



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA V TRNAVE

Ing. Róbert Straka

Autoreferát dizertačnej práce

**Vplyv rektifikácie rezných hrán na trvanlivosť rezných nástrojov pri sústružení
ťažkoobrobiteľného materiálu**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 104226 Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: 2381 Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava 31.5.2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre obrábania a počítačovej podpory na
Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Róbert Straka
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ: Ing. Tomáš Vopát, PhD.
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti: Ing. Rudolf Zaujec, PhD.
MASAM R&D
Priemyselný park Vráble
Hlavná ulica 1798/60A
952 01 Vráble

doc. Ing. Peter Pokorný, PhD.
Ústav Výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **o**
.....**h.**

na Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave, Jána Bottu 2781/25, 917 24
Trnava

.....
Prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.

OBSAH

ÚVOD	5
1 TEORETICKÁ ANALÝZA V OBLASTI REKTIFIKÁCIE REZNÝCH HRÁN REZNÝCH NÁSTROJOV	7
1.1 Mikrogeometria reznej hrany	7
1.2 Opatrebovanie reznej hrany	8
1.3 Trvanlivosť rezných nástrojov	8
1.4 Tvar reznej hrany	8
1.5 Rektifikácia reznej hrany	9
1.6 Metódy rektifikácie	10
2 CIELE dizertačnej PRÁCE	12
3 NÁVRH EXPERIMENTU	13
3.1 Rezné nástroje	13
3.2 Obrábaný materiál	14
3.3 Rezné parameter	14
3.4 Meracie zariadenia	15
3.5 Realizácia experimentov	15
4 VÝSLEDKY A DISKUSIA	18
4.1 Vývoj opotrebovania a trvanlivosť vymeniteľných rezných platničiek pri hrubovaní 18	
4.2 Vývoj opotrebovania a trvanlivosť vymeniteľných rezných platničiek pri dokončovaní.....	21
4.3 Drsnosť obrobeného povrchu a rezné sily pri dokončovaní.....	27
4.4 Výsledky deformačného spevnenia.....	29
4.5 Diskusia dosiahnutých výsledkov	30
5 PRÍNOS PRE VEDU, PRAX A PEDAGOGIKU	34
5.2 Prínos pre vedu.....	34
5.3 Prínos pre prax	34

5.4	Prínos pre pedagogiku	35
ZÁVER.....		36
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY		38
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI		41

ÚVOD

V súčasnosti sa kladie dôraz na vysokú produktivitu vo všetkých oblastiach výroby a ani obrábanie nie je výnimkou. Vysoká trvanlivosť rezných nástrojov pri nízkej cene je jeden z hlavných faktorov, ktorý určuje či sa daný produkt bude vyrábať procesmi obrábania alebo sa na výrobu použije iná metóda. Výber správnej metódy výroby súčiastok ešte umocňuje fakt, že sa do popredia dostávajú ťažkoobrobiteľné materiály, ktoré z rôznych dôvodov znižujú produktivitu obrábania. Preto je jednou z priorít výrobcov rezných nástrojov zvýšiť ich trvanlivosť, čo sa dá dosiahnuť rôznymi spôsobmi. Práve vďaka zvýšeniu trvanlivosti a zlepšeniu príľnavosti povlaku na reznú hranu sa rektifikácia javí ako vhodný spôsob úpravy rezných nástrojov čo má za následok vyššiu produktivitu a tým aj lepšiu udržateľnosť obrábania ako voľbu pre výrobu súčiastok. Práca sa v prvej časti zaoberá teoretickou analýzou a prehľadom makro a mikrogeometrie rezných nástrojov a materiálmi, ktoré sú použité pre ich výrobu. Opisuje aj generácie povlakov a povlakovanie rezných nástrojov. Tiež sa zaoberá typmi a mechanizmami opotrebovania, ktoré vznikajú na nástroji počas obrábania, trvanlivosťou rezných nástrojov, rôznymi tvarmi reznej hrany. Pojednáva aj o konvenčných a nekonvenčných metódach rektifikácie, ktoré sa v dnešnej dobe používajú na úpravu rezných hrán. V nadväznosti na kapitolu jedna ako aj kvôli záujmu výrobcu nástrojov Dormer Pramet, boli definované ciele práce. V súčasnosti sa vedecké publikácie nepozerajú tak komplexne na problematiku úpravy rezných hrán rôznymi metódami rektifikácie sústružníckych rezných nástrojov pri sústružení ťažkoobrobiteľných materiálov. Dizertačná práca ponúka súhrnný obraz na úpravu rezných hrán z pohľadu rôznych parametrov, ako opotrebovanie, trvanlivosť, drsnosť obrobeného povrchu alebo rezné sily, ktoré sú rektifikáciou ovplyvnené. Tretia časť opisuje metodiku práce. Výskum sa zaoberá 4 rôznymi polomermi zaoblenia reznej hrany, ktoré boli upravené 4 rozličnými metódami rektifikácie rezných hrán vymeniteľných rezných platničiek a ich vplyvom na trvanlivosť, vznik opotrebovania rezných nástrojov ako aj vplyvom na drsnosť obrobeného povrchu, rezné sily a deformačné spevnenie pri sústružení ťažkoobrobiteľného materiálu Inconel 718, čo je zliatina niklu s chrómom. Táto časť načrtáva použité nástroje, metódy ich rektifikácie a tiež spôsob akým boli dané parametre merané pri experimentoch. Získané výsledky z experimentov sú prezentované v štvrtej časti práce. Výsledky sú v tejto časti vyhodnotené a tiež porovnané medzi sebou. Nachádza sa tu aj diskusia dosiahnutých

výsledkov, ako aj vyhodnotenie splnenia alebo nesplnenia stanovených cieľov práce.
Z vyhodnotenia výsledkov a diskusie vyplynú prínosy pre vedu, prax a pedagogiku.

1 TEORETICKÁ ANALÝZA V OBLASTI REKTIKÁCIE REZNÝCH HRÁN REZNÝCH NÁSTROJOV

Aktívna časť v procese obrábania, ktorá zabezpečuje tvorbu triesky a obrobeného povrchu sa nazýva rezný nástroj. Rezná hrana, čelná a chrbtová plocha sú prvky, ktoré spolu tvoria reznú časť nástroja, pretože sú počas obrábania v kontakte s obrobkom. Čelná plocha A_γ a hlavná alebo vedľajšia chrbtová plocha A_α , A_α' spolu tvoria rezný klin. Priesečnice týchto plôch tvoria hlavnú a vedľajšiu reznú hranu a majú označenie S a S' (Vasilko 2009).

Nástrojové roviny sú v nástrojovej súradnicovej sústave definované ako základná nástrojová rovina P_r rovnobežná so základňou nástroja, ďalej Bočná nástrojová rovina P_f kolmá na os P_r a rovnobežná so smerom posuvu. Zadná rovina P_p kolmá na rovinu P_r a P_f . Ortogonálna rovina P_o kolmá na rovinu P_r a priemet hlavnej reznej hrany v rovine P_r . Rovina reznej hrany P_s kolmá na rovinu P_r a je dotyčnicou k reznej hrane S . Normálová nástrojová rovina P_n kolmá na reznú hranu S (Grzesik 2017).

1.1 Mikrogeometria reznej hrany

Roviny a plochy a spomenuté vyššie, a tiež uhly k nim prislúchajúce, ako napríklad uhol čela γ_o , uhol chrbta α_o alebo uhlo hrotu β_o , sa nazývajú makrogeometriou nástroja. Naproti tomu existuje aj mikrogeometria, ktorá popisuje detaily aktívnej časti rezného nástroja cez makrogeometrické veličiny. Mikrogeometria teda definuje tvar reznej hrany. Charakterizácia tvaru reznej hrany je dosiahnuteľná pomocou profilových rezov rezného klinu, kvôli čomu je potrebné vhodne definovať rozdiel medzi mikro a makro geometriou. Uhol čela je vopred určený tvarom nástroja, čo súvisí s nadradeným tvarom rezného klinu alebo s orientáciou skosenia. Efektívny uhol čela je určený reálnym uhlom čela rezného nástroja v mieste, kde je obrobok v kontakte s nástrojom počas procesu rezania. Časť rezného nástroja, kde sa efektívny uhol začína líšiť od nominálneho uhlu čela definuje prechod medzi mikro a makro geometriou nástroja (Denkena, Biermann 2014). Na definovanie mikrogeometrie reznej hrany však nestačí len efektívny uhol čela. Ďalšími parametrami, ktoré definujú reznú hranu nástroja sú polomer zaoblenia reznej hrany r_n , veľkosť zaoblenia Δr , uhol sklonu brúsenia φ , segmentom plochy čela S_γ a segmentom chrbtovej plochy S_α . K týmto sa ešte pripájajú dva pomery, z ktorých prvý je pomer K , ktorý má tvar $K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha}$ a slúži na opis symetrie obrysu reznej hrany. Pomer, ktorý určuje rozmer zaoblenia reznej hrany je priemerné zaoblenie reznej hrany $\bar{S}$ a má tvar $\bar{S} = \frac{S_\alpha + S_\gamma}{2}$ (Denkena et al. 2011).

1.2 Opotrebovanie reznej hrany

Opotrebovanie rezného nástroja je komplexný jav, ktorý je spôsobený mechanizmami alebo procesmi opotrebovania, ako sú abrazívne, difúzne, adhézne, tribooxidačné opotrebovanie a povrchové poškodenie. Kvôli vysokým tlakom a teplote na povrchu nástroja, ktorý je v kontakte s obrobkom a trieskou, je opotrebovanie reznej hrany počas obrábania nevyhnutné. K poškodeniu reznej hrany môže dôjsť predčasne a vo veľkom rozsahu alebo postupne, čo vedie ku koncu životnosti nástroja. Takéto poškodenie je zvyčajne spojené s nesprávnym výberom materiálu rezného nástroja, geometriou reznej hrany alebo reznými parametrami. Pri normálnych podmienkach vzniká opotrebovanie reznej hrany postupne, až kým nedosiahne štádium, kedy sa nástroj stáva neefektívnym pri odstraňovaní materiálu a vytváraní kvalitného povrchu obrobku. Opotrebovanie nástroja vedie k nežiadúcim následkom, ako je zníženie pevnosti reznej hrany, zvýšenie rezných síl, degradácia povrchovej úpravy obrobku, strata rozmerovej presnosti obrobku a iné. Kvôli tomu je žiadúce, aby bolo opotrebovanie nástroja značne minimalizované a kontrolované. Okrem mechanizmov existujú aj typy opotrebovania, ako kráter na ploche čela nástroja, šírka plôšky opotrebovania na chrbtovej ploche nástroja, nárastok, žliabok na reznej hrane nástroja, otupenie hrotu alebo tepelné trhliny (Klocke 2011, Sheikh-Ahmad, Davim 2012).

1.3 Trvanlivosť rezných nástrojov

Trvanlivosť nástroja je najdôležitejší parameter pre charakterizáciu obrobiteľnosti materiálu. Vzťahuje sa na dané kritérium, napríklad T_{VB04} znamená, že nástroj môže obrábať bez prebrúsenia alebo výmeny, pokiaľ opotrebovanie na chrbtovej ploche nedosiahne hranicu 0,4 mm. Zo všetkých parametrov, ktoré ovplyvňujú toto kritérium má naň najväčší vplyv rezná rýchlosť. F. W. Taylor objavil exponenciálny vzťah medzi reznou rýchlosťou a trvanlivosťou rezného nástroja pre dané kritérium opotrebovania na chrbtovej ploche VB, ktorý má tvar $v_c = C \times (\frac{T}{T_0})^{1/k}$, kde v_c je rezná rýchlosť, C je Taylorov koeficient vzťahujúci sa k reznej rýchlosti pri 1 minúte trvanlivosti nástroja, T je výsledná trvanlivosť a T_0 má hodnotu 1 minúta. Tento vzťah sa častejšie zapisuje v zjednodušenom tvare ako číselná rovnica $v_c = T^{1/k}$ (Toenshoff, Denkena 2013).

1.4 Tvar reznej hrany

Tvar a veľkosť reznej hrany predstavujú dva významné faktory pre výkon nástroja a charakter opotrebovania. Nástroj s ostrou reznou hranou má veľmi dobrý výkon pri

rezaní, no nie je vhodný pre aplikácie obrábania v priemysle kvôli citlivosti na opotrebovanie nástroja a veľmi obmedzenú trvanlivosť. Zrazené rezné hrany sa často používajú pre sústruženie tvrdých materiálov, hrubovacích procesoch a prerušovanom rezaní na zvýšenie pevnosti rezných hrán (Fang, Wu 2005, Zhuang et al. 2020). Zhou a kol. zistili, že napätia pôsobiace na zrazenú reznú hranu s uhlom zrazenia 15° sú menšie ako pri iných uhloch, vďaka čomu je tento uhol optimálny z hľadiska opotrebovania nástroja (Zhou et al. 2003). Zaoblenie reznej hrany znižuje lokálne zaťaženie nástroja a následne výskyt vylamovania reznej hrany. Najvyšší potenciál takýchto rezných hrán je pri obrábaní ocelí povlakovanými nástrojmi zo spekaného karbidu alebo pri obrábaní neželezných kovov použitím rezných nástrojov z diamantu či polykrištallického diamantu. Operácie obrábania, pre ktoré je zaoblenie rezných hrán vhodné použiť sú polo dokončovanie, dokončovanie, presné obrábanie alebo mikroobrábanie (Denkena et al. 2020). Shatla a kol. to pripisujú zvýšeniu mechanickej stability reznej hrany a tým zníženiu jej vylamovania (Shatla et al. 2001). Okrem toho je tiež optimalizovaná príľnavosť povlaku k substrátu. Väčšie zaoblenia reznej hrany preto vykazujú menšiu tendenciu k odlamovaniu alebo predčasnému opotrebovaniu. Bouzakis a kol. pripísali zlepšenú príľnavosť povlaku k zníženým napätiam v ťahu (Bouzakis 2009).

1.5 Rektifikácia reznej hrany

Geometria rezného nástroja je najdôležitejším atribútom správneho obrábania materiálu a zvyšuje výkon rezania. Kombinácia správnej mikrogeometrie rezného nástroja a vhodného povlaku umožňuje zníženie rezných síl, zvýšenie životnosti nástroja a zlepšenie kvality povrchu obrobku. Zaoblenie robí hranou tuhšou a odolnejšou proti odštiepeniu a zlomeniu. Na druhej strane to spôsobuje väčšiu deformáciu triesky v dôsledku nižšieho uhlu chrbtovej plochy, najmä ak je použitá malá hrúbka triesky. Kontakt nástroja s obrobkom pre rôzne geometrie reznej hrany je na obr. 10 (Ventura et al. 2015). Kontrolovaná aplikácia rektifikácie reznej hrany má niekoľko hlavných účelov, a to zvýšenie pevnosti reznej hrany, odstránenie predošlých chýb na reznej hrane, zvýšenie životnosti nástroja, zníženie štiepenia hrany a prípravu povrchu nástroja na povlakovanie. Zaoblenie reznej hrany nástroja významne ovplyvňuje vyvinuté mechanické a tepelné zaťaženie počas úberu materiálu. Bolo zistené, že životnosť nástroja rastie so zväčšovaním polomeru zaoblenia reznej hrany a najvhodnejší polomer je medzi 20-25 μm , no záleží to aj na hĺbke rezu. Bolo pozorované, že najnižšia drsnosť obrábaného povrchu bola dosiahnutá pri polomere

zaoblenia reznej hrany 15 μm (Pokorný et al. 2020). Diniz a Oliveira preukázali, že interakcia medzi geometriou reznej hrany a materiálom nástroja má významný vplyv na jeho životnosť. Zistili, že nástroje so zaoblenými hranami vykazovali dlhšiu životnosť, keď sa v nich použil vysoký obsah CBN a skosené nástroje mali dlhšiu životnosť, keď bol použitý nástroj s nízkym obsahom CBN (Diniz, Oliviera, 2008).

1.6 Metódy rektifikácie

Existuje niekoľko metód rektifikácie reznej hrany, ako je abrazívne tryskové obrábanie, kefovanie, omieľanie, ultrazvukové obrábanie, obrábanie laserovým lúčom a podobne. Najpoužívanějšími metódami na rektifikáciu moderných nástrojov alebo rezných platničiek z karbidu sú mokré tryskanie a kefovanie. Okrem nich existujú aj ďalšie metódy, ktoré možno použiť na dosiahnutie požadovanej mikrogeometrie reznej hrany. Tie používajú rôzne stroje, ktoré sú špeciálne navrhnuté pre dané metódy alebo je možné použiť bežný stroj. Jednou z týchto metód je omieľanie, ktoré je možné vykonať na špeciálnom stroji alebo pomocou obrábacieho stroja (Denkena et al. 2014; Peterka et al. 2020).

Kefovanie je jeden z procesov obrábania s nedefinovanou reznou hranou, ktorý umožňuje cieľnú výrobu definovaných rezných hrán so symetrickou a nesymetrickou geometriou. Touto metódou je preto možné vyrobiť široké spektrum tvarov a veľkostí zaoblenia rezných hrán. Hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi polomer zaoblenia reznej hrany sú prísuv a rezná rýchlosť. V dôsledku zvýšenia týchto parametrov stúpa úber materiálu pozdĺž reznej hrany. Zvýšenie posuvu vedie k vyššiemu splošteniu profilu, zatiaľ čo zníženie má za následok nedostatočné odstránenie materiálu v dôsledku nízkej rýchlosti úberu. Zvyšovaním reznej rýchlosti stúpa kinetická energia a tým sa zvyšuje úber materiálu (Denkena et al. 2010; Bassett et al. 2012). Je to vysoko efektívna a pomerne jednoduchá metóda na výrobu zaoblenej reznej hrany v krátkom čase a má vysokú rýchlosť úberu pre širokú škálu obrábaných materiálov. Obmedzené je však základné pochopenie procesu interakcie so substrátom a vlastnosťami opotrebenia vlákien, pretože cyklus rektifikácie určuje zaťaženie procesu (Denkena, Biermann 2014).

Omieľanie je proces hromadného dokončovania obrobeného povrchu súčiastok. Súčiastky sú upnuté na vreteno a ponorené do zmesi abrazívneho média a tekutiny, následne je súčiastka uvedená do pohybu (Malkorra et al. 2021). S ohľadom na rektifikáciu rezných hrán je omieľanie vhodné na vytvorenie homogénneho zaoblenia

reznej hrany. Vďaka malej veľkosti brusných zŕn je možné dosiahnuť rovnomerné zaoblenie, najmä pre nástroje so zložitou geometriou rezných hrán ako sú špirálové vrtáky alebo frézovacie hlavy. Niekedy je však potrebná dlhšia doba spracovania, aby sa dosiahla požadovaná veľkosť zaoblenia alebo kvalita povrchu. Tiež je možné touto metódou stabilizovať reznú hranu a znížiť štiepenie fréz pre mikroobrábanie (Denkena, Biermann 2014; Uhlman et al. 2016). Avšak aplikácia procesu omieľania a rektifikácia jednotlivých rezných hrán alebo plôch je ťažko realizovateľná, pretože ponorená časť obrobku je úplne ponorená v abrazívnom médiu. Kvôli tomu je upravený celý povrch a nie je možná cielená rektifikácia konkrétnych častí. Obmedzená je tiež variácia asymetrického zaoblenia geometrie reznej hrany (Denkena, Biermann 2014).

Pri otryskávaní sa materiál odstraňuje eróziou prúdom abrazívnych častíc a považuje sa za efektívny spôsob výroby rezných hrán s relatívne presnou geometriou. Abrazívne častice sa zmiešajú v nosnom médiu nastriekanom na povrch nástroja pomocou dýzy (Wang et al. 2020). Výsledky rektifikácie sa môžu líšiť v závislosti od prevedenia a spôsobu abrazívneho obrábania. Napríklad môžu nastať ťažkosti v dôsledku nepravidelného toku zmesi. V podstate možno povedať, že tento druh rektifikácie je mimoriadne zložitý z dôvodu mnohých ovplyvňujúcich parametrov. Na dosiahnutie požadovaných výsledkov reznej hrany, je potrebné špecifické know-how o procese. Otryskávanie môže spôsobiť lokálne odstránenie karbidu v obrábanej oblasti reznej hrany, čo vedie k destabilizácii skorými nalomeniami povlakov v porovnaní s ostrými reznými platničkami (Denkena, Biermann 2014).

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Analýza súčasného stavu ukázala, že publikované vedecké články nepojednávajú súhrnne o problematike rektifikácie hrán sústružníckych rezných nástrojov zo spekaných karbidov. Práca ponúka komplexný prehľad o problematike úpravy rezných hrán z pohľadu rôznych metód aj rôznych polomerov zaoblenia reznej hrany a rôzne parametre, ktoré sú úpravou mikrogeometrie rezných hrán ovplyvnené. Výsledky v takomto rozsahu a forme neboli zatiaľ nikde publikované. Tiež bol prejavovaný záujem zo strany výrobcu nástrojov Dormer Pramet, pre ktorého by experiment v takomto rozsahu bol časovo aj finančne náročný.

Dizertačná práca sa zaoberá vplyvom rektifikácie rezných hrán na trvanlivosť rezných nástrojov, drsnosť obrobeného povrchu a rezné sily pri sústružení ťažkoobrobiteľných materiálov ako je zliatina na báze niklu s chrómom NiCr19FeNbMo, ktorá je známa pod obchodným názvom Inconel 718. V experimentálnom výskume sú použité vymeniteľné rezné platničky so 4 polermi zaoblenia reznej hrany, ktoré boli rektifikované 3 rôznymi metódami používanými v priemysle a 1 metódou, ktorá je zatiaľ vo vývoji. Rezné parametre boli určené pre hrubovací aj dokončovaci operáciu sústruženia.

Všeobecným hlavným cieľom dizertačnej práce je zvýšiť trvanlivosť rezných platničiek vhodnou úpravou rezných hrán. Čiastkovými konkrétnymi cieľmi sú:

1. Zistiť vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n na trvanlivosť rezných nástrojov.
2. Zistiť vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n na drsnosť obrobeného povrchu.
3. Zistiť vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n na zložky reznej sily.
4. Zistiť vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n na deformačné spevnenie.
5. Porovnať vplyv metód rektifikácie reznej hrany na trvanlivosť rezných nástrojov.

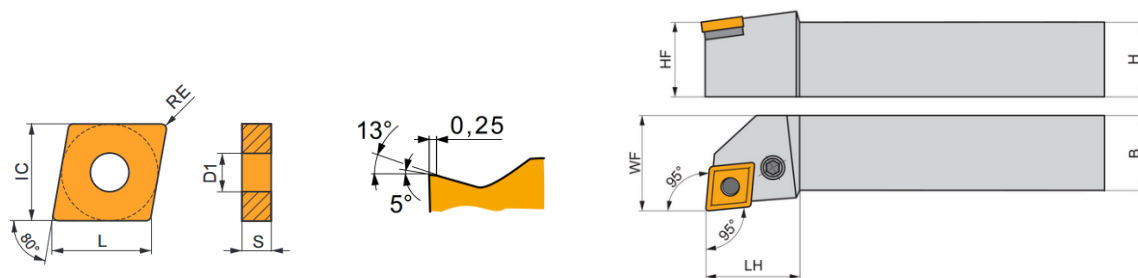
Splnenie čiastkových cieľov, kde sa vyhodnocujú jednotlivé aspekty v obrábaní, prinesie odpoveď, či príde k splneniu alebo nesplneniu hlavného cieľa. Zároveň výsledky stanovených čiastkových cieľov prinesú detailný rozbor a lepšie vysvetlenie obrábacieho procesu pri sústružení ťažkoobrobiteľnej zliatiny, s ohľadom na zmenu polomeru zaoblenia reznej hrany.

3 NÁVRH EXPERIMENTU

Na experimenty bolo použité viacosové sústružnícke centrum s protivretenom CTX alpha 500. Dráhy pre sústruženie boli navrhnuté v riadiacom systéme stroja Heidenhain CNC DataPilot. Experimenty boli uskutočnené v Centre excelentnosti 5-osového obrábania na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave.

3.1 Rezné nástroje

Použité rezné nástroje boli vymeniteľné rezné platničky zo spekaného karbidu, s bližšie nešpecifikovaným chemickým zložením, ktoré dodala firma Dormer Pramet. Ich označenie je CNMG 120408E-SM. Použitý držiak rezných platničiek, vyrobený z nástrojovej ocele, má označenie PCLNL 2020K16. Ich rozmery sú na Obr. 1 a v Tab. 1.



Obr. 1: Rozmery rezných platničiek a držiaka rezných platničiek

Tab. 1: Rozmery použitých rezných platničiek a držiaka VRP

VRP	L [mm]		IC [mm]		D1 [mm]		S [mm]	
CNMG 120408E-SM	12,90		12,70		5,16		4,76	
držiak	κ_r [°]	ϵ_r [°]	h [mm]	b [mm]	LH [mm]	HF [mm]	λ_s [°]	γ [°]
PCLNL 2020 K12	95	80	20	20	28	20	-6	-6

Rezné nástroje boli za pomoci výrobcu nástrojov Dormer Pramet rektifikované 4 rôznymi metódami, menovite kefovaním, mokrým tryskaním, omieľaním a metódou N, ktorá je zatiaľ vo vývoji a nebola bližšie špecifikovaná. Prvou metódou bolo kefovanie, pri ktorom boli použité rotačné kefy s abrazívnym SiC zrnom. Každou z metód boli vyrobené štyri polomery zaoblenia reznej hrany a to $r_n = 19 \mu\text{m}$, $r_n = 25 \mu\text{m}$, $r_n = 37 \mu\text{m}$ a $r_n = 51 \mu\text{m}$.

3.2 Obrábaný material

Materiál použitý na experimenty bola zliatina na báze niklu s chrómom Inconel 718, ktorej ekvivalent je DIN 2.4668, EN NiCr19FeNbMo alebo UNS N07718. Je to zliatina s vysokou pevnosťou, ktorá spadá do skupiny takzvaných ťažkoobrobiteľných materiálov. Dôvodom pre jej zaradenie do tejto skupiny sú jej fyzikálne vlastnosti ako nízka tepelná vodivosť, vysoká náchylnosť k deformačnému spevneniu, a tiež pri jej obrábaní veľmi rýchlo vzniká opotrebovanie na rezných nástrojoch, čo znižuje ich trvanlivosť a je potrebné ich často prebrusovať a vymieňať. Polotovary boli vyrobené valcovaním za studena a žíhané pri teplote 965°C 1 hodinu a následne ochladené prúdom vzduchu. Priemer polotovarov bol $\varnothing 101,6 \text{ mm}$.

3.3 Rezné parameter

Na zachovanie rovnakých podmienok experimentu v každom kroku boli rezné parametre navrhnuté tak, aby sa počas celého experimentu nemenili. Určené boli mnohopočetnými testami pre hrubovaciu a dokončovaciu operáciu sústruženia v spolupráci s dodávateľom nástrojov. Použité rezné parametre v experimente sú uvedené v tab. 4 a sú navrhnuté tak, aby bolo možné dosiahnuť kontrolovaný vývoj opotrebovania nástroja, čo je pri obrábaní ťažko-obrobiteľnej niklovej zliatiny problematické. Rezná rýchlosť v_c bola stanovená po mnohopočetných dlhodobých skúškach trvanlivosti tak, aby rezné platničky dosiahli trvanlivosť približne 33 minút. Posuv f a hĺbka rezu a_p boli zvolené najmenšie možné s ohľadom na tvarovanie a odvod triesky z miesta rezu. Jedna dráha mala 21 mm, po nej nasledoval ďalší rez. Použitá stratégia sústruženia bola pozdĺžne sústruženie.

Tab. 2: Použité rezné parametre

Operácia	$v_c [m \cdot min^{-1}]$	$f[mm]$	$a_p[mm]$
Hrubovanie	40	0,15	1
Dokončovanie	50	0,12	0,8

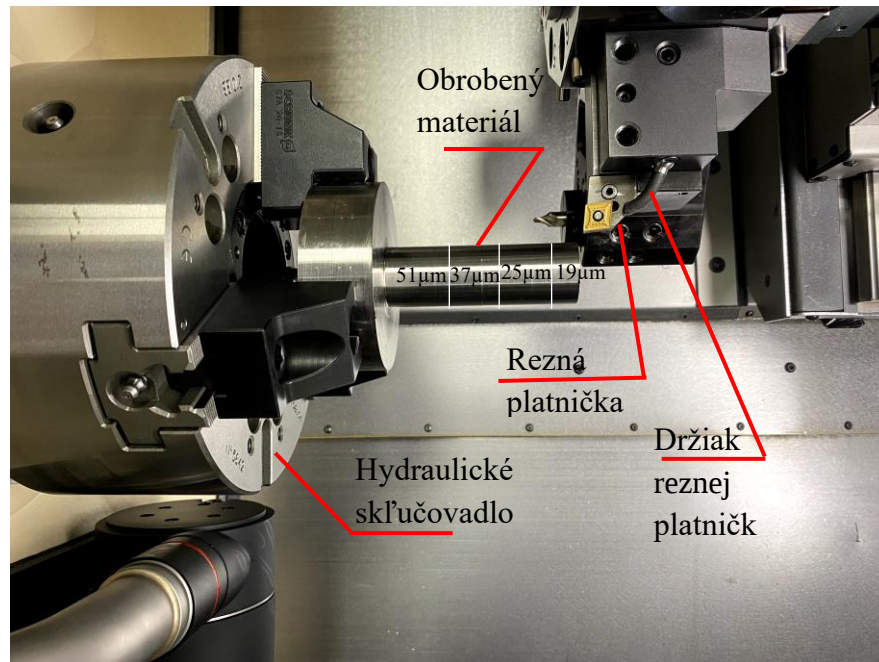
3.4 Meracie zariadenia

Na meranie plôšok opotrebovania na hlavnej a vedľajšej chrbtovej ploche bol použitý mikroskop Dino-Lite Edge s rozlíšením 1280×960 pixelov s rozsahom zväčšenia 20 až 220-krát. Na meranie parametrov drsnosti obrobeného povrchu po sústružení bol použitý drsnomer Mitutoyo SJ-210. Parametre drsnomeru boli základná dĺžka $\lambda_c = 2,5$ mm, vyhodnocovaná dĺžka $l_n = 12,5$ mm, rýchlosť merania $0,25$ mm·s⁻¹, krátkovlnný filter $\lambda_s = 0,8$ μm. Zložky reznej sily sa merali pomocou dynamometru Kistler.

Keďže je niklová zliatina známa náchylnosťou na deformačné spevnenie, meral sa aj tento parameter. Vyhodnocoval sa externe vo firme Staton. Maximálne zaťaženie bolo 5 mN. Rýchlosť zaťaženia a uvoľnenia bola 15 mN·min⁻¹. Zaťaženie bolo lineárne počas celej doby merania. Použitá vyhodnocovacia metóda bola Oliver & Pharr s poissonovým pomerom (ν) 0,30. Mikrotvrdosť pod povrchom obrobeného materiálu sa merala v 13 hĺbkach a v každej hĺbke 9 krát.

3.5 Realizácia experimentov

V prvom kroku sa nástroje skontrolovali kvôli možným nečistotám alebo chybám, ktoré by mohli vzniknúť pri výrobe, čo by mohlo ovplyvniť experiment. Následne sa nasníмали, aby bolo vidieť, kde sa počas sústruženia tvorí opotrebovanie. Súčasne s kontrolou nástrojov sa na obrábanom materiály odstránila zhrubnutá povrchová vrstva, ktorá vznikla po výrobe kruhového tyčového polotovaru, konkrétne valcovaním za studena, aby nijako neovplyvnila experiment. Obrobok upnutý v trojčelust'ovom skľučovadle, ktorý mal priemer 100 mm, bol obrábaný vždy 4 reznými platničkami, ktoré boli rektifikované rovnakou metódou s rôznymi polomermi zaoblenia reznej hrany, aby nedošlo k zámene rezných platničiek. V obrábacom procese bola použitá procesná kvapalina (voda + 5% olej). Na Obr. 2 je obrobok upnutý v skľučovadle sústruhu aj s upnutým nástrojom v revolverovej nástrojovej hlave.



Obr. 2: Upnutie obrobku a nástroja

Každá rezná platnička prešla dráhu 21 mm. Prvý nástroj obrábala dráhu od 0 do 21 mm, druhý od 21 do 42 mm, tretí od 41 do 63 mm a štvrtý nástroj od 63 do 84 mm. Bolo to z dôvodu aby sa nástroje medzi sebou neovplyvňovali. Po prvej minúte obrábania sa nástroje vybrali, očistili od procesnej kvapaliny a možných nečistôt a postupne sa vkladali do špeciálneho prípravku vyrobeného pomocou 3D tlače, ktorý sa nachádzal v zornom poli mikroskopu. Meranie opotrebovania je na Obr. 30.

Po ustavení reznej platničky v prípravku a zaostrení kamery mikroskopu na reznú hranu sa opotrebovanie merala prostredníctvom programu DinoCapture 2.0 tak, že sa rezná hrana nasnímala, aby sa zamedzilo jej posunutiu vonkajšími vplyvmi a na fotografii sa merala šírka plôšky opotrebovania VB_N na hlavnej chrbtovej ploche. Pri experimentoch s hrubovacími podmienkami sa merala aj šírka plôšky opotrebovania VB_B , avšak v skoro všetkých prípadoch vznikalo opotrebovanie v časti N rýchlejšie a preto je v práci uvádzaná len tá. Po meraní sa nástroje vrátili na svoje pozície v nástrojovej hlave sústruhu a pokračovalo sa v ďalšom obrábaní. Meranie sa opakovalo po 1, neskôr po 2 a následne po 3 minútach obrábania, až pokiaľ rezná platnička neprekročila stanovené kritériá otupenia VB_K . Zvolené kritériá otupenia boli zvolené $VB_{K1} = 0,20$ mm, $VB_{K1} = 0,25$ mm a $VB_{K1} = 0,30$ mm.

Dôvod výberu viacerých kritérií otupenia bol ten, že opotrebovanie pri tomto materiáli sa nevyvíja ako napríklad pri oceliach a preto je náročné určiť len jedno kritérium, podľa ktorého by sa určila trvanlivosť reznej platničky. Najvyššie zvolené

kritérium $VB_K = 0,30$ mm bolo zvolené z dôvodu, že sa u viacerých nástrojov začalo opotrebovanie výrazne zväčšovať už pred dosiahnutím alebo po dosiahnutí tejto hodnoty, alebo sa po presiahnutí tejto hodnoty začala vylamovať rezná hrana.

Drsnosť a rezné sily sa merali samostatne, počas 4 minút obrábania, z dôvodu, že sa opotrebovanie na rezných platničkách ešte vyvíjalo kontrolovateľne a preto bolo možné sledovať vplyv polomerov zaoblenia na drsnosť a rovnako aj zložky reznej sily. Zložky reznej sily, menovite posuvová (axiálna) F_f , pasívna (radiálna) F_p a hlavná zložka reznej sily (tangenciálna) F_c , sa merali tak, že počas celej doby obrábania bol zapnutý dynamometer, ktorý zložky meral. Po skončení obrábania sa merali parametre drsnosti obrobeného povrchu ako aritmetická odchýlka hodnoteného povrchu R_a a najväčšia výška hodnoteného profilu R_z tak, že bol drsnomer pomocou magnetického stojana s hydraulickým ramenom pripevnený na revolverovú nástrojovú hlavu sústruhu a ručne sa priviedol nad obrobok, aby bolo možné odmerať parametre vždy na obrobenej ploche, ktorá zodpovedala danej minúte obrábania. Dôvod výberu týchto 2 parametrov bol ten, že si ich meranie vyžiadala výroba nástrojov, no tiež sú to najviac používané parametre drsnosti obrobeného povrchu vo vedeckých článkoch a rovnako sa často používajú pre technickú dokumentáciu v strojárskom priemysle. Parametre drsnosti obrobeného povrchu boli vždy merané 3 krát na každej obrobenej ploche. Zložky reznej sily ako aj parametre drsnosti obrobeného povrchu R_a , R_z boli merané vždy len pri obrábaní jedným nástrojom s jedným polomerom zaoblenia reznej hrany a bola použitá len jedna metóda rektifikácie, konkrétne omieľanie.

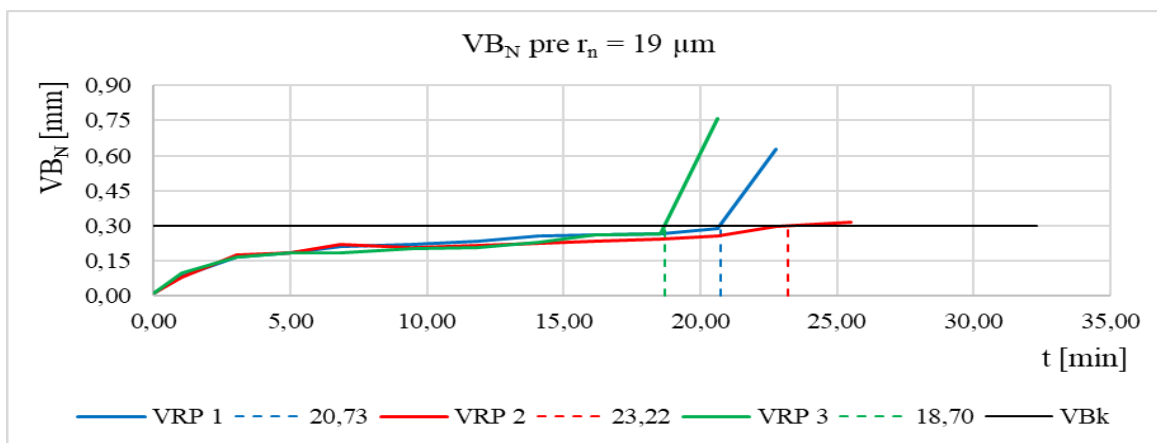
Deformačné spevnenie sa meralo samostatne na vzorkách s priemerom $\varnothing 40$ mm a dĺžkou 30 mm. Deformačné spevnenie sa na vzorkách meralo tak, že vzorka bola osústružená s použitím rezných parametrov pre dokončovaciu metódu. Použité boli vymeniteľné rezné platničky rektifikované omieľaním. Po osústružení sa na drôtoreze vyrobila plôška pod uhlom $1,3^\circ$, na ktorej bola pod povrchom vzorky meraná nanotvrdosť.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

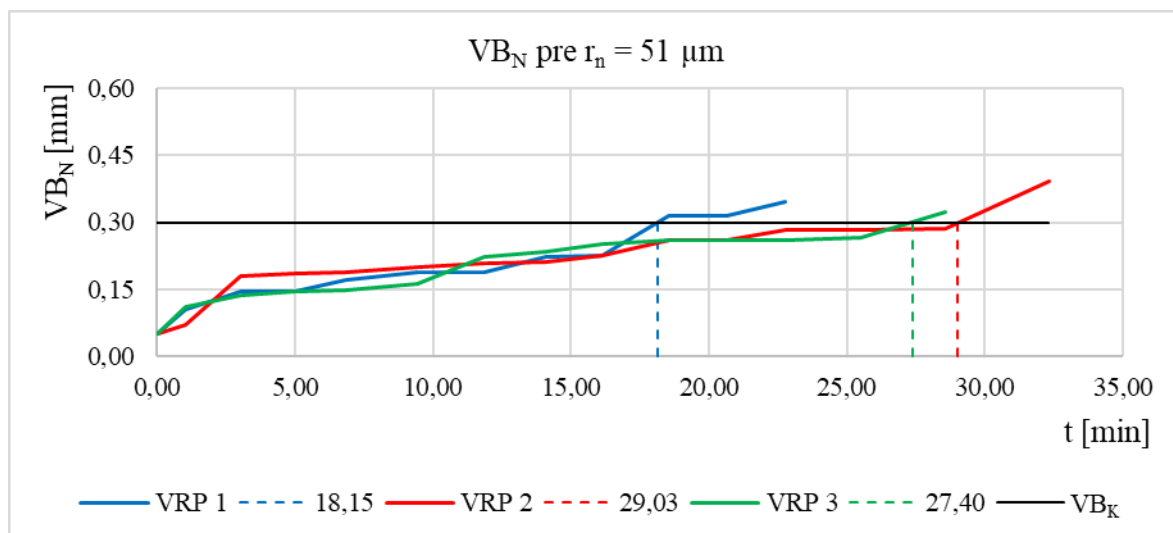
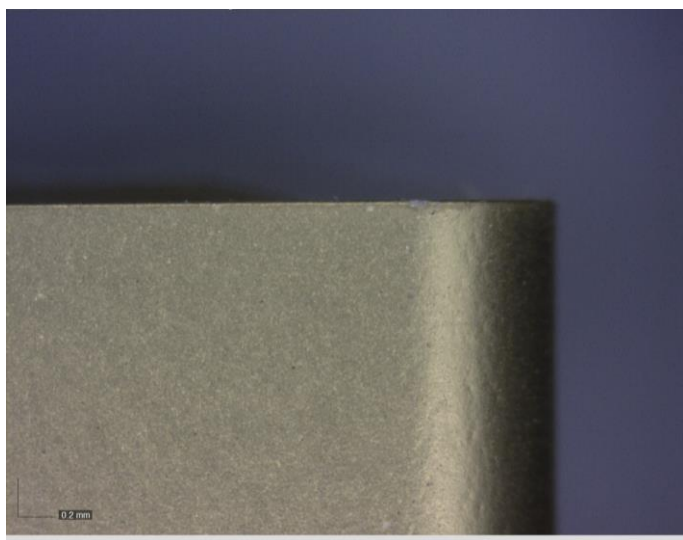
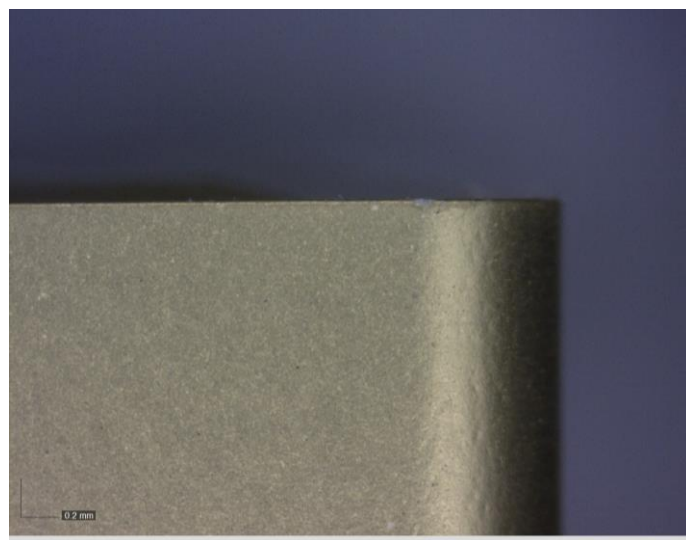
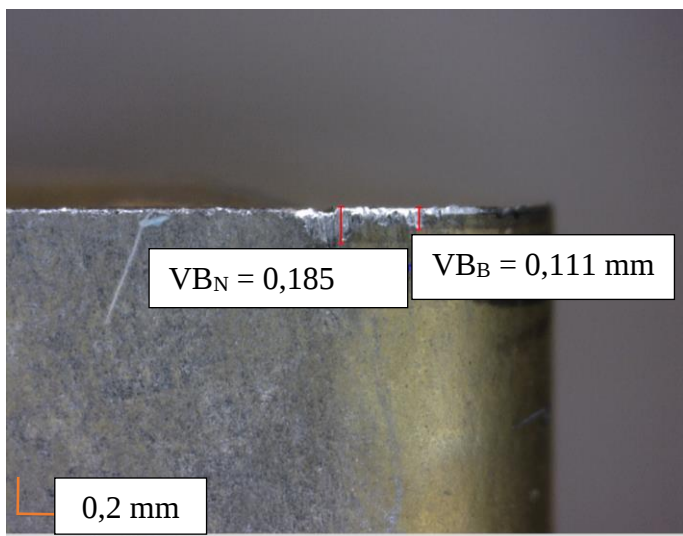
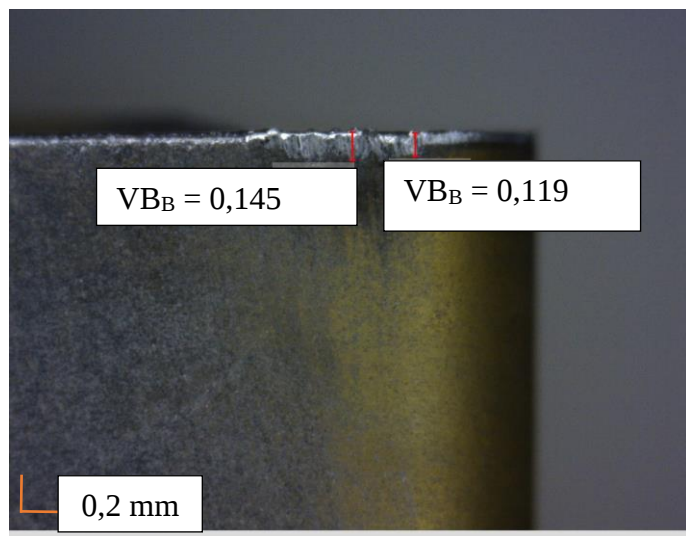
Ako už bolo spomenuté trvanlivosť sa vyhodnocovala z pohľadu šírky plôšky opotrebovania VB_N a kritérium otupenia bolo stanovené na $VB_K = 0,3$ mm pre hrubovanie a $VB_K = 0,20 / 0,25 / 0,30$ mm pre dokončovanie. Porovnávala sa priemerná trvanlivosť všetkých polomerov zaoblenia reznej hrany pre každú metódu rektifikácie zvlášť. Rovnako sa porovnávala aj priemerná trvanlivosť všetkých metód navzájom. Pozoroval sa aj vplyv rektifikácie reznej hrany na drsnosť obrobeného povrchu, kde sa merali parametre drsnosti obrobeného povrchu R_a a R_z . Tiež sa sledoval vplyv rektifikácie reznej hrany na zložky reznej sily F_c , F_f , F_p . Zároveň sa meral aj vplyv polomerov zaoblenia reznej hrany na deformačné spevnenie materiálu.

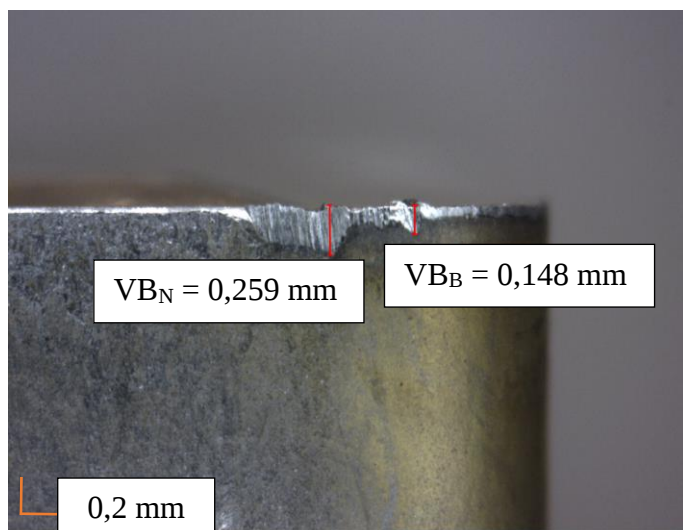
4.1 Vývoj opotrebovania a trvanlivosť vymeniteľných rezných platničiek pri hrubovaní

Táto podkapitola sa zaoberá vývojom opotrebovania na hlavnej chrbtovej ploche reznej hrany s rôznymi polermi zaoblenia reznej hrany, ktoré boli vždy vyrobené rovnakou metódou rektifikácie. Grafy, ktoré sú na Obr. 3 a 4 ukazujú vývoj šírky plôšky opotrebovania VB_N pre polomery zaoblenia reznej hrany $r_n = 19 \mu m$ a $r_n = 51 \mu m$, ktoré boli vyrobené omieľaním. Označenie VRP a číslo znamená, že sa jedná o vymeniteľnú reznú platničku (vzorku) 1, 2 alebo 3 s rovnakým polomerom zaoblenia. Čiarkované čiary v grafoch ukazujú časy, v ktorých daná vzorka dosiahla kritérium otupenia, čo sú vlastne ich trvanlivosti. Na Obr. 5 je vývoj opotrebovania v čase pre omieľané rezné platničky s polomerom zaoblenia reznej hrany $19 \mu m$ a $51 \mu m$. Rovnakým spôsobom sa vyhodnocovali všetky polomery zaoblenia reznej hrany pri všetkých rektifikačných metódach použitých pri experimentoch.

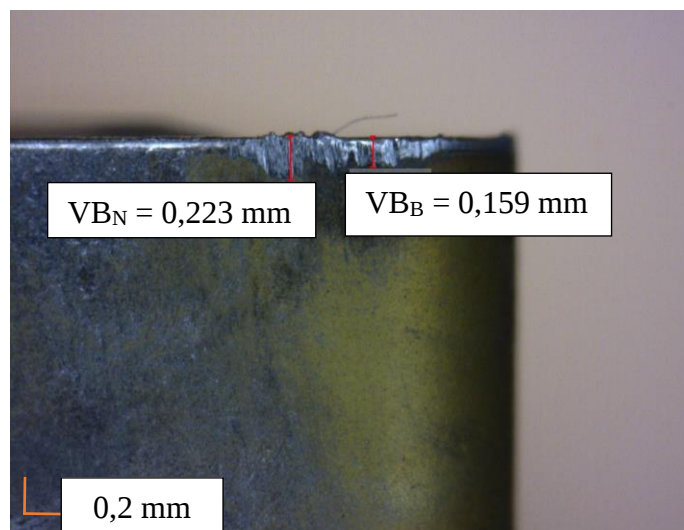


Obr. 3: Vývoj šírky plôšky VB_N v čase pre omieľaný nástroj s $r_n = 19 \mu m$

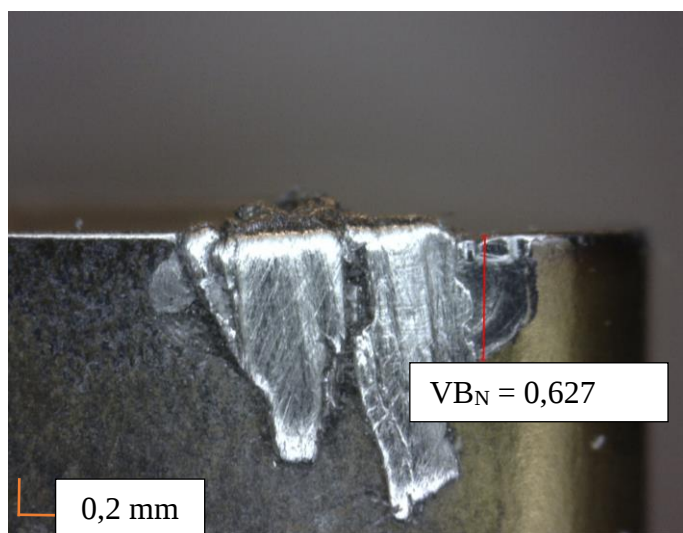
Obr. 4: Vývoj šírky plôšky VB_N v čase pre omieľaný nástroj s $r_n = 51 \mu m$  $t = 0 \text{ min}, r_n = 19 \mu m$  $t = 0 \text{ min}, r_n = 51 \mu m$  $t = 4,97 \text{ min}, r_n = 19 \mu m$  $t = 4,97 \text{ min}, r_n = 51 \mu m$



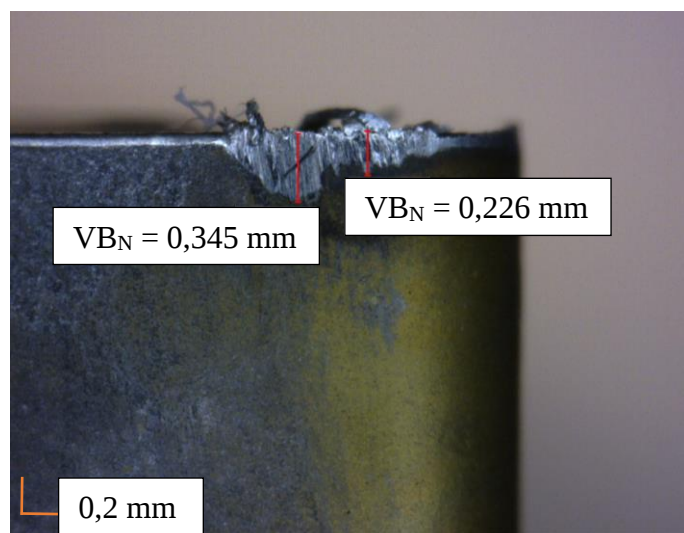
$t = 14,07 \text{ min}, r_n = 19 \text{ }\mu\text{m}$



$t = 14,07 \text{ min}, r_n = 51 \text{ }\mu\text{m}$



$t = 22,97 \text{ min}, r_n = 19 \text{ }\mu\text{m}$

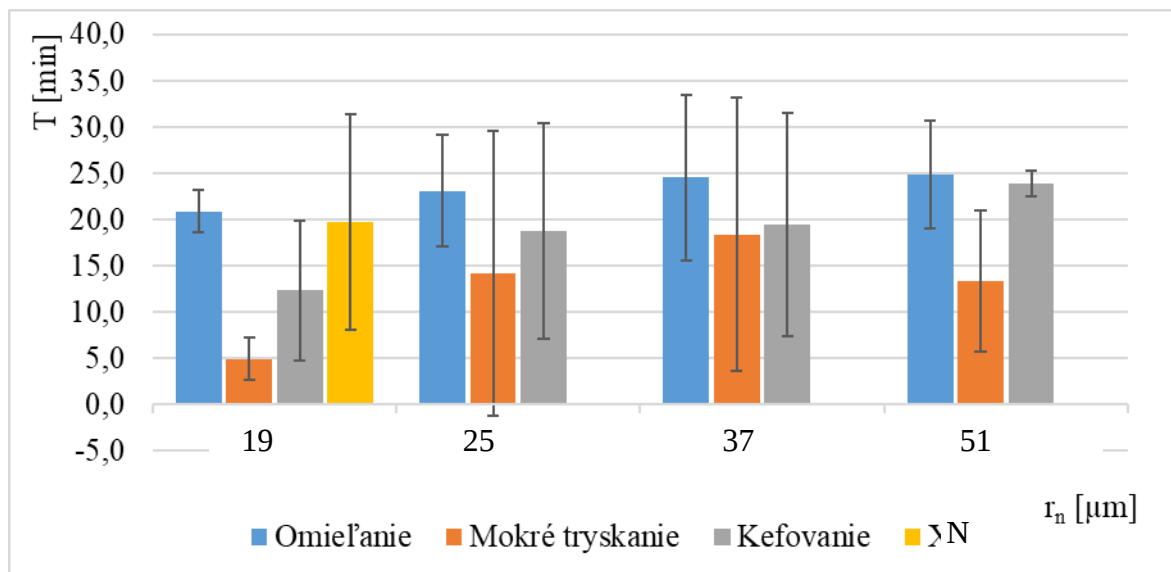


$t = 22,97 \text{ min}, r_n = 51 \text{ }\mu\text{m}$

Obr. 5: Vývoj opotrebovania v čase pre omieľané nástroje

Po nameraní údajov bolo možné vyhodnotiť priemernú trvanlivosť pre každú metódu zvlášť a tiež porovnať metódy medzi sebou. Graf na Obr. 6 ukazuje porovnanie priemernej trvanlivosti každej metódy pre každý polomer zaoblenia reznej hrany. Ako už bolo spomenuté vyššie, bližšie nešpecifikovaná metóda, ktorá má v grafe označenie N, bola použitá na výrobu len jedného polomeru zaoblenia reznej hrany a preto je jej hodnota priemernej trvanlivosti len pri polomery zaoblenia reznej hrany $r_n = 19 \text{ }\mu\text{m}$. Pri obrábaní ťažkoobrobiteľných materiálov, akým je aj niklová zliatina, je veľmi náročné zaistiť kontrolovateľný vývoj opotrebovania nástroja. Z toho dôvodu sa stalo, že rezný nástroj niekedy zlyhal skôr, ako sa očakávalo, čo je vidieť aj na grafoch vývoja

opotrebovania. Preto je v niektorých prípadoch smerodajná odchýlka oveľa väčšia na grafe priemernej trvanlivosti na Obr. 7.



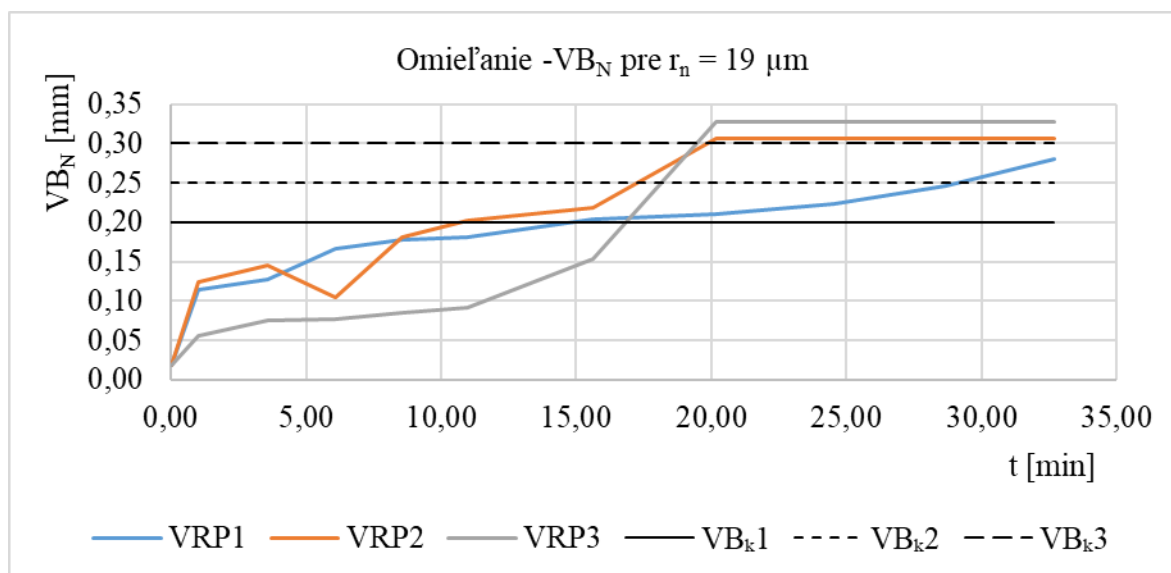
Obr. 6: Priemerná trvanlivosť pre rôzne metódy rektifikácie

Z grafu na Obr. 7 je vidieť, že pri omieľaní najdlhšiu priemernú trvanlivosť 24,86 minút dosiahol nástroj s polomerom zaoblenia reznej hrany $r_n = 51 \mu\text{m}$. V prípade mokrého tryskania bola najdlhšia trvanlivosť dosiahnutá nástrojom s polomerom zaoblenia $r_n = 37 \mu\text{m}$ a jej hodnota bola 18,4 minút. Pre kefovanie bola najvyššia priemerná trvanlivosť dosiahnutá rovnako ako pri omieľaní polomerom $r_n = 51 \mu\text{m}$ a jej hodnota bola $T = 23,86$ minút. Trvanlivosť pri metóde N mala hodnotu 19,73 minút. Ako je vidno z výsledkov, trvanlivosti rezných nástrojov, veľké hodnoty smerodajných odchýlok spôsobujú nejednoznačnú interpretáciu výsledkov, čo je diskutované v kapitole 4.4 diskusia dosiahnutých výsledkov. Zaujímavým poznatkom je, že voľba rezných parametrov musí byť prispôbená detailne pre špecifickú operáciu obrábania. Z tohto dôvodu vyplýva, že pri hrubovacích podmienkach nie je možné zaručiť kontrolovaný vývoj opotrebovania hoci rozdiel hodnôt rezných parametrov medzi hrubovacími a dokončovacími podmienkami nie je veľký (Tab. 2).

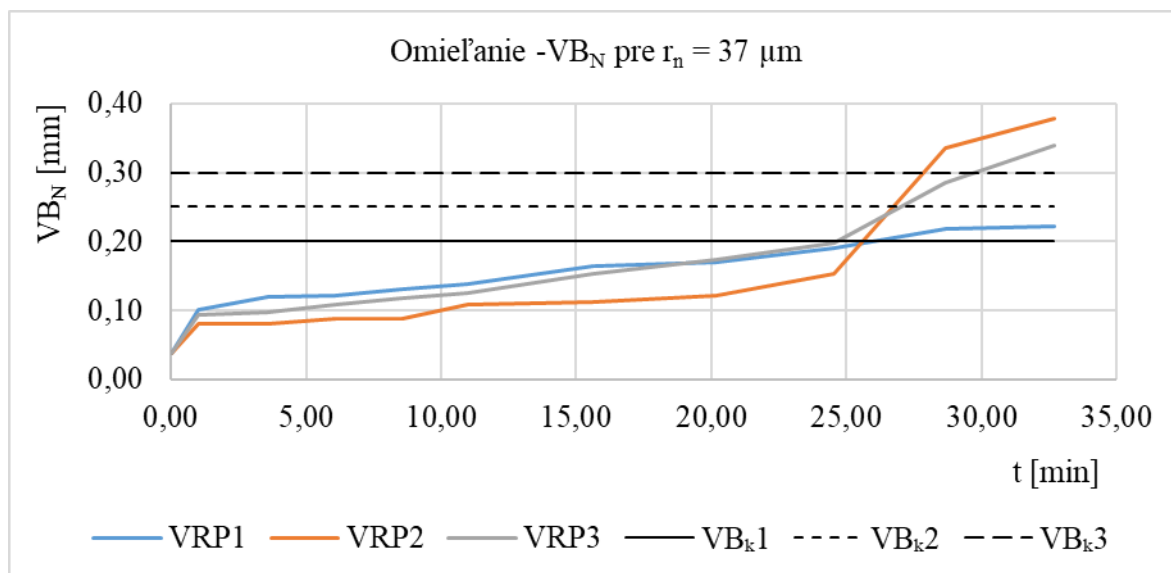
4.2 Vývoj opotrebovania a trvanlivosť vymeniteľných rezných platničiek pri dokončovaní

Táto podkapitola sa zaoberá vývojom opotrebovania na hlavnej chrbtovej ploche reznej hrany s rôznymi polomerami zaoblenia reznej hrany, ktoré boli vždy vyrobené rovnakou metódou rektifikácie s reznými parametrami pre dokončovaciu operáciu. Grafy, ktoré sú na Obr. 7 a 8 sú príklady nameraného vývoj šírky plošky opotrebovania

VB_N pre polomery zaoblenia reznej hrany $r_n = 19 \mu\text{m}$ a $r_n = 37 \mu\text{m}$, vyrobené omieľaním. Označenie VRP a číslo znamená, že sa jedná o vymeniteľnú reznú platničku (vzorku) 1, 2 alebo 3 s rovnakým polomerom zaoblenia. Rovnakým spôsobom sa vyhodnocovali všetky polomery zaoblenia reznej hrany pri všetkých rektifikačných metódach použitých pri experimentoch s reznými parametrami pre dokončovaciu stratégiu.



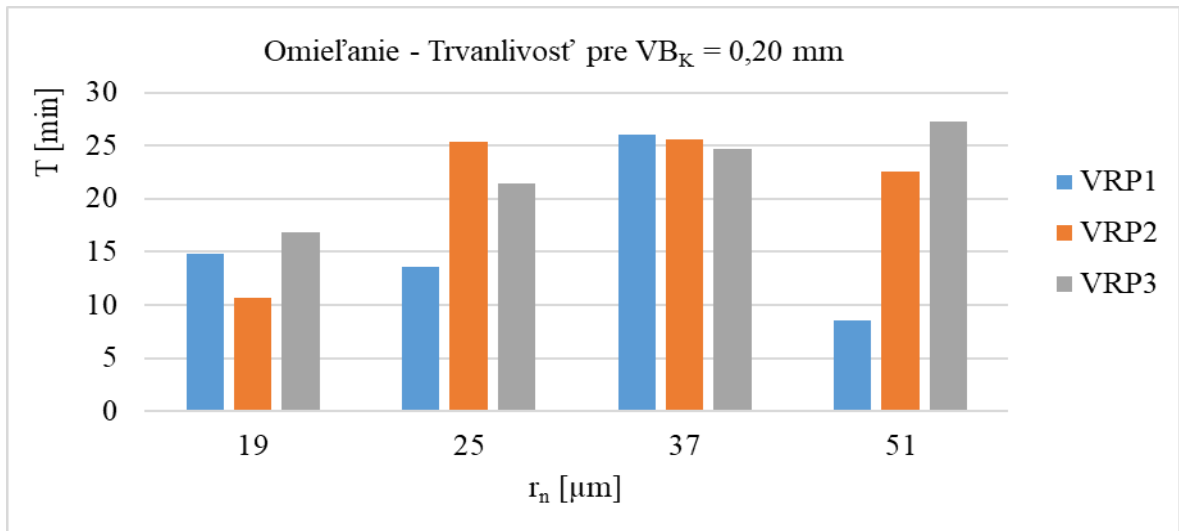
Obr. 7: Vývoj šírky plošky opotrebovania VB_N v čase pre omieľaný nástroj s $r_n = 19 \mu\text{m}$



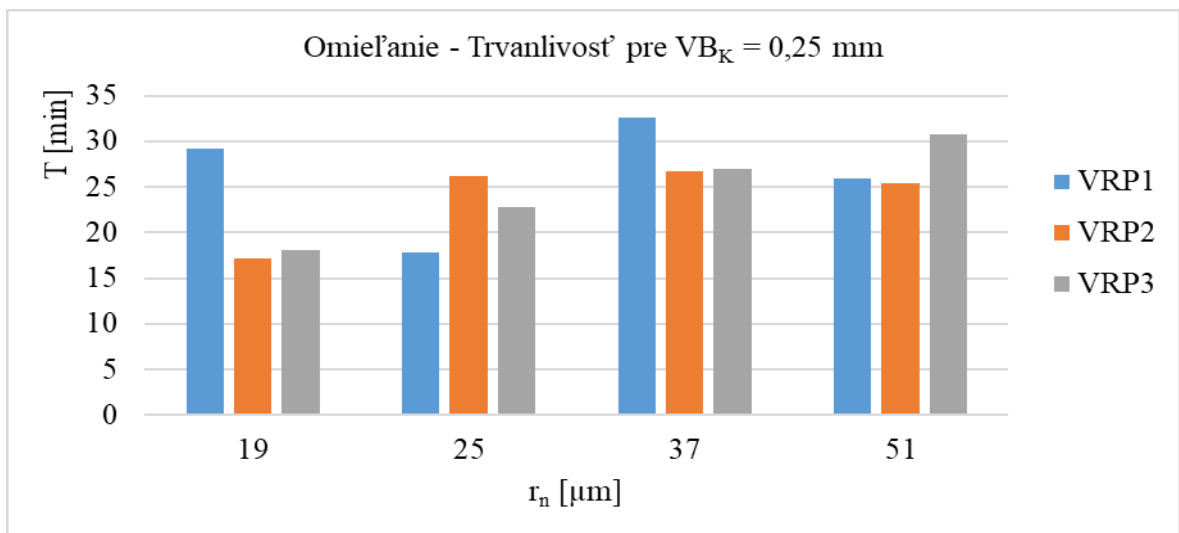
Obr. 8: Vývoj šírky plošky opotrebovania VB_N v čase pre omieľaný nástroj s $r_n = 37 \mu\text{m}$

Keďže pre dokončovanie boli zvolené kritériá otupenia tri, časy, v ktorých daná platnička prekročila dané kritérium otupenia VB_K , sú uvedené v grafoch na Obr. 9 až 11, kvôli lepšej prehľadnosti a čitateľnosti grafov. Označenie VRP a číslo má rovnaký význam ako v grafoch vývoja opotrebovania v čase. Na Obr. 12 je vývoj opotrebovania

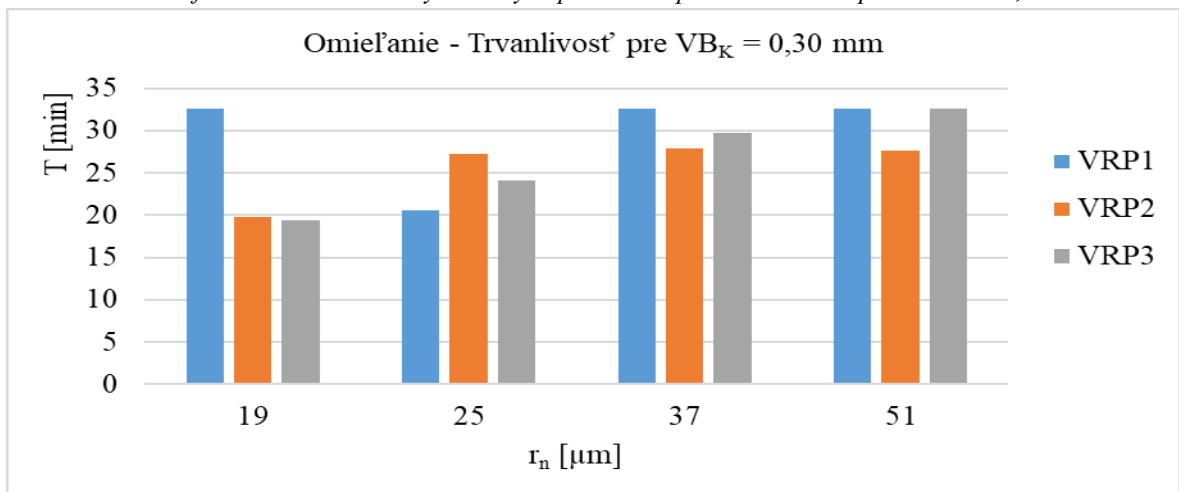
v čase pre omieľané vymeniteľné rezné platničky pre rôzne polomery zaoblenia reznej hrany.



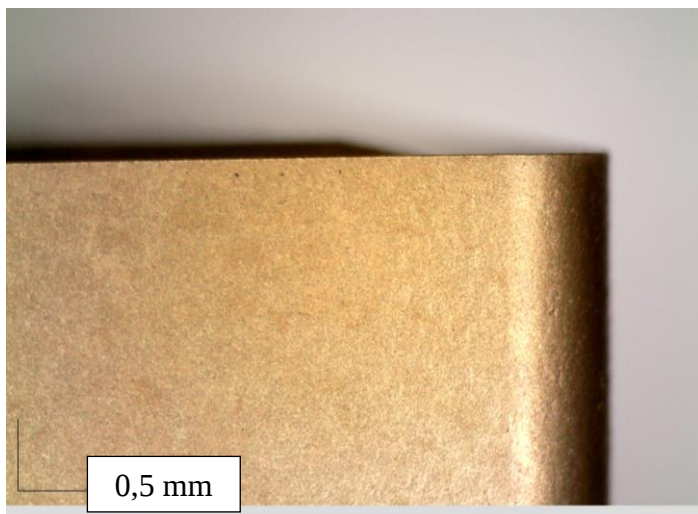
Obr. 9: Graf trvanlivosti omieľaných rezných platničiek pre kritérium otupenia $VB_K = 0,20$ mm



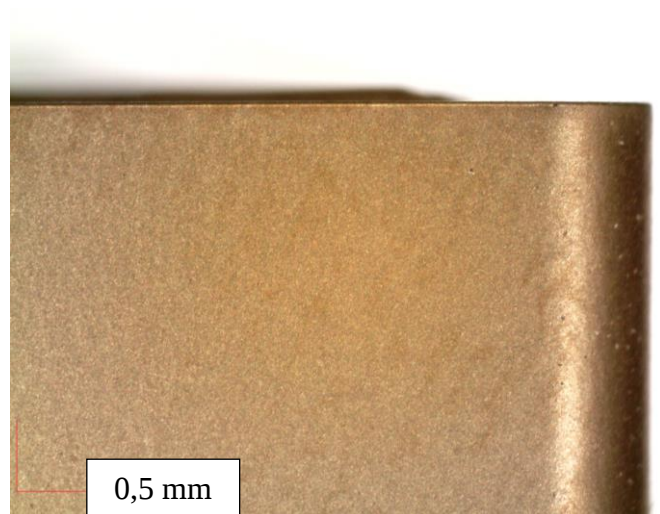
Obr. 10: Graf trvanlivosti omieľaných rezných platničiek pre kritérium otupenia $VB_K = 0,25$ mm



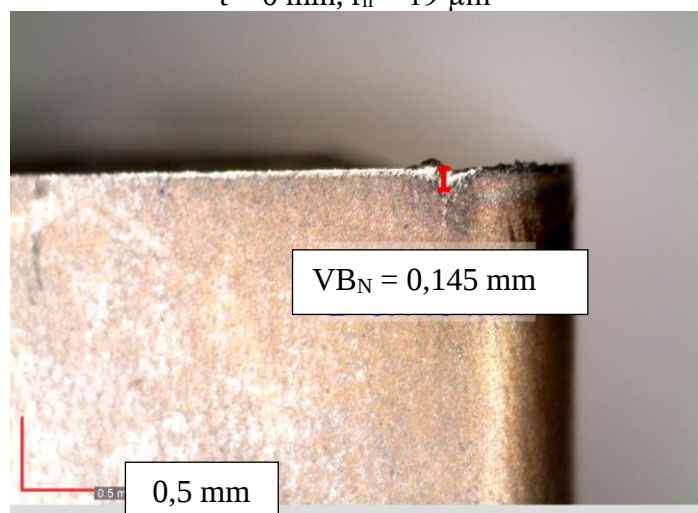
Obr. 11: Graf trvanlivosti omieľaných rezných platničiek pre kritérium otupenia $VB_K = 0,30$ mm



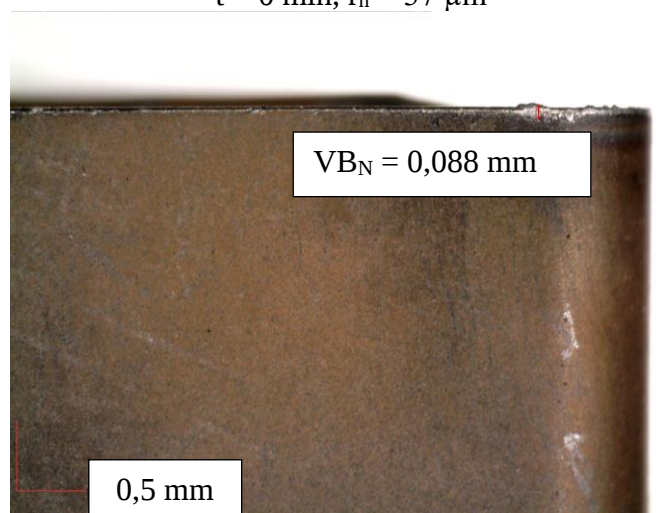
$t = 0 \text{ min}, r_n = 19 \text{ μm}$



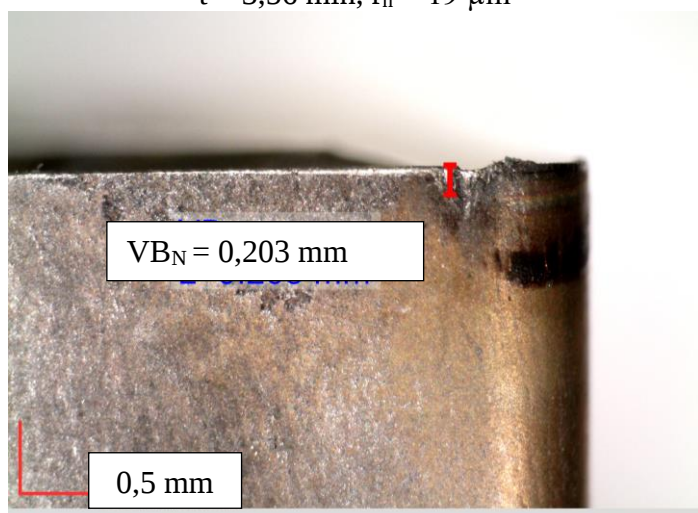
$t = 0 \text{ min}, r_n = 37 \text{ μm}$



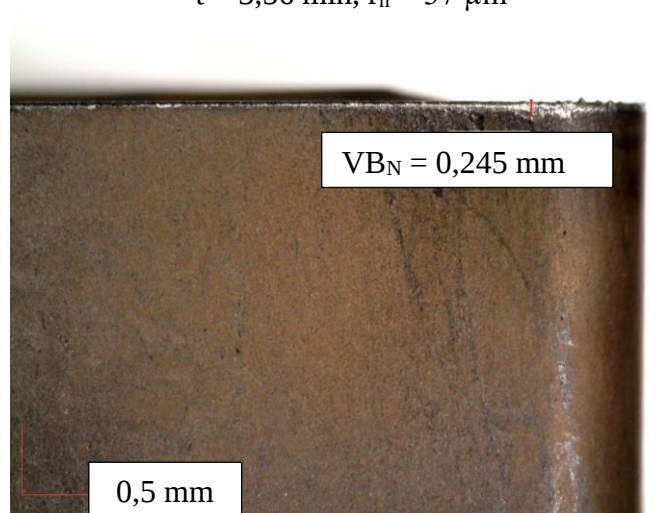
$t = 3,56 \text{ min}, r_n = 19 \text{ μm}$



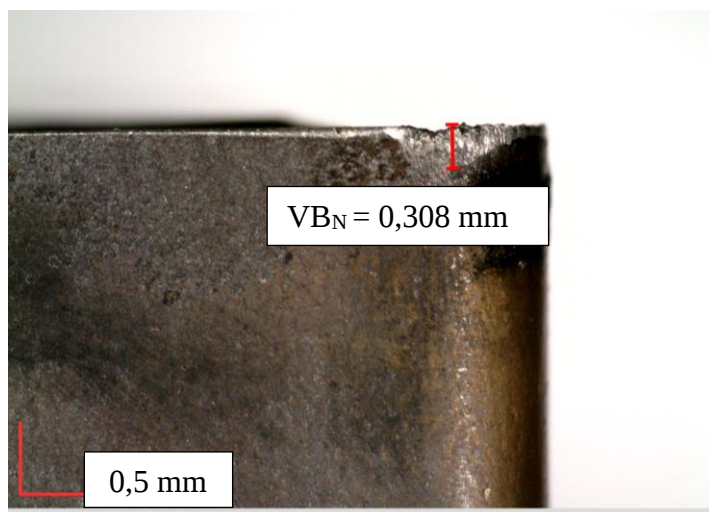
$t = 3,56 \text{ min}, r_n = 37 \text{ μm}$



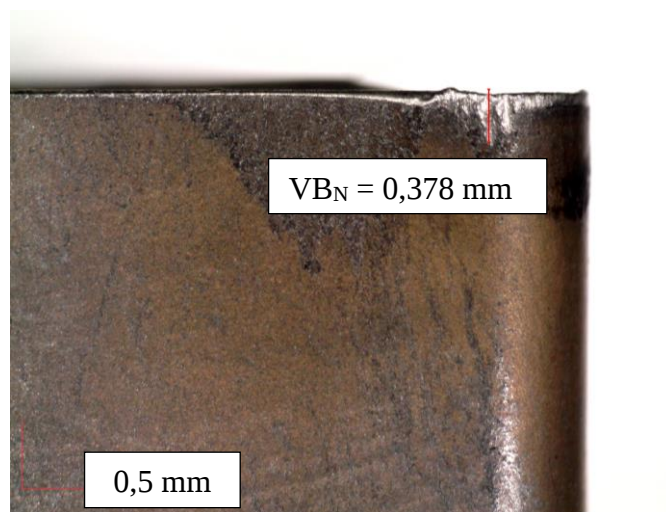
$t = 10,99 \text{ min}, r_n = 19 \text{ μm}$



$t = 10,99 \text{ min}, r_n = 37 \text{ μm}$



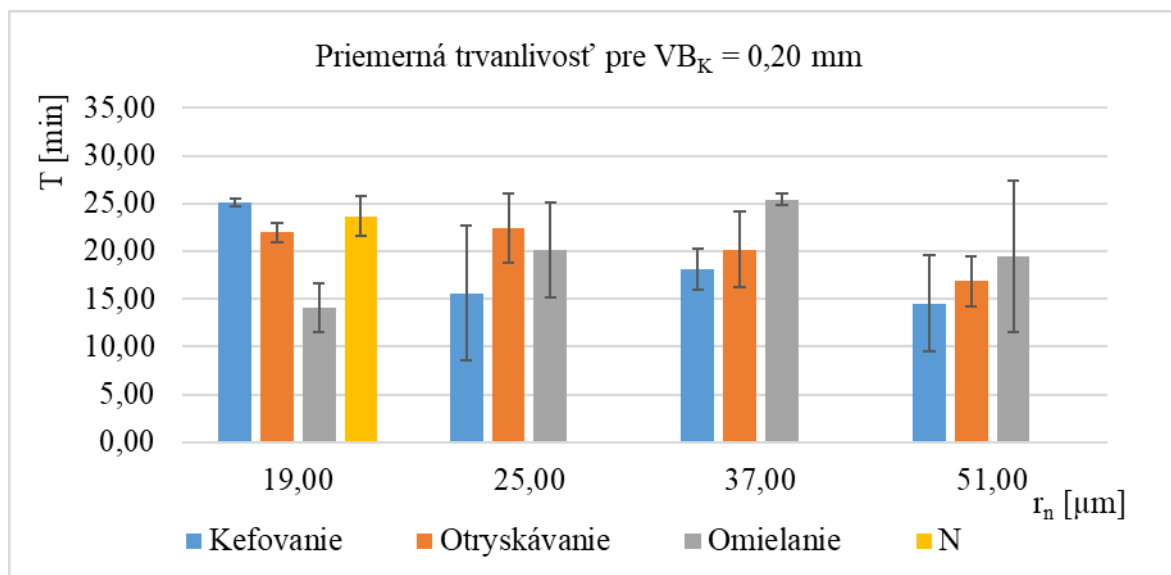
$t = 9,42 \text{ min}$, $r_n = 19 \text{ }\mu\text{m}$



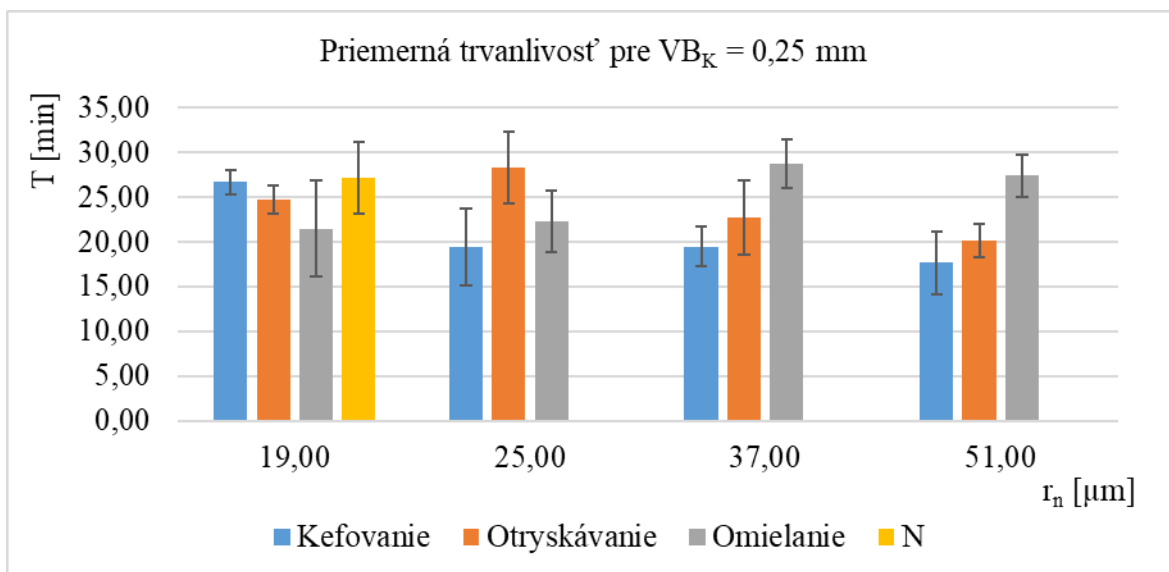
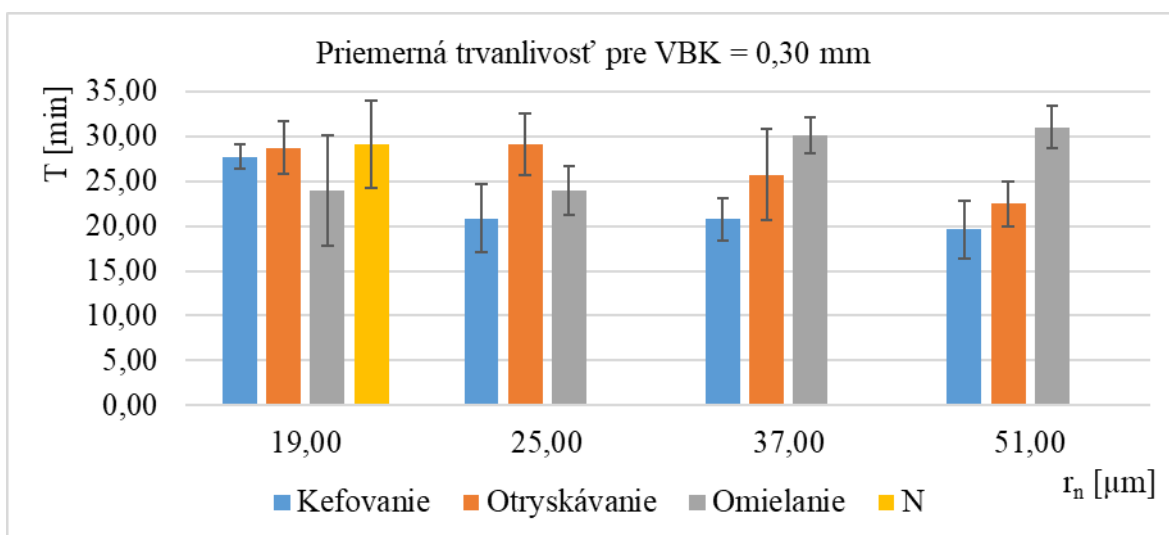
$t = 32,67 \text{ min}$, $r_n = 37 \text{ }\mu\text{m}$

Obr. 12: Vývoj opotrebovania v čase pre omieľané vymeniteľné rezné platničky

Po nameraní vývojov opotrebovania a získaní trvanlivostí pre všetky polomery zaoblenia reznej hrany pri všetkých metódach rektifikácie sa vytvoril graf priemernej trvanlivosti, ktorý porovnáva nie len polomery zaoblenia reznej hrany v rámci jednej metódy rektifikácie, ale aj použité metódy medzi sebou v rámci zvoleného kritéria otupenia VB_K . Grafy sú na Obr. 13 až 15.



Obr. 13: Priemerná trvanlivosť pre sledované metódy rektifikácie pre kritérium otupenia $VB_K = 0,20 \text{ mm}$

Obr. 14: Priemerná trvanlivosť pre sledované metódy rektifikácie pre kritérium otupenia $VB_K = 0,25$ mmObr. 15: Priemerná trvanlivosť pre sledované metódy rektifikácie pre kritérium otupenia $VB_K = 0,30$ mm

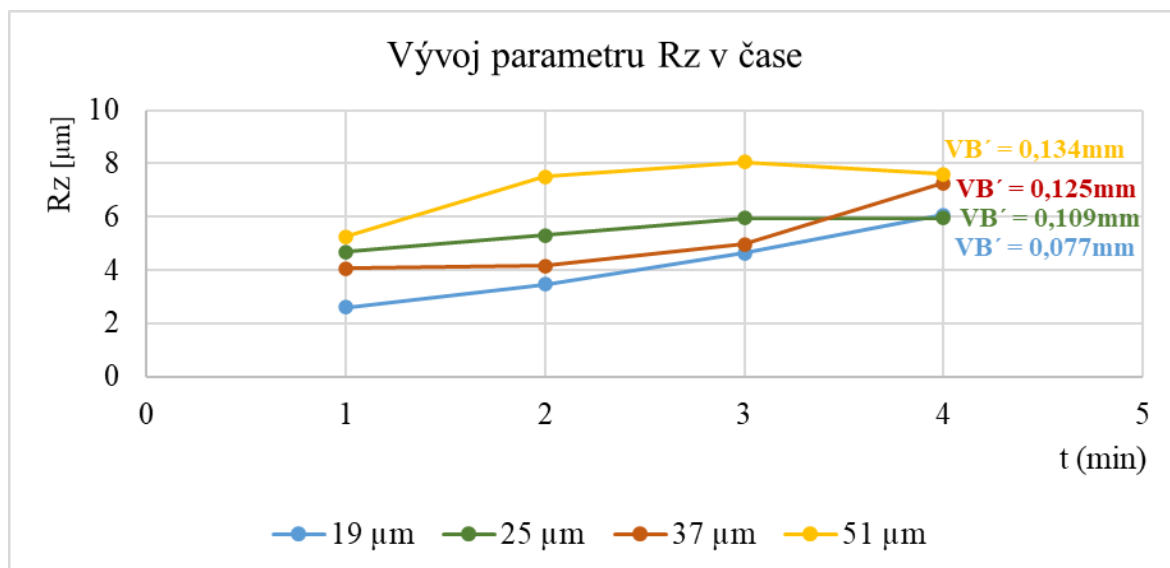
Pri kefovaní dosiahol najvyššiu trvanlivosť polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 19$ μm , ktorá bola od 25 do 28 minút v závislosti od zvoleného kritéria opotrebovania. Pri mokrom tryskaní dosiahol najvyššiu trvanlivosť polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 25$ μm . Hodnoty priemernej trvanlivosti boli od 22 do 29 minút podľa zvoleného VB_K . Pri omieľaní sa dá pozorovať dôvod výberu viacerých kritérií otupenia. Pre $VB_K = 0,20$ mm a $VB_K = 0,25$ mm, dosiahol najvyššiu trvanlivosť polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 37$ μm , ktorá bola od 25 do 29 minút. Pre kritérium otupenia $VB_K = 0,30$ mm, dosiahol polomer $r_n = 51$ μm o približne 1 minútu väčšiu trvanlivosť v porovnaní s polomerom $r_n = 37$ μm .

Pri porovnaní metód medzi sebou už výsledky nie sú také jednoznačné. V závislosti od zvoleného kritéria otupenia a polomeru zaoblenia reznej hrany, dosiahli rôzne

metódy najvyššiu trvanlivosť. Pre polomer $r_n = 19 \mu\text{m}$ pri $VB_K = 0,20 \text{ mm}$, dosiahli najvyššiu trvanlivosť, približne 25 minút, nástroje rektifikované kefovaním, no pre $VB_K = 0,25 \text{ mm}$ ako aj $VB_K = 0,30 \text{ mm}$, bola najvyššia trvanlivosť od 27 do 29 minút dosiahnutá platničkami rektifikovanými nešpecifikovanou metódou. Pre polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 25 \mu\text{m}$, bola najvyššia hodnota trvanlivosti, od 22 do 29 minút, dosiahnutá reznými nástrojmi upravenými mokrým tryskaním. V prípade polomeru $r_n = 37 \mu\text{m}$, dosiahli najvyššiu trvanlivosť omieľané nástroje, od 29 do 30 minút. Tento polomer dosiahol celkovo najvyššie hodnoty trvanlivosti v porovnaní s ostatnými r_n upravenými zvyšnými metódami rektifikácie pri kritériách otupenia $VB_K = 0,20 \text{ mm}$ a $VB_K = 0,25 \text{ mm}$. Omieľanie tiež dosiahlo najvyššie hodnoty trvanlivosti pre $r_n = 51 \mu\text{m}$. Tento polomer zaoblenia reznej hrany dosiahol celkovo najvyššiu trvanlivosť, okolo 31 minút, z pomedzi všetkých r_n a metód rektifikácie pri kritérií otupenia $VB_K = 0,30 \text{ mm}$.

4.3 Drsnosť obrobeného povrchu a rezné sily pri dokončovaní

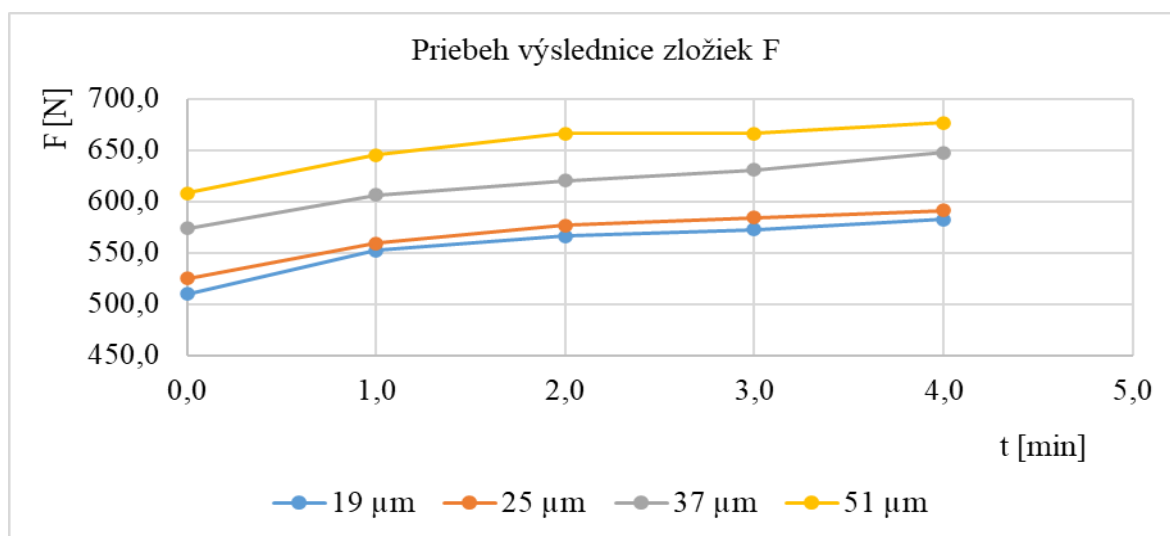
Vývoj parametrov drsnosti obrobeného povrchu a rezných síl sa sledoval len pri obrábaní omieľanými platničkami, pretože sa nepredpokladá, že by zmena metódy rektifikácie značne ovplyvnila ich vývoj. Ako už bolo spomenuté, merali sa počas prvých 4 minút obrábania, pretože sa opotrebovanie na nástrojoch ešte vyvíjalo kontrolovateľne a bolo teda možné získať aj výsledky pre tieto pozorované parametre. Navyše reálne odzrkadľujú nasadenie nástroja pri dokončovaní povrchu s cieľom dosiahnutia akceptovateľnej drsnosti povrchu (so zväčšujúcim časom obrábania by stúpalo aj opotrebovanie nástroja a s tým späť drsnosť povrchu, čo by už robilo nástroj nevhodným pre dokončovaciu stratégiu). Graf na Obr. 16 ukazuje vývoj parametru R_z v čase. Podobne sa vyhodnocoval aj parameter R_a . Tiež je v grafe zapísaná hodnota šírky plošky opotrebovania na vedľajšej chrbtovej ploche VB' danej reznej platničky na konci štvrtej minúty obrábania. Ako je z grafov parametrov drsnosti vidieť, tak už po prvej minúte obrábania je možné sledovať vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n . So zvyšujúcim sa r_n stúpa drsnosť obrobeného povrchu, čo môže mať súvis s niekoľkými aspektami počas obrábania. Veľa vedeckých publikácií, ktoré sa zaoberajú opotrebovaním nástroja a integritou obrobeného povrchu, dokumentovali, že zhoršenie obrobeného povrchu so zvýšeným opotrebovaním chrbta sa očakáva, pretože trenie medzi chrbtom nástroja a obrobeným povrchom je väčšie (Bhushan, 2022, Magalhães et al. 2022).



Obr. 16: Vývoj najväčšej výšky drsnosti hodnoteného profilu Rz v čase

Predpokladáme, že jedna z hlavných príčin dosiahnutej drsnosti povrchu vzhľadom na veľkosť polomeru zaoblenia reznej hrany súvisí s vývojom opotrebovania na vedľajšej reznej hrane. Z grafu je možné sledovať vplyv opotrebovania reznej platničky, keďže vedľajšia chrbtová plocha je v priamom kontakte s povrchom obrábaného materiálu, tak sa do neho okrem profilu reznej hrany kopíruje aj opotrebovanie, ktoré vzniká na vedľajšej chrbtovej ploche, čo má za následok, že pri väčšom opotrebovaní stúpajú aj parametre drsnosti obrobeného povrchu.

Graf na Obr. 17 zobrazuje vývoj výslednice rezných síl v čase. Z grafu je možné vidieť, že s väčším polomerom zaoblenia reznej hrany r_n stúpajú aj zložky reznej sily a rovnako aj ich výslednica, čo koreluje aj s inými publikáciami (Wyen, Wegener 2010, Meijer et al. 2024).

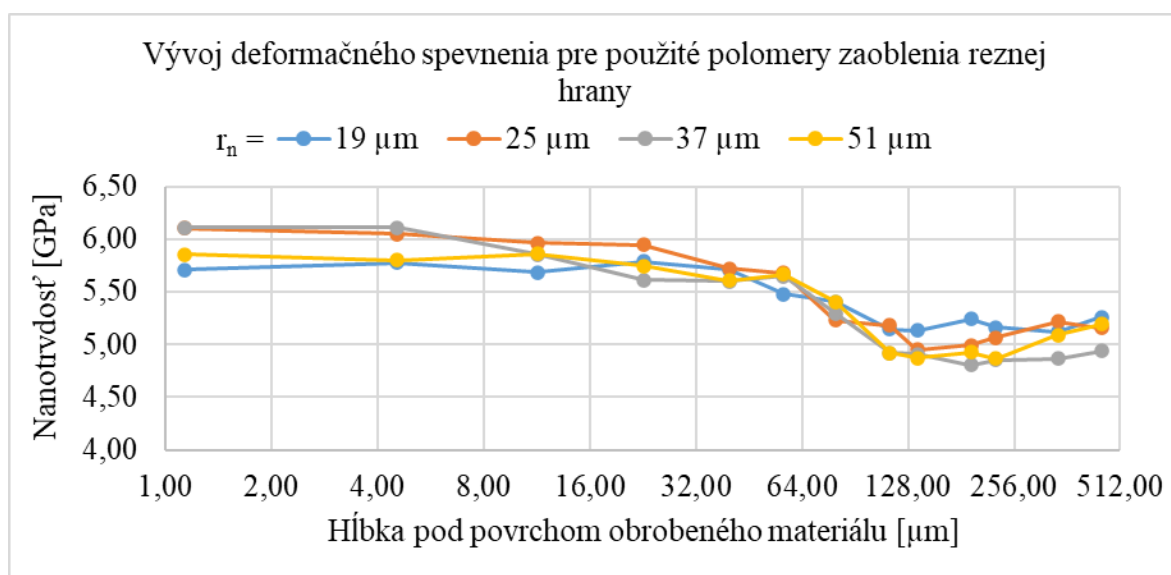


Obr. 17: Priebeh výslednice zložiek rezných síl v čase

Dôvod, prečo rezné sily stúpajú so zväčšujúcim sa polomerom zaoblenia je ten, že sa zväčšuje veľkostný pomer medzi polomerom zaoblenia reznej hrany r_n a hrúbkou odrezávanej vrstvy h . Výsledkom tohto sa zvyšuje energia, ktorá je potrebná na odstránenie materiálu polotovaru, čo má za následok, že sila, ktorá je potrebná na tvárnenie materiálu, je vyššia ako rezná sila, čo je pojednávané v kapitole 4.5 diskusia dosiahnutých výsledkov.

4.4 Výsledky deformačného spevnenia

Výsledky nameraných hodnôt mikrotvrdosti v rôznych hĺbkach pod obrobeným povrchom sú v grafe na Obr. 18. Ako je možné z grafu vidieť, rozdiely nameraných hodnôt nanotvrdosti nie sú medzi rôznymi polomerami zaoblenia reznej hrany významné. Ako je možné vidieť, tak od určitej hĺbky, konkrétne 136 μm , pod povrchom obrobeného materiálu sa vracajú k hodnotám nanotvrdosti deformačne nespevneného materiálu, okolo 5 GPa. Zaujímavosťou však je, že hodnoty deformačného spevnenia na vzorkách, ktoré boli obrábané menšími polomerami zaoblenia reznej hrany, začínajú výrazne klesať o niečo skôr. Pre polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 19 \mu\text{m}$ je to od 23 μm a pre polomer $r_n = 25 \mu\text{m}$ je to od 39 μm pod povrchom obrobeného materiálu. Pre polomery zaoblenia reznej hrany $r_n = 37 \mu\text{m}$ a $r_n = 51 \mu\text{m}$ je výrazné klesanie zaznamenané až od hĺbky 57 μm . Z toho je možné konštatovať, že menšie polomery zaoblenia reznej hrany ovplyvňujú materiál náchylný na deformačné spevnenie menej, čo je diskutované v kapitole 4.5 diskusia dosiahnutých výsledkov.



Obr. 18: Vývoj deformačného spevnenia v závislosti od hĺbky pod povrchom obrobeného materiálu

4.5 Diskusia dosiahnutých výsledkov

Veľkosť polomeru zaoblenia reznej hrany má vplyv na trvanlivosť rezného nástroja, ako je vidieť z dosiahnutých výsledkov. Pri experimentoch boli použité 4 polomery zaoblenia reznej hrany, ktoré boli upravené 4 rôznymi metódami rektifikácie a celkovo bolo použitých 76 vymeniteľných rezných platničiek, 24 pre každú použitú metódu rektifikácie a 6 pre metódu označenú ako N, keďže nebola výrobcom nástrojov bližšie špecifikovaná z dôvodu jej vývoja. Z výsledkov vývoja opotrebovania pri hrubovaní je vidieť, že nie len veľkosť polomeru zaoblenia reznej hrany, ale aj použitá metóda rektifikácie má vplyv na trvanlivosť vymeniteľných rezných platničiek. Zvýšenie trvanlivosti rezných platničiek pri väčšom polomere zaoblenia reznej hrany sa dá vysvetliť tým, že rezná hrana s polomerom zaoblenia $r_n = 19 \mu\text{m}$ nie je tak pevná ako pri väčších polomeroch zaoblenia reznej hrany. Z toho dôvodu je rezná hrana s polomerom zaoblenia $r_n = 19 \mu\text{m}$ náchylnejšia na zlomenie nástroja a zlyhanie. Na druhej strane použitie príliš veľkého polomeru zaoblenia reznej hrany vedie k vyššiemu treniu a tepelnému zaťaženiu reznej hrany v dôsledku väčšej kontaktnej plochy rezného nástroja s obrobkom, čo má za následok zníženie trvanlivosti, čo je možné sledovať pri mokrom tryskaní (Basset et al. 2012, Enders, Kountanya 2002). Je treba dodať, že pri podmienkach pre hrubovaciu stratégiu sústruženia nebolo možné dosiahnuť kontrolovaný vývoj opotrebovania a preto nie je možné tieto výsledky považovať za jednoznačné a spoľahlivé. Z tohto dôvodu neodporúčame použiť zvolené rezné podmienky pri hrubovacej operácii sústruženia, pokiaľ chceme dosiahnuť hospodárne obrábanie.

Z pohľadu rezných podmienok pre dokončovaciu operáciu sústruženia je možné tiež pozorovať vplyv rektifikácie reznej hrany na trvanlivosť rezných nástrojov ako aj vplyv na drsnosť obrobeného povrchu a rezné sily. Z pohľadu každej metódy rektifikácie zvlášť dosiahol vždy iný polomer zaoblenia reznej hrany inú najvyššiu priemernú trvanlivosť. V prípade kefovania, bola trvanlivosť najvyššia pri $r_n = 19 \mu\text{m}$, pri každom zvolenom kritériu otupenia VB_K . Hodnoty trvanlivosti pri nástroji s týmto r_n boli 25,1 minút pre $VB_K = 0,20$, 26,7 minút pre $VB_K = 0,25$ a 27,7 minút pre $VB_K = 0,30$, čo je zvýšenie od 60,5% po 33% v porovnaní s $r_n = 25 \mu\text{m}$, v porovnaní s polomerom zaoblenia reznej hrany $r_n = 37 \mu\text{m}$ ide o zvýšenie od 38,1% po 33,6% a o zvýšenie od 72,9% po 41,4% v porovnaní s $r_n = 51 \mu\text{m}$. Najväčšie zvýšenie bolo pozorovať pri $VB_K = 0,20 \text{ mm}$ a so zvyšujúcim sa kritériom otupenia rozdiel v trvanlivostiach klesal.

Pri mokrom tryskaní bol najväčší rozdiel v trvanlivostiach vidieť pri $VB_K = 0,25$ mm, kde polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 25 \mu\text{m}$ dosiahol priemernú trvanlivosť približne 28,4 minúty, čo bolo zvýšenie o 14,6% v porovnaní s $r_n = 19 \mu\text{m}$, o 24,4% v porovnaní s polomerom $r_n = 37 \mu\text{m}$ a v porovnaní s $r_n = 51 \mu\text{m}$, bola jeho trvanlivosť vyššia o 40,8%.

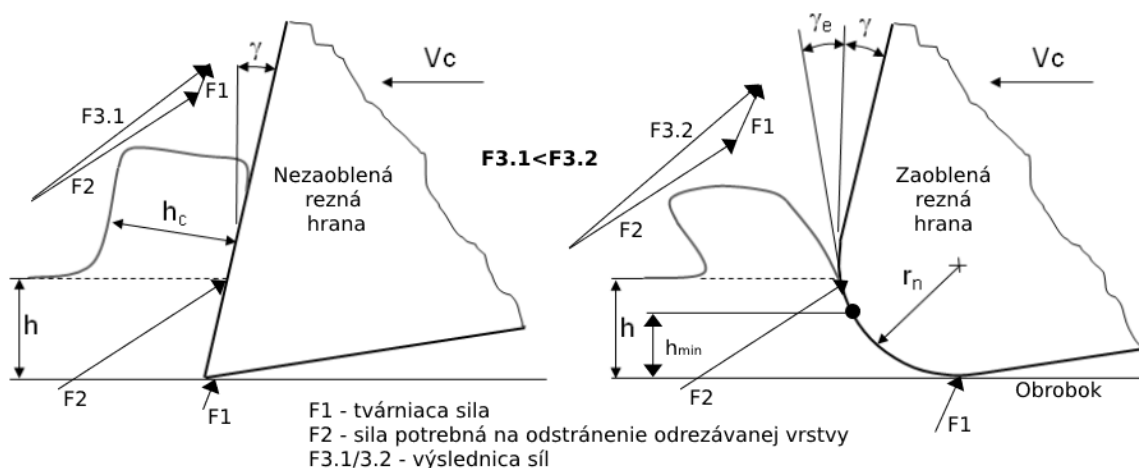
V prípade omieľania je zaujímavé, že aj keď polomer zaoblenia reznej hrany $r_n = 37 \mu\text{m}$, dosiahol najvyššiu trvanlivosť pri $VB_K = 0,20$ mm a $VB_K = 0,25$ mm, ktorej hodnoty boli 25,4 minút a 28,8 minút, tak v prípade najvyššieho zvoleného kritéria otupenia mal najvyššiu trvanlivosť polomer $r_n = 51 \mu\text{m}$, ktorá bola 31 minút. Išlo o zvýšenie o približne 29% v porovnaní s $r_n = 19 \mu\text{m}$ a $r_n = 25 \mu\text{m}$ a zvýšenie o 3,1% v porovnaní s polomerom zaoblenia reznej hrany $r_n = 37 \mu\text{m}$. V tomto prípade je vidieť, že nie je vhodné sústrediť sa len na jedno kritérium otupenia v prípade ťažkoobrobiteľných materiálov, keďže krivky opotrebenia nemajú očakávaný vývoj, kde je možné sledovať zábeh, normálové opotrebenie a zrýchlené opotrebovanie až lom. To môže mať za následok nižšiu trvanlivosť pri výbere “nesprávneho” nástroja.

Z pohľadu porovnania použitých metód rektifikácie, závisí od použitého polomeru zaoblenia reznej hrany. V prípade menších r_n , sa ako vhodné metódy javia mokré tryskanie alebo nešpecifikovaná metóda, pretože tie dosiahli najvyššie trvanlivosti pri polomeroch $r_n = 19 \mu\text{m}$ a $r_n = 25 \mu\text{m}$. V prípade polomerov $r_n = 37 \mu\text{m}$ a $r_n = 51 \mu\text{m}$ je dominujúce omieľanie, kde trvanlivosti dosahovali od 28 do 31 minút v závislosti od zvoleného kritéria otupenia. Jedným z dôvodov, prečo pre rôzne polomery zaoblenia reznej hrany sú vhodné rôzne metódy rektifikácie môže byť ten, že dané metódy vždy iným spôsobom upravujú reznú hranu a preto nemusí byť vždy rezná hrana upravená rovnomerne, sú do nej vnesené napätia, čo môže viesť k rýchlejšiemu opotrebovaniu reznej hrany a teda aj k nižšej trvanlivosti rezných nástrojov. Pri rezných podmienkach pre dokončovaciu operáciu sústruženia bolo o niečo jednoduchšie dosiahnuť kontrolované opotrebovanie reznej hrany, čo malo za následok aj zvýšenie trvanlivosti rezných nástrojov. Z tohto dôvodu odporúčame zvoliť tieto rezné podmienky za akési univerzálne pre obrábanie ťažkoobrobiteľnej niklovej zliatiny (Denkena, Biermann 2014).

Parametre drsnosti obrobeného povrchu R_a a R_z boli merané počas prvých 4 minút obrábania. Ako je možné vidieť z grafov parametrov drsnosti obrobeného povrchu, zaoblenie reznej hrany má vplyv na ich vývoj. Toto je možné vidieť už po prvej minúte obrábania, kedy sú ich hodnoty menšie pri menších polomeroch zaoblenia reznej hrany. Tiež je možné vidieť, že so zvyšujúcim sa opotrebovaním rezných platničiek sa zvyšujú aj

hodnoty parametrov drsnosti obrobeného povrchu. To je spôsobené tým, že v priamom kontakte s obrobenou plochou je vedľajšia rezná hrana, ktorej opotrebovanie sa kopíruje do povrchu obrobeného materiálu spolu s hrotom nástroja, čo má za následok vyššie hodnoty parametrov drsnosti pri väčšom opotrebovaní rezných nástrojov. V prípade dokončovacej operácie sústruženia Inconelu 718, teda platí aj tvrdenie z článku (Denkena, Biermann 2014), kde boli dosiahnuté podobné výsledky.

Z výsledkov merania rezných síl možno konštatovať, že čím je menší polomer zaoblenia reznej hrany, tým sú aj menšie rezné sily pri obrábaní a tiež výslednica síl potrebná na odstránenie materiálu, ktorá sa skladá zo sily potrebnej na odstránenie materiálu z odrezávanej vrstvy a tvárniacej sily. Tvárniaca sila vzniká tak, že časť materiálu sa dostáva pod nástroj, stlačí sa a neodchádza vo forme triesky z miesta rezu. Táto sila je výsledkom zvyšujúcej sa energie potrebnej na odstránenie materiálu z polotovaru, kvôli zvyšujúcemu sa polomeru zaoblenia reznej hrany a tým zväčšujúcemu sa pomeru medzi polomerom zaoblenia reznej hrany a hrúbkou odrezávanej vrstvy materiálu, čím sa tiež posúva bod separácie materiálu obrobku. Tento pomer je známy ako veľkostný efekt. Schéma veľkostného efektu ako aj tvárniacej sily je na Obr. 19 (Rodriguez, 2009).



Obr. 19: Tvárniaca sila a veľkostný efekt (Rodriguez, 2009)

Po spracovaní výsledkov je možné povedať, že za najvhodnejší polomer zaoblenia reznej hrany je možné považovať $r_n = 19 \mu\text{m}$. Bola pri ňom nameraná najvyššia trvanlivosť pre všetky metódy okrem omieľania. Z experimentálnych meraní pre drsnosť obrobeného povrchu a rezné sily ako aj z teórie obrábania vyplýva, že čím je menší polomer zaoblenia reznej hrany, tým je celý proces stabilnejší, nástroj je menšou plochou v kontakte s obrábaným materiálom, čím je do procesu vneseného menej trenia a tým aj tepla a aj

parametre drsnosti obrobeného povrchu sú lepšie. Toto tvrdenie podporujú aj výsledky z deformačného spevnenia, kedy pri najmenšom použitom polomere zaoblenia reznej hrany boli namerané aj najmenšie hodnoty nanotvrdosti. S deformačným spevnením súvisí aj oblasť stagnácie rezného procesu. Materiál obrobku je tlačенý k reznému nástroju a musí sa pohybovať buď k ploche čela alebo chrbta nástroja. Keďže na začiatku procesu nie je možné povedať, kam sa materiál bude pohybovať, začína sa tvoriť oblasť stagnácie. Táto oblasť môže mať rôznu veľkosť a stabilitu v dôsledku príľnavosti materiálu obrobku k reznému nástroju a v dôsledku stupňa deformačného spevnenia obrábaného materiálu. V strede tejto oblasti vzniká bod separácie. Šmykové napätie v tejto zóne sa mení v súlade so smerom toku materiálu obrobku (Rodriguez 2009, De Vos, 2014).

Pre materiály náchylné na väčšie deformačné spevnenie, ako sú austenitické nehrdzavejúce ocele alebo superzliatiny, dochádza k zvýšeniu tvrdosti obrábaného materiálu. Prirodzeným dôsledkom tejto vlastnosti je zvýšený výskyt vrubového opotrebovania na chrbtovej ploche, ktoré je vidieť na Obr. 20, a tiež vylamovanie reznej hrany. To sa dá kompenzovať správnou mikrogeometriou reznej hrany, pretože ostrejšie hrany znižujú deformačné spevnenie počas procesu obrábania, čo je vidieť aj z nameraných výsledkov (De Vos, 2014).



Obr. 20: Vývoj šírky plošky opotrebovania VB_N

Zároveň je potrebné poznamenať, že aspoň malá úprava reznej hrany je potrebná, nakoľko úplne ostrý rezný nástroj by bol viac náchylný na zlomenie a zlyhanie a tiež by bola zhoršená príľnavosť povlaku k rezným nástrojom (Wang et. al. 2020).

5 PRÍNOS PRE VEDU, PRAX A PEDAGOGIKU

Okrem problematiky obrábania ťažkoobrobiteľných materiálov práca približuje aj teóriu rektifikácie rezných nástrojov, opisuje metódy používané v priemysle a dôvody pre jej aplikáciu. Preto sú v tejto kapitole zhrnuté prínosy dizertačnej práce pre vedeckú oblasť, prax a pedagogický proces.

5.2 Prínos pre vedu

Na základe analýzy súčasného stavu v tejto oblasti možno konštatovať, že nie je známa publikácia, ktorá by takto podrobne spracovala výsledky pre sústružnícke operácie, sústružnícke rezné nástroje a rôzne metódy rektifikácie. Preto hlavným prínosom pre vedu je publikovanie týchto výsledkov a nových zistení v dizertačnej práci ako celku.

Navyše je vytvorený základ pre pokračovanie výskumu rektifikácie rezných hrán pre použitie nástrojov iných materiálových skupín. Taktiež výsledky dizertačnej práce sú použité ako súčasť výsledkov riešenia projektov APVV-21-0071 a VEGA 1/0266/23.

5.3 Prínos pre prax

Dizertačná práca bola vypracovaná v spolupráci s výrobcom nástrojov Dormer Pramet, pre ktorého hlavnými prínosmi sú:

- zistenie vplyvu metód rektifikácie na trvanlivosť rezných nástrojov pri sústružení ťažkoobrobiteľného materiálu,
- zistenie vplyvu polomeru zaoblenia reznej hrany na trvanlivosť rezných nástrojov pri sústružení ťažkoobrobiteľného materiálu,
- stanovenie voľby rezných parametrov pre sústruženie niklovej zliatiny Inconel 718,
- čo sa týka rezných podmienok pre hrubovací stratégiu, tieto neodporúčame použiť, nakoľko nebolo možné dosiahnuť kontrolovaný vývoj opotrebovania. Odporúčame použitie iných typov tvarovačov triesky (bližšie k reznej hrane), čím by bolo možné použiť nižší posuv, hĺbku rezu a vyššiu reznú rýchlosť, čo by mohlo viesť k vyššej trvanlivosti nástrojov pri hrubovacej stratégii sústruženia. Nutné je ešte verifikovanie tohto zistenia.

Tieto odporúčania budú prezentované za účelom prispôsobenie výroby rezných nástrojov vo firme Dormer Pramet.

5.4 Prínos pre pedagogiku

Práca bola vypracovaná na Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, a preto výsledky dizertačnej práce môžu byť použité pre:

- predmet Teória obrábania so zameraním na vplyv veľkosti polomerov zaoblenia reznej hrany na trvanlivosť, drsnosť obrobeného povrchu, rezné sily a deformačné spevnenie pri sústružení daného materiálu,
- vplyv rektifikačnej metódy na trvanlivosť rezných nástrojov, doplnenie výsledkov pre iné materiálové skupiny v iných dizertačných prácach.

ZÁVER

Udržanie obrábania ako konkurencieschopnej metódy pre výrobu súčiastok tlačí na výrobcov rezných nástrojov inovovať používané rezné nástroje a vyrábať nové, ktoré budú mať stále vyššiu trvanlivosť. Jedným z dôvodov týchto inovácií na zvýšenie trvanlivosti je stále častejšie využívanie ťažkoobrobiteľných materiálov v rôznych odvetviach priemyslu. Práve obrábanie tohto druhu materiálov vedie k rýchlemu opotrebovaniu rezných nástrojov, čo má za následok zníženú trvanlivosť a rýchlejšie zlyhanie rezných nástrojov. Práca v prvej časti približuje mikrogeometriu reznej hrany a proces rektifikácie. Tiež opisuje metódy rektifikácie, použité pri experimentoch a aj dôvody, prečo je rektifikácia dôležitá pri zvyšovaní trvanlivosti rezných nástrojov a príľnavosti povlakov k rezným hranám nástrojov.

Druhá časť práce stanovuje hlavný a čiastkové ciele práce. Čiastkovými cieľmi bolo zistiť vplyv polomeru zaoblenia r_n na trvanlivosť rezných nástrojov, drsnosť obrobeného povrchu, rezné sily a deformačné spevnenie, ako aj porovnanie metód rektifikácie a ich vplyvu na trvanlivosť rezných nástrojov. Tieto ciele mali za úlohu priniesť detailný rozbor a lepšie pochopenie procesu sústruženia ťažkoobrobiteľnej niklovej zliatiny Inconel 718. Ich splnením bolo podmienené splnenie hlavného cieľa, ktorým bolo zvýšenie trvanlivosti rezných platničiek vhodnou úpravou rezných hrán.

V tretej časti práce sú opísané nástroje a materiál, ktoré boli použité pri experimentoch. Opisuje tiež metódy rektifikácie, ktoré boli použité pri experimentoch, a to kefovanie, mokré tryskanie, omieľanie a nešpecifikovanú metódu N ako aj polomery zaoblenia reznej hrany, ktoré boli týmito metódami vytvorené. Sú v nej definované rezné parametre pre hrubovaciu a dokončovaciu stratégiu sústruženia použité v experimentoch. Charakterizuje, ako boli dané parametre drsnosti, rezných síl, opotrebovania a deformačného spevnenia merané. Merania opotrebovania sa vykonávali v časových intervaloch po dobu približne 33 minút (v závislosti od kritéria otupenia) a namerané hodnoty boli vyhodnotené pomocou grafov. Parametre drsnosti obrobeného povrchu a zložky reznej sily boli pre dokončovaciu stratégiu merané počas prvých 4 minút obrábania, pretože sa opotrebovanie vyvíjalo kontrolovateľne a bolo možné namerať hodnoty týchto parametrov. Viacosové sústružnícke centrum s protivretenom CTX alpha 500 slúžilo na vykonanie experimentov a miesto experimentov bolo v Centre excelentnosti 5osového obrábania na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave.

Dosiahnuté výsledky sú v štvrtej časti práce. Táto časť nie len vyhodnocuje získané výsledky ale tiež porovnáva skúmané metódy a jednotlivé r_n medzi sebou a nachádza sa tu aj diskusia k dosiahnutým výsledkom. Je možné tvrdiť, že všetky čiastkové ciele boli splnené, na koľko bol pozorovaný vplyv polomeru zaoblenia reznej hrany r_n trvanlivosť rezných nástrojov ako aj vplyv r_n na drsnosť obrobeného povrchu, rezné sily a deformačné spevnenie. Tiež bol pozorovaný vplyv rôznych metód rektifikácie rezných nástrojov. Tým sa podarilo splniť aj hlavný cieľ, ktorým bolo zvýšiť trvanlivosť rezných platničiek vhodnou úpravou geometrie pri rezných parametroch pre dokončovaciu stratégiu sústruženia ťažkoobrobiteľnej zliatiny Inconel 718. Pre hrubovaciu stratégiu sa nepodarilo splniť tento cieľ úplne nakoľko nebolo možné dosiahnuť kontrolovaný vývoj opotrebovania pri daných parametroch. Zaujímavým poznatkom preto je, že voľba rezných parametrov musí byť prispôsobená detailne pre špecifickú operáciu obrábania. Z tohto dôvodu vyplýva, že pri hrubovacích podmienkach nie je možné zaručiť kontrolovaný vývoj opotrebovania hoci rozdiel hodnôt rezných parametrov medzi hrubovacími a dokončovacími podmienkami nie je veľký.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- BASSETT, E., KÖHLER, J., DENKENA, B. 2012. *On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Vol. 5, vydanie 2, str. 108-126. ISSN 17555817. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.004>
- BHUSHAN, R. K. 2022. *Effect of tool wear on surface roughness in machining of AA7075/ 10 wt.% SiC composite*. Composites Part C: Open Access. Vol. 8. ISSN 26666820. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100254>
- BOUZAKIS, K. D., GERARDIS, S., SKORDARIS, G., KATIRTZOGLOU, G., MAKRIMALLAKIS, S., KLOCKE, F., BOUZAKIS, E. 2009. *Effect of dry micro-blasting on PVD-film properties, cutting edge geometry and tool life in milling*. Surface and Coatings Technology. Vol. 204, vydanie 6-7, str. 1081-1086. ISSN 02578972. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.07.018>
- DENKENA, B., de LEON, L., BASSETT, E., REHE, M. 2010. *Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing*. Key Engineering Materials. Vol. 438, str. 1-7. ISSN 16629795. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.438.1>
- DENKENA, B., LUCAS, A., BASSETT, E. 2011. *Effect of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load*. CIRP Anals, Vol. 60, issue 1, str. 73-76. ISSN 0007-8506. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.098>
- DENKENA, B., BIERMANN, D. 2014. *Cutting Edge Geometries*. CIRP Annals. Vol. 63, vydanie 2, str. 631-653. ISSN 0007-8506. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>
- DE VOS, P., STAHL, J.E. 2014 *Metal Cutting: Theories in Practice*. Seco Tools AB. ISSN 02987916.
- DINIZ, A. E., de OLIVEIRA, A. J. 2008. *Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 195, vydanie 1-3, str. 275-281. ISSN 09240136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.022>
- ENDERS, W. J., KOUNTANYA, R. K. 2002. *The Effects of Corner Radius and Edge Radius on Tool Flank Wear*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 4, vydanie 2, str. 89-86. ISSN 1526-6125
- FANG, N., Wu, Q. 2005. *The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys*. International Journal of Machine Tools and

- Manufacture. Vol. 45, vydanie 10, str. 1178-1187. ISSN 08906955.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.12.003>
- GRZESIK, W. 2017. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials (Second)*. Theory, Modeling, and Applications. Elsevier. ISBN 9780444637116.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63711-6.00002-8>
- KLOCKE, F. 2011. *Wear. Manufacturing Processes 1*. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 9783642119798. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>
- MAGALHÃES, L. C., CARLESSO, G. C., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., SOUZA, M. T., DE OLIVEIRA PALHETA, F., BINDER, C. 2022. *Tool Wear Effect on Surface Integrity in AISI 1045 Steel Dry Turning*. Materials. Vol. 15, vydanie 6, str. 2031. ISSN 19961944.
<https://doi.org/10.3390/ma15062031>
- MALKORRA, I., SOULI, H., CLAUDIN, C., SALVATORE, F., ARRAZOLA, P. RECH, J., SEUX, H., MATHIS, A., ROLET, J. 2021. *Identification of interaction mechanisms during drag finishing by means of an original macroscopic numerical model*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 168, časť A. ISSN 08906955.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103779>
- MEIJER, A. L., LOPES DIAS, N. F., TILLMANN, W., BIERMANN, D. 2024. *Preparation of asymmetrical cutting edge geometries on micro end mills using pressurized wet abrasive jet machining for hard micromachining of AISI M3:2*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Vol. 51, str. 252-262. ISSN 17555817.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.05.005>
- PETERKA, J., VOZÁR, M., VOPÁT, T., POKORNÝ, P., PÄTOPRSTÝ, B. 2020. *Using multi-criteria analysis to evaluate the impact of drag-finishing technological parameters on the carbide tool radius*. Materials Today: Proceedings. Vol. 22, vydanie 2, str. 205-211. ISSN 22147853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.089>
- RODRÍGUEZ, C., J., C. 2009. *Cutting Edge Preparation of Precision Cutting Tools by Applying Micro-abrasive Jet Machining and Brushing*. Kassel University Press. ISBN 9783899587128
- SHATLA, M., KERK, C., ALTAN, T. 2001. *Process modeling in machining*. Part II: validation and applications of the determined flow stress data. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 41, časť 11, str. 1659-1680. ISSN 08906955.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00017-7)

- SHEIKH-AHMAD, J., DAVIM, J. P. 2012. 5 - *Tool wear in machining processes for composites*. Machining Technology for Composite Materials. In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing. Str. 116-153. ISBN 9780857090300. <https://doi.org/10.1533/9780857095145.1.116>
- TOENSHOFF, H. K., DENKENA, B. 2013. *Basics of Cutting and Abrasive Processes. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783642332579.
- UHLMANN, E., OBERSCHMIDT, D., LÖWENSTEIN, A., KUCHE, Y. 2016. *Influence of Cutting Edge Preparation on the Performance of Micro Milling Tools*. Procedia CIRP. Vol. 46, str. 214-217. ISSN 22128271. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.204>
- VASILKO, K. 2009. 3.1 *Nástroj ako geometrické teleso. Teória a prax Trieskového obrábania*. Technická univerzita v Košiciach. Prešov. ISBN 9788055301525.
- VENTURA, C. E. H., KÖHLER, J., DENKENA, B. 2015. *Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 19, str. 129-134. ISSN 15266125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.010>
- WANG, W., BIERMANN, D., AßMUTH, R., ARIF, A. F. M., VELDHUIS, S. C. 2020. *Effects on tool performance of cutting edge prepared by pressurized air wet abrasive jet machining (PAWAJM)*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 277. ISSN 09240136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116456>
- WYEN, C. F., WEGENER, K. 2010. *Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium*. CIRP Annals. Vol. 59, vydanie 1. str. 93-96. ISSN 00078506. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.056>
- ZHUANG, X., YU, T., WANG, W. 2017. *Cutting forces modeling for micro flat end milling by considering tool run-out and bottom edge cutting effect*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Vol. 233. ISBN 095440541772681. <https://doi.org/10.1177/0954405417726811>
- ZHOU, J. M., WALTER, H., ANDERSSON, M., STÅHL, J. E. 2003. *Effect of Chamfer angle on wear of PCBN cutting tool*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 43, vydanie 3, str. 301-305. ISSN 08906955. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00214-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00214-6)

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI**V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka**

V2_01 JURINA, František - STRAKA, Róbert - BURANSKÝ, Ivan. Influence the effect of balancing the grinding set on the accuracy and roughness of the machined surface. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2712, 32nd Joint Seminar Development of Materials Science in Research and Education (DMSRE32-2023) 04/09/2023 - 08/09/2023 Pavlov, Czechia (2024), s. 1-11. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2712/1/012016 ; SCOPUS: 2-s2.0-85186138282.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_02 STRAKA, Róbert - PETERKA, Jozef. Investigation of Machined Surface Roughness and Cutting Tool Wear from Prepared Tool Geometry. In *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering. KOD 2021 : 11th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, KOD 2021, Novi Sad, 10-12 June 2021*. 1. vyd. Cham : Springer, 2022, S. 279-287. ISSN 2211-0984. ISBN 978-3-030-88464-2. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-030-88465-9_25 ; SCOPUS: 2-s2.0-85125282784.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_03 STRAKA, Róbert - VOPÁT, Tomáš. Cutting edge preparation methods comparison in terms of tool life. In *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium : DAAAM International Symposium Intelligent Manufacturing and Automation, 27.-28.10.2022, Vienna, Austria*. 1. vyd. Viedeň : DAAAM International Vienna, 2022, S. 0188-0192. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-36-5. V databáze: DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.026 ; SCOPUS: 2-s2.0-85149439967.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_04 VOPÁT, Tomáš - STRAKA, Róbert - KURUC, Marcel - PETERKA, Jozef. The effect of cutting edge radius sizes on tool life in machining nickel alloy Inconel 718. In *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium : DAAAM International Symposium Intelligent Manufacturing and Automation, 27.-28.10.2022, Vienna, Austria*. 1.

vyd. Viedeň : DAAAM International Vienna, 2022, S. 0180-0187. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-36-5. V databáze: DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.025 ; SCOPUS: 2-s2.0-85149444659.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_05 VOPÁT, Tomáš - STRAKA, Róbert. Development of cutting force components in high-speed cutting on turning centre. In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2712, 32nd Joint Seminar Development of Materials Science in Research and Education (DMSRE32-2023) 04/09/2023 - 08/09/2023 Pavlov, Czechia (2024), s. 1-9. ISSN 1742-6588 (2022: 0.183 - SJR). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2712/1/012013 ; SCOPUS: 2-s2.0-85186144167.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

V3_01 PETERKA, Jozef - WALLYSON, Thomas de Silva - STRAKA, Róbert - VOPÁT, Tomáš - HRBÁL, Jakub - KRITIKOS, Michaela [Samardžiová, Michaela,]. Analysis of form error and roughness of hardened steel workpieces internally turned with different tools in long overhangs. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Vol. 30, no. 50 (2022), s. 21-29. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2022-0003.

Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADF

V3_02 VOPÁT, Tomáš - KURUC, Marcel - PÄTOPRSTÝ, Boris - VOZÁR, Marek - JURINA, František - BOČÁKOVÁ, Barbora - PETERKA, Jozef - GÖRÖG, Augustín - STRAKA, Róbert. The Selection of Cutting Speed to Prevent Deterioration of the Surface in Internal Turning of C45 Steel by Small-Diameter Boring Bars. In *Machines*. Vol. 12, iss. 1 (2024), s. 1-14. ISSN 2075-1702 (2022: 2.600 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.449 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/machines12010068 ; SCOPUS: 2-s2.0-85183411509 ; WOS: 001151344900001 ; CC: 001151344900001.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

V3_03 VOZÁR, Marek - PÄTOPRSTÝ, Boris - VOPÁT, Tomáš - STRAKA, Róbert - JURINA, František - ŠAJGALÍK, Michal. Evaluation of Suitability of High-Speed Drag Finishing Machine Prototype Utilization for Workpiece Modification. In *Machines*. Vol. 12, iss. 4 (2024), s. 1-18. ISSN 2075-1702 (2022: 2.600 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.449 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/machines12040251 ; SCOPUS: 2-s2.0-85191414464 ; WOS: 001210252700001 ; CC: 001210252700001.

Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	5
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	3
Súčet		8