky záberu hlavné ostria a_p [9].

4.4 Opatrenie rezného nástroja

Opatrenie je proces prejavujúci sa na koncepcných aj celkových častiach strojov a strojných konštrukcií, ktoré sú vo vzájomnom kontakte, respektíve relatívnom pohybe. Proces opotrebenia je maximalizovaný mnohými faktormi, medzi ktoré patria fyzikálne, chemické či mechanické vplyvy. Pri procese obrábania sa do relatívneho pohybu dostáva obrobok voči nástroju a trieska odchádzajúca po čele nástroja. Taktiež dochádza k silovému kontaktu medzi trieskou a nástrojom, respektíve nástrojom a polotovarom. Tieto vplyvy majú spoločný výsledok, ktorým sa stáva nutné opotrebenie nástroja. V porovnaní s bežnými pracovnými podmienkami strojných súčastí je rezná hrana obrábacím procesom enormne namáhaná. Orientačné údaje, v ktorých rezný nástroj pracuje a ktorým musí odolávať znázorňuje tabuľka (Tab. 4.5) [8].

Tab. 4.5 Vybrané vplyvy zaťaženia reznej hrany nástroja [8].

Pracovné podmienky	Doba kontaktu nástroj–trieska [s]	Deformačná rýchlosť [s^{-1}]	Teplotný gradient na čele nástroja [$^{\circ}C/mm$]	Teplota na funkčnom povrchu nástroja [$^{\circ}C$]	Tlakové kontaktné zaťaženie [MPa]
Rezná hrana nástroja	10^{-3}	10^3-10^6	10^4	300–1300	10^3-10^4

4.4.1 Mechanizmy a formy opotrebenia nástroja

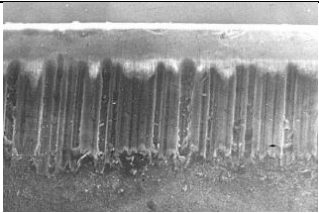
Mechanizmy opotrebenia rezného nástroja v princípe delíme na základe javu, ktorý toto opotrebenie spôsobuje. Jeho vysvetlenie má buď fyzikálne-mechanickú alebo chemickú podstatu, prípadne ich kombináciu. V tabuľke (Tab. 4.6), uvedieme rozdelenie jednotlivých mechanizmov.

Tab. 4.6 Rozdelenie mechanizmov opotrebenia rezného nástroja [8].

Fyzikálne – mechanické mechanizmy	Chemické mechanizmy
<ul style="list-style-type: none"> • Krehký lom, • Plastickú deformáciu, • Abrázivny oter, • Adhézny oter, • Teplotné trhliny, • Delamináciu vrstvy, • Kmity sústavy S-N-O, • Únavu materiálu, • Prípadne kombináciu daných mechanizmov. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difúzia, • Tvorba chemických zlúčenín, • Interkryštalické zoslabovanie, • Termo – elektrické opotrebenie, <ul style="list-style-type: none"> • Prípadne kombinácia uvedených mechanizmov.

K základným, respektíve najčastejšie sa vyskytujúcim mechanizmom s najväčším podielom na celkovom opotrebení rezného nástroja patria nižšie uvedené. Tieto mechanizmy budú bližšie popísané a znázornené pomocou komplexnej tabuľky (Tab. 4.7). Informácie sme čerpali z uvedených zdrojov [24, 9, 45].

Tab. 4.7 Základné mechanizmy opotrebenia [24, 9, 16].

Abrázia	<p>Opotrebenie vznikajúce hlavne pôsobením tvrdých mikročastíc obsiahnutých v materiáli polotovaru a mikročastíc uvoľnených z nástroja, ktoré sa dostanú medzi ich povrch. Abrázia je tiež nazývaná ako brúsny oter. Typickou formou opotrebenia pôsobením daného mechanizmu je opotrebenie chrbta nástroja VB.</p>	 <p>Obr. 4.22 Abrázivne opotrebená plocha keramické nástroja [24].</p>
---------	---	---

Adhézia	Dochádza k „nalepovaniu“ materiálu na čele nástroja a tvorbe nárastku. Takto vzniknutý nárastok môže poškodiť reznú hranu vydrolovaním alebo vylomením pri porušení mikrozvarovej plochy. Tento proces vzniká v dôsledku afinity rezného materiálu k materiálu polotovaru za pôsobenia tlaku a teploty. Typickou formou opotrebenia je vydrolovanie a následný výmoľ na čele nástroja.	 <p>Obr. 4.23 Adhézia na nástroji zo SK [24].</p>
Difúzia	Dochádza k preskupeniu atómov z materiálu nástroja do materiálu obrobku a opačne. Tento proces je tepelne aktivovaný vplyvom rezného procesu. Prejavuje sa u materiálov s vysokou vzájomnou afinitou a zníženou chemickou stabilitou. Typickou formou opotrebenia pre tento mechanizmus je výmoľ na čele, ktorý znásobuje pôsobenie abrazívneho a adhézneho mechanizmu.	 <p>Obr. 4.24 Opotrebenie čela nástroja pôsobením kombinácie difúzie, adhézie a abrazie [45].</p>
Oxidácia	Vplyvom zníženej chemickej stability nástroja, pôsobením kyslíku a zvýšenej teploty, dochádza k tvorbe zlúčenín na povrchu nástroja. Typickou formou opotrebenia tohto mechanizmu, je vytvorenie sekundárnej – oxidačnej ryhy na chrbte nástroja.	 <p>Obr. 4.25 Zvýraznená oxidačná ryha na chrbte nástroja [24].</p>
Plastická deformácia	K plastickej deformácii rezného nástroja všeobecne dochádza, ak je teplota rezného procesu vyššia ako maximálna teplota nástroja pri ktorej si zachováva svoje mechanické vlastnosti. V spojení s mechanickým zaťažením dôjde k plastickej deformácii reznej hrany, nazývanému aj lavínové opotrebenie.	 <p>Obr. 4.26 Lavínové opotrebenie reznej hrany nástroja [45].</p>
Krehký lom	Krehký lom vzniká v dôsledku vysokého mechanického zaťaženia, nehomogenity materiálu obrobku, nečistotami v materiáli. Jeho vznik je typický pri prerušovanom reze. Môže spôsobiť vážne škody, hlavne pri dokončovaní.	 <p>Obr. 4.27 Krehký lom [45].</p>

Ako bolo uvedené vyššie, forma opotrebenia nástroja je výsledkom alebo prejavom pôsobenia mechanizmu, prípadne kombinácie skupiny mechanizmov. Medzi základné formy opotrebenia sa zaraďuje: opotrebenie na chrbte, výmoľ na čele, primárna a sekundárna ryha na chrbte, ryha na čele nástroja. Medzi ďalšie formy patrí opotrebenie v tvare vrubu na hlavnom chrbte nástroja, vznik hrebeňových trhlín (obvykle spôsobené tepelnými šokmi) [9, 24].

4.4.2 Typické opotrebenie nástroja pri obrábaní Inconelu 718

Pri obrábaní superzliatiny niklu s obchodným označením Inconel 718 je možné konštatovať, že mechanizmy, ktoré sa budú na opotrebení podieľať, budú aktivované pôsobením vysokých rezných síl, respektíve odporov a vysokej teploty procesu. Na základe viacerých odborných publikácií budú uvedené typy opotrebenia, ktoré majú pri danom reznom materiáli najväčšie zastúpenie. Ďalším krokom bude návrh možných riešení na elimináciu daného javu. Na základe prác [35, 42, 44, 46], budú uvedené najčastejšie formy a mechanizmy opotrebenia pre vyššie vybrané rezné nástroje.

V prípade **spekaného karbidu** s povlakmi $TiC-Al_2O_3$ malo významné zastúpenie abrazívne a adhézne opotrebenie, ktoré sa prejavilo pri nižších rezných rýchlostiach. Pri vyšších rezných rýchlostiach sa začalo prejavovať opotrebenie spôsobené teplotným zaťažením a aktivovaným difúznym dejom. Hlavnými formami opotrebenia boli výmoľ na čele, opotrebenie chrbta rezného nástroja, plastická deformácia a tepelné trhliny. Pri použití **reznej keramiky** dochádzalo k tvorbe zárezov/vrubov na chrbte nástroja, výmoľu na čele nástroja a ku krehkému lomu reznej hrany. V prípade použitia oxidickej keramiky s pridaním TiC bol dominantný výmoľ na čele, naopak pri reznej keramike na báze Si_3N_4 bolo dominantné opotrebenie formou zárezov/vrubov. Rezná keramika vykazovala dobrú chemickú odolnosť pri zvýšených teplotách. Super tvrdý rezný **materiál CBN** vykazoval v jednej z uvedených prác v porovnaní s ostatnými reznými materiálmi najvyššiu hodnotu opotrebenia VB. V ďalšej práci bol skúmaný vplyv reznej kvapaliny. Zistilo sa, že pri vysokorýchlostnom obrábaní nedošlo vplyvom reznej kvapaliny k efektívnemu potlačeniu opotrebenia. Formy opotrebenia boli podobné ako pri reznej keramike. Celkový záver je, že pri obrábaní Inconelu 718 je trvanlivosť reznej hrany najviac ovplyvnená faktormi, akými sú, odpevnenie rezného materiálu vplyvom tepla, difúzia, tepelné trhliny. Pri nižších rezných rýchlostiach sa prejavuje pôsobenie adhézie a abrázie [35, 42, 46, 44, 43].

Opotrebenie VB na chrbte rezného nástroja bolo pre všetky rezné materiály najnižšie pri použití reznej rýchlosti v rozmedzí 70 až 110 m/min, tak ako deklaruje tabuľka (Tab. 4.8) [35, 42].

Tab. 4.8 Doporučené rezné rýchlosti vzhľadom na VBminimálne [35, 42].

Rezný materiál	Spekaný karbid	Rezná keramika	CBN
Rezná rýchlosť [m/min]	70–85	90–110	95–120

V nasledujúcej tabuľke (Tab. 4.9), uvedieme možné príčiny uvedených problémov a opatrenia, ktoré ich pomôžu minimalizovať.

Tab. 4.9 Možné riešenia príčin nadmerného opotrebenia nástroja [9, 21].

Typ opotrebenia	Možná príčina	Opatrenie
Opotrebenie chrbta nástroja	Príliš vysoká rezná rýchlosť prípadne nedostačujúca odolnosť rezného materiálu k materiálu obrobku.	Zvoliť rezný nástrojový materiál s vyššou odolnosťou. V prípade obrábania HRSA zliatin reznou keramikou, zvýšiť reznú rýchlosť. Použiť menší uhol nastavenia ostria.
Opotrebenie na čele v tvare žliabku	Difúzne opotrebenie, spôsobené vysokými reznými teplotami na čele a nízkou odolnosťou rezného materiálu.	Použiť rezný materiál s povlakom Al_2O_3 . Použiť pozitívnu geometriu reznej hrany.
Plastická deformácia	Príliš vysoká teplota a tlak.	Zvoliť tvrdší rezný materiál.
Trhliny vzniknuté pôsobením tepla	Prerušovaný rez prípadne nerovnomerný prívod procesnej kvapaliny.	Obrábať rezným materiálom bez prívodu reznej kvapaliny. Zvoliť materiál s vyššou húževnatosťou
Krehký lom reznej hrany	Príliš krehký rezný materiál. Príliš vysoké namáhanie reznej hrany. Príliš pozitívna geometria reznej hrany. Príliš malá veľkosť VBD.	Zmenšiť posuv alebo hĺbku rezu. Zlepšiť stabilitu obrábania – vyhnúť sa kmitaniu. Zvoliť širšiu VBD, ideálne využiť jednostrannú VBD. Zmenšiť uhol κ_r .
Tvárnienie polotovaru	Spôsobená veľkým tlakom od nástroja.	Zvýšiť hĺbku záberu. Zvýšiť posuv a znížiť reznú rýchlosť. Zmenšiť rádius špičky.

5 REALIZÁCIA EXPERIMENTU

Cieľom tejto práce je optimalizácia procesu sústruženia Inconelu 718 v spolupráci s firmou CCI Czech Republic s.r.o.. Priestory spoločnosti sa nachádzajú v blízkosti Brna, v Šlapaniciach. Výrobný program je zastúpený produkciou bezpečnostných tlakových ventilov, dodávaných do aplikácií ropného, petrochemického a energetického priemyslu. Spoločnosť aktuálne dáva prácu viac ako 330 zamestnancom a disponuje viac ako 30 CNC strojmi. Pri samotnom výrobnom procese sú zastúpené technológie obrábania a zvarovania, technológie povrchových úprav a tiež technologické riešenia nevyhnutné pre finálnu montáž ventilov.

Experimentálna časť tejto práce bude spočívať v náhrade aktuálneho rezného materiálu, ktorým je spekaný karbid od firmy Walter CZ s.r.o., s cieľom nárastu produktivity pri procese sústruženia polotovarov hriadeľových súčastí. Aktuálny stav procesu obrábania spekaným karbidom a rovnako jeho špecifikáciu uvádzame v tabuľke (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Stav zistených hodnôt rezného procesu pred optimalizáciou [50].

Sledovaný parameter	Údaj definujúci sledovaný parameter
Obrábací stroj	DMG CTX Gama 2000
Nožový držiak	PDJNL 2525 M15 (Walter AG)
Vymeniteľná doštička (ISO)	DNMG 150608-NM4 (Walter AG)
Povlak doštičky	Tiger-tec® PVD WSM 10 – povlak oxidu hlinitého Al_2O_3 , nanesený PVD metódou
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	45
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	2
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,3
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	10
Odobraný materiál V [cm ³ ·min ⁻¹]	27
Celkový odobraný materiál V [cm ³]	270

5.1 Definícia použitých strojov a prístrojov

Experimenty budú prebiehať na obrábacom stroji DMG CTX Gama 2000, roku výroby 2012. Stroj je vybavený revolverovou hlavou s kapacitou pre 12 nástrojov. Uvedený stroj disponoval poháňanou frézovacou hlavou. Výkon hlavného elektromotoru vretena (os C) dosahoval 52 kW. Maximálne otáčky vretena boli 2500 min⁻¹. Na tomto stroji sú nižšie uvedené súčasti, obrábané uvedeným spekaným karbidom. Nasadením totožného stroja pre potreby experimentu a pre skutočnú výrobu sa zvyšuje relevancia samotného testu. Uvedený stroj je vybavený riadiacim

systemom firmy Siemens, Sinumerik 840D. Stroj je zachytený na (Obr. 5.1), pohľad na ovládací panel s riadiacim systémom znázorňuje (Obr. 5.2).

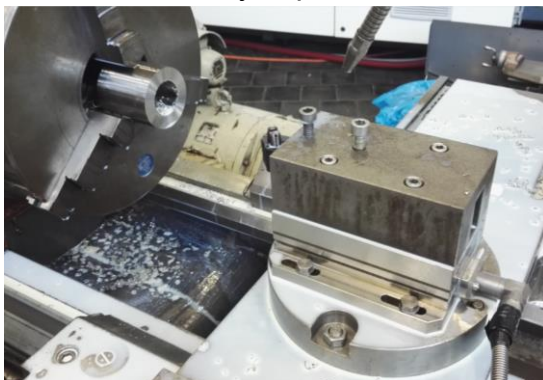


Obr. 5.1 DMG CTX Gama 2000.



Obr. 5.2 Riadiaci panel so systémom Sinumerik 840D.

Zariadenie, pomocou ktorého budeme vyhodnocovať tvar a štruktúru triesok vzniknutých pri obrábaní, je optický mikroskop ZEISS Stemi 2000-C. Rovnako budeme pomocou tohto prístroja zaznamenávať priebeh opotrebenia VBD. Zariadenie je vybavené plynulou reguláciou osvetlenia. Optický záznam je zhotovený digitálnym fotoaparátom Sony, ktorý bol k tomuto mikroskopu prispôbosený. Zábery zhotovené digitálnym fotoaparátom budú v prípade potreby upravené softvérom Lucia Image. Tento program pracuje na princípe preloženia viacerých snímok, s následným vyostrením obrazu. Meranie rezných síl, bude uskutočnené za pomoci dynamometru firmy Kistler, typ 9257 B. Dynamometer je schopný zachytiť 3 zložky síl, v osiach X, Y, Z. Meracie zariadenie je upevnené pomocou skrutiek na suport sústruhu TOS SUI 50. Nožový držiak je ustavený v prípravku, ktorý je uchytený na dynamometer (Obr. 5.3). Meracie zariadenie je pripojené na multikanálový nábojový zosilovač Kistler 5070A, ktorého výstup zachytáva počítač pomocou programu DynoWare (Obr. 5.4). Ukážku nastavenia základných parametrov merania v programe DynoWare, uvádza Príloha 1.



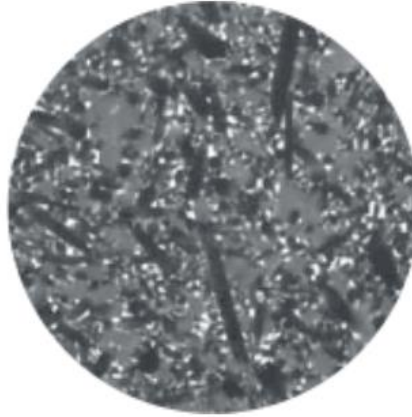
Obr. 5.3 Dynamometer typ 9257 B, s upnutým nožovým držiakom.



Obr. 5.4 Nábojový zosilovač prepojené so softwarom DynoWare.

5.2 Testovaný rezný nástroj a definícia podmienok obrábania

Na základe teoretických poznatkov uvedených v tejto práci, doplnených o skúsenosti odborníkov českého zastúpenia firmy Kennametal, bola ako vhodný rezný materiál zvolená sialonová keramika (Obr. 5.5).



Obr. 5.5 Mikroštruktúra SiAlON keramiky Kennametal [52].

Vzhľadom na štíhlosť obrobku bude použitá geometria reznej doštičky, ktorá minimalizuje pasívnu silu, pôsobiacu do obrobenej plochy, čo okrem iného pomôže eliminovať efekt spevňovania za studena. Uhol nastavenia hlavného ostria κ_r , bude 95° . Polomer zaoblenia špičky nástroja 1,2 mm, respektíve 0,8 mm. Ďalším dôvodom použitia uhla $\kappa_r = 95^\circ$ je požiadavka spoločnosti CCI Brno - sústruženia do „rohu“ bez potreby použitia ďalšieho nástroja. Väčší polomer špičky VBD má priaznivý vplyv na tuhosť a možnosť nastavenia produktívnejších rezných parametrov. Preto bude $r_\epsilon = 1,2$ mm prvou voľbou. V prípade, že by generované sily spôsobovali vznik vibrácií, bude prístupné k použitiu VBD s rádiusom 0,8 mm. Vhodným kompromisom medzi produktivitou a stabilitou procesu je rezná doštička tvaru C. Testované sorty VBD od firmy Kennametal, budú KYS 25 a KYS 30. Ich označenie špecifikuje tabuľka pomocou ISO kódu, ktorý definuje ich geometriu (Tab. 5.2).

Tab. 5.2 Vybrané rezné materiály pre potreby experimentu.

Označenie VBD podľa ISO	Vybraná sorta
CNGA 12 04 12 T01020	KYS 25, KYS 30
CNGA 12 04 08 T01020	KYS 25, KYS 30

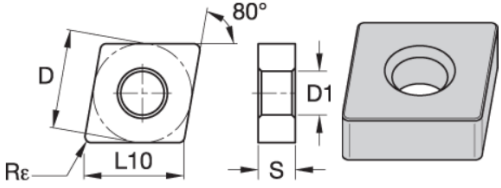
Použitie a typ procesnej kvapaliny je ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje rezný proces. Na základe možností stroja, jeho vybavenia, teoretických poznatkov a skúseností zástupcov firiem Kennametal a CCI Brno, boli zvolené 2 možnosti použitia procesného média, ktoré bude testované. Prvou voľbou je použitie procesnej kvapaliny s maximálnym možným prietokom, ktorý stroj umožňuje. Druhou voľbou bude obrábanie na sucho, vďaka ktorému dôjde k odpevneniu povrchovej vrstvy,

vplyvom natavovania odchádzajúcej triesky. Teoretické aspekty jednotlivých spôsobov sú bližšie popísané v kapitole 3.2.2.

Prvou voľbou v oblasti nastavenia rezných parametrov, akými sú rezná rýchlosť, posuv a šírka záberu hlavného ostria, budú katalógové hodnoty, s prihliadnutím na možnosti použitého obrábacieho stroja. Tieto údaje budú optimalizované, s cieľom dosiahnutia vhodného kompromisu medzi odobraným objemom materiálu a trvanlivosťou reznej hrany nástroja.

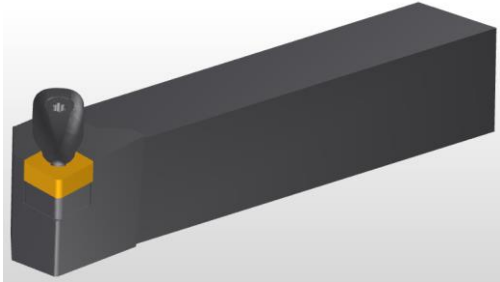
Rozmery a grafické znázornenie prvej voľby VBD, s polomerom špičky 1,2 mm, je uvedené v tabuľke (Tab. 5.3).

Tab. 5.3 Rozmery a geometria VBD CNGA 120412 T01020 [51].

 <p>Obr. 5.6 VBD geometrie CNGA Kennametal [51].</p>	D [mm]	L10 [mm]	S [mm]	R _ε [mm]
	12,7	12,896	4,76	1,2

K VBD je potrebné nakonfigurovať kompatibilný nožový držiak. Vzhľadom na požiadavku spoločnosti CCI Brno a teoretické predpoklady, ktoré sme uviedli vyššie, budeme voliť nástroj s nastavením hlavného uhlu 95°. Označenie a grafický náhľad zostavy, je prezentovaný tabuľkou (Tab. 5.4).

Tab. 5.4 Nožový držiak s definovanou geometriou [51].

 <p>Obr. 5.7 Nožový držiak Kennametal [51].</p>	Označenie ISO	DCNL 2525 M12 KC04
	Uhol κ _r [°]	95
	Celková dĺžka [mm]	150
	Maximálna šírka [mm]	32

5.2.1 Definícia sorty KYS 30

Jedná sa o keramiku typu SiAlON, ako bolo uvedené v kapitole 5.2. Daná sorta je v nepovlakovanom stave, čo napovedá jej všeobecné použitie pri dokončovacom sústružení HRSA materiálov. Odoláva tepelným šokom a vyznačuje sa väčšou hodnotou húževnatosti, v porovnaní s povlakovanou keramikou rovnakého

materiálového substrátu. Ďalším benefitom je možnosť použitia veľkej hĺbky záberu hlavného ostria v pomere k veľkosti VBD [52].

Vďaka zvýšenej húževnatosti a lomovej pevnosti dokáže vo väčšej miere odolávať vibráciám. Táto vlastnosť ju predurčuje pre použitie v aplikáciách náchylných na ich vznik. Do tejto oblasti spadá napríklad obrábanie hriadeľov s veľkým štíhlostným pomerom bez možnosti použitia lunety.

5.2.2 Definícia sorty KYS 25

Multivrstvý povlak $Ti(C,N)-Al_2O_3$, s hrúbkou 20 μm na SiAlON substráte je základnou materiálovou charakteristikou sorty KYS 25. Tento typ rezného materiálu je špeciálne vyvinutý na hrubovacie a polohrubovacie operácie, pri sústružení superzliatin na báze niklu vo vytvrdenom stave [52].

Ako bolo uvedené v teoretickej časti tejto práce, použitie povlaku s Al_2O_3 vrstvou vedie k zvýšeniu teplotnej odolnosti, zvýšeniu trvanlivosti a tiež k možnosti nárastu reznej rýchlosti pri danej obrábacej aplikácii. Na druhej strane táto sorta sa vyznačuje nižšou húževnatosťou. Z tohto dôvodu musí byť zabezpečená vysoká stabilita systému S-N-O. Pri tejto sorte je tiež možná aplikácia suchého obrábania.

5.3 Návrh experimentálnej skúšky

Experiment bude rozdelený na dve zásadné oblasti. Prvou bude odber dát a parametrov zistených v priebehu procesu sústruženia. Druhou časťou experimentu bude vyhodnotenie nameraných hodnôt a následné stanovenie záverov. V nasledujúcich kapitolách, načrtne plán postupu realizácie skúšky.

5.3.1 Odber dát pri sústružení Inconelu 718

Testovanie bude realizované pre sorty KYS 30 a KYS 25 v kombinácií so suchým obrábaním a obrábaním za prítomnosti procesnej kvapaliny. Jednotlivé možnosti budú na základe nameraných hodnôt optimalizované, s cieľom získania uspokojivej trvanlivosti reznej hrany a objemu odobraného materiálu za danú časovú jednotku. Po získaní týchto hodnôt budú zaznamenané zodpovedajúce rezné podmienky. Následne bude uskutočnený sekvenčný test zaťaženia reznej hrany. Časové úseky zaťaženia zvolíme po približne 2 minútach. Každý z testov bude doplnený odberom vznikajúcej triesky. Ako bolo uvedené vyššie, prioritou bude použitie VBD s rádiusom špičky 1,2 mm. Prvou voľbou budú rezné parametre doporučené výrobcom (Tab. 5.5). V poslednej fáze zberu experimentálnych hodnôt, uskutočníme meranie rezných síl za pomoci vyššie popísaného dynamometru Kistler. Rezné sily budú merané pre optimalizované podmienky obrábania reznou keramikou a pre pôvodné (referenčné) hodnoty obrábania spekaným karbidom. Generované sily na reznej keramike budú vyhodnotené pre novú VBD a pre jednotlivé sekvencie

opotrebenia reznej hrany. Výstupom bude graf vývoja rezných síl v závislosti na náraste opotrebenia. Hodnoty namerané na spekanom karbide a na reznej keramike budú porovnané vzhľadom na silové zaťaženie obrobku.

Meranie bude realizované na čele prstenca s vonkajším priemerom 68 mm a vnútorným priemerom 40 mm (Obr. 5.3), čím bude docielená verifikácia vývoja rezných síl v závislosti na zmene reznej rýchlosti.

5.3.2 Vyhodnotenie nameraných hodnôt

Priebeh opotrebenia reznej hrany VBD, tvar a štruktúra odobratej triesky, bude vyhodnotená pomocou vyššie spomínaného optického mikroskopu ZEISS. Vďaka snímkam čela a chrbta rezného nástroja, sme schopní sledovať formy opotrebenia a priradiť k nim mechanizmy, ktoré sa na vzniku daného defektu podieľajú. Rozvoj opotrebenia reznej hrany nástroja bude zistený na VBD, vopred vystavenej sekvenčnému záťažovému testu.

Rezné sily, respektíve odpory, vznikajúce pri procese obrábania, zaťažujú rezný nástroj, stroj a obrobok. Vzhľadom na vysoký štíhlostný pomer obrábaných súčastí je potrebné predikovať reakciu obrobku na namerané silové namáhanie. Výpočet bude realizovaný pomocou metódy konečných prvkov (MKP),

Aktuálny obrábací proces spekaným karbidom (Tab. 5.1), daných reprezentatívnych zástupcov vyrábaných súčastí, je vo firme CCI Brno odladený. Bude preto považovaný za referenčný stav, kedy vznikajúce rezné sily negenerujú vznik vibrácií prípadne inú nestabilitu. Z týchto dôvodov bude prevedený výpočet, pomocou ktorého bude zistený priebeh napätia a namáhania na ohyb obrábanej súčastí. Vstupnými hodnotami budú rezné podmienky a sily od spomenutého, stabilného procesu.

V ďalšom kroku uskutočníme rovnaký výpočet so vstupnými dátami z optimalizovaného procesu obrábania reznou keramikou. Následne, oba simulačné výstupy medzi sebou porovnáme a vyvodíme závery. V prípade, že zaťaženie obrobku za daných silových podmienok optimalizovaného procesu bude vyššie ako pri referenčných hodnotách, budeme nútený podstúpiť kroky, ktoré pomôžu rezné sily minimalizovať. Tento stav však môže viesť k zníženiu efektivity samotnej optimalizácie, a preto bude ďalším podstatným výstupom diplomovej práce technicko-ekonomická analýza.

5.4 Prezentácia nameraných dát

Realizácia experimentu prebiehala smerom od uvedených rezných parametrov (Tab. 5.5), k parametrom optimalizovaným. Zistenia v tejto časti práce budú prezentované rovnako so zachovaním chronológie. Prvé testy na základe odporúčaní zástupcov firmy Kennametal prebiehali za prítomnosti použitia procesnej kvapaliny.

Dôležitým aspektom jej použitia, bolo nastavenie maximálneho prietoku na danom stroji a smerovanie kvapaliny priamo do miesta rezu. Toto sme docielili použitím tvarovateľnej medenej trubičky. Upevnená bola, pomocou závitú na centrálny rozvod procesnej kvapaliny v revolverovej hlave (Obr. 5.6). V nasledujúcich tabuľkách, sú uvedené rezné podmienky spolu s výsledkami testov (Tab. 5.5–5.10).



Obr. 5.8 Prívod procesnej kvapaliny do miesta rezu.

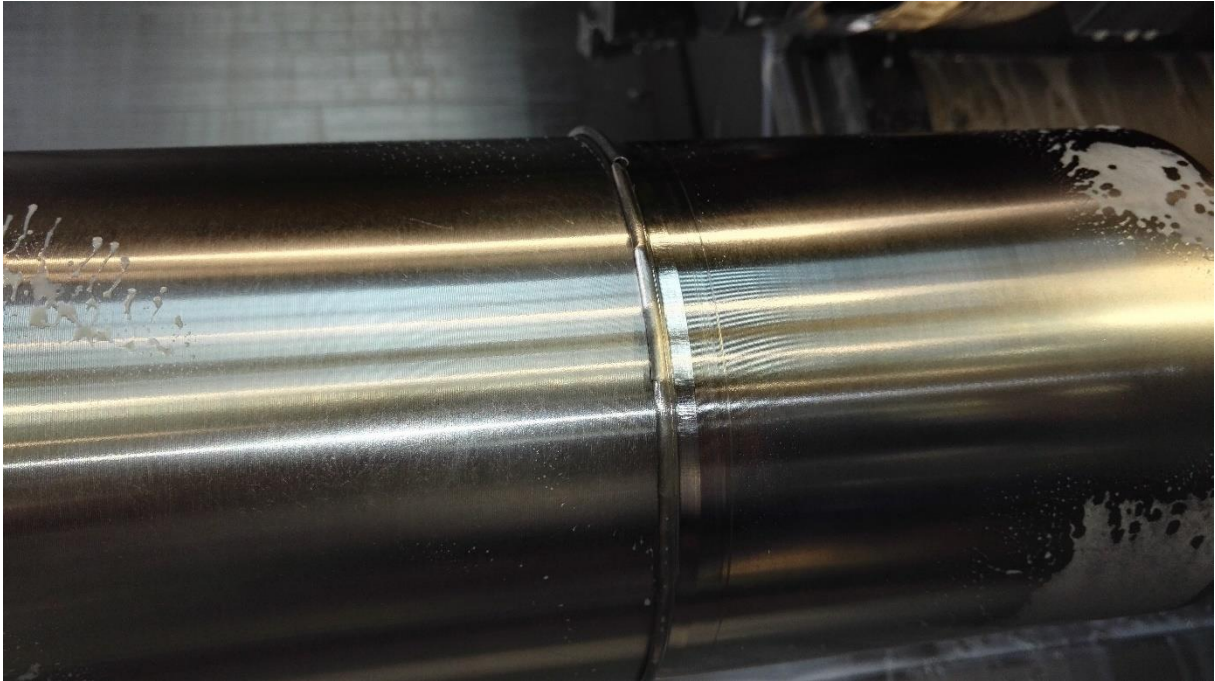
Tab. 5.5 Testované rezné podmienky 1.

Číslo merania	1
Sorta reznej doštičky	KYS 30
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	180
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	3
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,2
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	1,5
Procesná kvapalina	ÁNO

Tab. 5.6 Testované rezné podmienky 2.

Číslo merania	2
Sorta reznej doštičky	KYS 30
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	200
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	2
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,2
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	1,5
Procesná kvapalina	ÁNO

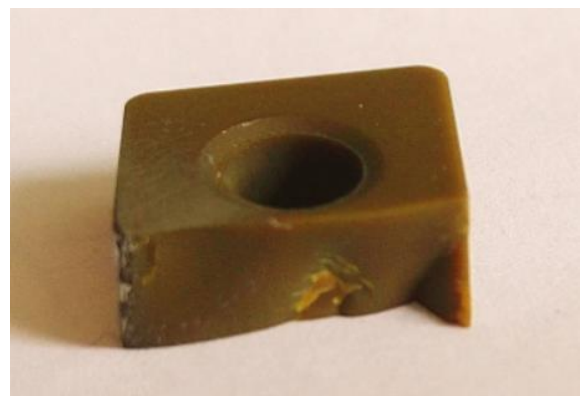
Trvanlivosť reznej hrany je v oboch prípadoch nízka a výsledky neboli uspokojivé. Za vznikom problému a následným náhlym ukončením trvanlivosti reznej hrany stál v oboch prípadoch rovnaký činiteľ. Týmto činiteľom bolo generovanie disku na neobrobenej ploche (Obr. 5.9). To spôsobovalo značné rázy do vedľajšieho chrpta reznej doštičky a namáhanie viedlo až ku krehkému lomu (Obr. 5.10, 5.11).



Obr. 5.9 Generovanie disku na neobrobenej ploche.

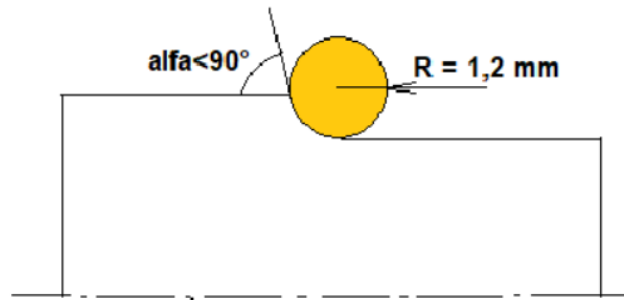


Obr. 5.10 Krehký lom po teste 1.



Obr. 5.11 Krehký lom po teste 2.

Možným riešením by bolo použitie inej geometrie VBD, s uhlom nastavenia hlavného ostria $\kappa_r < 90^\circ$. To bolo z uvedeného technologického hľadiska zamietnuté. Z tohto dôvodu bolo potrebné znížiť šírku záberu hlavného ostria a_p na 1 mm, pričom rádus špičky danej doštičky bol 1,2 mm. Týmto spôsobom bola využitá kombináciu výhod VBD kruhového tvaru a tvaru C. Obrábalo sa v podstate „mikro-kruhovou“ doštičkou, no stále bola možnosť vytvorenia ostrého rohu, ako bolo požadované. Vstupný uhol κ_r bol nižší ako 90° (Obr. 5.12), a tým sme eliminovali tvorbu disku.



Obr. 5.12 Schéma obrábania pod úrovňou rádiusu špičky.

S takto upravenými parametrami sa pokračovalo v ďalšom testovaní. Posunová rýchlosť bola zvýšená, následkom čoho bola eliminácia objemových strát odobraného materiálu, vplyvom zníženia šírky záberu hlavného ostria.

Tab. 5.7 Testované rezné podmienky 3.

Číslo merania	3
Sorta reznej doštičky	KYS 30
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	200
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	1
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,35
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	2,4
Procesná kvapalina	ÁNO

Nárast trvanlivosti oproti pôvodnej variante sa zvýšil o približne 60 %, no stále sme nedosahovali na hranicu predpokladanej trvanlivosti, 6 až 8 minút. Preto sa pre ďalšie testy použil výkonnejší, povlakovaný rezný materiál KYS 25.

Tab. 5.8 Testované rezné podmienky 4.

Číslo merania	4
Sorta reznej doštičky	KYS 25
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	200
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	1
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,35
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	4,7
Procesná kvapalina	ÁNO

Použitím povlakovanej sorty sialonovej keramiky, sa za rovnakých podmienok obrábania, trvanlivosť reznej hrany zvýšila takmer dvojnásobne. Trvanlivosť bola ukončená krehkým lomom materiálu (Obr. 5.13).



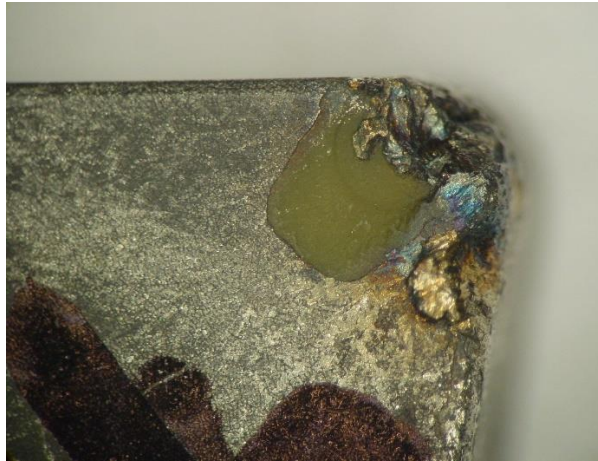
Obr. 5.13 Krehký lom reznej hrany, po teste 4.

V ďalšom priebehu testovania sme preto znížili obe zo zložiek rýchlostí, podieľajúcich sa na obrábaní. Pri teste číslo 5 boli využité výhody obrábania na sucho.

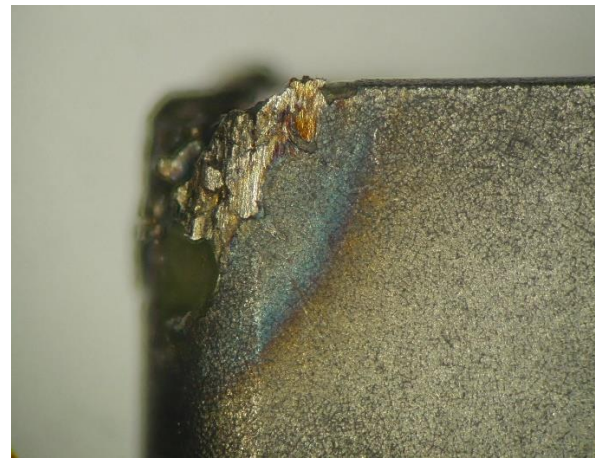
Tab. 5.9 Testované rezné podmienky 5.

Číslo merania	5
Sorta reznej doštičky	KYS 25
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	180
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	1
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,28
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	12,7
Procesná kvapalina	NIE

Mikroskopické snímky opotrebenia čela a chrbta nástroja na konci trvanlivosti sú uvedené na Obr. 5.14 a 5.15. Počas obrábania bola odobratá vznikajúca trieska, ktorá sa menila v priebehu opotrebovávania nástroja. Jej tvar a štruktúru je zaznamenaná pomocou optického mikroskopu (Príloha 2).



Obr. 5.14 Opatrebenie čela nástroja, suché obrábanie.



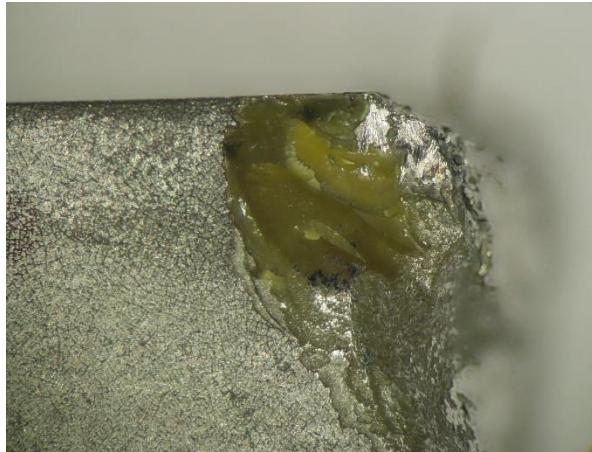
Obr. 5.15 Opatrebenie chrbta nástroja, suché obrábanie.

Aj napriek nízkej tepelnej vodivosti Inconelu 718 by sa mohlo generované tepelné namáhanie pri obrábaní štíhlych hriadeľov nepriaznivo prejavovať na finálnych geometrických a mechanických vlastnostiach obrobku. Preto sme sa rozhodli uskutočniť test číslo 6 za rovnakých rezných podmienok, ale s použitím procesnej kvapaliny.

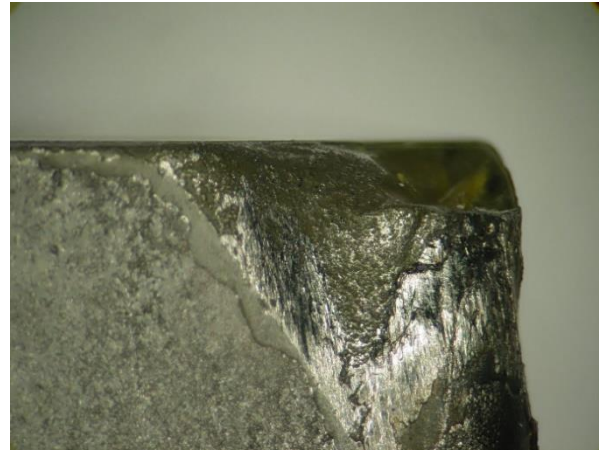
Tab. 5.10 Finálna optimalizácia rezných podmienok.

Číslo merania	6
Sorta reznej doštičky	KYS 25
Rezná rýchlosť v_c [m/min]	180
Šírka záberu hlavného ostria a_p [mm]	1
Posunová rýchlosť v_f [mm/ot.]	0,28
Trvanlivosť reznej hrany T [min]	12,2
Procesná kvapalina	ÁNO

Opatrebenie reznej hrany na konci trvanlivosti uvádzame na (Obr. 5.16 a 5.17). Oproti variante suchého obrábania je značná výrazná ryha na chrbte nástroja a výmoľ na čele. Zaujímavosťou bolo, že pri takto opotrebovanej reznej hrane bolo možné vzhľadom na potreby polohrubovacieho sústruženia valcovej plochy obrábať s dostatočnou presnosťou. Zmeraná kuželovitosť na dĺžke 400 mm, bola 0,05 mm.



Obr. 5.16 Opatrenie čela nástroja,
podmienky 6.



Obr. 5.17 Opatrenie chrbta nástroja,
podmienky 6.

Finálnou, optimalizovanou variantnou rezných podmienok pre zvolenú aplikáciu obrábania budú rezné podmienky, vychádzajúce z testovania číslo 6. Z tohto dôvodu, bolo na samotný proces obrábania sústrednej viac pozornosti. Reznú hranu VBD sme zaťažili časovými sekvenciami a na konci každej bola odobraná vytvorená trieska. Snímky priebehu opotrebenia VBD, tvaru a štruktúry triesky sú uvedené v Prílohe 3 tejto práce.

Pre verifikáciu referenčných obrábacích parametrov spekaným karbidom v spoločnosti CCI Brno, uvedených v tabuľke (Tab. 5.1), bol experiment na trvanlivosť reznej hrany uskutočnený aj na VBD z uvedeného materiálu - sorty WSM 10. Počas experimentu, bola rovnako ako v prípade reznej keramiky odobieraná vznikajúca trieska (Obr. 5.18 a 5.19). Zaujímavosťou oproti reznej keramike bolo to, že k celkovému defektu vplyvom opotrebovania dochádzalo náhle. Samotný proces bol preto menej predvídateľný a po prekročení 10 minút obrábania riskantný v závislosti na poškodení obrobku. Na hranici 10 minút nástroja v reze dochádzalo k tvorbe výmoľu na čele a geometria lámača triesky bola poškodená (Obr. 5.20). Na obrázku (Obr. 5.21) sledujeme opotrebenie chrbta nástroja. Po uplynutí ďalších 20 sekúnd došlo k úplnému odlomeniu časti VBD (Obr. 5.22, 5.23). Meranie bolo opakované, s podobným priebehom aj záverom. Celkový defekt doštičky tentokrát nastal o 15 sekúnd neskôr.



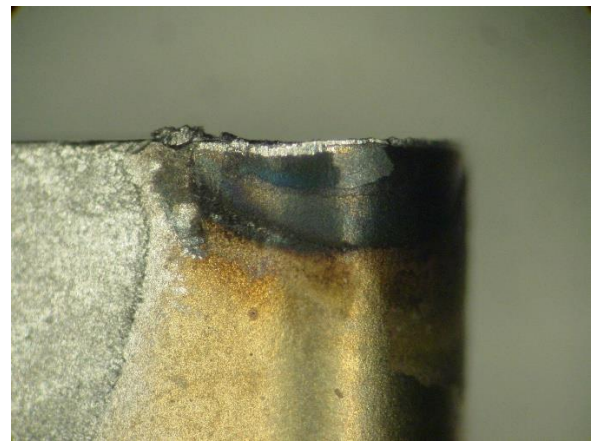
Obr. 5.18 Segmentovaná trieska po 2 minútach v reze.



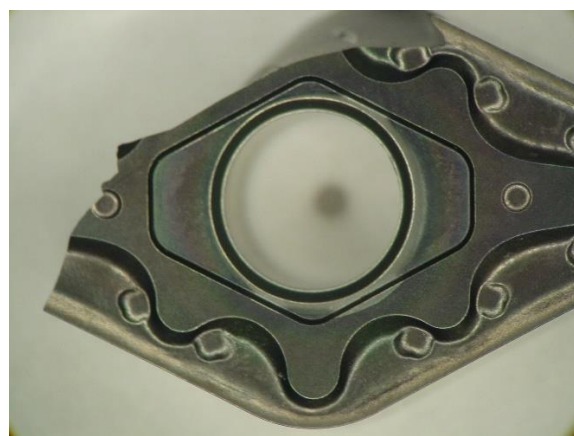
Obr. 5.19 Trieska, vznikajúca na konci trvanlivosti reznej hrany.



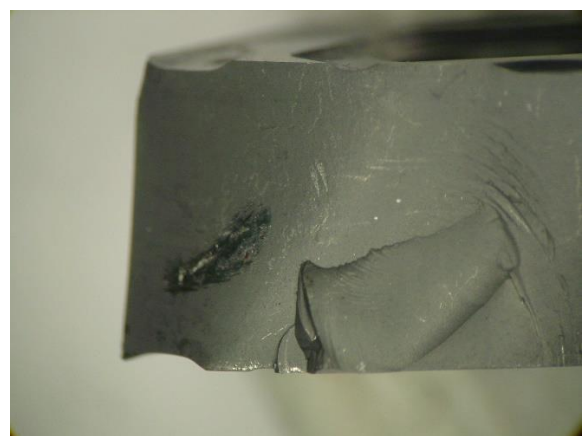
Obr. 5.20 Čelo po 10 minútach obrábania.



Obr. 5.21 Chrbát po 10 minútach obrábania.

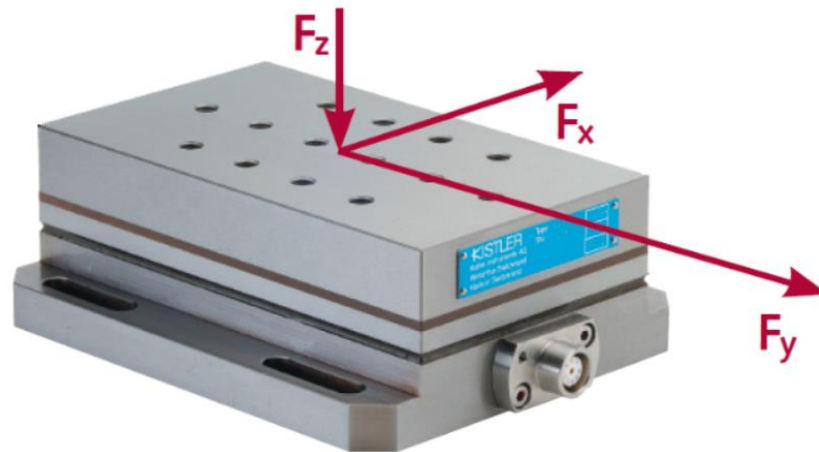


Obr. 5.22 Krehký lom VBD zo spekaného karbidu.



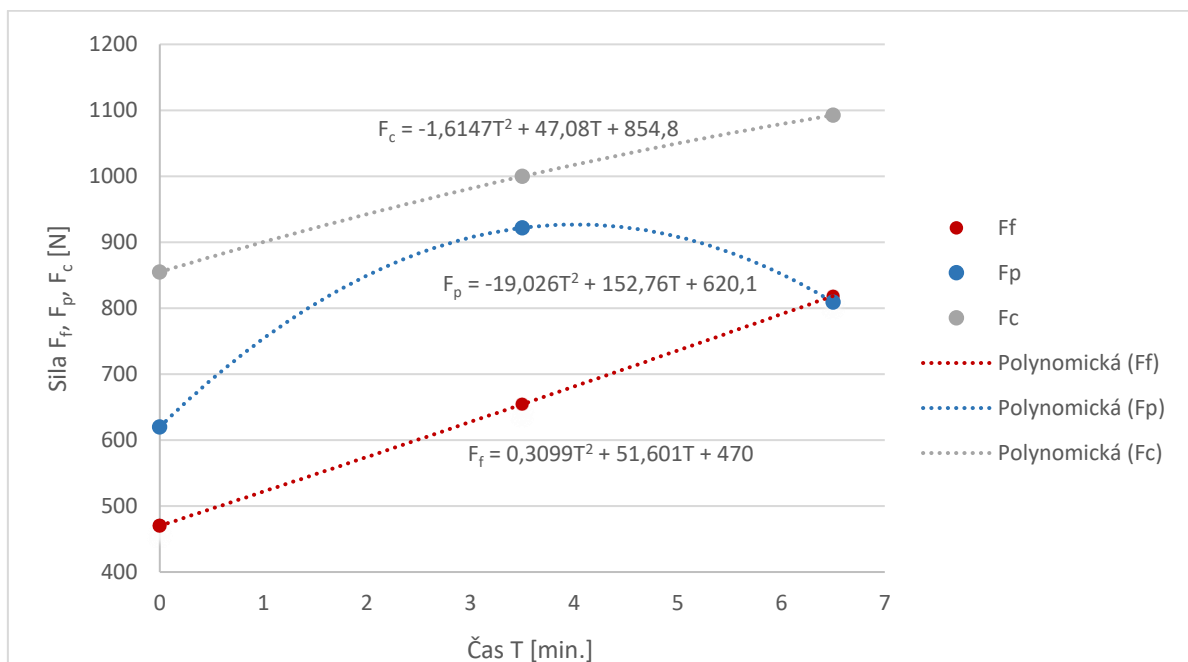
Obr. 5.23 Lomová plocha VBD, zo spekaného karbidu.

Nasledujúce testovanie bolo zamerané na meranie rezných odporov, generovaných pri použití uvedených rezných materiálov. Namerané sily, ako vstupné dáta simulačného výpočtu, uvádza tabuľka v nasledujúcej kapitole, (Tab. 5.12). Kompletné výstupy merania na dynamometri Kistler sú uvedené v Prílohe 4, kde si môžeme všimnúť pokles rezných síl so zmeňujúcim sa priemerom sústruženia. Prepočet síl generovaných v osiach X, Y, Z do jednotlivých zložiek korešponduje so súradnicovým systémom na obrázku (Obr. 5.24).



Obr. 5.24 Merané zložky rezných síl a ich smer na dynamometri Kistler 9257B [54].

Posledným výstupom je zhotovenie grafu závislosti nárastu rezných síl na opotrebení reznej hrany keramického nástroja (Obr. 5.25).

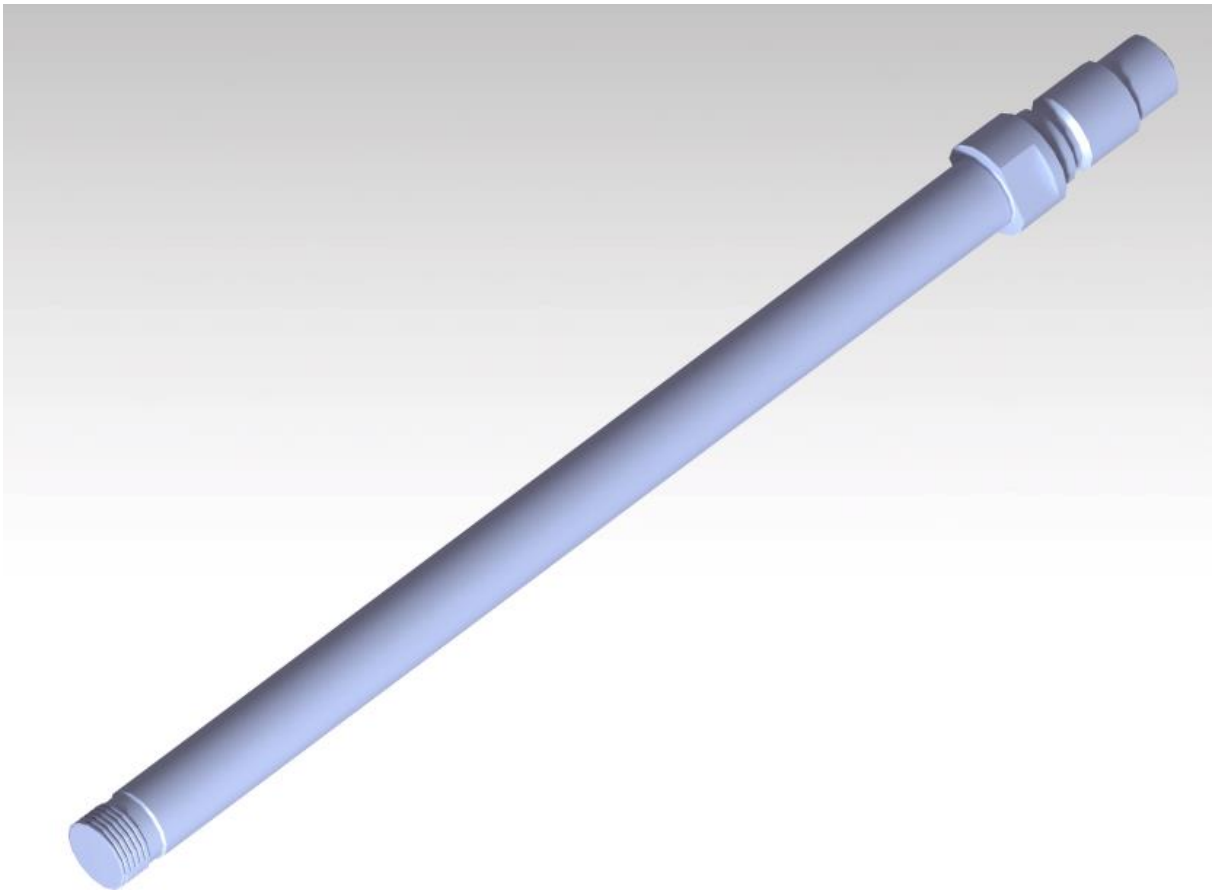


Obr. 5.25 Závislosť zložiek rezných síl na opotrebení nástroja.

5.5 Simulácia v softwari ANSYS Workbench

Metóda konečných prvkov spadá do oblasti numerickej matematiky. Jej princípom je rozdelenie skúmaného fyzikálneho modelu pomocou siete uzlových bodov na konečný počet prvkov. Vytvárame takzvanú prvkovú sieť. Tento princíp je nazývaný diskretizácia úlohy. Ďalší význam diskretizácie v oblasti riešenia pomocou MKP analýzy spočíva v tom, že úloha je riešená po častiach, jednotlivými iteráciami. Množstvo inžinierskych problémov môžeme zjednodušiť na 2D prvky. Týka sa to hlavne rovinných a rotačne symetrických úloh. Ďalšou variáciou sú 1D prvky – prútové úlohy. Najzložitejšia dimenzia výpočtu je sústredená do riešenia 3D prvkových úloh. Na popis jednotlivých prvkov využívame geometrické tvary, ktoré tvoria celkovú konečno-prvkovú sieť. Ku každému z prvkov je teda priradený geometrický element, ktorým ho môžeme popisovať. Pre riešenie 2D prvkov, ktorými sa zaoberá táto práca sú to štvoruholníky a trojuholníky. Výsledok sa realizuje postupne po jednotlivých iteráciách, na základe predpokladu Lagrangeovho princípu. Tento matematicko-fyzikálny princíp hovorí, že teleso je v rovnováhe, ak je celková potenciálna energia deformácie sústavy minimálna. Metódou konečných prvkov sa dajú riešiť rôzne typy fyzikálnych problémov akými sú: teplotné analýzy, napäťovo-deformačné úlohy, javy elektromagnetizmu, prúdenie kvapalín či sledovanie vlastných frekvencií [48, 49].

V tejto práci bude zameraná pozornosť na napäťovo-deformačnú analýzu súčiastky (Obr. 5.26) za podmienok obrábania reznou keramikou. Výkres reprezentatívneho zástupcu vyrábaných súčastí, na ktoré je optimalizácia smerovaná, je uvedený v Prílohe 5. K tejto analýze nás vedie veľký štíhlostný pomer (dĺžka/priemer) daného výrobku. Výpočet bude realizovaný pomocou softwaru ANSYS Workbench. Výsledky pomôžu stanoviť kritické miesta ohybu a porovnať deformačne-napäťové zaťaženie, vznikajúce pri použití spekaného karbidu a reznej keramiky. Na základe týchto zistení budeme schopní umiestniť lunetu do bodu, kde bude eliminovať maximum vznikajúceho ohybu. Ďalším výstupom môže byť stanovenie maximálnej prípustnej hodnoty hĺbky záberu hlavného ostria či posunovej rýchlosti, z hľadiska generovaných rezných síl.



Obr. 5.26 Reprezentatívny zástupca vyrábaných hriadeľov z Inconelu 718.

Pomocou výpočtového softwaru firmy Kennametal, ktorý je verejne dostupný na stránkach www.kennametal.com boli zistené hodnoty, uvedené v tabuľke (Tab. 5.11).

Tab. 5.11 Vypočítané hodnoty rezných síl a výkonov [47].

Vypočítané rezné sily		Vypočítané rezné výkony	
Rezná sila F_c [N]	827,28	Potrebný rezný výkon na nástroji [kW]	2,64
Posunová sila F_f [N]	435,97	Potrebný rezný výkon na motore vretena [kW]	3,1*
Pasívna sila F_p [N]	272,83	Potrebný točivý moment motora vretena [Nm]	8,64
Vektorový súčet síl F [N]	974,11		

*pri účinnosti stroja 85%.

Teoreticky zistené hodnoty budú verifikované experimentom. Meranie bolo vykonané pomocou dynamometru Kistler pri procese čelného sústruženia Inconelu 718. Rezným materiálom bola sialonová keramika sorty KYS 25, ktorá vykazovala pri testoch rezného výkonu najpriaznivejšie výsledky. Referenčné dáta boli zistené na spekanom karbide, ako je uvedené v kapitole 5.3.2. Definícia rezných nástrojov je uvedená v (Tab. 5.1), respektíve (Tab. 5.2). Výsledky experimentálnej skúšky merania

rezných síl sú prezentované v tabuľke (Tab. 5.12). Z dôvodu čelného sústruženia, kedy boli otáčky vretena konštantné, bola do úvahy braná prvá sekunda merania, pretože v tomto časovom úseku bola zvolená rezná rýchlosť dostatočne relevantná a nedošlo k ovplyvneniu výsledkov.

Tab. 5.12 Experimentom zistené hodnoty rezných síl.

	Spekaný karbid WSM 10	Keramika KYS 25
Pasívna sila F_p [N]	544,20	596,30
Posunová sila F_f [N]	730,70	450,90
Rezná sila F_c [N]	1790,60	821,50

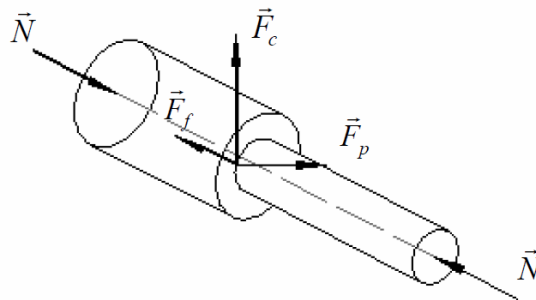
Teoretické predpoklady výpočtu reznej a posunovej sily boli potvrdené. V prípade pasívnej sily je možné konštatovať odchýlku od vypočítanej hodnoty, čo môže byť spôsobené tým, že vo výpočtovom softwari nebola možnosť zadania uhlu nastavenia hlavného ostria κ_r .

5.5.1 Postup výpočtu

Na začiatku výpočtu je potrebné nadefinovať v akej oblasti MKP analýzy sa bude simulácia realizovať. Od tejto definície sa odvíjajú parametre ako napríklad dimenzionalita úlohy. Z časového hľadiska vyšetrovanej deformačno-napäťovej analýzy spadá uvedená problematika do statickej oblasti. Deformácie a napätia, spôsobené zaťažovacími silami sa budú pohybovať v medziach elastických deformácií. To znamená, že definíciou úlohy je statická lineárna analýza. V prvom kroku je potrebné importovať do výpočtového softwaru CAD model, ktorý bol vytvorený v programe Catia V5. Za importom modelu musí nutne nasledovať úprava výpočtovej geometrie, takzvaná idealizácia. Týmto krokom sú z geometrie súčasti odstránené konštrukčno-technologické prvky ako závit málo významné drážky a rádiusy s malým polomerom. Vďaka týmto krokom dokážeme výrazne zjednodušiť náročnosť na výpočtovú techniku a zároveň neovplyvníme relevanciu výpočtu. Následne systému dodáme fyzikálne konštanty popisujúce mechanické vlastnosti testovaného materiálu. Generujeme takzvaný materiálový model. Každá reálna súčiastka je ovplyvnená fyzikálnym prostredím. Pre potreby akéhokoľvek výpočtu ju musíme z tohto prostredia uvoľniť. Uvoľnením súčastky vytvoríme takzvané okrajové podmienky. Takto pripravený geometrický model, doplnený o materiálové charakteristiky, ktoré predikujú jeho chovanie, je pripravený na nasieťovanie. Hustota siete sa volí s ohľadom na vyšetrovaný prvok. Zjemňovaním siete sa zvyšuje presnosť výpočtu, na druhej strane rapídne narastá jeho náročnosť. Dôležité je nájsť vhodný kompromis a všeobecne platí, že kvalita generovanej siete je závislá na skúsenostiach výpočtára. Posledným krokom pred spustením výpočtu bude zaťaženie nadefinovaného

geometricko-materiálového modelu, experimentálne zistenými zložkami rezných síl [48, 53].

Na obrázku (Obr. 5.27), je schematicky znázornené zaťaženie obrábanej súčasti pri pozdĺžnom sústružení s upnutím medzi hrotmi. Tieto charakteristiky popisujú zvolenú technológiu sústruženia. Upínacia sila, znázornená vektorom \vec{N} , dosahuje hodnotu 5000 N.



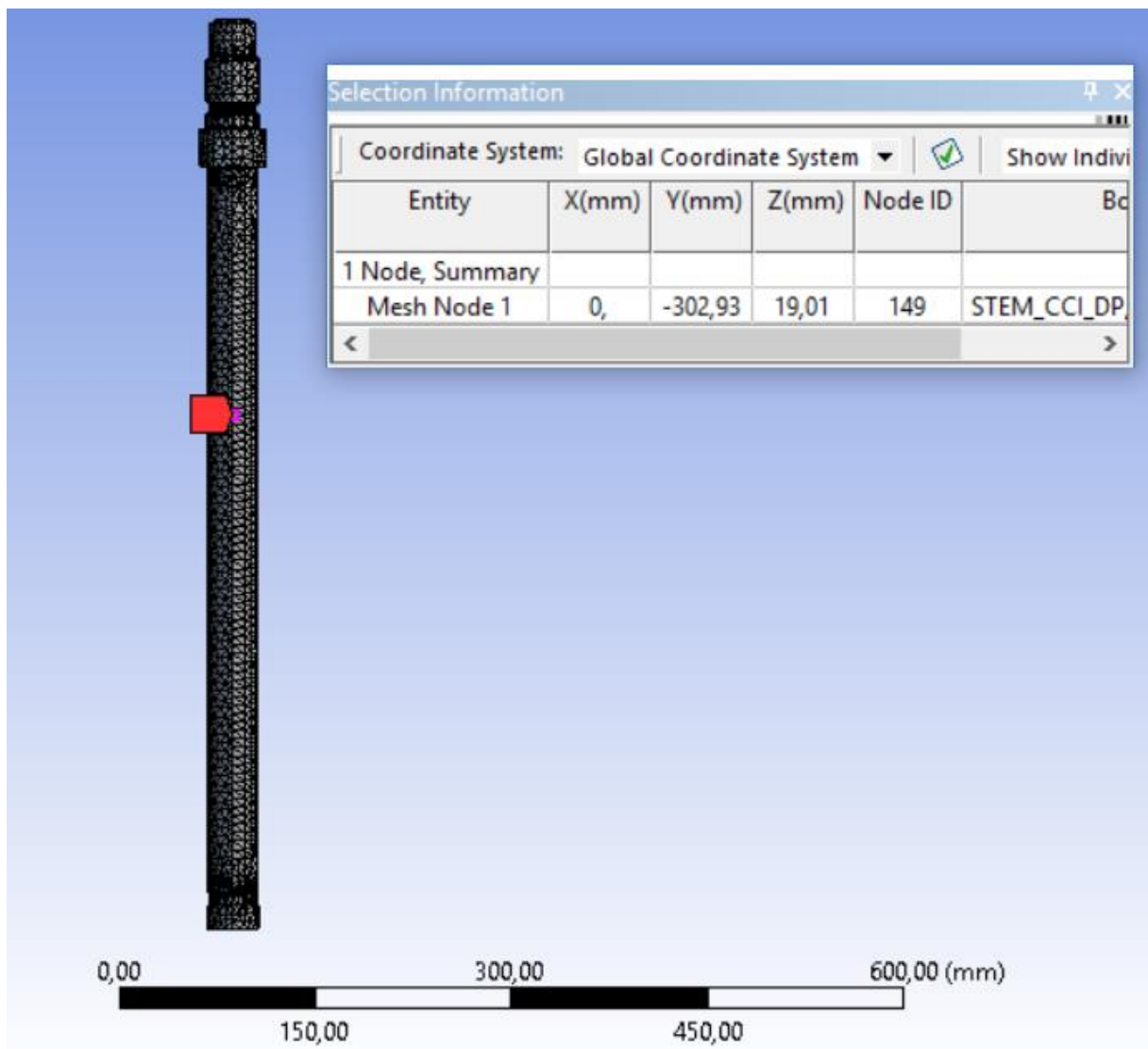
Obr. 5.27 Silové zaťaženie súčasti [53].

Súčasť obrábanú medzi hrotmi uvoľníme z fyzikálneho prostredia pomocou rotačnej väzby na strane čelného unášača a podporou na strane otočného hrotu (Tab. 5.13).

Tab. 5.13 Silové uvoľneniev posudzovanej súčasti [53].

Typ väzby	Silové uvoľnenie	Obmedzenie
Rotačná		$U_x=0, U_y=0, U_z=0$
Podpora		$U_y=0, U_z=0$

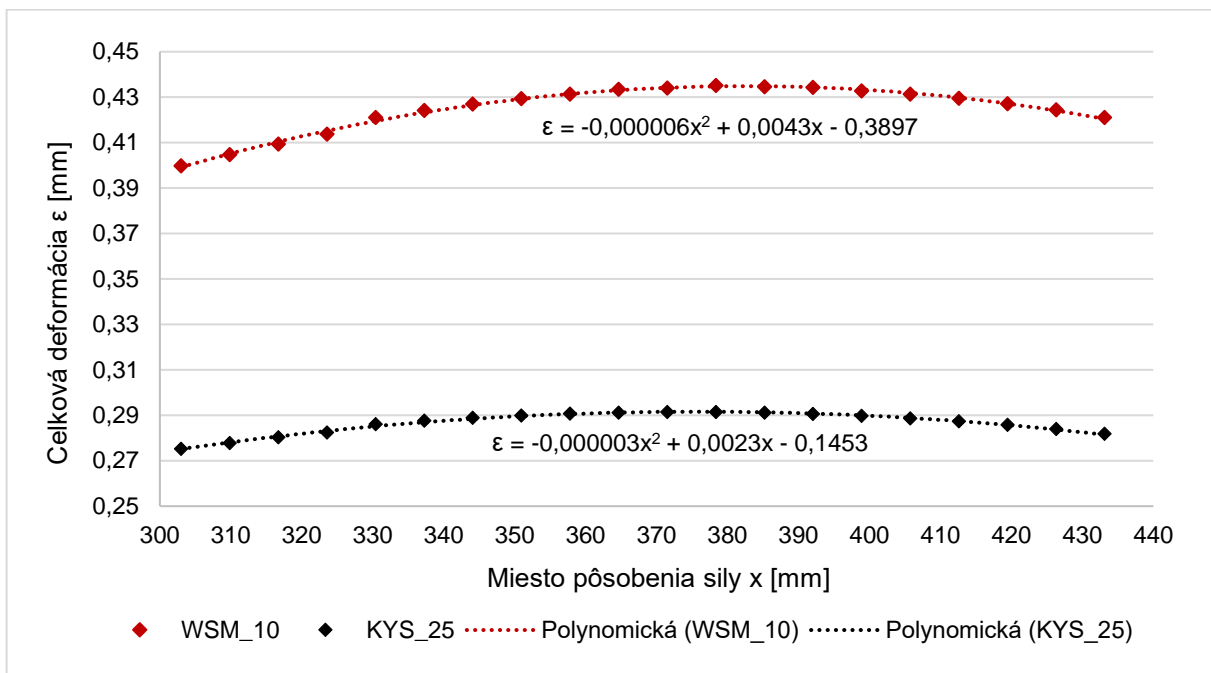
Silové pôsobenie je rozmiestnené do 20 uzlov. Vzďialenosť medzi počiatočným a konečným uzlom bude 150 mm. Zaťaženie je umiestnené s predpokladom kritického miesta ohybu súčasti. Z tohto dôvodu nebolo potrebné rozmiestňovať silové pôsobenie po celej obrábanej dĺžke. Prvý uzol je vo vzdialenosti približne 303 mm od miesta pôsobenia čelného unášača (Obr. 5.28). Do výpočtu bol zahrnutý aj vplyv reznej rýchlosti formou výpočtu otáčok obrobku pri minimálnom obrábanom priemere. Odpovedajúce otáčky boli 380 ot/min v prípade spekaného karbidu WSM 10, respektíve 1510 ot/min v prípade keramiky KYS 25.



Obr. 5.28 Prvý zo zaťažovaných uzlov vygenerovanej siete.

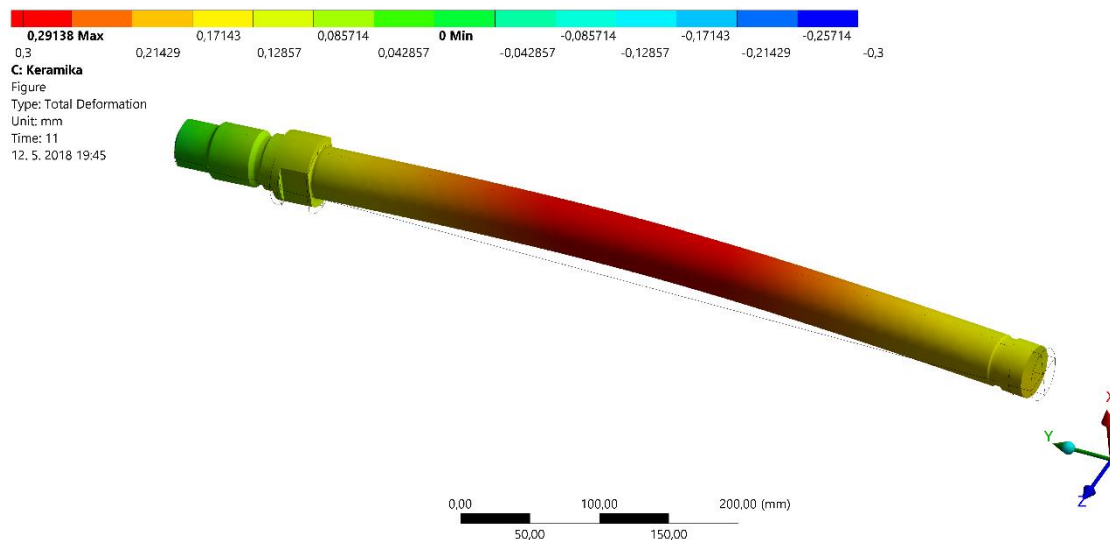
5.5.2 Prezentácia vypočítaných hodnôt

Výstupom simulácie je určenie miesta a hodnoty maximálneho ohybu obrobku vplyvom pôsobenia rezného nástroja. Zistené výsledky pre jednotlivé rezné nástroje, sú medzi sebou porovnané. Pre dostatočnú názornosť sú výsledky reflektované do grafu (Obr. 5.29). Súčasťou prezentácie sú aj exportované výstupy zo softwaru Ansys Workbench (Obr. 5.30, 5.31). Uvedené obrázky reflektujú miesto zaťaženia, keď nastala maximálna deformácia. Kvôli názornosti tvaru celkovej deformácie bol výsledok zväčšený 50 krát. Reálne hodnoty deformácie popisuje priložená legenda.



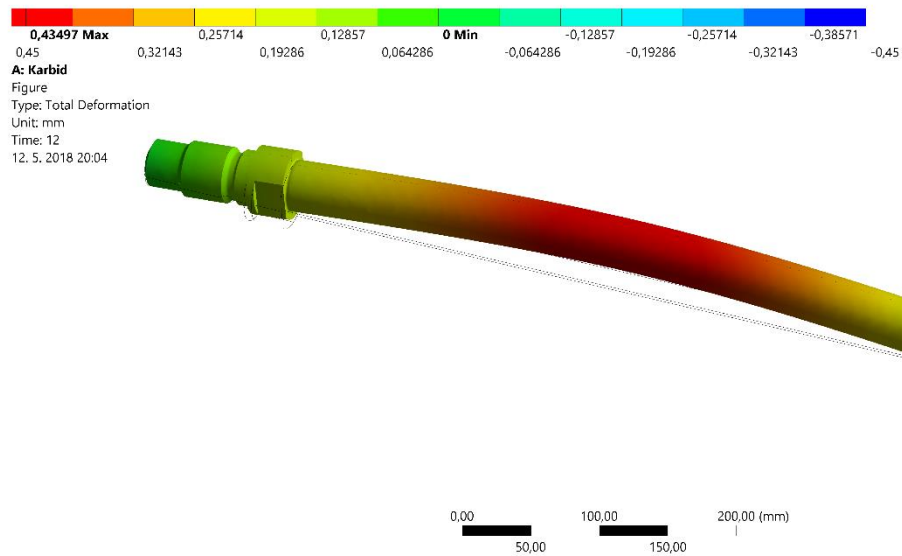
Obr. 5.29 Priehyb súčastí vplyvom obrábacieho procesu.

Obrábanie reznou keramikou s uvedenými hodnotami v_c , a_p , v_f , bude z hľadiska celkovej deformácie súčastí stabilnejšie ako v prípade použitia testovaného spekaného karbidu.



Obr. 5.30 Deformácia súčastí pri obrábaní reznou keramikou KYS 25 [57].

Vplyvom kombinácie zaťažujúcich síl a vysokých otáčok pri obrábaní reznou keramikou, v porovnaní s aplikáciou spekaného karbidu, dochádza v mieste podopretia hrotom k „skráteniu“ obrobku o hodnotu približne 0,1 mm. Tento problém sa pri použití nižších otáčok obrobku v simulácii nevyskytoval.



Obr. 5.31 Deformácia súčastí pri obrábaní reznou keramikou KYS 25 [57].

Hegemónna zložka deformácie sa v oboch prípadoch simulácie vyskytovala v tangenciálnom smere s pôsobením pasívnej sily, čím boli potvrdené teoretické predpoklady. Celková deformácia v najkritickejšom mieste ohybu je v prípade nasadenia reznej keramiky nižšia o 49 %, v porovnaní so spekaným karbidom. V numerickom vyjadrení je táto hodnota deformácie nižšia o 0,14375 milimetra.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOTENIE

Ekonomické hľadisko každého optimalizačného procesu výrobnjej spoločnosti je rozhodujúcim faktorom v zmysle jeho aplikácie do praxe. Neodmysliteľnou súčasťou technologických zlepšení musí byť preto ekonomická analýza, ktorá dáva odpoveď na otázku čerpania finančných zdrojov pri realizácii optimalizovanej technológie.

6.1 Technické hodnotenie

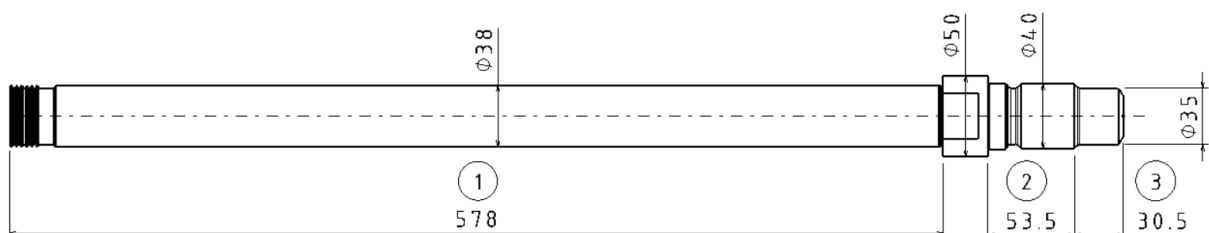
V prípade optimalizovanej varianty bola dosiahnutá hodnota trvanlivosti jednej reznej hrany, približne na úrovni spekaného karbidu. Rezná rýchlosť však bola zvýšená 4 krát. Na druhej strane, pôvodný variant disponoval o 50 % väčšou šírkou záberu hlavného ostria. Obrábací proces vykazoval v prípade reznej keramiky KYS 25 menšie namáhanie obrobku na ohyb ako v prípade nasadenia referenčného procesu sústruženia spekaným karbidom. Vzhľadom na objem odobraného materiálu, za jednotku trvanlivosti reznej hrany vychádza rezná keramika oproti spekanému karbidu produktívnejšia o 124 % (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Porovnanie variant vzhľadom k objemu odobraného materiálu.

Hodnotená VBD	Objem odobraného materiálu [cm ³ /min]	Objem odobraného materiálu za jednotku trvanlivosti [cm ³]
DNMG 150608-NM4	27,00	270,00
CNGA 120412 T01020	50,40	604,80

Výpočet vychádzal z informácií o reznom procese, ktoré sú definované v tabuľkách (Tab. 5.1), respektíve (Tab. 5. 10) pomocou softvéru [55].

Ako bolo uvedené, referenčný a rovnako optimalizovaný obrábací proces je aplikovaný pri polohrubovacom sústružení. Na obrázku (Obr. 6.1), môžeme vidieť základné rozmery obrobku. Rozdelený bol na 3 časti, ktoré sa líšia finálnym priemerom a sú obrábané pri popisovanom procese sústruženia. Poslúžia nám pri výpočte jednotkového strojného času danej operácie. Do výpočtov nebude zahrnutý čas upnutia polotovaru a základného nastavenia stroja a nástroja, pretože tento čas je pre oba prístupy totožný a výsledky neovplyvní.



Obr. 6.1 Rozdelenie súčasti na 3 obrábané úseky optimalizovanými podmienkami.

Nakoľko sa nejedná o dokončovacie sústruženie, pri výpočte bude uvažované s prídavkom 1 mm na obrábaných priemeroch. Vypočítané hodnoty strojných časov, pre oba prístupy (referenčný a optimalizovaný), sú reflektované do tabuľky (Tab. 6.2). Výpočty boli uskutočnené pomocou softvéru TurnCalc, spoločnosti Sandvik Coromant AG [55].

Tab. 6.2 Jednotkový strojný čas polohrubovacieho cyklu.

	Úsek 1 [s]	Úsek 2 [s]	Úsek 3 [s]	Celkový jednotkový strojný čas t_{AS} [min]
Referenčný proces	1113,80	71,60	75	21,01
Optimalizovaný proces	583,70	46,10	35,20	11,10

Dávkové časy nebudú počítané, pretože sa jedná o malosériovú výrobu, kedy sa dané súčasti vyrábajú po 1 kuse. Celková ročná produkcia predmetných súčastí je 60 až 80 kusov. Z vyššie uvedených dôvodov sa na celkovom jednotkovom čase daného cyklu bude podieľať čas jednotkový strojný a čas na výmenu nástroja (respektíve otočenie reznej hrany VBD).

Čas na výmenu nástroja bol empiricky zistený na stroji DMG CTX Gama 2000. Proces otočenia VBD a opätovného spustenia obrábania trval operátorovi 70 sekúnd. Výpočet času t_{A11} , pre jednotlivé varianty popisuje nasledujúca tabuľka (Tab. 6.3).

Tab. 6.3 Čas t_{A11} , potrebný na výmenu nástroja.

	Trvanlivosť [min]	Čas t_{AS} [min]	Počet otočení VBD [-]	Čas potrebný na otočenie VBD t_{A11} [min]
Referenčný proces	10	21,01	3	3,48
Optimalizovaný proces	12	11,10	1	1,16

Nespornou výhodou optimalizovanej varianty je to, že obrábací proces nemusí byť prerušený z dôvodu výmeny reznej hrany VBD. To zaručí väčšiu stabilitu a spoľahlivosť samotného procesu a rovnako so sebou prináša pozitíva v oblasti bezpečnosti operátora CNC stroja. Výpočet celkového jednotkového času cyklu pre uvedené varianty, získame aplikáciou vzťahov (6.1 a 6.2).

$$t_{ARef.} = t_{AS} + t_{A11} = 21,01 + 3,48 = 24,49 \text{ min} \quad (6.1)$$

$$t_{AOpt.} = t_{AS} + t_{A11} = 11,10 + 1,16 = 12,26 \text{ min} \quad (6.2)$$

6.2 Ekonomické hodnotenie

V tejto časti práce, bude k zisteniam technickej analýzy, priradená hodnota hodinovej sadzby stroja a cena jednotlivých VBD. V prvom kroku bude počítaná spotreba použitých VBD na obrobenie súčasti pre referenčný a optimalizovaný proces. Obe z uvedených britových doštičiek disponujú 4 reznými hranami. Výpočty sa budú z tohto dôvodu vzťahovať na 10 kusov obrobkov. Spotreba VBD bude určená pomocou vzťahu (6.3 a 6.4).

$$D_{\text{Ref.}} = \frac{t_{\text{ARef.}} \cdot N}{T \cdot P_O} = \frac{24,49 \cdot 10}{10 \cdot 4} = 6,123 = 7 \text{ ks} \quad (6.3)$$

$$D_{\text{Opt.}} = \frac{t_{\text{AOpt.}} \cdot N}{T \cdot P_O} = \frac{12,26 \cdot 10}{12 \cdot 4} = 2,554 = 3 \text{ ks} \quad (6.4)$$

Náklady na nákup VBD v prepočte na 10 obrobených kusov sú popísané v nasledujúcej tabuľke (Tab. 6.4). Kusové ceny VBD sú katalógovými hodnotami. Skutočné predajné ceny závisia na odberateľovi a objeme ročných hodnôt objednávok.

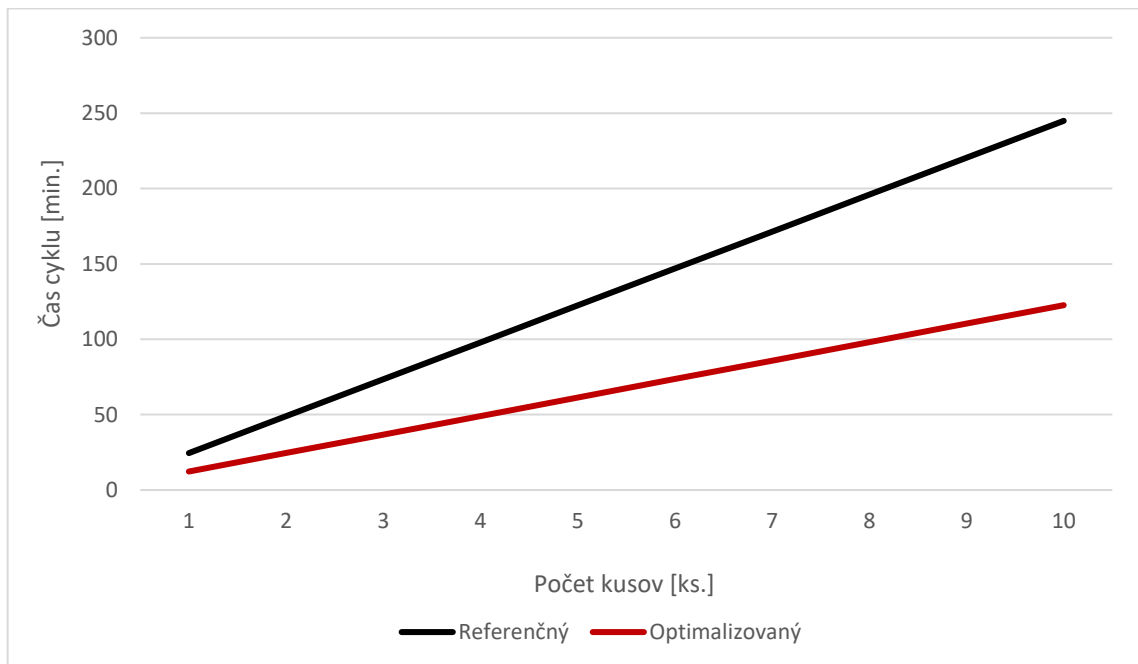
Označenie VBD	Potrebný počet [ks.]	Náklady na kus [€]	Σ Cena C _{VBD} [€]
DNMG 150608-NM4	7	16,60	116,20
CNGA 120412 T01020	3	32,50	97,50

V oboch prípadoch aplikovanej technológie je materiál a hmotnosť polotovaru rovnaký. Rovnaký je aj celkový objem odobraného materiálu. Rozdiely v nákladoch na nákup nožových držiakov pre upnutie VBD uvedených typov sú minimálne, preto budú vo výpočte zanedbané. Hodinová sadzba stroja S_h , činí 58 € na hodinu. Sú v nej zahrnuté režijné náklady a tiež náklady na obsluhu stroja. Celkové náklady na výrobu 10 súčasti referenčnou a optimalizovanou technológiou popisuje vzťah (6.5 a 6.6).

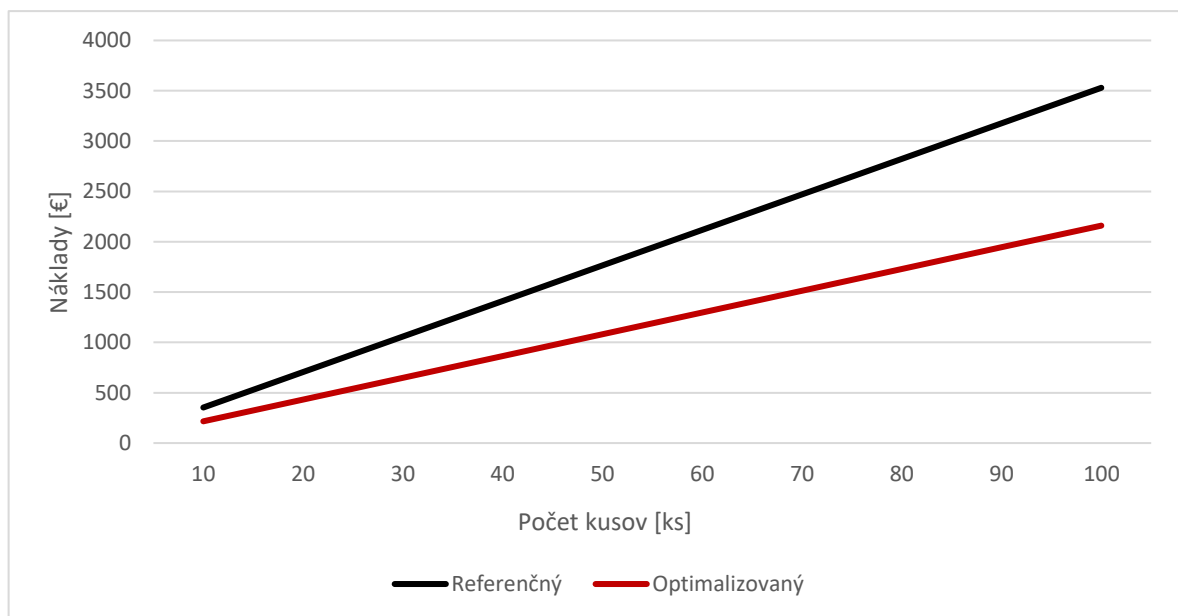
$$N_{\text{vRef.}} = \frac{t_{\text{ARef.}} \cdot S_h}{60} \cdot N + C_{\text{VBDRef.}} = \frac{24,49 \cdot 58}{60} \cdot 10 + 116,20 = 352,94 \text{ €} \quad (6.5)$$

$$N_{\text{vOpt.}} = \frac{t_{\text{AOpt.}} \cdot S_h}{60} \cdot N + C_{\text{VBDOpt.}} = \frac{12,26 \cdot 58}{60} \cdot 10 + 97,50 = 216,01 \text{ €} \quad (6.6)$$

Z ekonomického hľadiska činí priama finančná úspora na výrobu jedného kusu 63 %, oproti pôvodnej technológii. Ešte markantnejšia je úspora jednotkového času cyklu, činí 89 % v porovnaní s pôvodným procesom. To znamená, že na danom stroji sa vplyvom optimalizácie zvýši výrobnú kapacita, čo je z finančného hľadiska nepriamym, no zásadným ukazovateľom. Samotný obrábací proces sa stal vďaka vyššie popísaným dôsledkom stabilnejším. Výsledky technicko-ekonomickej analýzy sú premietnuté z hľadiska počtu vyrobených kusov do grafov (Obr. 6.1, 6.2).



Obr. 6.2 Závislosť jednotkového času obrábacieho cyklu na počte vyrobených kusov.



Obr. 6.3 Závislosť finančných nákladov na počte obrobeneých kusov.

7 DISKUSIA

Nameraný priebeh zložiek reznej sily (Príloha 4) korešpondoval s literatúrou [22]. S rastúcou reznou rýchlosťou jednotlivé zložky klesali. Tento pokles bol výraznejší pri obrábaní spekaným karbidom. Zapríčiňovala to oblasť použitia nižších rezných rýchlostí. V prípade obrábania keramikou, kedy sme sa pohybovali na úrovni reznej rýchlosti od $180 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ do $105 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, bol pokles menej výrazný. Táto verifikáciu bola vykonaná vďaka sústruženiu čelnej plochy obrobku so zachovaním konštantných otáčok. Geometria nástroja bola nastavená rovnako ako pre skúmaný prípad pozdĺžneho sústruženia (Obr. 5.3). Teoreticky zistená rezná a posunová sila korešpondovala s empiricky nameranými hodnotami. V prípade pasívnej sily bola zaznamenaná odchýlka hodnôt viac ako 100 %. Spôsobená bola skutočnosťou, že do výpočtovej kalkulačky nebolo možné zadať nastavenie uhlu hlavného ostria nástroja. V prípade vyhodnotenia priebehu generovaných síl vplyvom opotrebenia VBD boli splnené teoretické predpoklady. Anomália nastala pri meraní síl na VBD, ktorá bola vystavená predošlému obrábaniu po dobu 6,5 minúty (Obr. 5.25). V prípade pasívnej sily tu došlo k poklesu voči predošlej hodnote (meranie po 3,5 minúte v reze). Tento defekt je možné vysvetliť zmenou geometrie reznej hrany vplyvom poškodenia, prípadne vplyvom vytvorenia nárastku. Najväčší vplyv na generované rezné sily má hĺbka záberu hlavného ostria a posunová rýchlosť. Rezná rýchlosť ovplyvňuje rezné sily najmenej výrazne. Experimentálne testovanie (Tab. 5.7 a 5.8) potvrdilo výkonnostné rozdiely povlakovanej a nepovlakovanej keramiky. V prípade povlakovanej VBD bol zaznamenaný nárast trvanlivosti o 95,8 % pri rovnakých podmienkach obrábacieho procesu.

7.1 Návrh pokračovania riešenia

Z meraní rezných síl a z ich následného štatistického spracovania je viditeľné, že deformácia obrobku vplyvom pôsobenia spekaného karbidu je voči zvolenej reznej keramike a zvoleným podmienkam obrábania vyššia o 49 %. Tento poznatok poskytuje z hľadiska možného zaťaženia obrobku ďalší priestor pre optimalizáciu. Jedným z možných riešení je otestovanie VBD rovnakej sorty s rovnakou geometriou, ale s rádiusom špičky 1,6 mm. Presné označenie podľa ISO kódu takejto doštičky je CNGA 120416 T01020. V tomto prípade je možné zvoliť šírku záberu hlavného ostria a_p na úrovni 1,5 mm. Tým by bol zachovaný predpoklad, že nebude dochádzať k tvorbe disku na neobrobenej ploche (Obr. 5.9 a 5.12). Objem odobraného materiálu by vzrástol na úroveň $75,60 \text{ cm}^3/\text{min}$. Oproti optimalizovanej variante by tento nárast činil ďalších 50 % a v porovnaní s pôvodnou referenčnou technológiou až 180 %.

ZÁVER

Predmetom diplomovej práce na tému obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov bola optimalizácia aktuálneho stavu obrábacieho procesu niklovej superzliatiny Inconel 718. Optimalizácia bola zameraná na zvýšenie produktivity obrábania vplyvom náhrady pôvodného rezného materiálu. Na základe teoretických poznatkov bola zvolená keramika typu SiAlON vo vyhotoveniach bez povlaku (KYS 30) a s povlakom (KYS 25). Dôležitými okrajovými podmienkami boli hodnoty generovaných rezných síl od ktorých sa odvíjala deformácia obrobku. Ako referenčné boli považované sily, ktoré vznikali pri obrábaní spekaným karbidom.

Medzi hlavné výstupy tejto práce sa zaraďuje:

- na základe empirického testovania bolo zistené, že pre potreby uvedenej optimalizácie je najvhodnejšie nasadenie reznej keramiky sorty KYS 25;
- pri obrábaní súčastí s väčším priemerom je možné s výhodou použiť technológiu obrábania bez prítomnosti procesnej kvapaliny. V prípade geometrie obrobku, akou sa vyznačoval zvolený reprezentatívny zástupca (Príloha 5), je použitie chladiacej kvapaliny bezpečnejšie s ohľadom na výslednú geometrickú presnosť;
- pri nastavení uhlu hlavného ostria $\kappa_r > 90^\circ$ dochádzalo na neobrobenej ploche k tvorbe disku. Bolo potrebné znížiť šírku záberu hlavného ostria a_p pod hodnotu rádiusu špičky r_ϵ ;
- optimalizované hodnoty obrábania boli: $v_c = 180$ m/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 0,28$ mm/ot.;
- silové zaťaženie a rovnako deformácia súčasti vplyvom obrábania bola nižšia o 49 % v prospech optimalizovanej varianty, čo predikuje vyššiu spoľahlivosť samotného procesu;
- objem celkového odobraného materiálu počas trvanlivosti reznej hrany bol zvýšený z pôvodných 270 cm³ na $604,8$ cm³;
- pôvodný jednotkový strojný čas cyklu bol skrátený o 9,91 minúty čo tvorilo úsporu 89 %;
- výrobné náklady boli znížené o 136,93 € na jednom kuse, čo predstavuje úsporu 63 % oproti pôvodnej variante.

Zoznam Použitej Literatúry

1. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Obrobitelnost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, 58 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-obrobitelnost.html>
2. GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*[online]. Boston: Elsevier, 2008 [cit. 2018-05-16]. ISBN 978-0-08-044534-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/B9780080445342500291>
3. Knowledge: Introduction. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/introduction/pages/default.aspx>
4. MILLS, B. a A. H. REDFORD. *Machinability of engineering materials*. 2. New York, NY, USA: Sole distributor in the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co., c1983. ISBN 08-533-4183-4.
5. NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
6. LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3. dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-718-3164-6.
7. BILÍK, Oldřich. *Obrábění II: [Určeno pro posl. 4. roč. fak. stroj.]*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-707-8228-5.
8. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
9. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.

10. Boulger, W., M.L. Shaw and H.E. Johnson, "Constant Pressure Lathe Test for Measuring the Machinability of Free-Machining Steels", Trans. ASME, 71, 431- 438 (1949).
11. Skupiny obráběných materiálů. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
12. TEJKL, Jakub. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
14. Výrobky z ocelí korozivzdorných. *Bohdan Bolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, c2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych>
15. ISO M Korozivzdorné oceli. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
16. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: *Soustružení korozivzdorných ocelí*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 2001, 88 s. Přel. z: Stainless steel turning.
17. *Nikl a jeho slitiny, titan a jeho slitiny (katalog)*. Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení povrchového inženýrství, dostupné z: http://ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf
18. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

-
19. *APPLICATION GUIDE: Heat resistant super alloys*. 1. Sweden, 2010.08.
Dostupné také z:
<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-034.pdf>
20. High Performance Alloys Literature. *Special Metals* [online]. New York: Special Metals Corporation, c2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
21. *Aerospace: Sustainable solutions*. 1. Latrobe, PA: Kennametal, c2011.
22. THAKUR, D.G., B. RAMAMOORTHY a L. VIJAYARAGHAVAN. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. *Materials and Design* [online]. 2009, 30(5), 1718-1725 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.011. ISSN 02613069.
Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908003506>
23. INCONEL 718 TECHNICAL DATA. *High Temp Metals* [online]. California: High Temp Metals, c2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>
24. HUMÁR, A. Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 s. [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
25. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
26. RAHIM, Erween Abd a Hemarani DORAIRAJU. Evaluation of mist flow characteristic and performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining. *Measurement* [online]. 2018, **123**, 213-225 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.03.015. ISSN 02632241. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026322411830191X>

-
27. HOSSEINI TAZEKANDI, Ahmadreza, Farid PILEHVARIAN a Behnam DAVOODI. Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools. *Journal of Cleaner Production*[online]. 2014, **80**, 271-281 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.098. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614005873>
28. SAM PAUL, P., A.S. VARADARAJAN a R. ROBINSON GNANADURAI. Study on the influence of fluid application parameters on tool vibration and cutting performance during turning of hardened steel. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2016, **19**(1), 241-253 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.07.017. ISSN 22150986. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221509861500124X>
29. FANG, Zhenglong a Toshiyuki OBIKAWA. Turning of Inconel 718 using inserts with cooling channels under high pressure jet coolant assistance. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **247**, 19-28 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.032. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617301231>
30. PUSAVEC, F., H. HAMDÍ, J. KOPAC a I.S. JAWAHIR. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy—Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211**(4), 773-783 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.013. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003833>
31. BARÁNEK, Ivan. *REZNÉ MATERIÁLY PRE HSC*. Trnava: AlumniPress, 2007. ISBN 978-80-8096-037-7.
32. SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 978-019-5142-068.

-
33. GARCIA-GONZALEZ, Jean Carlos, Wilfredo MOSCOSO-KINGSLEY a Viswanathan MADHAVAN. Tool Rake Face Temperature Distribution When Machining Ti6Al4V and Inconel 718. *Procedia Manufacturing* [online]. 2016, **5**, 1369-1381 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.08.107. ISSN 23519789. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978916301196>
34. ISO S HRSA a titan. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx
35. KITAQAWA, T., A. KUBO a K. MAEKAWA. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Incone1718 and Ti-6A1-6V-2Sn. *Wear*. 1997, **1997**(202), 142-148.
36. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-858-2510-4.
37. Povlakovaný slinutý karbid. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx
38. Třídy Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/sandvik_coromant_grades/pages/default.aspx
39. Polykrystalický kubický nitrid bóru. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx
-

-
40. Řezná keramika. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/ceramics/pages/default.aspx
41. DRASTÍK, František. *Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba*. Praha: Dashöfer, 2002. ISBN 1801-7991.
42. XAVIOR, M. Anthony, M. MANOHAR, P. JEYAPANDIARAJAN a Patil Mahesh MADHUKAR. Tool Wear Assessment During Machining of Inconel 718. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **174**, 1000-1008 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.252. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817302527>
43. BHATT, Abhay, Helmi ATTIA, R. VARGAS a V. THOMSON. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. *Tribology International* [online]. 2010, **43**(5-6), 1113-1121 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.053. ISSN 0301679X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09003909>
44. SUGIHARA, Tatsuya, Haruki TANAKA a Toshiyuki ENOMOTO. Development of Novel CBN Cutting Tool for High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Coolant Behaviors. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **10**, 436-442 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/J.PROMFG.2017.07.021. ISSN 23519789. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917302019>
45. Opotřebení břitu. *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx

-
46. GRZESIK, W., P. NIESŁONY, W. HABRAT, J. SIENIAWSKI a P. LASKOWSKI. Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process performance and productivity enhancement. *Tribology International* [online]. 2018, **118**, 337-346 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.10.005. ISSN 0301679X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X17304656>
47. Cutting Forces For Turning Application. *Kennametal* [online]. Latrobe PA: Kennametal, c2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/en/resources/engineering-calculators/turning-calculators/cutting-forces.html>
48. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: část tváření* [online]. Brno, 2015, 29 s. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/studium/index.php?stranka=opory> . Syllabus. FSI VUT v Brně.
49. Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
50. On-line katalog Walter. *Walter AG* [online]. Tübingen: Walter, c2000-2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/search/pages/default.aspx#/>
51. Novo Kennametal [program]. Version2.8.1. Stans: Machining Cloud GmbH, c2017 [prístup 10 April 2018]
52. Ceramics for High-Temp Alloy Machining. *Kennametal* [online]. Latrobe PA: Kennametal, c2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/en/industry-solutions/aerospace/high-temp-alloy-machining.html>
-

-
53. GREBEŇ, Petr. *Název: Výpočet průhybu součástí při obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s., 1 příloha. Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
54. Product Catalog: Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement. In: *Kistler Instrument Corp.* [online]. Switzerland: Kistler Group, c2014 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=62&model=download&callee=frontend>
55. TurnCalc [program]. Version 1.2.5. Sandviken: Sandvik Coromant AB, 2014 [přístup 25 April 2018]
56. MADARIAGA, A., J. APERRIBAY, P. J. ARRAZOLA, J. A. ESNAOLA, E. HORMAETXE, A. GARAY a K. OSTOLAZA. Effect of Thermal Annealing on Machining-Induced Residual Stresses in Inconel 718. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2017, 26(8), 3728-3738 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1007/s11665-017-2824-2. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-017-2824-2>
57. AnsysWorkbench [program]. Version 19.0. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., c2018 [přístup 25 April 2018]
59. DynoWare [program]. Version 2825A. Winterthur: Kistler Group, c2002-2013 [přístup 3 May 2018]

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

AMS	<i>Aerospace material standard</i> – štandard pre letecké materiály	-
CAD	<i>Computer aided design</i> – počítačom podporovaný návrh konštrukčných riešení	-
CBN	Kubický nitrid bóru	-
CVD	<i>Chemical vapour deposition</i> - povlakovanie chemickou metódou	-
D _{Opt.}	Spotreba VBD optimalizovaného procesu	[ks]
D _{Ref.}	Spotreba VBD referenčného procesu	[ks]
HB	Tvrdosť podľa Brinella	-
HRC	Tvrdosť podľa Rockwella	-
HRSA	<i>Heat resistant super alloys</i> – žiaruvzdorné superzliatiny	-
HSC	<i>High speed cutting</i> – vysokorýchlostné obrábanie	-
HV	Tvrdosť podľa Vickersa	-
KYS 25	Použitá sorta reznej keramiky Kennametal	-
MQL	<i>Minimum quantity lubrication</i> – chladenie s minimálnym množstvom procesnej kvapaliny	-
MTCVD	<i>Middle temperature chemical vapour deposition</i> - povlakovanie chemickou metódou za znížených teplôt	-
N	Počet obrobkov	[ks]
N _{vOpt.}	Náklady na optimalizovanú výrobnú technológiu	[€]
N _{vRef.}	Náklady na referenčnú výrobnú technológiu	[€]
P _o	Počet využiteľných rezných hrán VBD	[ks]
PVD	<i>Physical vapour deposition</i> – povlakovanie fyzikálnou metódou	-
S _h	Hodinová sadzba stroja	[€]
SK	Spekaný karbid	-

S-N-O	Sústava stroj-nástroj-obrobok	-
T	Trvanlivosť	[min]
TOO	Tepelne ovplyvnená oblasť	-
VB	Opotrebenie na chrbtovej ploche rezného nástroja	[μm]
VBD	Vymeniteľná britová doštička	-
WSM 10	Použitá sorta spekaného karbidu Walter AG	-
a_p	Šírka záberu hlavného ostria nástroja	[mm]
c_T	Materiálová konštanta	[-]
i_o	Index obrobiteľnosti	[-]
m	Materiálový exponent	[-]
$n.$	Nerezová	-
r_ϵ	Polomer špičky VBD	[mm]
t_{A11}	Čas potrebný na výmenu nástroja	[min]
$t_{aOpt.}$	Jednotkový celkový čas cyklu optimalizovaného procesu	[min]
$t_{aRef.}$	Jednotkový strojný čas referenčného procesu	[min]
t_{AS}	Strojný čas cyklu	[min]
V_c	Rezná rýchlosť	[m/min]
V_{c15}	Rezná rýchlosť pri trvanlivosti 15 minút vzorky	[m/min]
$V_{c15et.}$	Rezná rýchlosť pri trvanlivosti 15 minút etalónu	[m/min]

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Základné nastavenie softvéru DynoWare.
- Príloha 2 Tvorba triesky v priebehu suchého obrábania Inconelu 718.
- Príloha 3 Vývoj opotrebenia reznej hrany VBD, s odberom vytvorenej triesky v jednotlivých sekvenciách opotrebenia.
- Príloha 4 Vývoj rezných sily pri sústružení Inconelu 718 spekaným karbidom a reznou keramikou.
- Príloha 5 Výkresová dokumentácia – reprezentatívny zástupca vyrábaných súčastí (STEM_CCI_DP) .

The screenshot displays the DynoWare software interface. At the top, the title bar reads "DynoWare - Edit Acquisition". The menu bar includes "File", "Acquisition", "View", "Tools", "Options", and "Help". A toolbar with various icons is located below the menu bar.

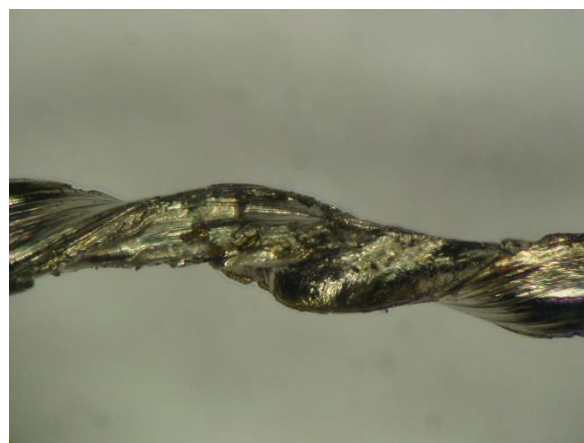
The main workspace contains several plots and a central configuration dialog box:

- Top Row Plots:**
 - Z [N]:** A plot showing a signal over time (0 to 10 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 2000.
 - Y [N]:** A plot showing a signal over time (0 to 10 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 700.
 - X [N]:** A plot showing a signal over time (0 to 10 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 100.
- Bottom Row Plots:**
 - TEST1_sk.dwd:3:** A plot showing a signal over time (0 to 16 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 2000.
 - TEST1_sk.dwd:2:** A plot showing a signal over time (0 to 16 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 700.
 - TEST1_sk.dwd:1:** A plot showing a signal over time (0 to 20 seconds) with a peak around 2.5 seconds. The y-axis ranges from 0 to 100.
- Central Dialog Box: "Edit Acquisition"**
 - Parameter:** Channels & Trigger, Data Manipulation OnLine
 - Measuring Parameters:**
 - Measuring Time: 20 (Seconds)
 - Sample Rate: 3000 (Hz)
 - Cycles: 1 (Continuous)
 - Trigger Delay Time: 0 (Seconds)
 - Save: YES, NO
 - Display: ON, OFF
 - Information:**
 - Number of Channels: 12
 - Samples / Channel: 60000
 - RAM Space / Cycle: 2.6 MB
 - Save:**
 - File: TEST_sk.dwd
 - Directory: D:\Dokumenty\Varhanik_DP\KERAMIKA\
 - Save configuration
 - Buttons: OK, Cancel, Apply

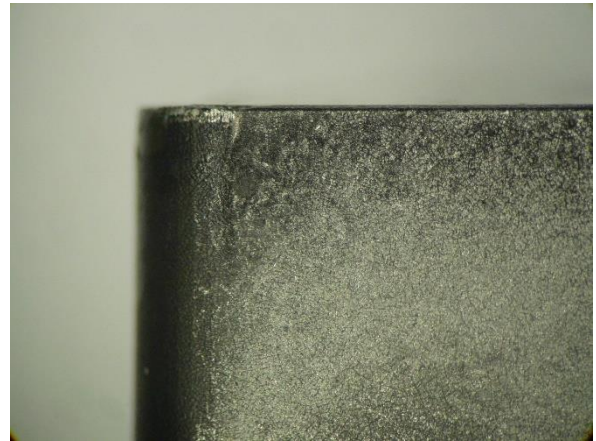
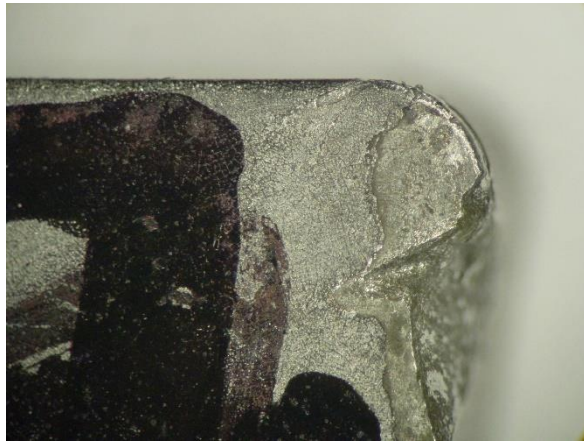
The Windows taskbar at the bottom shows the Start button, system tray icons, and the time 16:57.



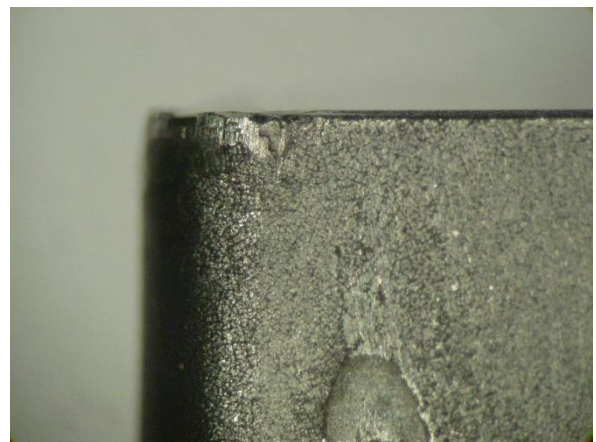
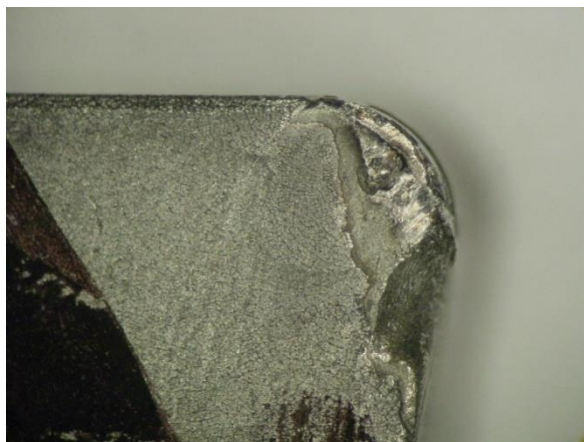
Nová VBD, tvar a štruktúra triesky na začiatku obrábania.



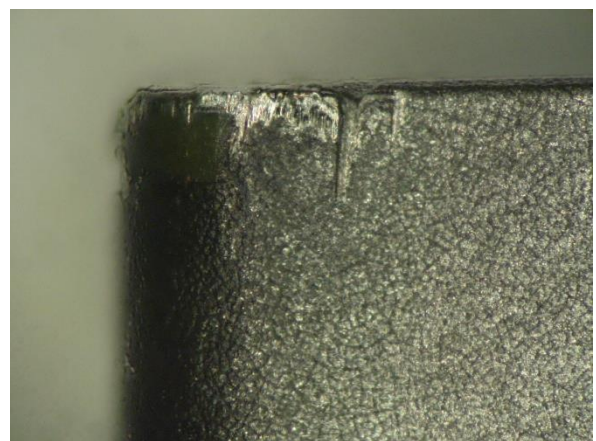
Opotrebená VBD, tvar a štruktúra triesky na konci trvanlivosti reznej hrany.



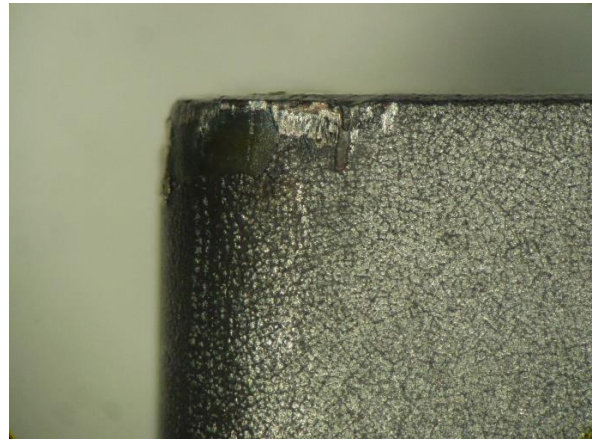
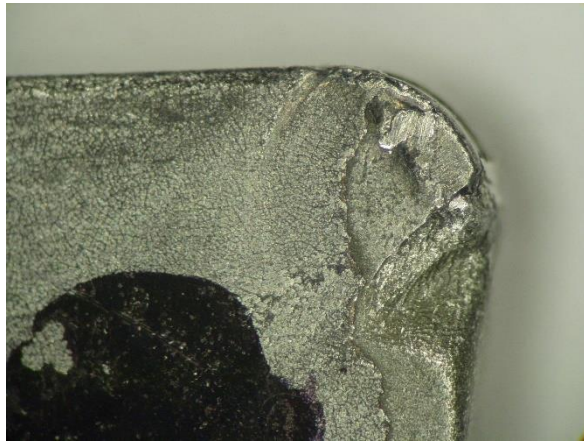
Opotrebenie čela (vľavo) a chrbta (vpravo) VBD po 2,2 min.



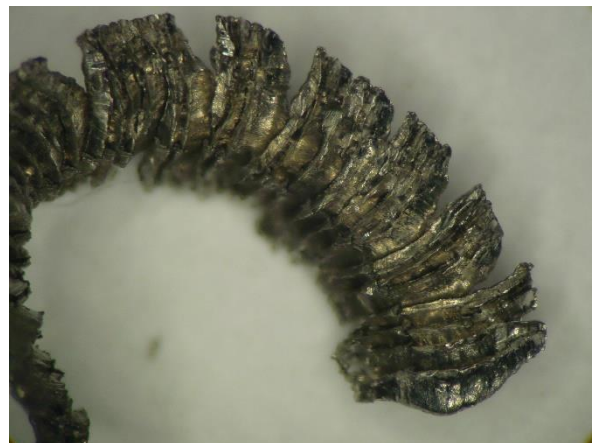
Opotrebenie čela (vľavo) a chrbta (vpravo) VBD po 3,5 min.



Opotrebenie čela (vľavo) a chrbta (vpravo) VBD po 4,4 min.



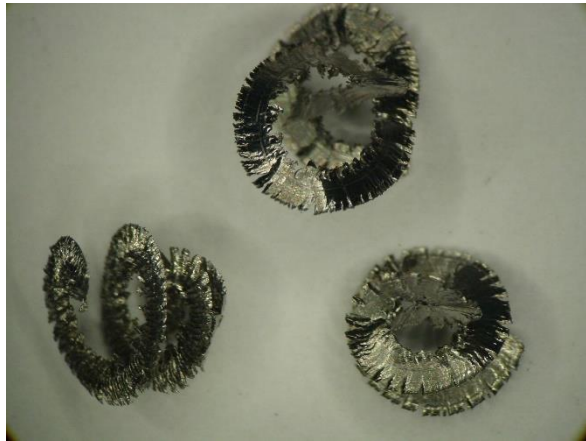
Opotrebenie čela (vľavo) a chrbta (vpravo) VBD po 6,5 min.



Tvar a štruktúra triesky po 2,2 min.



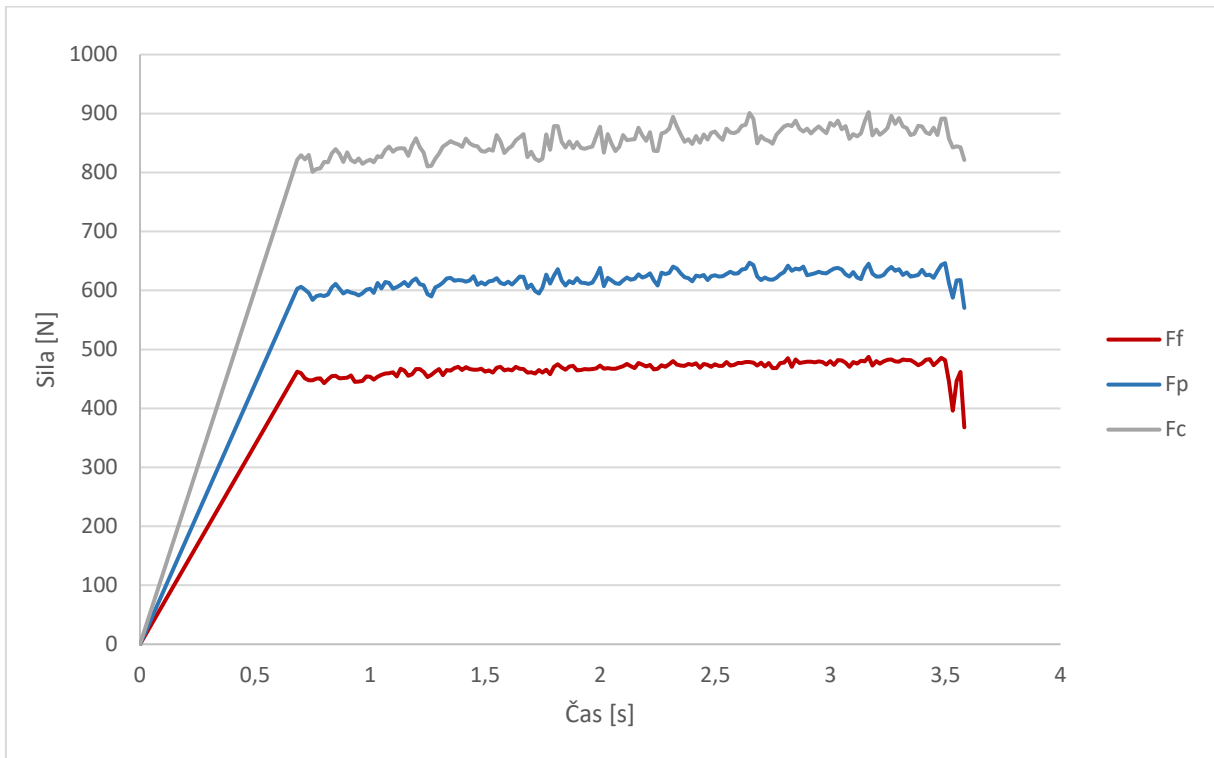
Tvar a štruktúra triesky po 3,5 min.



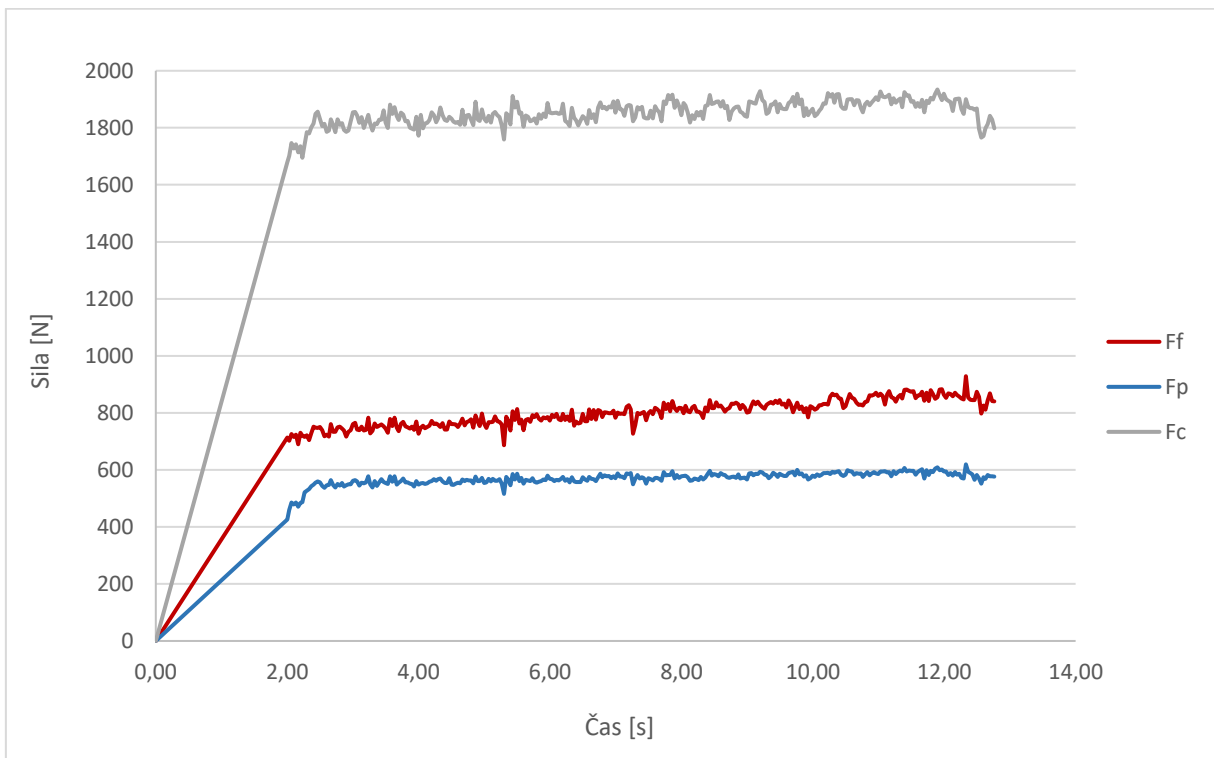
Tvar a štruktúra triesky po 4,4 min.



Tvar a štruktúra triesky po 6,5 min.



Vývoj rezných síl pri sústružení sialonovou keramikou Kennametal KYS 25.



Vývoj rezných síl pri sústružení spekaným karbidom Walter WSM 10.

Sústruženie prebiehalo na čelnej ploche z priemeru 68 mm na 40 mm. Otáčky vretena boli konštantné. Rezná rýchlosť v prípade spekaného karbidu klesala zo 45 m/min na 26 m/min. V prípade reznej keramiky z 180 m/min na 105 m/min.