

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění austenitické oceli

Autor: **Bc. Ladislav SMÍTKA**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav SMÍTKA**
Osobní číslo: **S16N0048K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění austenitické oceli**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace vlastních experimentů
4. Zhodnocení výsledků a jejich sumarizace
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **ASTAKHOV, Viktor, DAVIM, J. Paulo, BASAK, A.K., et al. Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends: Advanced Mechanical Engineering. De Gruyter Oldenbourg, 2016. ISBN 3110449420, ISBN 9783110449426.**
- **KLOCKE, Fritz. Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-11979-8.**
- **DAVIM, J Paulo. Machining of hard materials. Springer, 2014. ISBN 978-1-84996-450-0.**
- **Mádl, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum. 4. vydání. Praha, 1990. ISBN 80-01-00323-X.**
- **Forejt, Milan. Píška, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Vydání. Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Němec**
Navel s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc.Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup během zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval technickému konzultantovi Ing. Jiřímu Němcovi, bez kterého by tato práce nevznikla.

V neposlední řadě děkuji mé rodině a přátelům za jejich podporu, trpělivost a vytvoření potřebného zázemí v průběhu kombinovaného studia na Fakultě strojní.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Smítka	Jméno Ladislav		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie- technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost řezných nástrojů při obrábění austenitické oceli			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	82	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci fréz ze slinutého karbidu pro obrábění austenitických nerezových ocelí. Zaměřuje se na přínosy nerovnoměrné vůči rovnoměrné geometrii a tyto přínosy jsou porovnávány na základě trvanlivosti nástrojů. Výsledky experimentů budou použity v technické praxi.
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA	Trvanlivost nástroje, austenitická nerezová ocel

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Smítka	Name Ladislav		
FIELD OF STUDY	2303T004 “ Mechanical Engineering - Machining Technology“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.		Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR		
TITLE OF THE WORK	Cutting tool live when machining austenitic steel			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2019
----------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	--
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis is focused on optimization of carbide milling cutters for austenitic stainless steel machining. It focuses on benefits of unevenness vs. uniform geometry, and these benefits are compared based on cutting tool life. Experimental results will be used in technical practice.
KEY WORDS	Cutting tool live, austenitic stainless steel

Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Cíle práce.....	1
2	Rozbor současného stavu.....	2
2.1	Trvanlivost[1], [5].....	2
2.1.1	Vliv řezné rychlosti [1], [5].....	2
2.1.2	Opotřeбенí nástroje [1], [5].....	3
2.1.3	Dlouhodobá zkouška trvanlivosti [1], [5]	11
2.1.4	Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti [1], [5]	14
2.2	Charakteristika austenitických korozivzdorných ocelí [1], [4], [6].....	14
2.2.1	Obrábění austenitických ocelí [1], [5], [6], [7].....	15
2.3	Omílání [8]	18
2.4	Tryskání [9], [10], [11], [12], [13], [14]	21
2.5	Zbytková povrchová napětí po obrábění [16], [17].....	24
2.5.1	Destruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17].....	24
2.5.2	Polodestruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17].....	25
2.5.3	Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17]	25
3	Návrh a realizace vlastních experimentů.....	26
3.1	Polotovar	26
3.2	Obráběcí centrum.....	26
3.3	Testované nástroje	27
3.4	Řezné podmínky	29
3.5	Procesní kapalina [20].....	33
3.6	Mikroskop MultiCheck	33
3.7	Měření drsnosti [21].....	34
3.8	Měření zbytkového pnutí	34
4	Zhodnocení výsledků a jejich sumarizace	36

4.1	Preexperiment.....	38
4.1.1	4FR1 chlazení PK, $v_c = 90$ m/min, $f_z = 0,035$ mm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 2,4$ mm.....	38
4.1.2	4FR2 chlazení PK, $v_c = 190$ m/min, $f_z = 0,035$ mm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 1$ mm	39
4.1.3	4FR+1 chlazení vzd., $v_c = 90$ m/min, $f_z = 0,035$ mm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 1$ mm....	40
4.2	Hlavní experiment.....	41
4.2.1	Nástroj FR1_30° - chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min .	41
4.2.2	Nástroj FR1_45° - chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min .	42
4.2.3	Nástroj FR3_30° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min	43
4.2.4	Nástroj FR2_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min	44
4.2.5	Nástroj NAV1 – chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min....	45
4.2.6	Nástroj NAV2 - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min.....	46
4.2.7	Nástroj FR3_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,1$ mm, $v_c = 75$ m/min	47
4.2.8	Nástroj FR4_30° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,1$ mm, $v_c = 75$ m/min	48
4.2.9	Nástroj FR4_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,13$ mm, $v_c = 75$ m/min.....	49
4.2.10	Nástroj FR2_30° - chlazení procesní kapalinou, variabilní f_z , $v_c = 75$ m/min ..	50
4.3	Vyhodnocení drsnosti	51
4.3.1	Plochy obráběné $f_z = 0,06$ mm	52
4.3.2	Plochy obráběné $f_z = 0,1$ mm	53
4.4	Vyhodnocení zbytkového pnutí.....	55
4.5	Sumarizace	57
4.5.1	Porovnání nástrojů z hlediska opotřebení VB.....	58
4.5.2	Porovnání z hlediska drsnosti Ra.....	59
4.5.3	Porovnání z hlediska vzniku zbytkových pnutí v materiálu	60
5	Závěr.....	62
6	Použitá literatura	63
7	Seznam obrázku	65
8	Seznam Grafů.....	67

9	Seznam Tabulek.....	68
10	Přílohy	69

1 ÚVOD

Cílem každého podnikání jsou co nejvyšší výnosy a vybudování konkurenceschopnosti na trhu. Proto je potřeba, aby společnosti neustále zdokonalovali svoje technologie, know-how a kvalifikovanost. Firmy si zajistí svou oblíbenost u zákazníků výbornou znalostí obráběných materiálů, díky níž dokáží zákazníkovi poradit jakým nástrojem a jakými řeznými parametry obrábět. Z toho důvodu je častá spolupráce podniků s univerzitami nebo jinými vědecko-výzkumnými ústavy.

Téma práce bylo zadáno společností Navel spol. s r.o., která se zabývá vlastní výrobou nástrojů pro obrábění nejrůznějších aplikací, jako jsou letecký, energetický a automobilový průmysl. Testování vzorků a jejich vyhodnocení bylo provedeno na zařízeních Regionálního technologického institutu při Západočeské univerzitě v Plzni.

1.1 Cíle práce

Firma Navel se mimo jiné zabývá výrobou nástrojů ze slinutých karbidů a v současné době hledá směry pro inovaci těchto nástrojů. Cílem této práce je zaměřit se na optimalizaci fréz ze slinutých karbidů pro obrábění austenitických nerezových ocelí.

Navel doporučuje frézu s označením FR. Tato čtyřbřitá SK fréza má nerovnoměrnou geometrii (tzn. rozdílné stoupání šroubovic a nerovnoměrné dělení zubů). Mezi hlavní výhody nerovnoměrné geometrie frézy patří klidnější chod bez vibrací. Nerovnoměrná geometrie frézy má zároveň i svá omezení. Takovéto frézy jsou náročnější na výrobu a není možné libovolně prodlužovat činnou část (rozdílné stoupání šroubovic by při prodloužení činné části vyústilo v nepřijatelné zeslabení zubů frézy).

Vzhledem k tomu, že tyto praktické informace podložené konkrétními výsledky z experimentálního měření ve firmě Navel chybí, bylo rozhodnuto zaměřit se na přínosy nerovnoměrné geometrie vůči rovnoměrné geometrii a tyto přínosy porovnat na základě trvanlivosti nástrojů. Pro sledování trvanlivosti nástroje je potřeba zmínit princip opotřebování nástroje a faktory ovlivňující trvanlivost nástroje.

2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU

2.1 Trvanlivost[1], [5]

Trvanlivost lze formulovat jako součet všech čistých (strojních) časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje či vylovení břitu. Míru a hodnotu opotřebení je nutné stanovit tak, aby měl obrobek požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu po dobu trvanlivosti nástroje. Zvukový vjem během obrábění značí nekontrolovatelný odchod třísky nebo špatnou funkci břitu.

Trvanlivost může být dále posuzována podle počtu provedených operací (obrobených kusů) a celkové délky dráhy břitu.

V nejkrajnějším případě může dojít k lomu. Jedná se o nepravděpodobný jev proto, že převážná část výroby probíhá pod uzavřeným krytem stroje. Výroba je navíc automatizovaná, často bez obsluhy. Aby se předešlo komplikacím při obrábění, je nutné zásadně dodržovat stanovení trvanlivosti a spolehlivosti břitu.



Obr. č. 1 - Vlastnosti ovlivňující trvanlivost [18]

2.1.1 Vliv řezné rychlosti [1], [5]

Trvanlivost nástroje ovlivňuje teplota řezání související s řeznou rychlostí. Dále se projevuje řada jiných vlivů, jako například vznik nárůstku nebo vlastnosti materiálu břitu. Je pravidlem, že pokud stoupá řezná rychlost, klesá nerovnoměrně trvanlivost břitu.

Taylorův vztah vyjadřuje závislost trvanlivosti břítu na řezné rychlosti v $T=f(v)$.

$$v \cdot T^n = c_{vT}$$

c_{vT} - Taylorova konstanta

n - určeno rozsahem trvanlivosti břítu

Po úpravě vypadá Taylorův vzorec následovně:

Konstanta c_{vT} je dána druhem materiálu břítu.

$$T = \frac{c_{vT}}{v^m} \text{ [min, m/min]}$$

Exponent $m = \frac{1}{n}$ závisí na aktuálním rozsahu řezné rychlosti a druhu řezného materiálu.

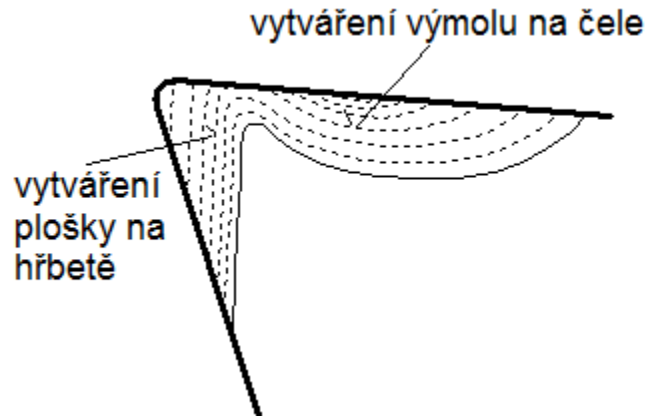
2.1.2 Opotřebení nástroje [1], [5]

2.1.2.1 Otupení břítu [1], [5]

Opotřebení je běžným následkem odebrání materiálu, jehož příčinou je silový styk dvou na sebe působících ploch, které na sebe působí relativním pohybem. Rozsah otupení měříme experimentálními metodami. Měří se velikost otupení a jejich příčiny v závislosti na čase řezání. Z kvalitativních hledisek (drsnot a přesnot povrchu) a ekonomických hledisek (životnost, trvanlivost) je určena optimální velikost otupení břítu. Tyto mechanismy působí plynule v průběhu času, při čemž platí, že časový okamžik jejich působení nemusí být vždy stejný.

Plastická deformace a křehký lom, oproti předchozím mechanismům, působí neočekávaně. Následkem toho je zničení nástroje (ulomení špičky, změna tvaru břítu nástroje, lavinové opotřebení). V důsledku abraze, adheze, difúze a oxidace dochází k opotřebování čela nástroje a opotřebovávání hřbetu vlivem oxidace a abraze. To, zda se nástroj opotřebí na čele popřípadě na špičce, ovlivňuje geometrie nástroje, řezné podmínky a způsob obrábění.

Změny povrchových vrstev břítu (změna tvrdosti, drsnoti povrchu) a změna tvaru břítu (změna řezných úhlů α , γ a tvaru čela i hřbetu)- otupení břítu, jsou způsobené silovými a tepelnými interakcemi mezi materiálem obrobku (třísky) a materiálem břítu.



Obr. č. 2 – příklad opotřebovávání břitu [5]

2.1.2.2 Vznik otupení [5]

1. Otěrem- v místě, kde se dotýká břit nástroje s materiálem obrobku. Setkáváme se s ním při obrábění řezáním.
2. Plasticou deformací břitu- k deformaci dochází při vysokém silovém a tepelném zatížení břitu.
3. Křehkým lomem břitu- v případě silového zatížení břitu nebo dojde-li například ke chvění.

2.1.2.3 Příčiny otupování břitu [2], [3], [5]

a) Fyzikální (při nižších teplotách)

Na kontaktních plochách břitu s obrobkem vznikají složité chemické a fyzikální jevy, kvůli kterým se břit otupuje, mění svoje vlastnosti a tvar.

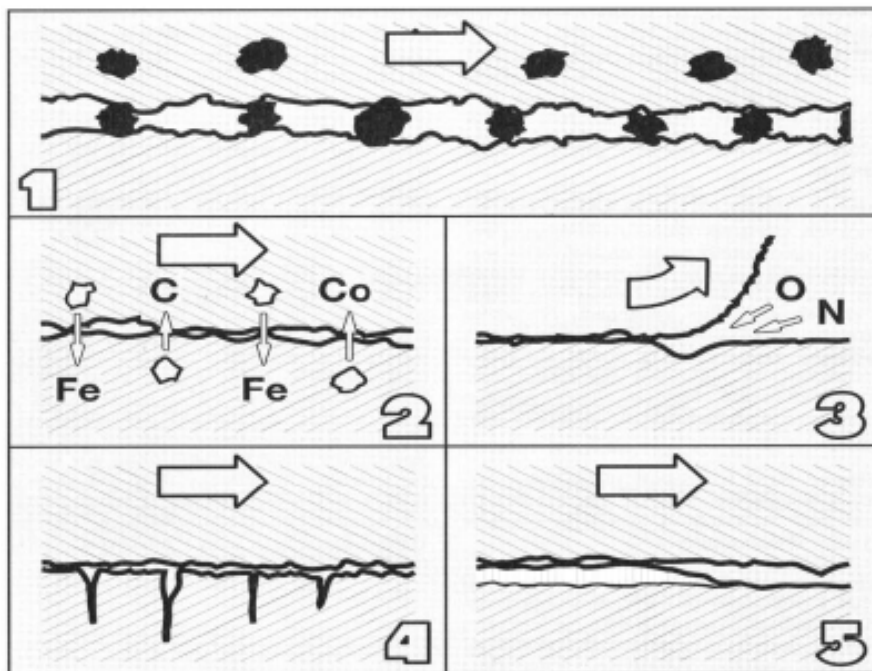
Aby bylo dosaženo ekonomických, kvalitativních a kvantitativních výsledků obrábění, je potřebné nalézt přiměřené pracovní podmínky a materiál břitu nástroje. Tyto podmínky jsou založené na výsledcích experimentálního testování fyzikálně-chemické podstaty otupení.

Díky znalosti vlivu dějů na otupení je možné aktivně ovlivňovat intenzitu otupování. U obrobku například zvolením správné metody dezoxidace při výrobě oceli. V případě břitu správnou volbou chemického složení legur. Dalším důležitým aspektem, ovlivňujícím velikost otupení, je výběr správného řezného prostředí.

b) Chemické (při vyšších teplotách)

- difúze: Objevuje se v případě překročení teploty, tzv. disociační teploty prvků obsažených v materiálu břitu, tj. teplota vyšší než 680°C. Atomy se při ní z obráběného materiálu přesouvají do nástrojového materiálu a naopak.

Rozlišovány jsou dva druhy difúze, reaktivní a heterogenní.



Obr. č. 3 - Hlavní mechanismy otupení břitu [3]

- Pole 1 – abrazivní opotřebení
- Pole 2 – difúzní opotřebení
- Pole 3 – oxidační opotřebení
- Pole 4 – statický či dynamický lom
- Pole 5 – adhezní opotřebení

Křehký lom břitu

- lom způsobuje vysoké mechanické zatížení, např. přerušovaný řez a vměstky v obráběném materiálu, atd.

Plastická deformace břitu

- je důsledkem mechanického a tepelného kumulovaného zatížení. Tzv. lavinové opotřebení je jedním z nežádoucích důsledků deformace břitu.

2.1.2.4 Tvary otupení břitu [1], [5]

Při výběru nástroje jsou brány v potaz technologické a ekonomické hledisko. Technologické hledisko je zapojeno ve chvíli, kdy nástroj neodebírá materiál v dostatečné přesnosti a při nízké kvalitě. Volba z ekonomického ohledu, která vychází z požadavků hospodárnosti procesu. Nejčastějšími kritérii jsou VB, KT a VB_{max} .

Chemické i fyzikální procesy ovlivňují společně průběh vzniku otupení, i když v různé míře. Za určitých podmínek může být některý z dějů rozhodující, např. difúze při vysokých řezných rychlostech nebo naopak abraze při nízkých řezných rychlostech.

Intenzita konkrétního děje je ovlivněna místem působení (střed kontaktní plochy oproti okrajům kontaktní plochy). Tvary otupení závisí na řezném materiálu a průběhu řezání.

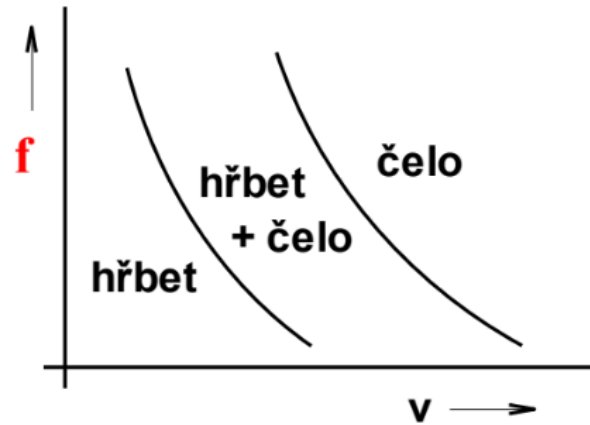
Typy otupení:

- výmol na čele v drážce nástroje
- rýhy na okrajích opotřebení hřbetu a čela
- otřená ploška na hřbetu břitu

Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem:

a) Druh řezného materiálu:

SK – doporučené řezné podmínky => vyvážené opotřebení čela (výmol) i hřbetu (rovnoměrně široká ploška). Změnou v_c a f se mění tvar otupení:



Obr. č. 4 - Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem [5]

Geometrie břitu:

α : zmenšení nebo zvětšení z doporučené hodnoty jsou příčinou růstu opotřebení VB_B (větší tření, růst teploty)

γ : negativnější hodnoty způsobují růst opotřebení KT

κ : zvětšení je příčinou růstu otupení KT i VB_B , především VB_C (větší tepelné zatížení špičky)

r_ϵ : menší hodnoty než doporučené způsobují růst VB_C , zvláště při $r_\epsilon = 0$

b) Řezné podmínky:

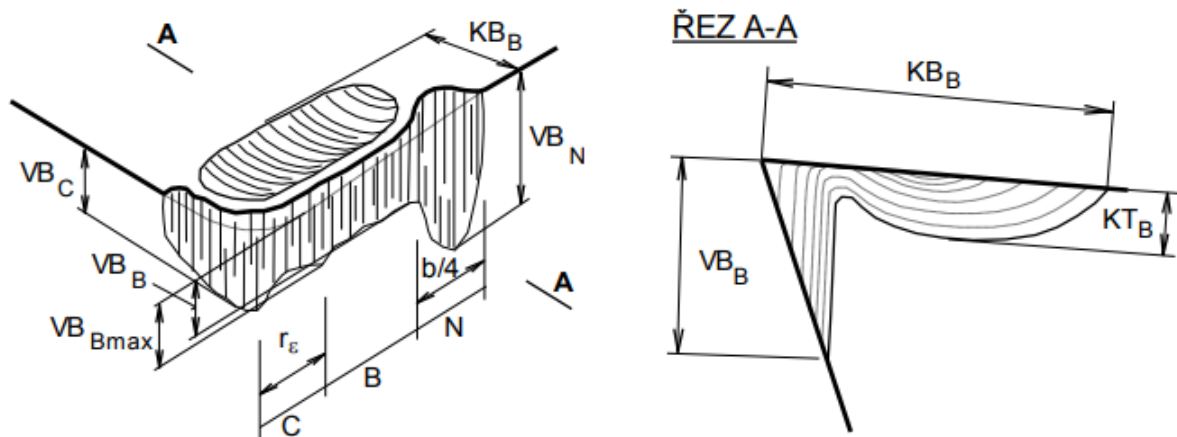
Poměrný vliv v_c a s - viz diagram výše.

c) Materiál obrobku:

Zpevněný povrch nebo povrchová kůra způsobují růst opotřebení VB_N

Náchylnost ke zpevňování je příčinou růstu opotřebení VB_C , zvláště na vedlejších ostřích

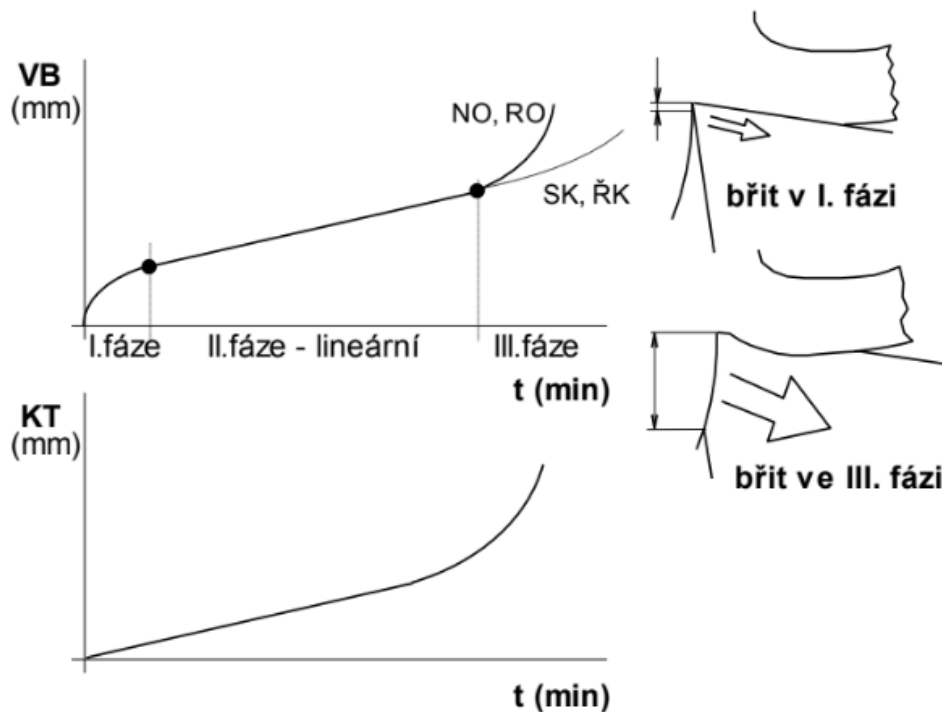
Horší tepelná vodivost ovlivňuje narůst opotřebení VB a zaoblování ostří (r_N).



Obr. č. 5- Druhy opotřebení břitu [5]

2.1.2.5 Závislost otupení otěrem na době řezání [1], [3], [5]

K otupení břitu dochází vlivem rostoucího času obrábění. Důsledkem toho je nelineární zvětšování rozměrů VB, KT a dalších. Gradient nárůstu otupení s časem řezání je známý jako *intenzita otupování*.



Obr. č. 6- Závislost otěru na době řezání [5]

I. fáze: Vzniká vlivem opotřebení nerovnosti ostří

Opotřebení intenzivně roste, ale intenzita postupně pomalu klesá do doby, než dojde k ustálení na určité hodnotě. Materiálové a geometrické defekty ovlivňují řezný klín. Na hřbet nástroje působí velký tlak z obráběného materiálu. S rostoucí šířkou plochy opotřebování na hřbetě dochází ke snížení měrných tlaků.

II. fáze: Lineární fáze

Oproti předchozí fázi je intenzita opotřebení menší a nedochází téměř k žádné změně. Požadavkem je co nejmenší opotřebení, a současně co největší délka tohoto úseku.

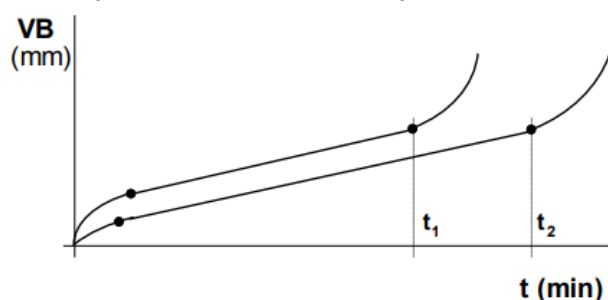
III. fáze: Vznik intenzivního opotřebení

Během této fáze dochází k nárůstu intenzity opotřebení, jehož důvodem je především změna podmínek současného působení řezného a obráběného materiálu. Ke změně geometrie určité části řezného klínu dochází při opotřebení nástroje. To má za následek změnu směru a velikosti řezných sil. Současně se mění velikost třecích sil a normálových tlaků na hřbetě a čele nástroje a také stoupá teplota v řezu. Ostří ztrácí svoji tvarovou pevnost. Může dojít ke křehkému lomu nebo plastické deformaci.

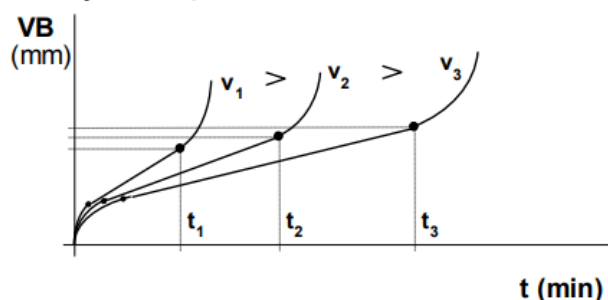
Další vlivy na časový průběh opotřebení VB

- poloměr zaoblení ostří r_N , kvalita ostří a drsnost ploch břitu:

- drsnost ploch břitu a kvalita ostří, poloměr zaoblení ostří r_N :



- řezná rychlost v_c :



Obr. č. 7 - Další vlivy na časový průběh otupení VB [5]

- řezná rychlost v_c :

Roste-li v_c , obecně se zvyšuje intenzita otupování **VB** i **KT**. Obrábí-li se uhlíková ocel, je průběh **VB** nejednotvárný v oblasti tvorby nárůstku. Stabilní tvorba nárůstku zmírňuje intenzitu otupování. U nestabilní tvorby nárůstku je tomu naopak.

-vliv posuvu f :

Růst posuvu neovlivňuje tak výrazně růst intenzity otupování **VB** jako řezná rychlost.

Velikost otupení břítu se hodnotí:

- a) hmotností nebo objemem opotřebeného materiálu břítu
- b) určením velikosti rozměrů otupení na hřbetě a čele břítu
- c) sledováním jevů souvisejících s otupením břítu

ad a)

Přímé metody:

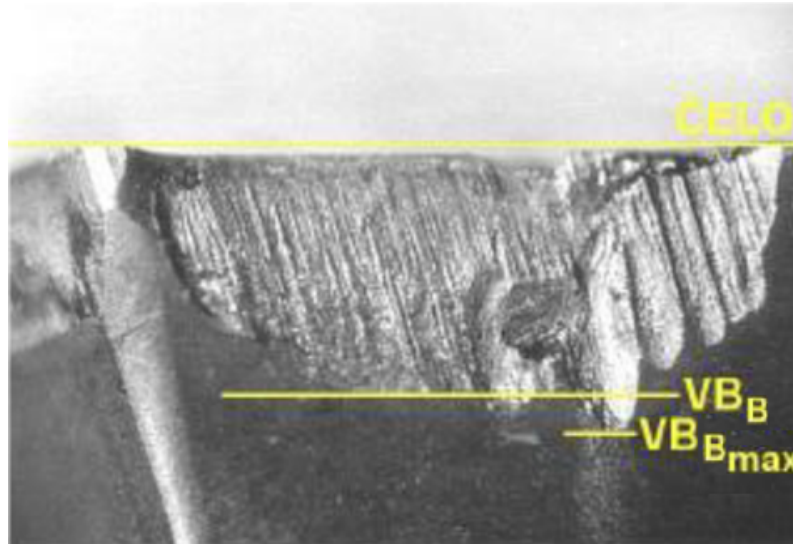
- měření vybraného kritéria opotřebení
- ultrazvukové, pneumatické, radioaktivní
- vážení břitové destičky
- elektrické metody

Nepřímé metody:

- vyhodnocování a měření příkonu obráběcího stroje
- vyhodnocování a měření složek řezné síly
- měření struktury povrchu měřené teploty
- teploty řezání měření kmitání

ad b)

Jedním z nejčastějších a nejjednodušších způsobů, jak zjistit otupení břitu je měření rozměrů otupení. Nejčastěji se jedná o otřenou plošku na hřbetu. Pokud není rovnoměrná, měří se její průměrná šířka VB_B a hodnota VB_{Bmax} .



Obr. č. 8 - Ukázka otupení na nástroji [18]

Často se jedná o podobný tvar otupení s rovnoměrnější šířkou. Má-li tvar břitu ostřejší přechody ostří (špičky), bývá tomu tak např. u tvarových, potom právě v těchto místech bývá otupení hřbetu intenzivnějších fréz. Výmol, který je další častou formou otupení břitu, je tvořen odcházející třískou na čele břitu.

Nejčastěji je měřena jeho šířka **KB** nebo hloubka **KT**, vzdálenost jeho okraje od ostří nebo osy žlábků od ostří **KM**.

2.1.3 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti [1], [5]

Počátkem 20. století se tímto problémem začal zabývat F. W. Taylor. Zjistil, že řezná rychlost nejvíce ovlivňuje trvanlivost nástroje a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, u nás známý jako "**T-vc** závislost" (někdy též "Taylorův vztah").

Po provedení dlouhodobé zkoušky, která probíhá za podmínek, které odpovídají téměř reálnému obrábění, je určen materiál, stroj, upnutí, rozměry a tvar obrobku. Řezný nástroj lze určit, ale obvykle je třeba zvolit geometrii břitu, řezný materiál.

Podle materiálu obrobku a typu operace volíme řezný materiál. Řezné prostředí je závislé na druhu obrábění, řezné rychlosti a druhu obráběného materiálu.

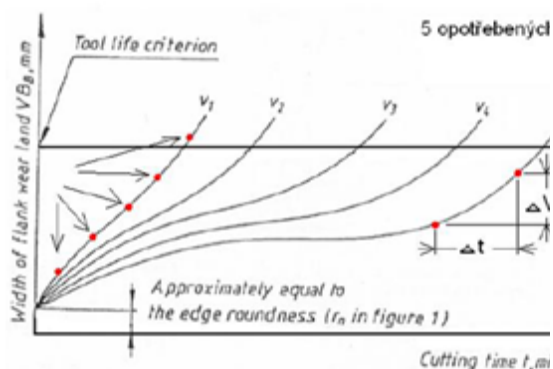
Příprava experimentu

Je potřeba určit velikost kritériálního opotřebení, které závisí na druhu nástroje a na druhu obráběného materiálu. Velikost kritériálního opotřebení lze zvolit z referenčních experimentů. Velikost opotřebení dále ovlivňuje typ operace (hrubování, načisto), funkce bříty s velikostí opotřebení a dostupné zdroje.

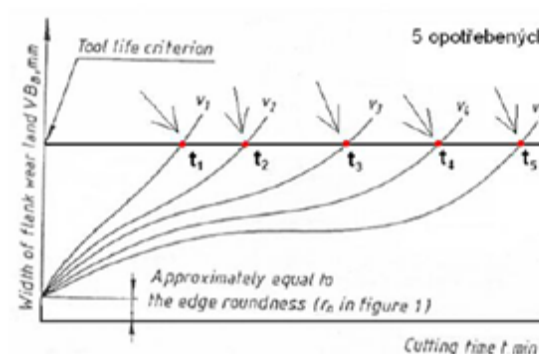
Volba řezných podmínek

Před samotnou zkouškou je možné experimentem získat představu o velikosti řezné rychlosti, hloubek řezu ve vztahu k trvanlivosti a posuvu. Dále potom lze vybrat doporučené řezné podmínky, které dodává výrobce nástroje. Volba rozsahu experimentu je dána doporučením nebo výsledky předexperimentu, a počtem úrovní řezných podmínek, záviselých na cíli experimentu a velikosti dostupných zdrojů (finance, lidé, čas).

Na přesnosti výsledků závisí volba počtu opakování měření. Při větším počtu opakování je získána vyšší přesnost Taylorovy funkce. V tuto chvíli by měl být získán experimentální funkční model (EFM), vyjadřující určený počet nezávisle proměnných, počet úrovní, počet opakování a počet bodů měření.



Obr. č. 9 - Průběh experimentu [1]



Obr. č. 10 - Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky [1]

Z minimálně pěti bodů lze stanovit charakteristiku křivky tak, aby v posledním čase byla naměřena vyšší hodnota než je určené kritické opotřebení. Křivku není možno extrapolovat mimo čas řezání. Zkoušku je zapotřebí provést 3x při každé řezné rychlosti.

-vynesení bodů do grafu

-ln souřadnic v, T

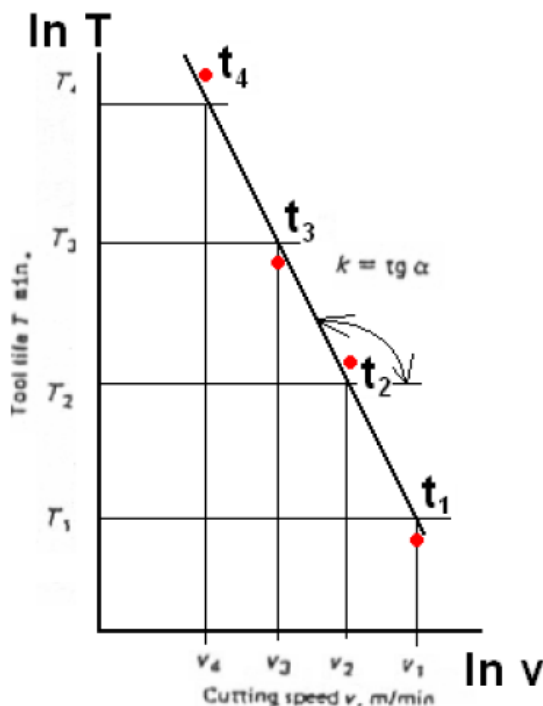
-proložení přímkou

$$\ln T = \ln c_{Tv} - m \cdot \ln v$$

$$T = c_{Tv} \cdot v^{-m}$$

$$v \cdot T^{1/m} = c_{ISO}$$

$$m = k = \tan \alpha$$



Obr. č. 11 - Logaritmická závislost T na v [1]

$\ln c_{Tv}$ je hodnota na ose $\ln T$, kde tuto osu protíná přímka

$$c_{Tv} = (\ln c_{Tv}) \cdot e$$

Výsledkem dlouhodobé zkoušky trvanlivosti je určený Taylorův vztah

$$T = 6 \cdot 10^6 \cdot v^{-3,25} \qquad T = \frac{6 \cdot 10^6}{v^{3,25} \cdot f^{2,1} \cdot a_p^{1,3}}$$

Dosazením řezné rychlosti z intervalu měřených řezných rychlostí do určeného Taylorova vztahu, je získána trvanlivost pro zvolenou řeznou rychlost. Nelze dosadit řeznou rychlost, nespádající do intervalu měřených řezných rychlostí. Další možností je dosadit do rovnice trvanlivost a tím určit řeznou rychlost.

2.1.4 Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti [1], [5]

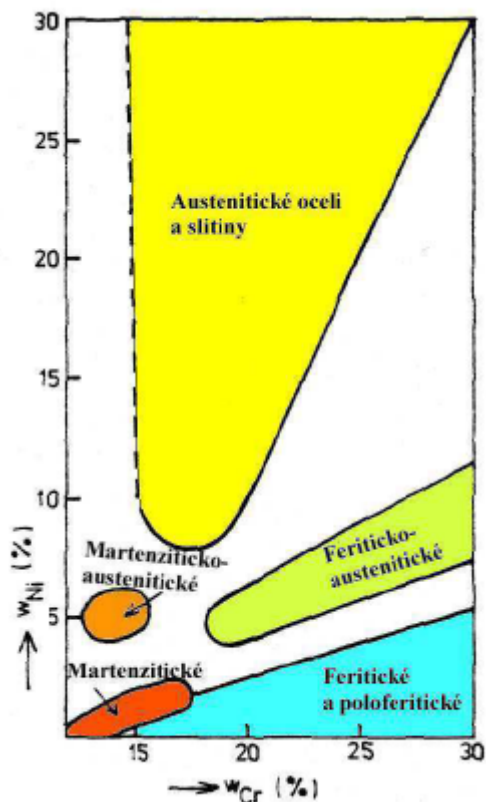
Jedná se o méně objektivní zkoušky, které trvají kratší čas a dochází při nich k nižší spotřebě materiálu. Současný prudký vývoj nově vyvíjených, vysoce pevných, tvrdých a houževnatých technických materiálů si žádá rychlé a dostatečně přesné stanovení obrobiteľnosti materiálu, a to především třískovým obráběním.

Krátkodobé zkoušky se hodí pro rychlé rozdělení skupiny materiálů podle stupně obrobiteľnosti, pro zjištění případné změny stupně obrobiteľnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobiteľnosti z jednotlivých materiálů. Podle principu a použitého kritéria se krátkodobé zkoušky dělí na přímé a nepřímé.

2.2 Charakteristika austenitických korozivzdorných ocelí [1], [4], [6]

Dle ČSN normy jsou nerezové oceli řazeny do třídy 17. Na základě chemického složení jsou oceli rozděleny na oceli chromové, chrommanganové (korozivzdorné) a chromniklové. Dále je lze dělit podle struktury na oceli martenzitické, austenitické, feritické, martenziticko-feritické, austeniticko-feritické a disperzně zpevněné korozivzdorné. Za disperzně zpevněné korozivzdorné oceli jsou považované oceli, které vznikly modifikací austenitické oceli se základním složením 18% Cr a 10% Ni. Jedná se o precipitačně zpevněné martenzitické a austenitické oceli. Rozpouštěcí žihání a následné umělé stárnutí (u každé oceli při rozdílných podmínkách) má za následek vyloučení precipitátů legujících prvků, například Al, Cu, Ti, N, Nb z přesycené základní matrice.

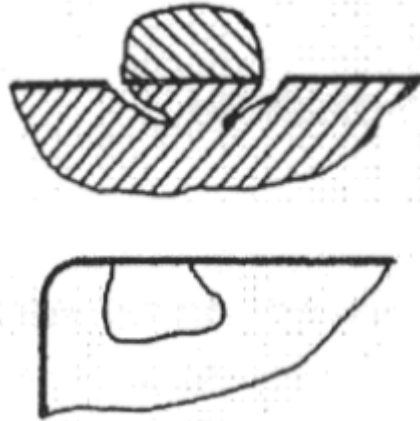
U těchto ocelí je důležitý obsah chromu, nicméně korozivzdornost závisí na dalších legujících prvcích a jejich obsahovém množství. Korozivzdorné oceli zpravidla obsahují minimálně 12% chromu, za účelem zajištění pasivačních schopností oceli. Dalšími legujícími prvky, které v kombinaci s chromem zlepšují korozní vlastnosti, jsou například molybden a nikl. Oceli jsou odolnější proti mezikrystalické korozi díky niobu a titanu. Dusík zvyšuje korozivzdornost a pevnost. Přidání síry potom zajišťuje lepší obrobiteľnost. S obsahem dalších legujících prvků se mění struktura nerezových ocelí.



Obr. č. 12 - Vyznačení oblasti chemických složení korozivzdorných [6]

2.2.1 Obrábění austenitických ocelí [1], [5], [6], [7]

Všechny druhy nerezových ocelí jsou obtížně obrobitelné až na podskupinu feritických ocelí. Díky absenci niklu jsou feritické oceli dobře obrobitelné. Problémem jsou především rychlé opotřebení břitu a špatné lámání a odchod třísek. Plastickou deformaci řezné hrany způsobuje nízká tepelná vodivost. Nízká kvalita povrchu vzniká v důsledku nárůstků na břitu. Dalším druhem opotřebení je chemická difúze mezi povrchem obrobku a břit. K poškození nástroje dochází kvůli abrazivnímu nebo adhezivnímu opotřebení, praskání či vylamování řezné hrany. Vytrhávání lasturovitých šupinek z povrchu břitu je způsobeno intenzivní adhezí (navarováním) materiálu obrobku (třísky) na břit.



Obr. č. 13 - Lasturovitý lom [5]

Austenitické oceli jsou řazeny k těžkoobrobitelným ocelím. Důvodem je jejich nízká tepelná vodivost, velký sklon ke zpevňování za studena a dobrá houževnatost.

Zpevnění za studena je spojené s přeměnou austenitické struktury na strukturu martenzitickou, pokud na materiál působí vysoké deformace. Austenit je vázán na vysokou rychlost zpevňování za studena. Výsledkem zpevňování za studena může být vznik zóny na obrobené ploše s extrémně vysokou tvrdostí. Velký význam při obrábění má také typ krystalové mřížky, ovlivňující i samotné vlastnosti daného materiálu.

Austenitizačním žiháním při teplotě 1000 až 1100 ° C a ochlazením vodou lze zlepšit obrobitelnost ocelí. Tím dojde k rozpuštění tvrdých karbidů z hranic austenitických zrn a je dosaženo stejnoměrné austenitizační struktury. Ochlazení oceli vodou je nutné provést tak rychle, aby nedošlo k opětovnému vyloučení rozpuštěných karbidů. Většinou je řízené ochlazování součástí primární výroby, například za tepla válcovaných normalizovaných profilů, a to především z ekonomického hlediska. Válcovaný materiál je ihned řízeně ochlazený, aby nemusel být opět ohříván a poté znovu chlazen.

Vliv chemických prvků v austenitické oceli na obrobitelnost je následující:

Chrom – Tato legura v oceli je typická pro svou malou odolnost proti tečení. Přesto je součástí většiny nízkolegovaných ocelí již od počátku jejich vývoje, kdy se chrom přidával do molybdenových ocelí pro zvýšení plasticity proti porušení při tečení, k potlačení sklonu ke grafitizaci a ke zlepšení odolnosti vůči korozi. Pokud ocel obsahuje více chromu, bude se ve struktuře tvořit chromový karbid M_7C_3 , jehož složení není výhodné. Charakteristickým znakem propouštění tohoto materiálu je tvorba hrubých tyčinkovitých útvarů místo jemné

disperze. Tyto útvary rozpouští velké množství Mo a tím ochudí ferit a sníží žárovevnost. Tyto tvrdé karbidy vznikají na hranicích zrn a tím dochází ke zvýšení abrazivního opotřebení nástroje. V důsledku toho je materiál hůře obrobiteľný. Ocel je možné řízeně legovat sírou a zajistit tím lepší obrobiteľnost. Je nutné dbát na množství síry, větší množství vede ke snížení korozivzdornosti materiálu.

Jedná se o feritotvorný prvek, používaný jako základ všech nerezových ocelí. Cílem je dosažení pasivovatelnosti a odolnosti vůči oxidaci za vyšších teplot. Díky chromu jsou oceli žáruvzdorné.

Molybden – Struktura přítomné karbidické fáze je ovlivněna molybdenem. Ten se rozpouští ve feritu a tím stoupá žárovevnost oceli. Mo se příznivě projevuje do 1% v CrV ocelích. Po precipitaci karbidu M_2C , dochází k vyloučení speciálního rovnovážného karbidu M_6C . Karbid M_2C je jehličkovitého tvaru a objevuje se v jemné disperzi. Austenitické oceli, které neobsahují molybden, jsou používané především kvůli jejich vyhovující ceně a slušné úrovni nerezovosti. Legování molybdenem je doporučováno hlavně kvůli zvýšení korozivzdornosti, odolnosti vůči hydroxidům a kyselinám (až na HCl). Zvýšení odolnosti materiálu vůči korozi je významné především proti agresivnímu prostředí, jako je průmyslové prostředí (oxidy síry) nebo mořská voda (chloridy). Z toho důvodu jsou tyto oceli používané především v chemických laboratořích, plaveckých bazénech, loďařském průmyslu atd..

Molybden je zároveň feritotvorný prvek, napomáhající tvorbě intermediálních fází čímž zvyšuje korozní odolnost ve všech prostředích, s výjimkou vroucích roztoků kyseliny dusičné. Zvyšuje především žárovevnost, ale nikoliv žáruvzdornost.

Vanad - Je další z feritotvorných prvků. Karbid vanadu V_4C_3 je vylučován v jemné disperzní formě. Díky značné aktivační energii difúze vanadu, dochází k pomalému hrubnutí materiálu a ke zvýšení žárovevnosti ocelí. V případě chromových ocelí se vanad zčásti rozpouští při nižších koncentracích v karbidu $M_2_3C_6$. Při vyšších koncentracích potom může vytvářet přednostně karbonitrid strukturálně i distribučně se nelišící od karbidu V_4C_3 . Vliv vanadu na žárovevnu ocel je menší než u Lavesových fází.

Niob – Niob má na vlastnosti žárovevých ocelí podobný účinek jako vanad. Větší blízkost niobu k uhlíku a vyšší bod tání jeho karbidu je předpokladem pro vyšší stabilitu karbidické fáze. Niob také potlačuje mezikrystalovou korozi. Legování pouze niobem bez přidání vanadu je používáno jen málokdy. Karbidy niobu a vanadu mohou vytvořit nepřetržitou řadu tuhých roztoků. V případě, že je množství vanadu 2x až 3x větší než množství niobu, může dojít k částečnému vytěsnění niobu z karbidické fáze a tím pádem i příznivému vlivu na žárovevost tuhého roztoku.

Nikl – Je prvek výrazně odolný vůči korozi. V matrici dochází k úplnému rozpuštění niklu a nevytváří tedy karbid, tím zvyšuje pevnost oceli. Zvýšením pevnosti oceli dochází k tomu, že jsou oceli hůře obrobitelné. Přítomnost niklu pozitivně ovlivňuje svařitelnost materiálu.

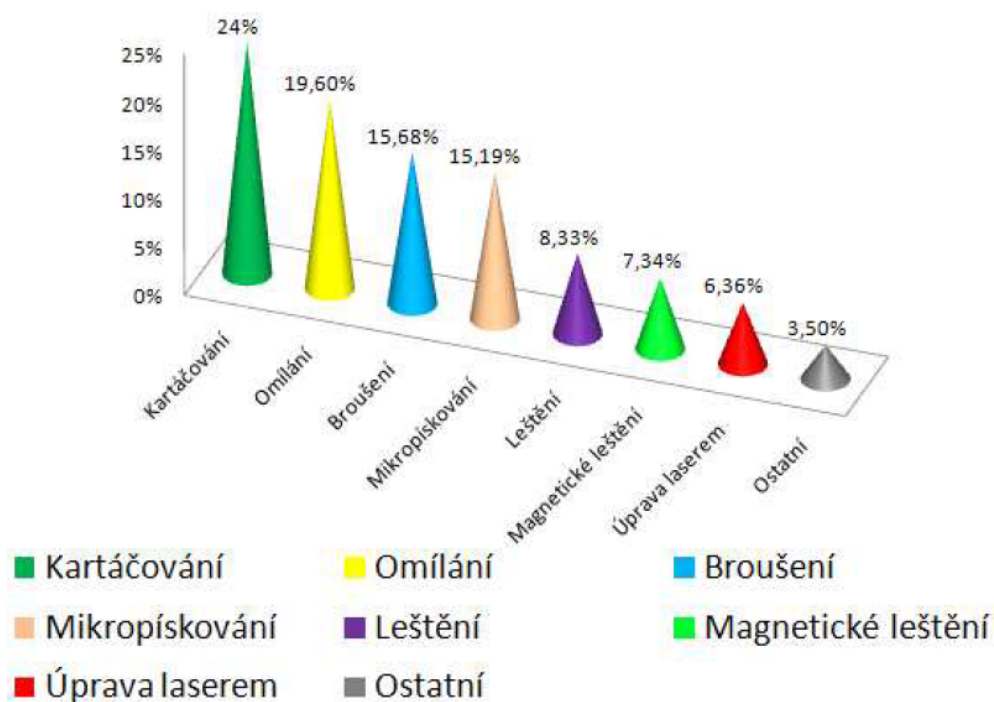
Titan - Titanem stabilizované druhy austenitických ocelí se v podstatě obrábějí obtížněji, protože titan vytváří TiC a TiN, což zvyšuje abrazivní účinky. Obecně platí, čím větší procento legur, tím horší obrobitelnost.

Měď - Přidáním až 4 % Cu do austenitických nerez ocelí, lze dosáhnout zlepšení odolnosti proti korozi i obrobitelnosti a austenitické stability. Naskytá se tedy možnost nahradit vliv síry přidáním mědi. V austenitické fázi je měď je vysoce rozpustná. Měď ve spojení s niklem tvoří tuhý roztok s vyšší teplotou tavení. Již několikrát bylo dokázáno, že obsah Cu do 4% téměř neovlivňuje tvařitelnost nerezových ocelí. Pokud je obsah Cu vyšší než 4%, jsou oceli, především v litém stavu, obtížně zpracovatelné tvářením.

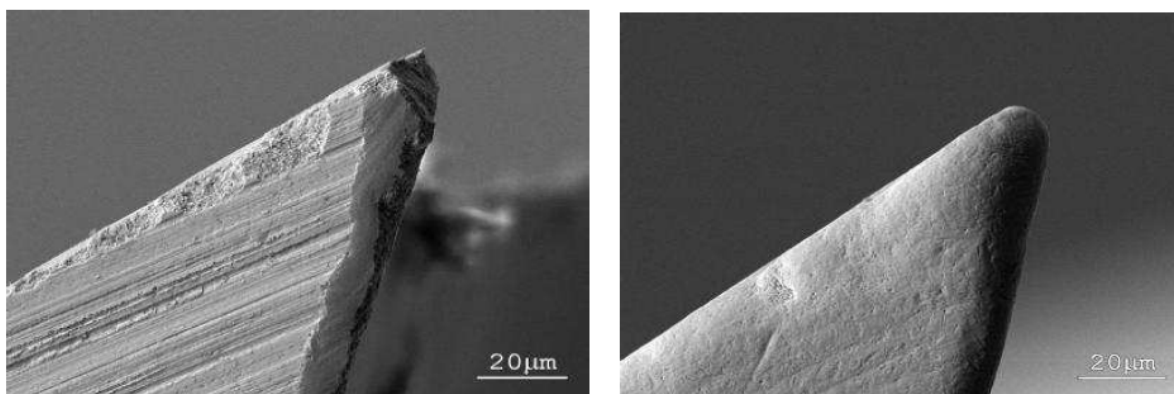
2.3 Omílání [8]

Po dokončení téměř všech technologických procesů (odlévání, stříhání, obrábění), dochází ke vzniku ořepů nebo nerovností. Může také dojít k poškrábání povrchu materiálu nebo je možné na něm nalézt rýhy. Tyto nežádoucí účinky je třeba odstranit. Technologie omílání patří do kategorie dokončovacích operací, při které dochází ke tření mezi obrobkem a abrazivem. Díky této metodě je možné vyřešit mnoho technologických potřeb jako je například odstranění zbylého materiálu (ořepy na hranách a radiusech) nebo zvýšení kvality povrchu. Omíláním lze odstranit nečistoty, mastnotu nebo koroze z povrchu materiálu.

Při výběru konkrétního způsobu omílání, bereme v potaz rozměry a tvar obrobku, který budeme omílat. Může se jednat o jednoduchá kruhová zařízení, vibrační omílací zařízení nebo výrobní linky, které se na omílání specializují.



Obr. č. 14 - Využití metod konečné úpravy ostří [8]



Obr. č. 15 - Stav břitu před a po úpravě mikrogeometrie [19]

Vlečné omílání [8]

Jedná se o spojení jemného broušení a leštění. Úprava mikrogeometrie ostří je pro nástroje velice přínosná. Díky ní dochází k lepší stabilizaci břitu, prodloužení trvanlivosti břitu během obrábění a přispívá ke snížení řezných sil. Při tomto typu omílání jsou obrobky (v tomto případě nástroje) umístěny do speciálních držáků. Obrobky jsou následně vlečeny planetovým pohybem (po elipsách) vysokou rychlostí v nádobě, obsahující brusné nebo leštící

médium. Pohybem obrobku nádobou vzniká tlak mezi obrobkem a brusným mediem a dochází k abrazivnímu obrábění (omílání). Velikost tlaku, kterou určuje rychlost pohybu v nádobě, je rozhodujícím parametrem.

Úprava laserem [8]

Jedná se o zesilování elektromagnetického záření, světla do místa požadovaného úběru materiálu. Při využití této metody je možné soustředit energii na malé plochy, aniž by byla použita mechanická síla. To dává možnost zpracovávat i velmi křehké materiály malých rozměrů. Paprsek laseru lze přivést např. pomocí optického kabelu, i do těžce přístupných míst obrobků. Úprava laserem je chemicky čistá a je možné obrábět bez znečištění materiálu.

Kartáčování [8]

Při úpravě břitu jsou používány speciální nylonové kartáče, na kterých je nanesená vrstva brusiva. Kartáčování lze využít i pro leštění povrchu funkčních částí nástrojů (např. k odstranění mikročástic po povlakování).

Lapování [8]

Lapováním lze dosáhnout maximální přesnosti rozměrů (0,1 až 0,5 μ m) a geometrického tvaru. Příznivé jsou například podmínky drsnosti obrobeného povrchu ($R_a = 0,01$ až 0,15 μ m). Účinkem zrn volně rozptýleného brusiva pod lapovacími kameny dochází k úběru materiálu.

Pískování [8]

Abrazivní zrna, jakožto volné částice, jsou v proudu nosného média (vzduchu) usměrňovány na povrch obrobku (nástroje) a napomáhají tak k jeho utváření, čištění. Pískování je používáno k mechanickému čištění před povlakováním. Tuto metodu je možné využít i k odstranění nežádoucích otřepů na břitech vzniklých broušením nástroje. Důležitá je volba správného abraziva. Při použití nevhodného abraziva, může dojít k trvalému poškození povrchu materiálu.

Iontové čištění [8]

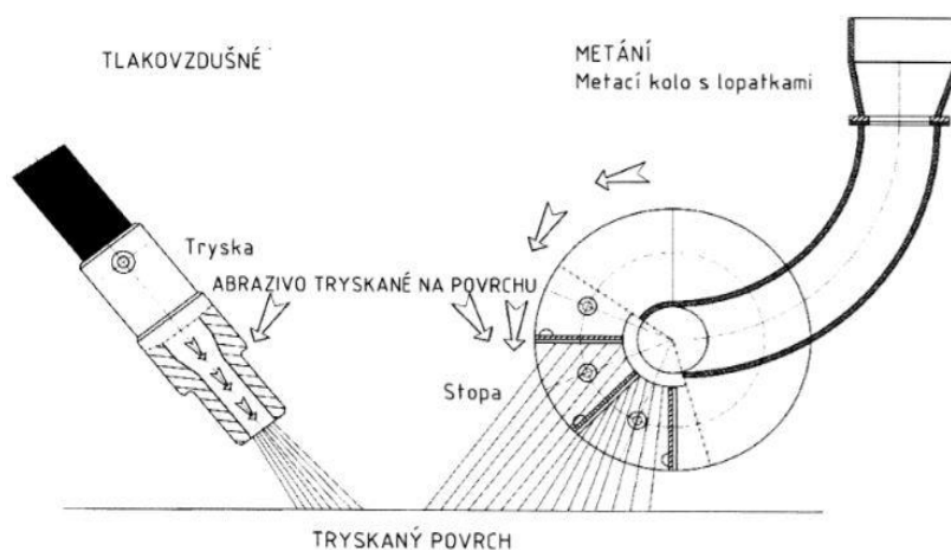
Při iontovém čištění dochází podobně, jako u pískování, k usměrňování proudu iontů. Ionty při dopadu na substrát odstraňují mikronečistoty usazené na povrchu.

Čištění ultrazvukem [8]

Tato metoda čištění přináší celou řadu výhod, např. krátký čas procesu, vysoká kvalita čištění při zvolení správného media, vhodné pro čištění nepřístupných míst, ultrazvukem lze vyčistit rovinnou plochu i tvarově složitý předmět.

2.4 Tryskání [9], [10], [11], [12], [13], [14]

V povrchových úpravách součástí se v dnešní době stále více uplatňuje technologie tryskání (popř. pískování). Tryskání je dokončovací operace. Tato metoda umožňuje úpravy povrchů z různých materiálů. Pro úpravu je možné si zvolit ze širokého výběru dostupných abraziv. Při této technologii dochází k odjehlení, očištění či jiné přípravě povrchu pro následující používání. Tryskání je děleno na dvě skupiny a to suché a mokré. Dále potom na tryskání tlakovzdušné (užití trysky) a tryskání pomocí metacích kol (použití metacího kola).



Obr. č. 16 - Principy tryskání [11]

Základním principem tryskání je vrhání abraziva na daný povrch obrobku. Po úpravě tryskáním dochází ke zvýšení trvanlivosti a únavové pevnosti povrchu materiálu.

Suché tryskání [9], [10]

Při suchém tryskání suchý stlačený vzduch pohání dané abrazivum na daný povrch a plochy obrobku. Po úpravě jsou plochy čisté, odjehlené, mají vyšší jakost, atd.

Mezi výhody patří vysoká účinnost procesu suchého tryskání. Metoda je ekologická (lze recyklovat abrazivo). Proces je rychlý a nepoužívají se při něm žádné závadné látky.

Mokrý tryskání [9], [10]

Základními prvky mokrého tryskání jsou stlačený vzduch, médium a voda. Úkolem této technologie je dosáhnout kvalitnějšího povrchu a odjehlit ostré hrany. Díky promývání dochází ke snížení rizika uvíznutí části abraziva a kontaminace v průběhu procesu. Po ukončení tryskání jsou součásti čisté a na povrchu není žádné zbytkové abrazivum. Pumpa, která je součástí zařízení, má za úkol připravit tryskací médium a současně upravit rychlost tryskání.

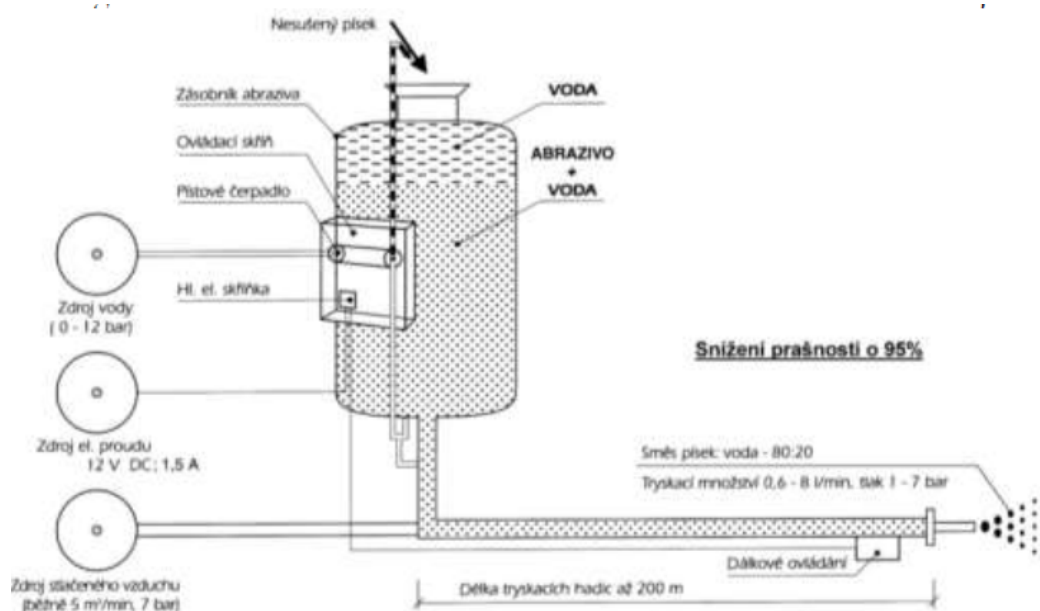
Výhody mokrého tryskání jsou například ekologický proces (možnost recyklace abraziva). Dále snadné odstranění nerovností a kvalitní povrch po opracování. Metoda je vhodná pro menší a tenkostěnné součásti z důvodu eliminace tepelné deformace.

Tryskání pomocí zvlhčeného abraziva [12], [13]

Na rozdíl od mokrého tryskání, během kterého byl písek smíchaný v koncové trysce, u tryskání pomocí zvlhčeného abraziva smíchají přístroje vodu s pískem až v tlakové nádobě. Výsledkem je směs obsahující 80% písku a 20% vody, která je následně unášena obrobky pomocí stlačeného vzduchu. I u této metody, stejně jako v případě mokrého tryskání, dochází k výraznému snížení prašnosti (až 95% snížení) v porovnání se suchým tryskáním. Výhodou toho je, že nemusí být zvláštní požadavky, které by zamezovaly úniku prašných částic do okolí.

Díky tzv. torbo systémům je možné regulovat pracovní tlak a množství tryskací směsi. Provádí se tryskání ocelí, přes měkké materiály až po „pískové mytí“, kdy při tlaku 0,1 MPa a většímu podílu vody ve směsi je možno pískovat měkké materiály, jako např. travertin.

Výsledek tryskání je ovlivněný použitým abrazivem. V torbo systémech je možné použít jakýkoliv druh abraziva (skleněné perly, křemičité písky, různé granuláty, atd.). Kvůli dokonalému smíchání vody a abraziva je nutné, aby abrazivum bylo těžší než voda.

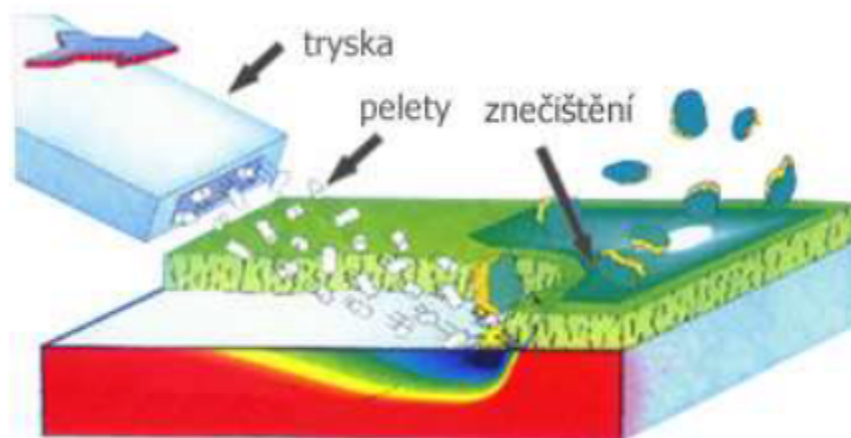


Obr. č. 17 - Princip tryskání pomocí zvlhčeného abraziva [11]

Tryskání pomocí suchého ledu [14]

Při této metodě jsou využívány pevné částice (granule suchého ledu), které jsou pomocí stlačeného vzduchu přesouvány do aplikační pistole. Tryskání suchým ledem není možné bez tří základních věcí: suchého ledu (pevné skupenství CO_2), stlačeného vzduchu a tryskacího zařízení.

Princip této metody je totožný jako u ostatních technologií, při kterých jsou využívána média (abraziva). Pelety uložené v zásobníku stroje, jsou dávkovány tlakovou hadicí do aplikační pistole. Poháněné jsou stlačeným vzduchem. Dochází k třířázovému působení granulí během jednoho okamžiku. V první fázi pelety suchého ledu dopadají působením kinetické energie na povrch rychlostí zvuku, čímž dochází k nalomení a uvolnění kontaminantu na povrchu. V druhé fázi, termická fáze, nízká teplota granulí ochladí nečistoty. Díky ochlazení jsou nečistoty křehké a snadno odstranitelné. Během třetí fáze dochází k sublimaci granulí suchým ledem důsledkem čeho je zvětšení jejich objemu, dokonce až 500x. Současně dochází k explozi usazenin a nečistot.



Obr. č. 18- Tryskání suchým ledem [14]

2.5 Zbytková povrchová napětí po obrábění [16], [17]

Zbytková napětí se v materiálu vyskytují bez působení vnějšího zatížení. Jejich vznik je spojen s technologií výroby a úpravy materiálu. Významná jsou povrchová zbytková napětí, jejichž vliv může být prospěšný i škodlivý. Za škodlivá jsou považována tahová napětí. Naopak tlaková napětí zlepšují únavové vlastnosti materiálu a zamezují vzniku a rozvoji povrchových trhlin. Vysoké hodnoty zbytkového napětí a s nimi spojené relaxační procesy ovlivňují pevnostní charakteristiky materiálu a mohou vést k nestabilitě tvaru a kvality povrchu součásti.

Zbytkové napětí je zjišťováno v těsné blízkosti povrchu nebo v celém průřezu součásti. Podle napjatosti lze měřením určit napjatost prostou, a to rovinnou nebo prostorovou.

Zjišťování zbytkových pnutí je rozděleno na tři metody, destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní.

2.5.1 Destruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17]

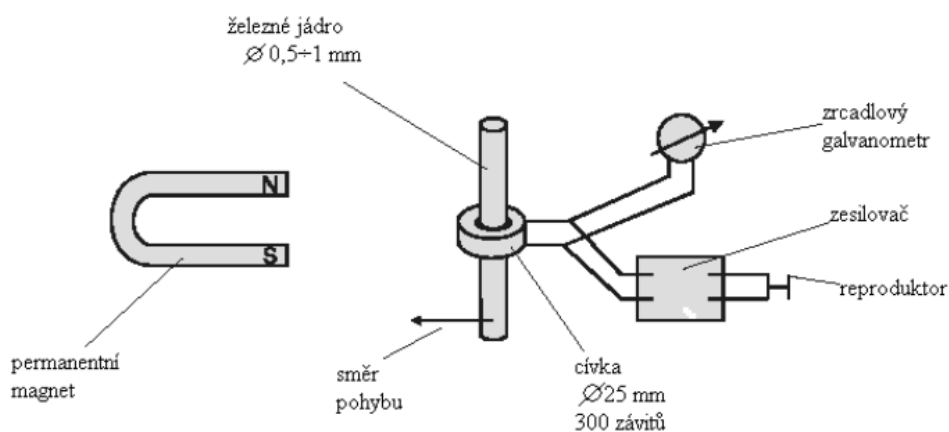
Do této kategorie patří například měření mikrotvrdosti. K reálným hodnotám stupně a hloubky zpevnění lze dosáhnout měřením mikrotvrdosti v ovlivněné zóně povrchu. Je-li tato metoda použita při malé hloubce ovlivněné vrstvy, vznikne chyba v metodice měření. Podle hloubky ovlivněné vrstvy lze volit z metod postupného odleptávání povrchových vrstev, metody kolmých řezů a metody šikmých řezů.

2.5.2 Polodestruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17]

Jednou z polodestruktivních metod je vyvrtávací metoda, která je řazena mezi mechanické, semidestruktivní metody. Je-li celistvost porušena vyvrtáním malého otvoru na povrchu součásti, dojde k uvolnění zbytkové deformace. Vzniklé deformace jsou měřené tenzometrickou růžicí, nainstalovanou na povrchu konstrukce. Otvor je vrtán do průsečíku os tří odporových tenzometrů. Vrtání probíhá po krocích a na konci každého kroku jsou měřené uvolněné deformace. Tímto jsou získána rozložení zbytkových deformací v daném místě do určité hloubky pod povrchem součásti. Získané deformace se následně vyhodnocují dle různých teorií, na jejichž základě se určuje rozložení zbytkových napětí v daném místě.

2.5.3 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí [16], [17]

Mezi nedestruktivní metody je řazena metoda využívající Barkhausenův šum. Barkhausenův šum popsal poprvé professor Heinrich George Barkhausen v roce 1919. Pokud je magnet přiblížen nebo vzdálen od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Podle vývoje kvantové mechaniky, tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu. Bylo dokázáno, že efekt závisí na tvrdosti ocelového jádra v cívce (roste-li tvrdost, intenzita praskání klesá).

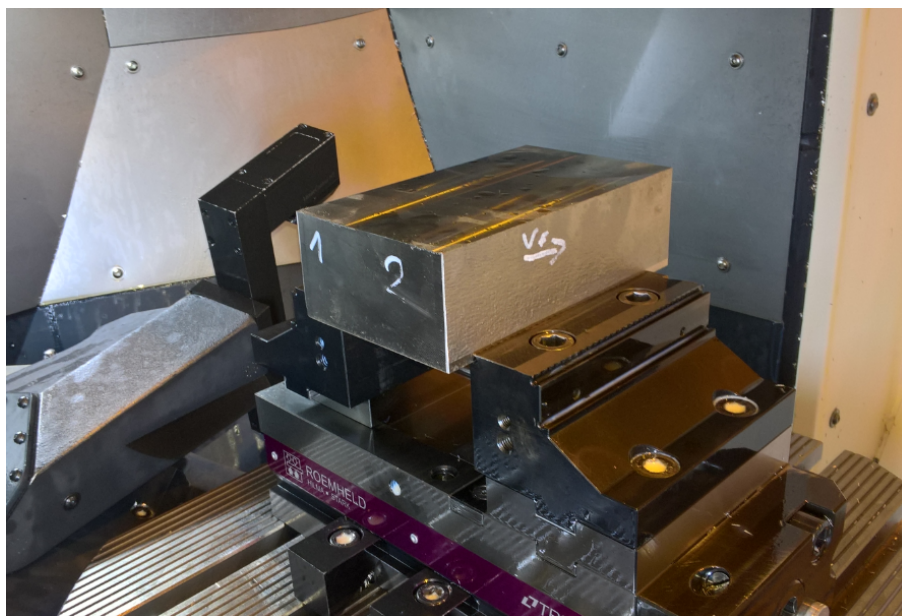


Obr. č. 19 - Původní Barkhausenovo uspořádání [17]

3 NÁVRH A REALIZACE VLASTNÍCH EXPERIMENTŮ

3.1 Polotovar

Materiál, který byl předmětem testování, byl dodán jako kovová tyč o průřezu 90x90 mm. Pro testovací účely bylo důležité tyč rozřezat na strojní pile na finální rozměry hranolu 90x90 mm o délce 150 mm. Tato délka odpovídala jednomu přejezdu pro testování.



Obr. č. 20- Polotovar upnutý ve svěráku

Chemické složení:

Ocel 17 241					
Prvek	C	Cr	Ni	Si	Mn
Obsah [%]	max 0,07	17-19,5	8-10,5	max 1,00	max 2,00

Prvek	P	S	N
Obsah [%]	max 0,045	max 0,015	max 0,11

Tab. č. 1- Chemické složení oceli 17 241

Tabulka znázorňuje chemické složení popsané v materiálové listu příslušné oceli 17 241.

3.2 Obráběcí centrum

Pro zjištění trvanlivosti nástrojů byl využit CNC stroj frézovací obráběcí centrum. Pro naše účely by byla postačující 3-osá frézka. Ve spolupráci s Regionálním technologickým

institutem byl vybrán pro testování stroj DMU 40 eVO linear, který je ve skutečnosti univerzální frézovací centrum, které využívá k obrábění 5 os. Chod obráběcího centra řídí system HEIDENHAIN.



Obr. č. 21- Univerzální frézovací centrum DMU 40 eVO linear

Max. pojezd v ose X	400 mm
Max. pojezd v ose Y	400 mm
Max. pojezd v ose Z	375 mm
Max. zatížitelnost stolu	250kg
Průměr stolu	480 mm

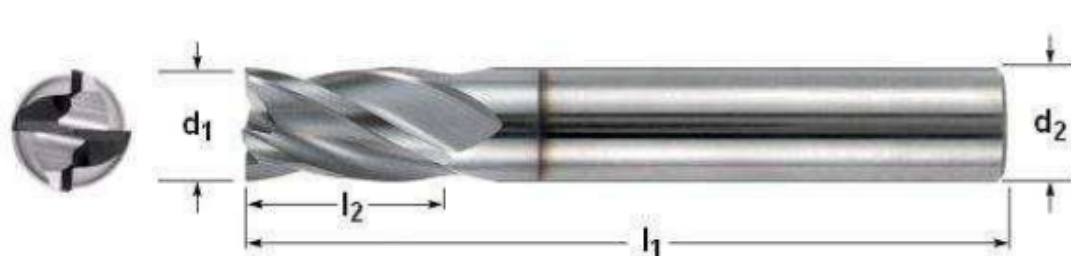
3.3 Testované nástroje

Pro experiment byly použity 3 typy fréz. Jednalo se o monolitní válcové frézy s různým stoupáním šroubovic. Jeden typ byl dodaný firmou NAVEL spol. s r. o., která měla nerovnoměrnou šroubovicí. Dalšími 2 typy byly nástroje s rovnoměrnými šroubovicemi 30° a 45°, které byly vyrobené a ověřené při obrábění inconelových slitin na Západočeské univerzitě v Plzni. Všechny nástroje měly průměr $D = 8$ mm a 4 břity. Pro preexperiment byly

opatřeny deponovanou vrstvou ALWIN (povlak CrAlSiN), v případě hlavního experimentu vrstvou TripleCoating Cr (povlak tvořený adhezí vrstvou TiN, středovou vrstvou AlTiN a vrchní nanokompozitní vrstvou CrAlSiN).

Fréza NAVEL

Testované nástroje byly dodány ve dvou variantách. Jedna varianta byla s předdepoziční úpravou a druhá bez předdepoziční úpravy. Mikrogeometrie byla změřena na opticko-skenovacím mikroskopu IFM G4, kde frézy s předdepoziční úpravou navykazovaly téměř žádný rozdíl proti frézám bez úprav. Změřené poloměry zaoblení ostří byly pro variantu s předdepoziční úpravou $r = 6,1 \mu\text{m}$ a pro variantu bez předdepoziční úpravy $r = 5 \mu\text{m}$ (protokoly viz přílohy práce). Proto bylo rozhodnuto všechny frézy považovat za totožné.

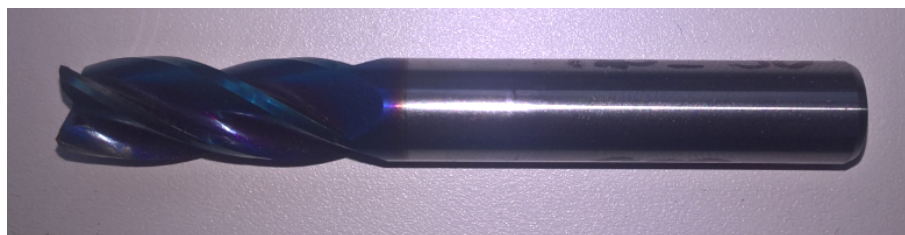


Obr. č. 22- Fréza NAVEL

Nástroj Navel	
Průměr	8 mm
Délka nástroje	64 mm
Délka břitu	19
Úhel čela v drážce	9°
Úhel hřbetu na obvodě	13°
Počet břitů	4
Stoupání šroubovice	48°, 50°

Tab. č. 2- Fréza NAVEL tabulka rozměrů

Fréza ZČU stoupání šroubovice 30°

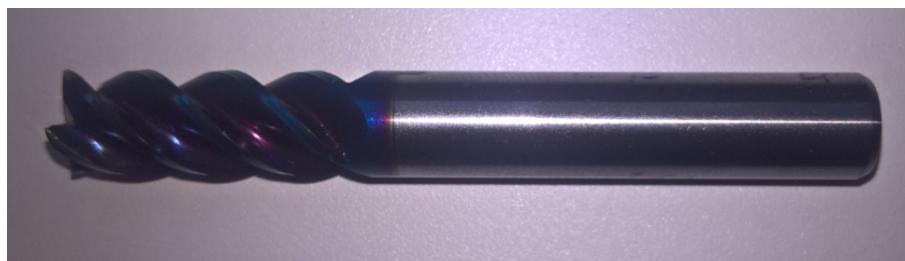


Obr. č. 23- Fréza ZČU stoupání šroubovice 30

Nástroj ZČU st. 30°	
Průměr	8 mm
Délka nástroje	60
Délka břitu	20
Úhel čela v drážce	9°
Úhel hřbetu na obvodě	10°
Počet břitů	4
Stoupání šroubovice	30°

Tab. č. 3- Fréza ZČU stoupání šroubovice 30° tabulka rozměrů

Fréza ZČU stoupání šroubovice 45°



Obr. č. 24 -Fréza ZČU stoupání šroubovice 45°

Nástroj ZČU st. 45°	
Průměr	8 mm
Délka nástroje	60
Délka břitu	20
Úhel čela v drážce	9°
Úhel hřbetu na obvodě	10°
Počet břitů	4
Stoupání šroubovice	45°

Tab. č. 4- Fréza ZČU stoupání šroubovice 45° tabulka rozměrů

3.4 Řezné podmínky

Preexperiment

Testování bylo zahájeno dle doporučených, katalogových řezných podmínek pro frézy FR z produkce firmy Navel. Preexperiment byl zahájen s řeznými podmínkami zachycenými v tabulce č. 5. V průběhu testování se tvořil nárůstek a opotřebení na hřbetu VB_B bylo

nevýrazné. Proto se přistoupilo ke změně řezných podmínek za účelem najít podmínky takové, při kterých bude opotřebení předvídatelné a nebude se břit vyštipovat nebo drodit.

Řezné podmínky - test 1	
v_c [m/min]	90
f_z [mm]	0,035
a_p [mm]	4
a_e [mm]	2,4
Chlazení	kapalina

Tab. č. 5- Řezné podmínky – Preexperiment test 1

Při snaze vyhnout se tvorbě nárůstku, bylo přikročeno ke zvýšení řezné rychlosti nad oblast intenzivní tvorby nárůstku. Ze zkušeností byla hodnota řezné rychlosti stanovena na $v_c = 240$ m/min. Bohužel po prvním přejezdu se ukázalo, že byl nástroj tepelně přetížený, docházelo k teplotním šokům a ostří bylo poznamenáno řadou křehkých lomů.

Řezné podmínky - test 2	
v_c [m/min]	240
f_z [mm]	0,035
a_p [mm]	4
a_e [mm]	2,4
Chlazení	kapalina

Tab. č. 6- Řezné podmínky – Preexperiment test 2

Po předchozím neúspěšném pokusu najít optimální řezné podmínky se stanovily nové parametry. Pro snížení silového zatížení nástroje se zmenšila hodnota přísuvu a_e na 1 mm, snížila se také řezná rychlost na $v_c = 190$ m/min

Řezné podmínky - test 3	
v_c [m/min]	190
f_z [mm]	0,035
a_p [mm]	4
a_e [mm]	1
Chlazení	kapalina

Tab. č. 7- Řezné podmínky – Preexperiment test 3

Opotřebení nástrojů při řezných podmínkách dle tab. č. 7 bylo stále nevýrazné a nepodařilo se vyhnout vzniku nárůstku. To vedlo k rozhodnutí změnit způsob chlazení. Místo procesní kapaliny byl proces chlazen stlačeným vzduchem.

Řezné podmínky - test 4	
v_c [m/min]	90
f_z [mm]	0,035
a_p [mm]	4
a_e [mm]	1
Chlazení	vzduch

Tab. č. 8- Řezné podmínky – Preexperiment test 4

Poslední test spočíval ve sledování intenzity opotřebení při různých řezných rychlostech při obrábění jedním nástrojem s cílem určit řezné podmínky pro hlavní experiment a sledovala se intenzita opotřebení v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti.

Řezné podmínky - test 5	
v_c [m/min]	90; 190; 240
f_z [mm]	0,035
a_p [mm]	4
a_e [mm]	1
Chlazení	kapalina

Tab. č. 9- Řezné podmínky – Preexperiment test 5

Závěr preexperimentu

Z preexperimentu vyplynulo, že pro hlavní experiment bude zvolena řezná rychlost v_c z intervalu 70 – 80 m/min. Důvodem je snížení teploty řezání a vyhnutí se oblasti intenzivní tvorby nárůstku. Dále bude zvýšen posuv na zub f_z s cílem zvýšit tlak na zub nástroje, což by mělo přinést intenzivnější opotřebení nástrojů.

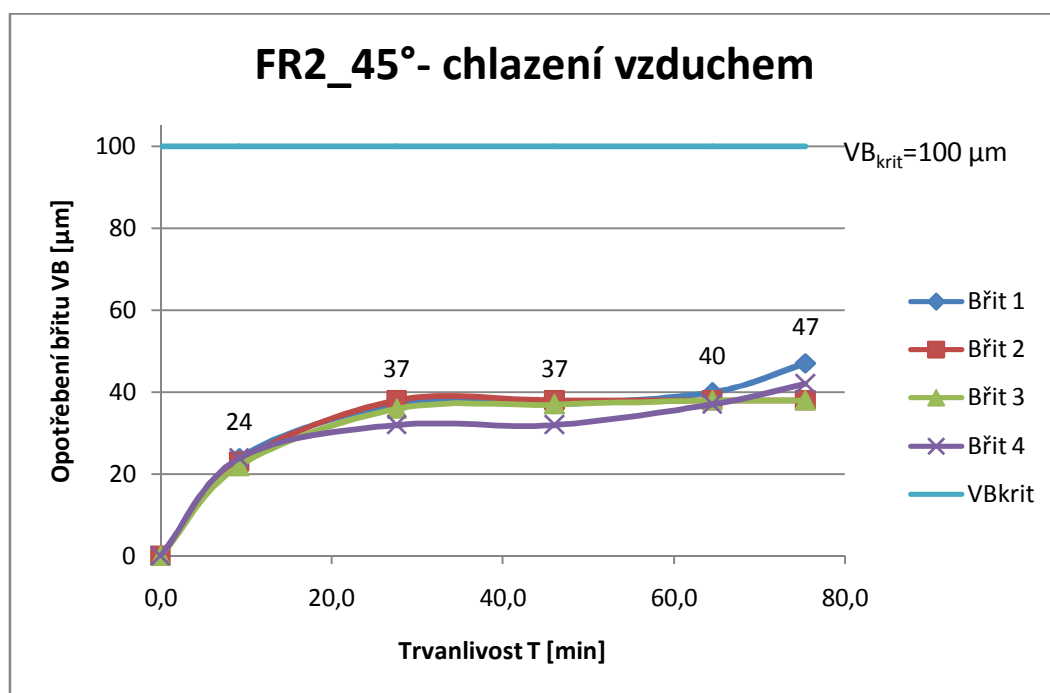
Hlavní experiment

Pro hlavní experiment byla stanovena řezná rychlost $v_c = 75$ m/min a posuv na zub $f_z = 0,06$ mm. Pro porovnání vlivu chlazení byly nástroje testovány při chlazení procesní kapalinou a stlačeným vzduchem.

Kriteriální opotřebení bylo stanoveno na základě zkušeností. Hodnota rovnoměrného opotřebení hřbetu VB_{krit} je $100 \mu\text{m}$ a hodnota kritického opotřebení hřbetu je VB_{Nkrit} je $200 \mu\text{m}$.

Řezné podmínky - test 1		Řezné podmínky - test 2	
v_c [m/min]	75	v_c [m/min]	75
f_z [mm]	0,06	f_z [mm]	0,06
a_p [mm]	4	a_p [mm]	4
a_e [mm]	1	a_e [mm]	1
Chlazení	kapalina	Chlazení	vzduch

Tab. č. 10- Řezné podmínky – Hlavní experiment test 1 a 2



Graf č. 1– Univerzitní fréza FR2_45°- závislost opotřebení na trvanlivosti T

Jelikož ani po 75 minutách řezu nebylo dosaženo limitního opotřebení (viz graf č. 1) a na nástroji se stále tvořil nárůstek, přistoupilo se ke zvýšení posuvu na zub $f_z = 0,1$ mm, aby se zvýšil tlak na břit a eliminován se vznik nárůstku.

Řezné podmínky - test 3		Řezné podmínky - test 4	
v_c [m/min]	75	v_c [m/min]	75
f_z [mm]	0,1	f_z [mm]	0,1
a_p [mm]	4	a_p [mm]	4
a_e [mm]	1	a_e [mm]	1
Chlazení	kapalina	Chlazení	vzduch

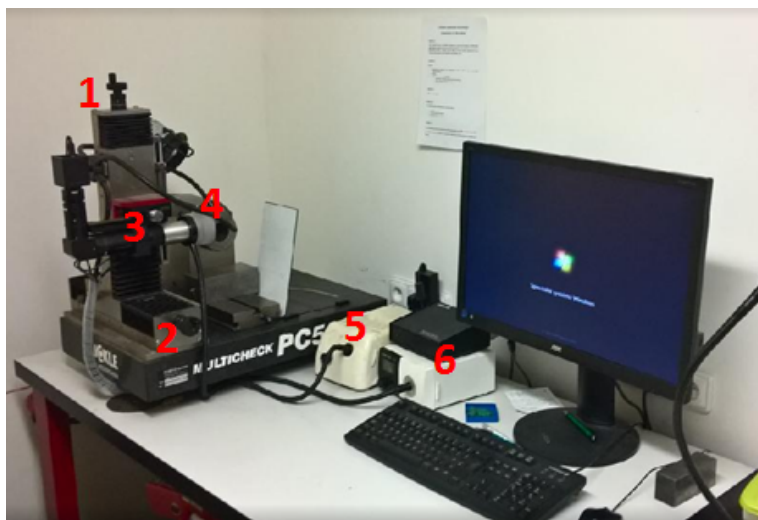
Tab. č. 11- Řezné podmínky – Hlavní experiment test 3 a 4

3.5 Procesní kapalina [20]

Jako procesní kapalina pro obrábění bylo použito standardní médium, které se využívá při obrábění na strojích v laboratoři Regionálního technologického institutu. Tím byla vodou mísitelná sloučenina oleje Blasocut BC 35 Kombi SW o koncentraci 5-8%. Jedná se o minerální olej bez obsahu chlóru. Tato univerzální řezná kapalina je určena pro obrábění a broušení oceli, slitiny hliníku a litiny. Koncentrát obsahuje vápník, který působí protipěnění.

3.6 Mikroskop MultiCheck

Opotřebení bylo měřeno na mikroskopu Multicheck PC500, který je vybaven objektivem a dokáže snímat detaily ve vysokém rozlišení. Jeho součástí je plynulý pojezd v osách x a y (0 – 150 mm). Je možné měřit opotřebení rotačních i nerotačních nástrojů. Pro vyhodnocení opotřebení byl využit software WMS. Bylo možné tak nástroj pomocí objektivu vyfotit a uložit snímek pro další zpracování v počítači.



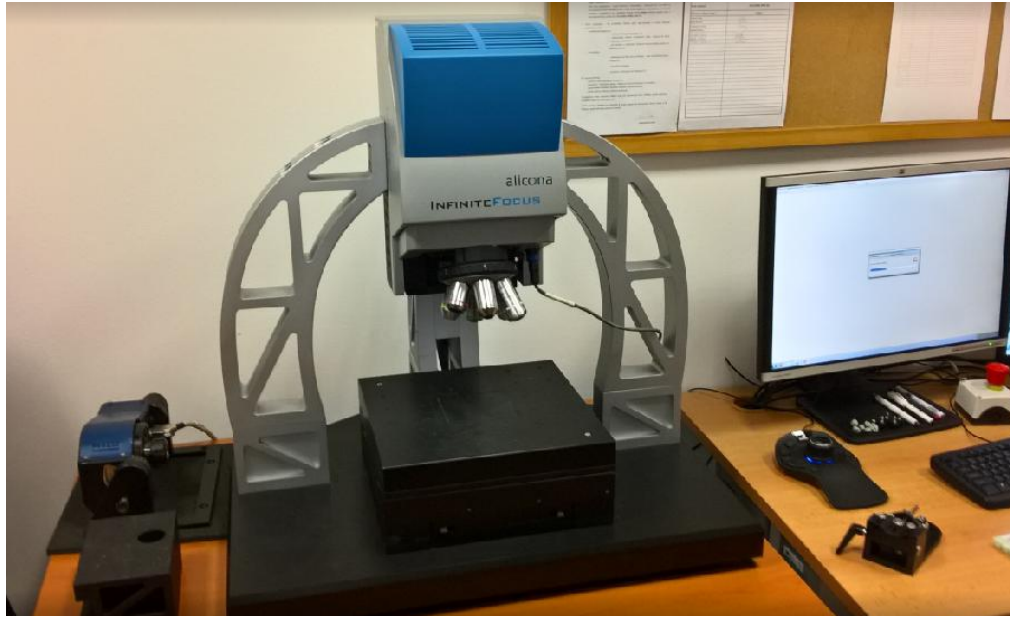
Popis pracoviště mikroskopu:

- 1- posuv v ose y
- 2- posuv v ose x
- 3- zaostřování
- 4- objektiv
- 5- zdroj pro bodové osvětlení
- 6- zdroj hlavního osvětlení

Obr. č. 25- Mikroskop MultiCheck PC500

3.7 Měření drsnosti [21]

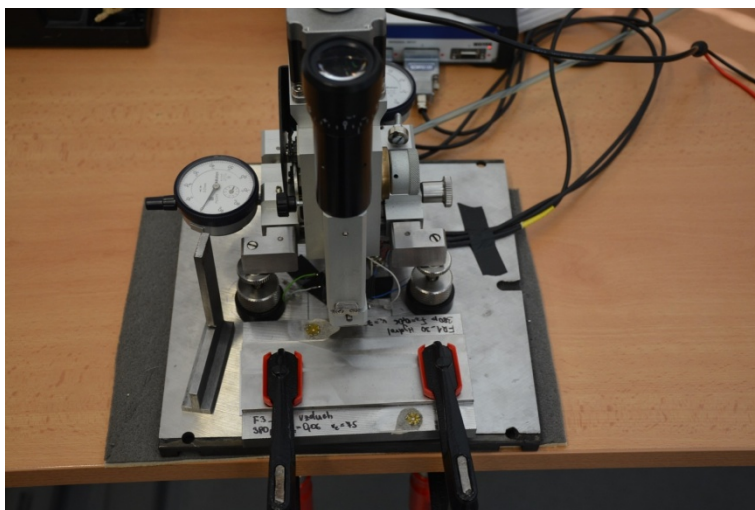
Díky přístroji IFM G4 je možné zajistit topografii povrchu, spolu s její skutečnou barevnou informací. Integrované měření tvaru a drsnosti jak ve 2D, tak i ve 3D, je hlavní výhodou přístroje. Tím dochází ke skloubení funkcionality několika podobných měřicích zařízení. Výstupem měření jsou názorné a přehledné protokoly.



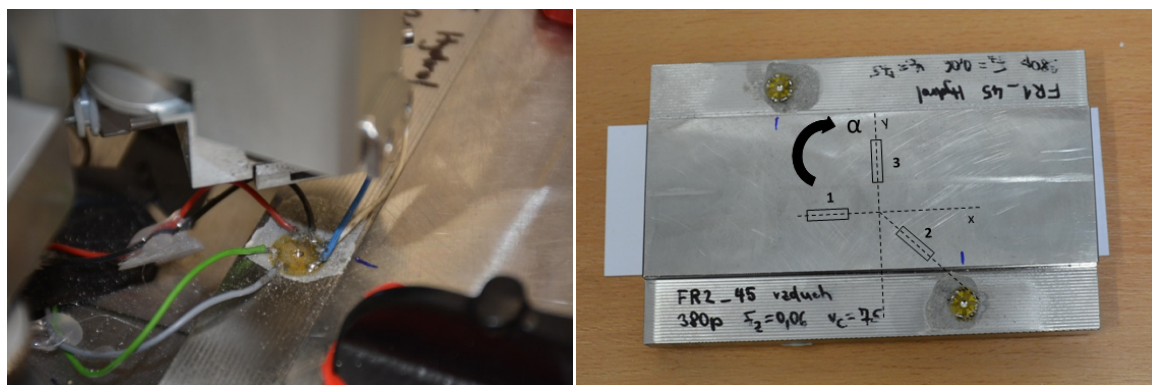
Obr. č. 26– Opticko-skenovací mikroskop IFM G4

3.8 Měření zbytkového pnutí

Měření zbytkových napětí na obrobených površích je provedeno zařízením SINT MTS3000 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). Primárně byla měřena deformace pomocí tenzometrické růžice. Tato naměřená deformace je zpracovávána softwarem Eval, který z naměřených deformací vypočítá hlavní napětí v měřeném místě. Při výpočtu se používají různé způsoby interpolace hodnot naměřených deformací. Podle použitého polynomu na interpolaci, pak vychází různé křivky průběhu napjatosti.



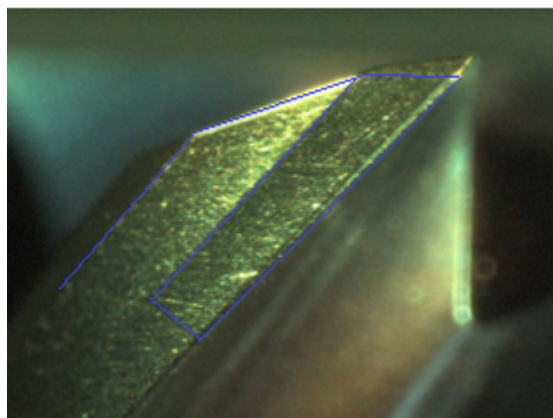
Obr. č. 27– Upnutí měřeného vzorku v přístroji MTS3000 RESTAN



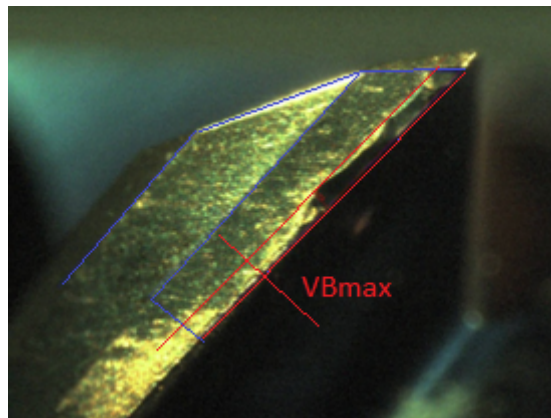
Obr. č. 28– Schéma zapojení tenzometrů při odvrtávací metodě.

Na výše uvedených obrázcích lze sledovat schéma zapojení tenzometrické růžice. Byly použity 3 tenzometry, které budou zaznamenávat pnutí v materiálu v průběhu odvrtávání do hloubky 1 mm. Pomocí této metody je možné vyhodnotit maximální a minimální napětí. Dále bude možné sledovat úhel natočení hl. napětí od osy Y.

4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH SUMARIZACE



Obr. č. 29- Nový břit s maskou



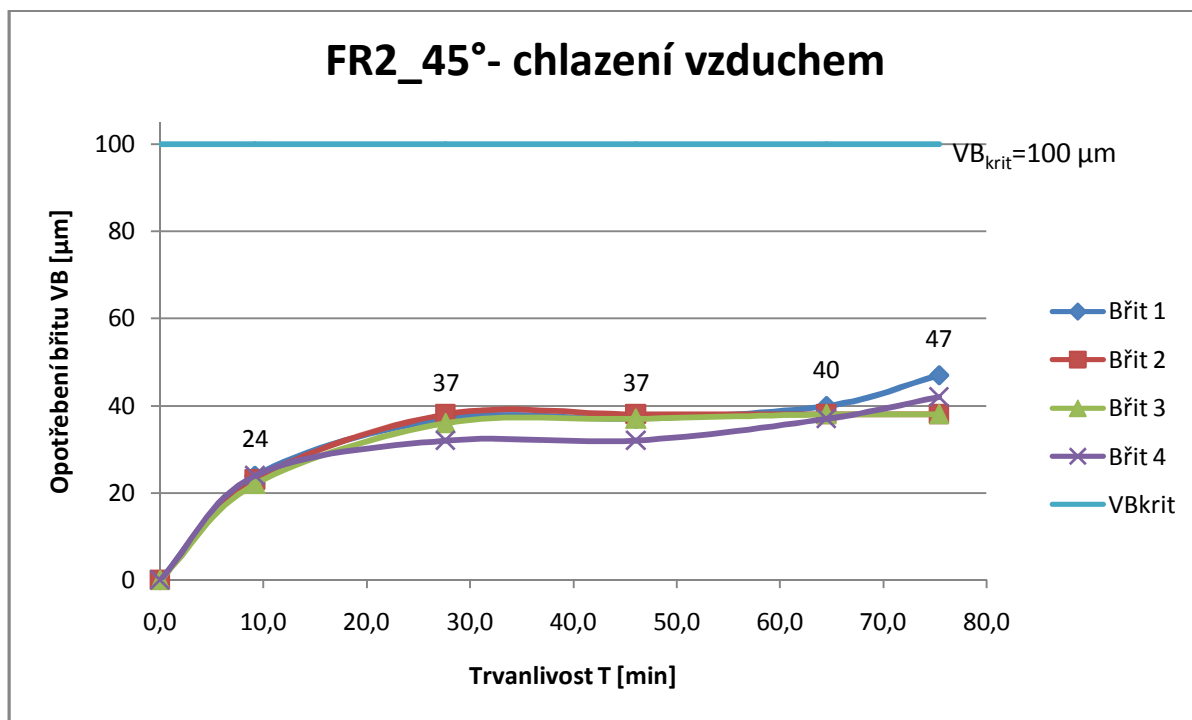
Obr. č. 30- Opotřebený břit – měření opotřebení

Obr. č. 29 znázorňuje břit nástroje ve stavu dodaném od výrobce. Snímek je proveden za pomoci dílenského mikroskopu Multicheck se zvětšením 120x. Tímto prvním krokem bylo u všech testovaných nástrojů zkontrolováno, zda jsou břity před započítáním testování v pořádku. Dalším krokem je metodika kontroly, kdy se pro každý břit zvlášť nakreslí tzv. maska, která zajistí opakovanou kontrolu břitu a to v předem nastavené poloze.

Pokud je jednou maska nastavená, tzn. nakreslená kontura původního břitu, snadno se pak změří velikost opotřebení v dalších fázích testu. Vzniklé opotřebení se měří pomocí kótování v softwaru, který řídí dílenský mikroskop. Od pravé hrany masky se nastaví rovnoběžka, která je posunuta do pozice velikosti vzniklého opotřebení a tím se vrátí hodnota tohoto opotřebení.

Experimenty byly vždy přerušovány, aby byly změřeny průběžné výsledky opotřebení v závislosti na čase. Testy byly ukončeny z různých důvodů. Buď došlo k dosažení kritického opotřebení, tzn. vylomení břitu. Nebo byl experiment ukončen z časových důvodů, kdy ani po dlouhodobém testování se hodnota opotřebení neblížila zvolenému limitu.

Hodnoty opotřebení byly zaznamenány do grafů, které znázorňují závislost velikosti opotřebení na čase. V Grafu č. 2 jsou zachyceny průběhy nárůstu opotřebení u všech břitů nástroje FR2. Tento graf je pro ilustraci nárůstu opotřebení značně nepřehledný. Pro přehlednost jsou dále v práci uvedeny zjednodušené grafy. U každého nástroje je vybrán břit prezentující nárůst opotřebení celého nástroje. Zobrazené křivky patří břitu s největší hodnotou opotřebení.



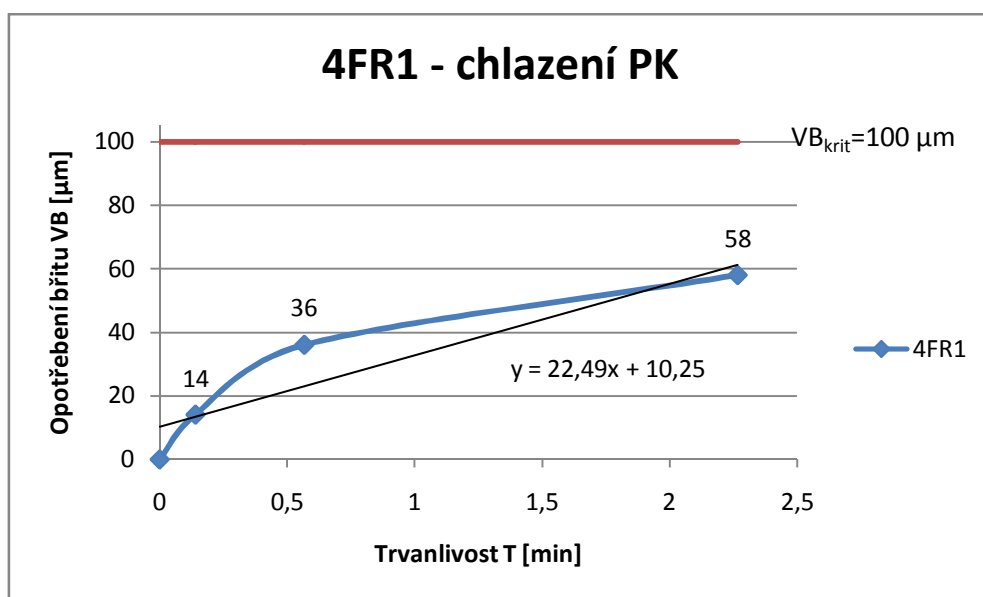
Graf č. 2– Graf se 4 křivkami opotřebení pro nástroj FR2_45°-hlavní experiment

Z grafu č. 2 je patrné, že se křivky překrývají a bylo by velice nepřehledné poznámenávat čtyři hodnoty opotřebení v jednom okamžiku. Z tohoto důvodu se pro vizualizaci vyhodnocovaných nástrojů vybral jen jeden břit a to ten nejvíce opotřeбенý.

4.1 Preexperiment

4.1.1 4FR1 chlazení PK, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,035 \text{ mm}$, $a_p = 4 \text{ mm}$, $a_e = 2,4 \text{ mm}$

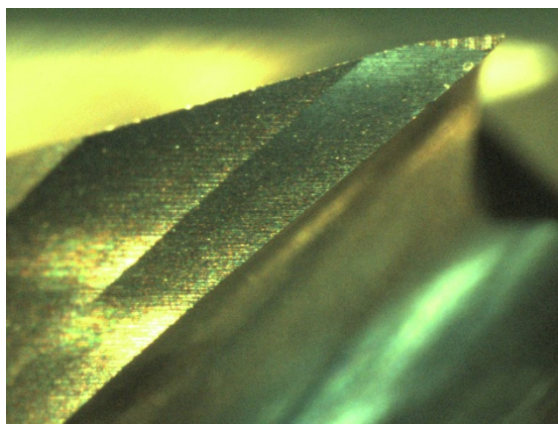
První nástroj, testovaný v rámci preexperimentu, byla fréza testovaná při parametrech viz výše. Fréza obráběla 2,3 minuty strojního času, to odpovídá 16 přejezdům. Po tomto čase dosahovalo opotřebení na hřbetu $58 \mu\text{m}$. Testování bylo přerušeno z důvodu vyštípnutí špičky na břit číslo 1. V grafu č.3 je zobrazen nejvíce opotřebovaný břit číslo 2, kde je patrný postupný trend narůstu opotřebení na hřbetu. Vyštípnutí špičky bylo pravděpodobně způsobeno tvorbou nestabilního nárůstku.



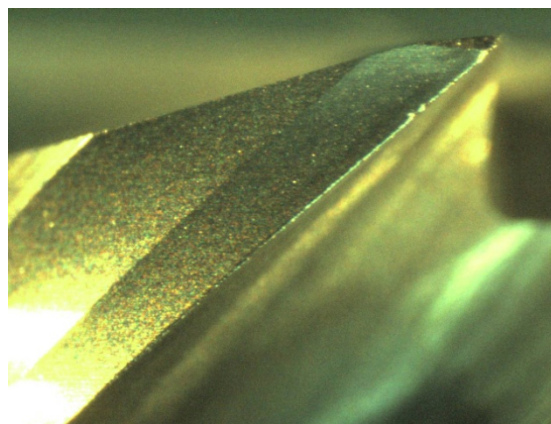
Graf č. 3- Průběh opotřebení na nástroji 4FR1, břit 2

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 58 \mu\text{m}$



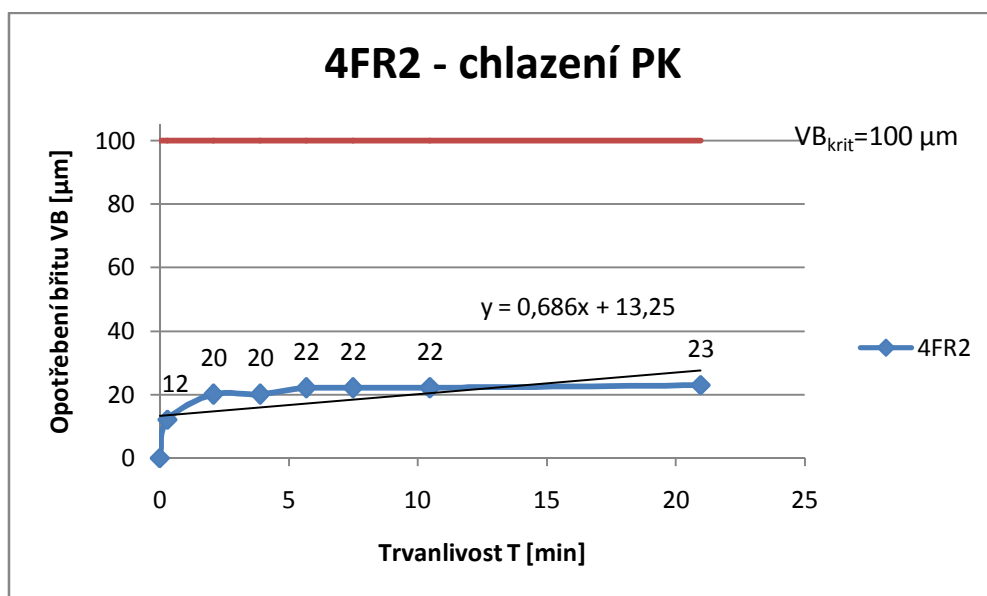
Obr. č. 31- Nový břit č. 2, 4FR1



Obr. č. 32- Opotřebovaný břit č. 2, 4FR1

4.1.2 4FR2 chlazení PK, $v_c = 190 \text{ m/min}$, $f_z = 0,035 \text{ mm}$, $a_p = 4 \text{ mm}$, $a_e = 1 \text{ mm}$

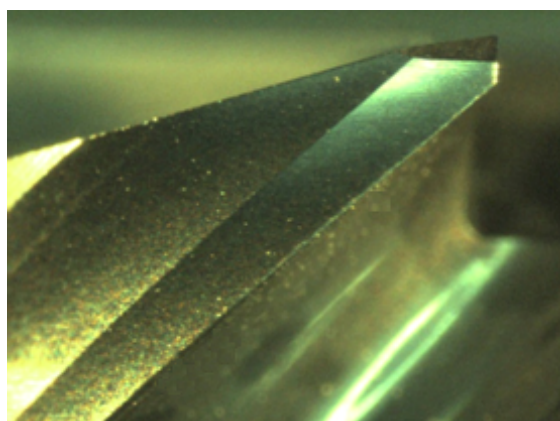
Další testovaný nástroj byla fréza se stejnou makrogeometrií jako v předchozím testu. Rozdíl v testech je ve volbě odlišných řezných podmínek. Nástroj obráběl 21 minut strojního času. Bylo dosaženo opotřebení na hřbetu pouhých $23 \mu\text{m}$. Další testování bylo přerušeno z časových důvodů a neměnosti opotřebení v závislosti na čase obrábění. V grafu je zobrazen nejvíce opotřebovaný břit číslo 3. Lze vyčíst, že v průběhu obrábění nedochází k žádné zásadní změně v opotřebení na hřbetu.



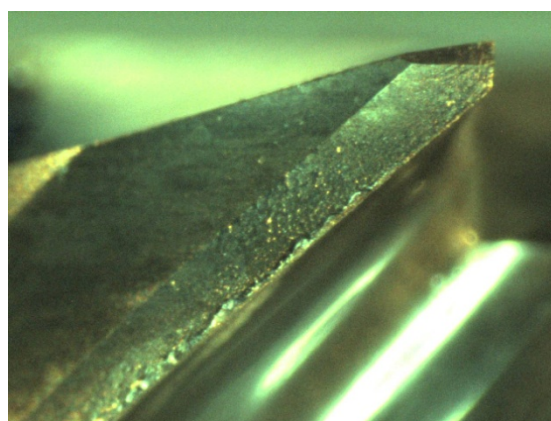
Graf č. 4- Průběh opotřebení na nástroji 4FR2, břit 3

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 23 \mu\text{m}$



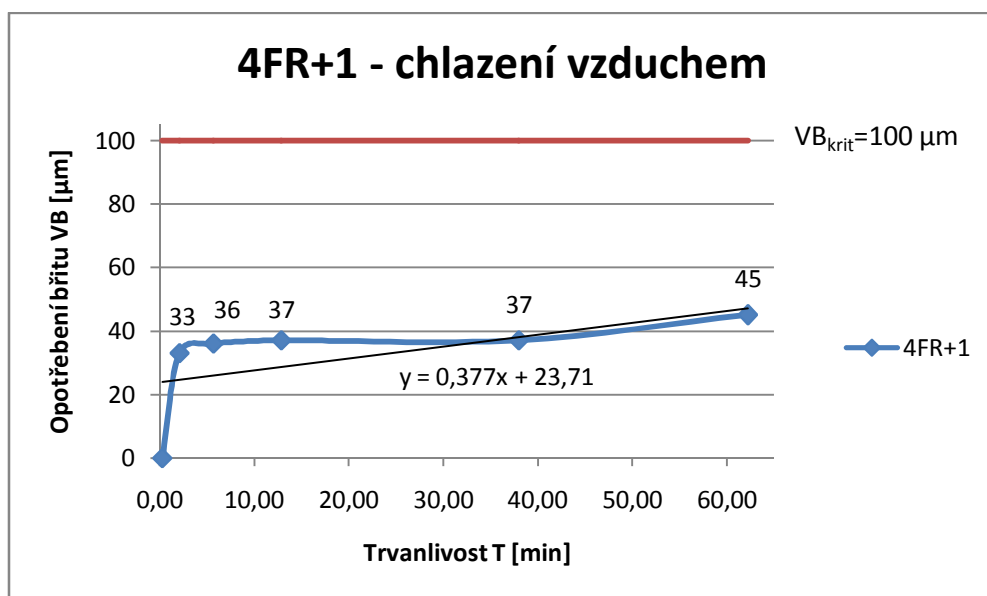
Obr. č. 33- Nový břit č. 4, 4FR+1



Obr. č. 34- Opotřebovaný břit č. 4, 4FR+1

4.1.3 4FR+1 chlazení vzd., $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,035 \text{ mm}$, $a_p = 4 \text{ mm}$, $a_e = 1 \text{ mm}$

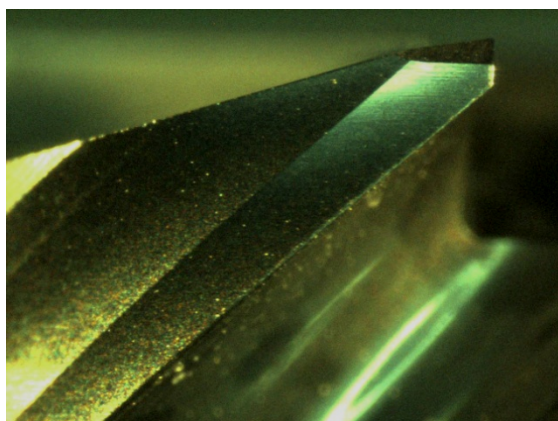
Tato fréza byla podrobena delšímu testování než v předchozích případech. I v tomto případě se jednalo o malé opotřebení. Nástroj obráběl 62 minut strojního času odpovídající 208 přejezdům. I v tomto případě nebylo dosaženo limitního opotřebení. Opotřebení po více jak hodině odpovídalo $45 \mu\text{m}$. V grafu je znázorněn břit číslo 4, kde lze vidět trend opotřebení na hřbetu. Během obrábění se tvořil nestabilní nárůstek, který byl nejčastěji odstraňován při očištění nástroje plastickou hmotou.



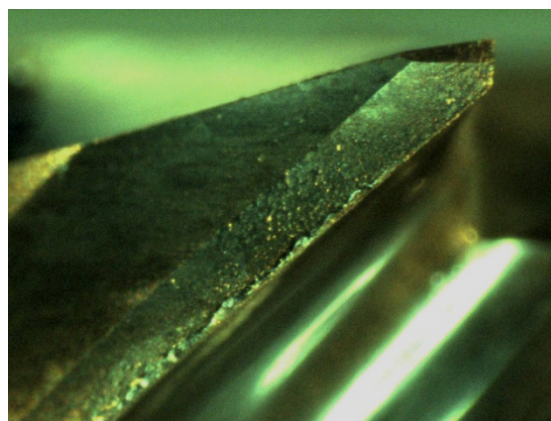
Graf č. 5-Průběh opotřebení na nástroji 4FR+1, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 45 \mu\text{m}$



Obr. č. 35- Nový břit č. 4, 4FR+1_45°

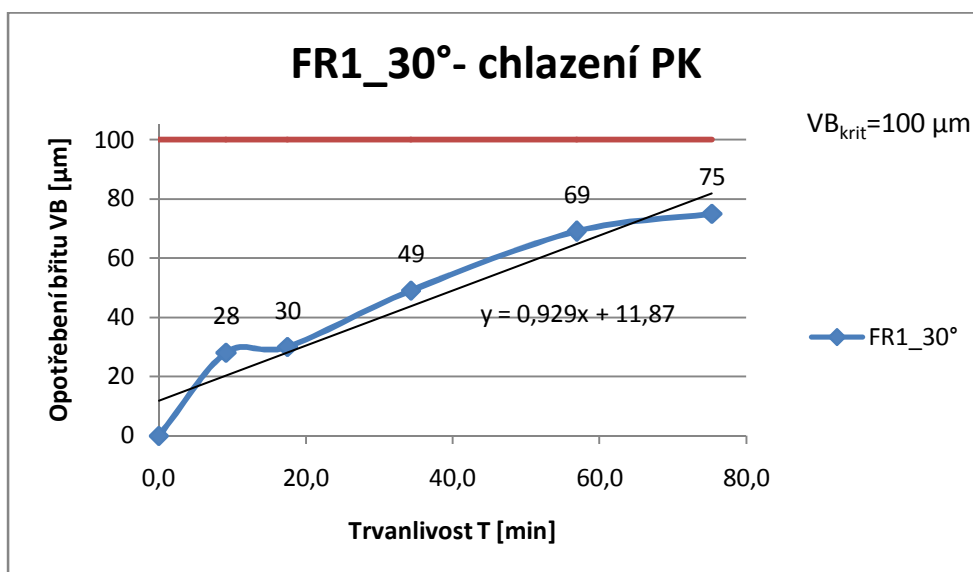


Obr. č. 36- Opotřebený břit č. 4, 4FR+1_45°

4.2 Hlavní experiment

4.2.1 Nástroj FR1_30° - chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min

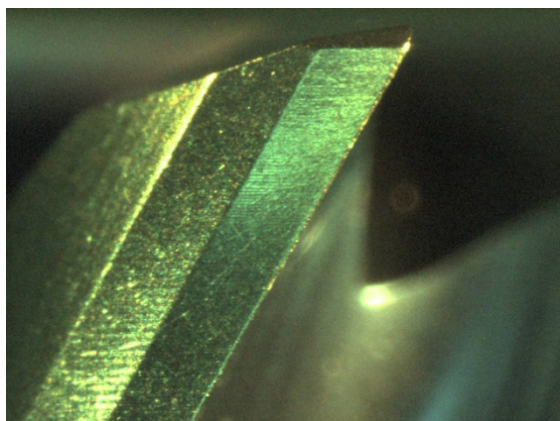
Nástroj obráběl 75 minut strojního času, to odpovídá 360 přejezdům. Po tomto čase dosahovalo opotřebení na hřbetu 75 μ m. Přesto, že nebylo dosaženo přednastaveného limitního opotřebení, bylo testování z časových důvodů přerušeno a nasazen další nástroj. V grafu je zobrazen nejvíce opotřeбенý břit číslo 4, kde je vidět postupný trend nárůstu opotřebení na hřbetu. Během obrábění se tvořil nestabilní nárůstek.



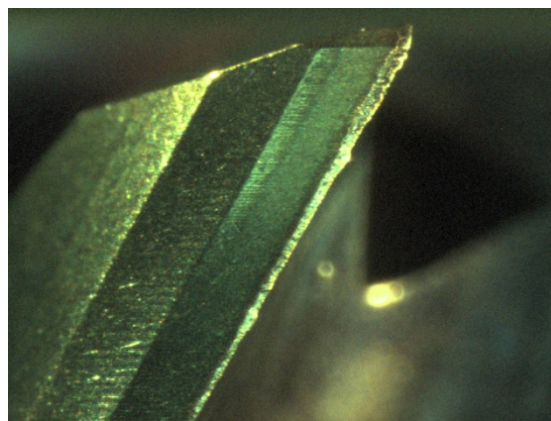
Graf č. 6- Průběh opotřebení na nástroji FR1_30°, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 75\mu$ m



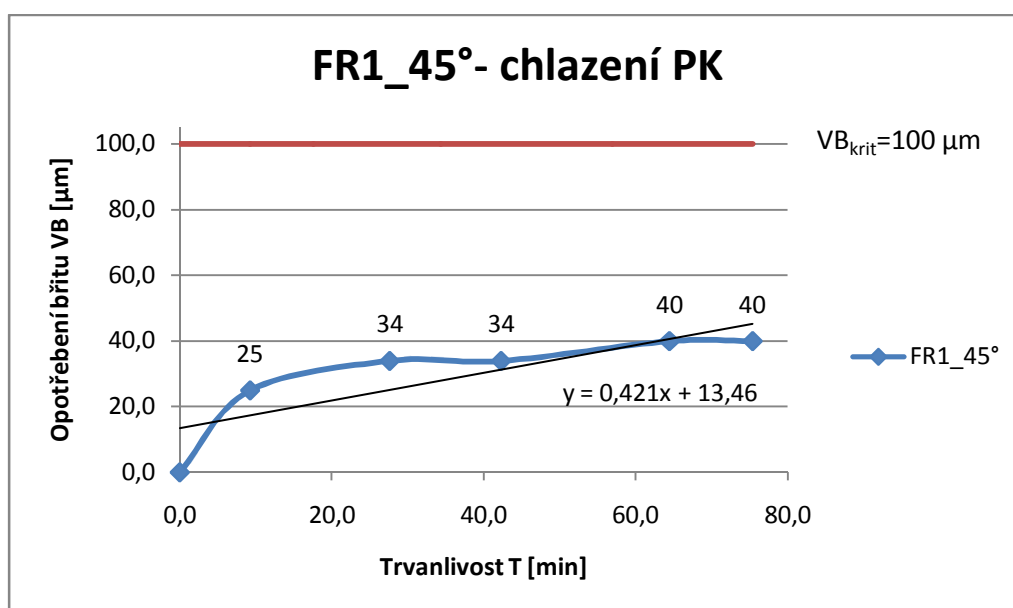
Obr. č. 37- Nový břit č. 4, FR1_30°



Obr. č. 38- Opotřeбенý břit č. 4, FR1_30°

4.2.2 Nástroj FR1_45° - chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06$ mm, $v_c = 75$ m/min

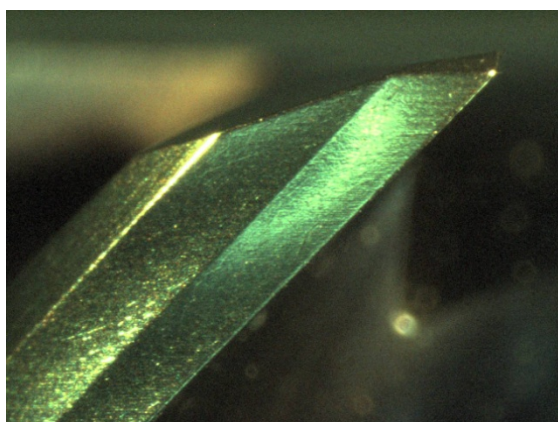
Dalším testovaným nástrojem byla univerzitní fréza se stoupáním šroubovice 45°. Stejně jako u předchozího testu se provedlo 360 přejezdů, které odpovídají 75 minutám strojního obrábění. Po tomto čase byla hodnota dosaženého opotřebení 40 μm . Maximální opotřebení bylo opět nízké, proto byl experiment přerušen a nasazen nový nástroj. V grafu je zobrazen nejvíce opotřeбенý břit číslo 2, kde je vidět trend nárůstu opotřebení na hřbetu. Během obrábění se opět tvořil nestabilní nárůstek, což v tomto případě nevedlo k vyštipování břitu.



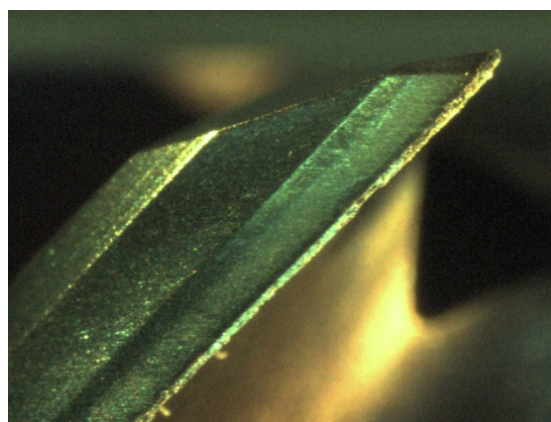
Graf č. 7- Průběh opotřebení na nástroji FR1_45°, břit 2

Základní tvar

Opotřeбенý $VB_B = 40 \mu\text{m}$



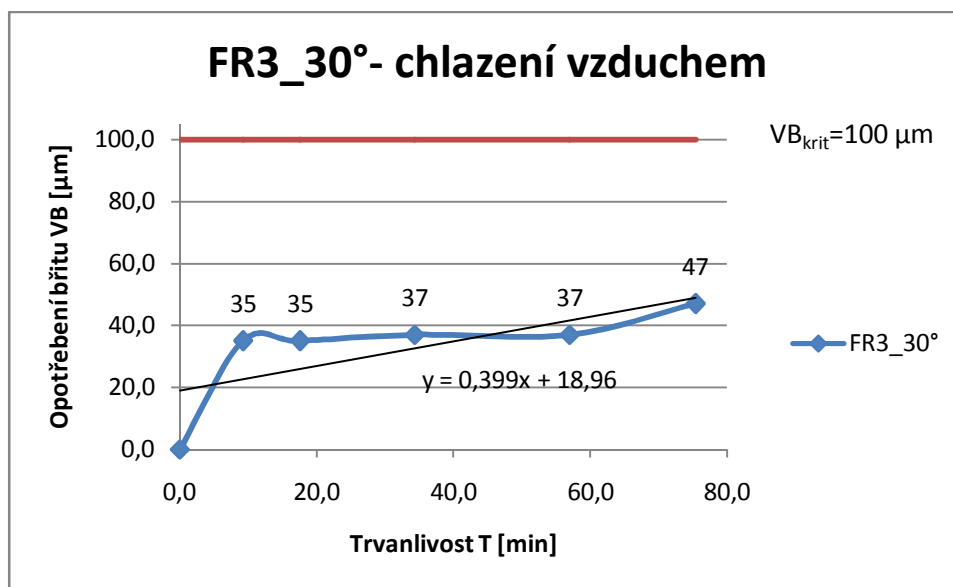
Obr. č. 39- Nový břit č. 2, FR1_45°



Obr. č. 40- Opotřeбенý břit č. 2, FR1_45°

4.2.3 Nástroj FR3_30° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

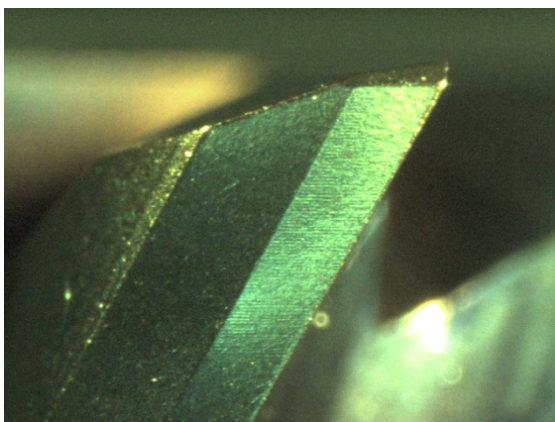
Další test bylo opakování experimentu s frézou, která měla stoupaní šroubovice 30°. Jediný rozdíl je vynechání chlazení procesní kapalinou. Výsledkem experimentu bylo poznání, že ani tato fréza nedosáhla limitního opotřebení po 75 minutách obrábění. Po tomto čase bylo dosažené opotřebení 47 μm . V grafu je zobrazen nejvíce opotřeбенý břit číslo 4, kde je vidět postupný trend narůstu opotřebení na hřbetu. Během obrábění se tvořil nestabilní nárůstek, který byl pokaždé odstraněn při očištění nástroje před kontrolou geometrie na mikroskopu.



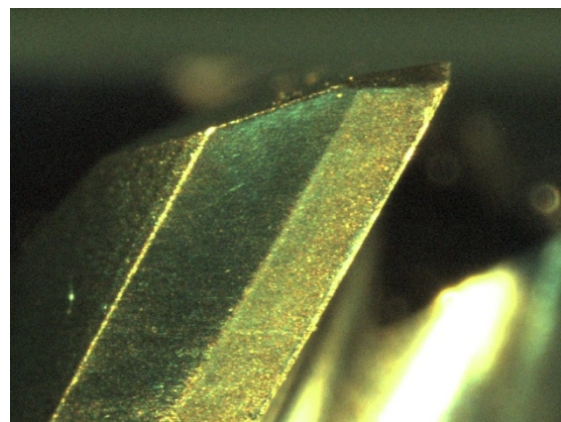
Graf č. 8- Průběh opotřebení na nástroji FR3_30°, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 47 \mu\text{m}$



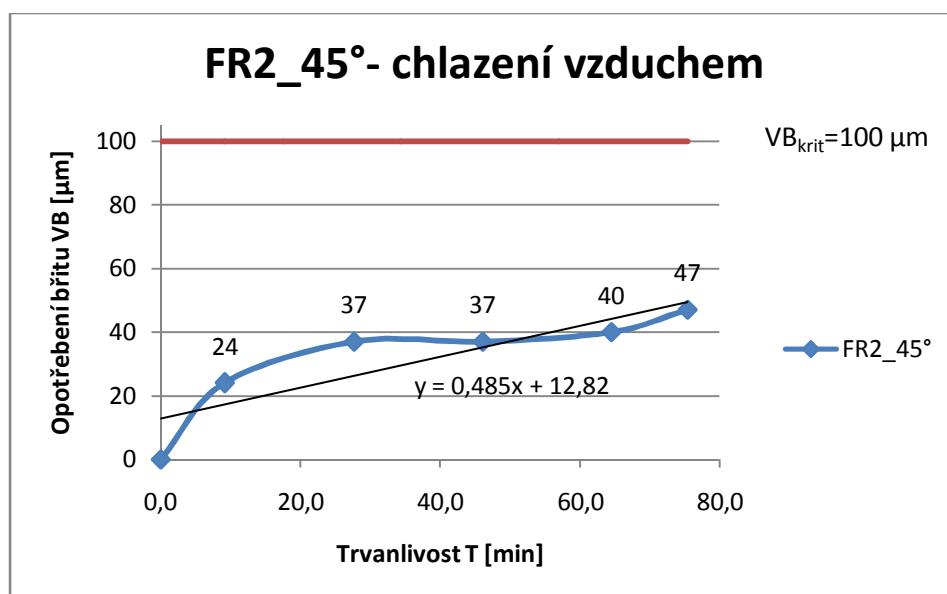
Obr. č. 41- Nový břit č. 4, FR3_30°



Obr. č. 42- Opotřeбенý břit č. 4, FR3_30°

4.2.4 Nástroj FR2_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

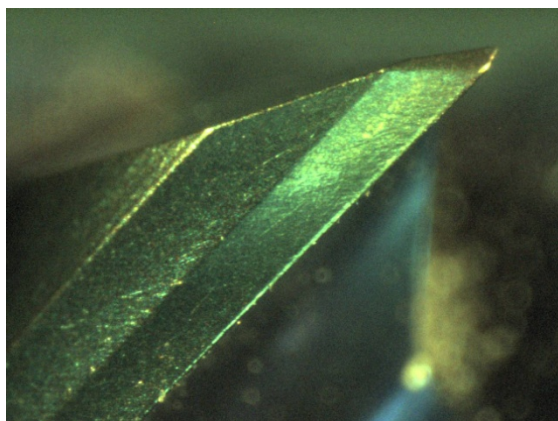
Stejně jako nástroj s 30° stoupáním šroubovice, testovaný jak s chlazením chladicí kapalinou, tak bez ní, byl ve stejném duchu testován nástroj se stoupáním šroubovice 45°. Nástroj pracoval opět 75 minut. Po tomto čase se dosáhlo opotřebení 47 μm . I v tomto případě nebylo dosaženo nastaveného limitního opotřebení. Z časových důvodů se test přerušil a byl započat nový test s jiným nástrojem. Z grafu lze odečíst trend nárůstu opotřebení. Zdroj dat pro tvorbu grafu byly naměřené hodnoty opotřebení z nejméně opotřebeného břitu číslo 2. Během obrábění se tvořil nestabilní nárůstek, který se objevoval při chlazení vzduchem častěji než u chlazení kapalinou.



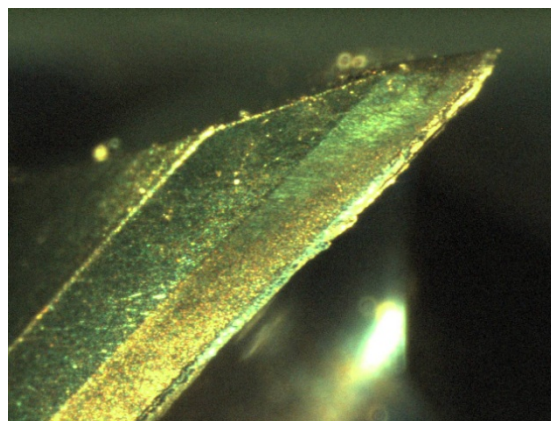
Graf č. 9- Průběh opotřebení na nástroji FR2_45°, břit 1

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 47 \mu\text{m}$



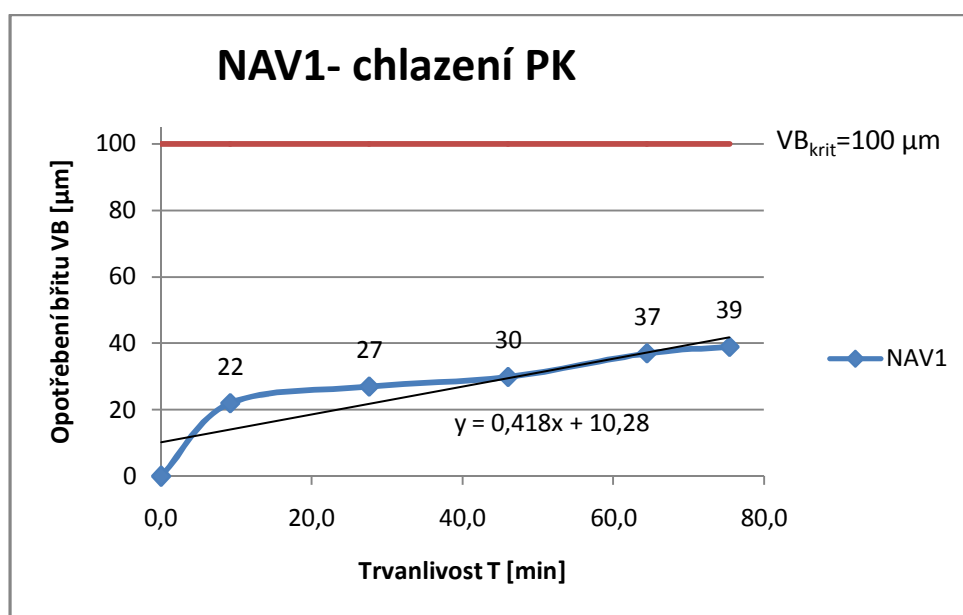
Obr. č. 43- Nový břit č. 2, FR2_45°



Obr. č. 44- Opotřebený břit č. 2, FR2_45°

4.2.5 Nástroj NAV1 – chlazení procesní kapalinou, $f_z = 0,06 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

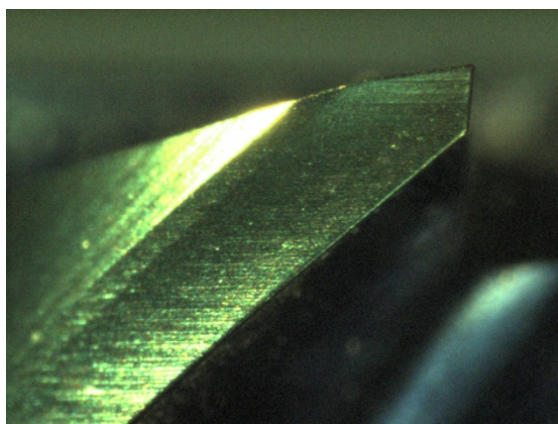
Nástroj, označený NAV1, je fréza dodaná společností Navel. Má nerovnoměrnou geometrii stoupání šroubovic. Nástroj obráběl 75 minut strojního času, to odpovídá 360 přejezdům. Po tomto čase dosahovalo opotřebení na hřbetu nástroje pouhých $39 \mu\text{m}$. Opět nebylo dosaženo nastavené limitní opotřebení, proto bylo testování z časových důvodů přerušeno a nasazen další nástroj. V grafu je znázorněn nejvíce opotřebovaný břit číslo 4. Je zde patrný trend opotřebení na hřbetu, který se lineárně zvyšoval. Opotřebení je téměř zanedbatelné.



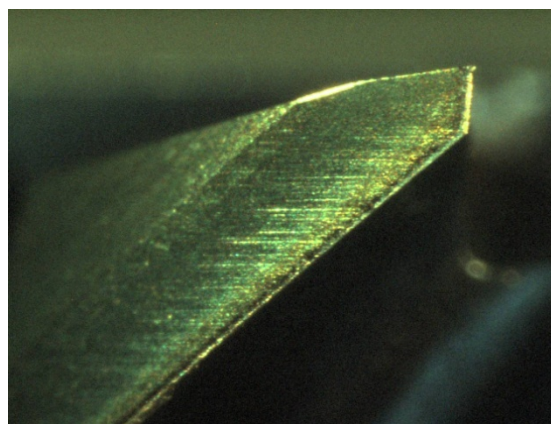
Graf č. 10- Průběh opotřebení na nástroji NAV1, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 39 \mu\text{m}$



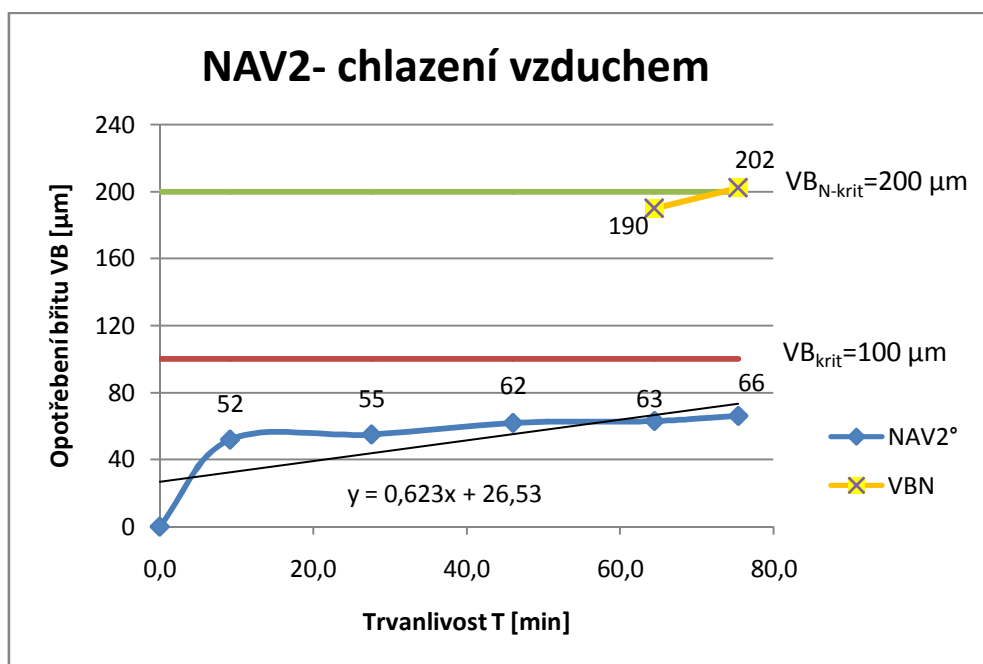
Obr. č. 45- Nový břit č. 4, NAV1



Obr. č. 46- Opotřebovaný břit č. 4, NAV1

4.2.6 Nástroj NAV2 - chlazení vzduchem, $f_z = 0,06 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

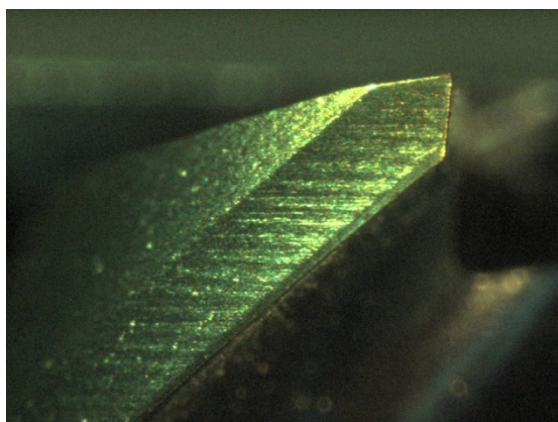
Další testovaná fréza NAV2 má identickou geometrii jako NAV1. Jediný rozdíl s předchozím testem je v typu chlazení, a to změna na chlazení vzduchem. Nástroj opět obráběl 75 minut, kdy dosáhl kritického opotřebení $VB_B = 66 \mu\text{m}$ a $VB_N = 202 \mu\text{m}$. V grafu je znázorněn nejvíce opotřebovaný břit č. 4. Je zde patrný trend opotřebování na hřbetu, který se projevoval již od samého počátku experimentu. Z počátku testu se opotřebení dostalo na hodnotu $50 \div 60 \mu\text{m}$. Zhruba po hodině obrábění se začalo projevovat vyštípnutí na špičce, které se nakonec rozšířilo na kritický lom viz. obr. 48.



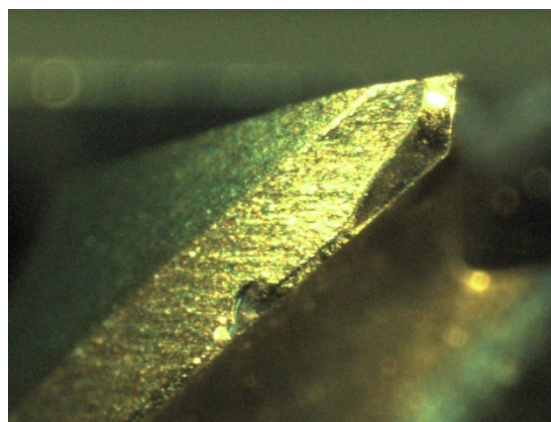
Graf č. 11- Průběh opotřebení na nástroji NAV2, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_N = 202 \mu\text{m}$, $VB_B = 66 \mu\text{m}$



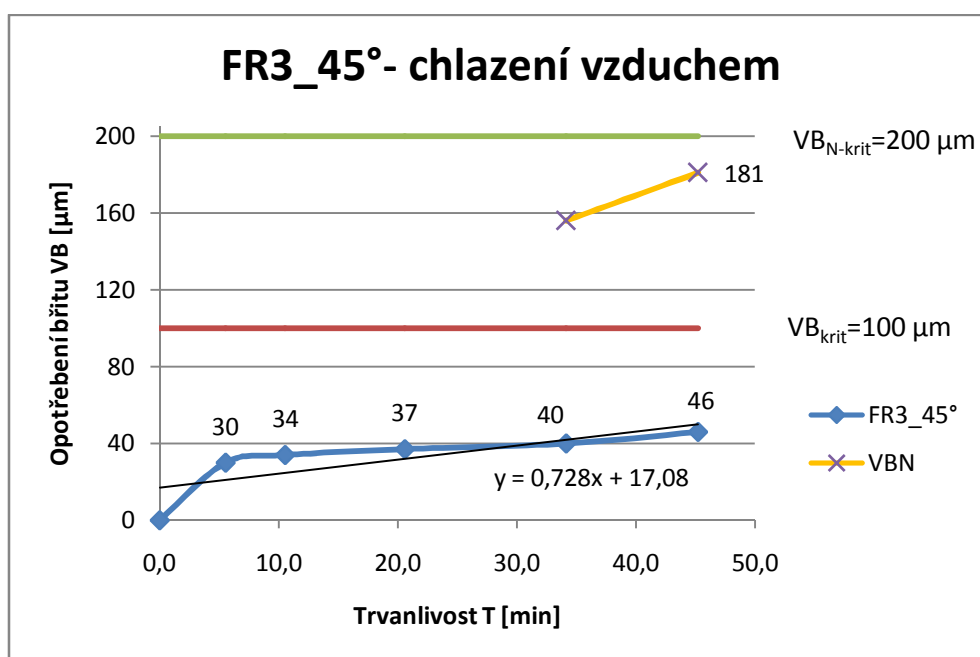
Obr. č. 47- Nový břit č. 4, NAV2



Obr. č. 48- Opotřebovaný břit č. 4, NAV2

4.2.7 Nástroj FR3_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

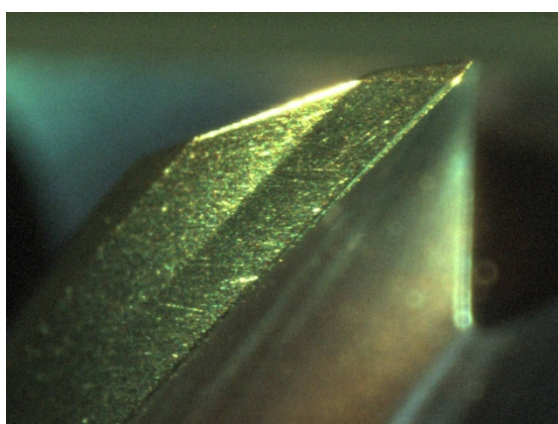
Fréza FR3_45° byla jako první vybrána pro experimentování za vyšších podmínek posuvů na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$. Pro vizualici byl vybrán břit č. 4, ostatní břity viz příloha. Graf č. 12 znázorňuje trend opotřebovávání. První tři průběžná měření otupení byla velmi nízká a téměř totožná mezi hodnotami 30-37 μm . Při dalších dvou měření došlo k deformaci na špičce břitu, které nedosáhlo kritického opotřebování, proto se dále pokračovalo v experimentu, dokud jsme nedosáhli 360 přejezdů. Při vyšších podmínkách posuvu na zub, to znamená 45 min. Maximální opotřebování dosáhlo $VB_B = 46 \mu\text{m}$ a $VB_N = 181 \mu\text{m}$.



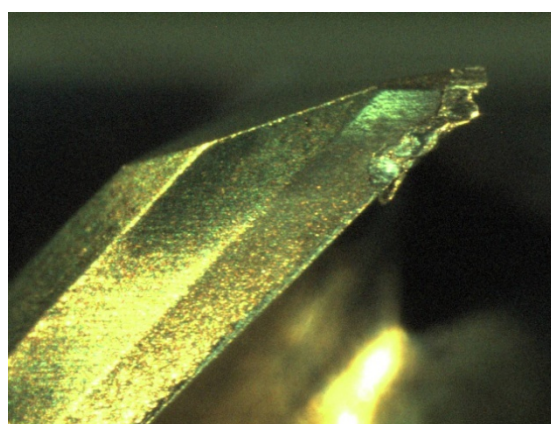
Graf č. 12- Průběh opotřebování na nástroji FR3_45°, břit 4

Základní tvar

Opotřebování $VB_B = 46 \mu\text{m}$, $VB_N = 181 \mu\text{m}$



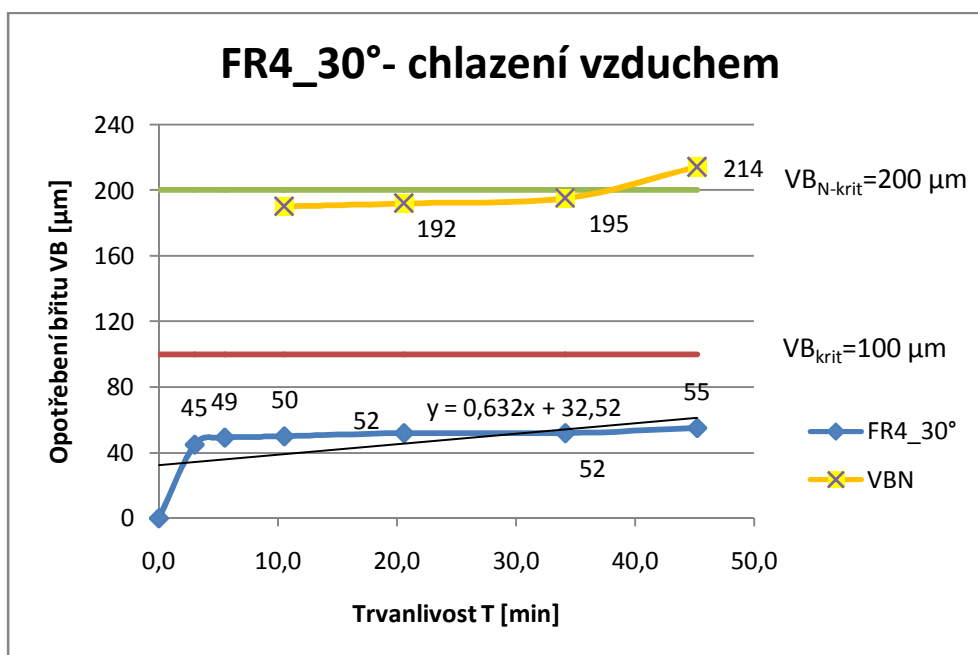
Obr. č. 49- Nový břit č. 4, FR3_45°



Obr. č. 50- Opotřebovaný břit č. 3, FR3_45°

4.2.8 Nástroj FR4_30° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

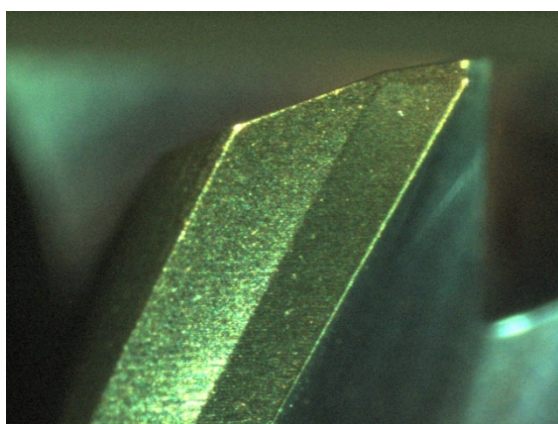
Tento nástroj byl také vybrán pro testování za vyšších podmínek posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ mm}$. Pro vizualizaci byl vybrán břit 2, který se opotřebovával nejvíce. Ostatní břity měly nízké opotřebení, viz přílohy. Nástroj obráběl 45 minut strojního času. Zhruba po 10 minutách obrábění se na břitu číslo 2 projevilo vyštípnutí o velikosti $190 \mu\text{m}$. Velikost deformace nedosáhla kritické deformace, proto bylo rozhodnuto pokračovat v experimentu. Na konci testu bylo maximální opotřebení $VB_B = 55 \mu\text{m}$ a $VB_N = 214 \mu\text{m}$, tzn., že bylo dosaženo kritického opotřebení (viz obr. č. 52).



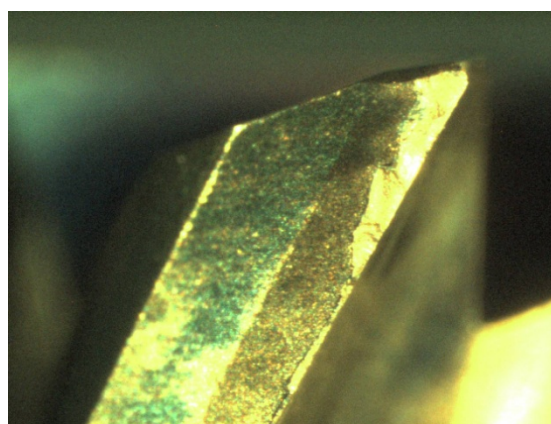
Graf č. 13- Průběh opotřebení na nástroji FR4_30°, břit 2

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 55 \mu\text{m}$, $VB_N = 214 \mu\text{m}$



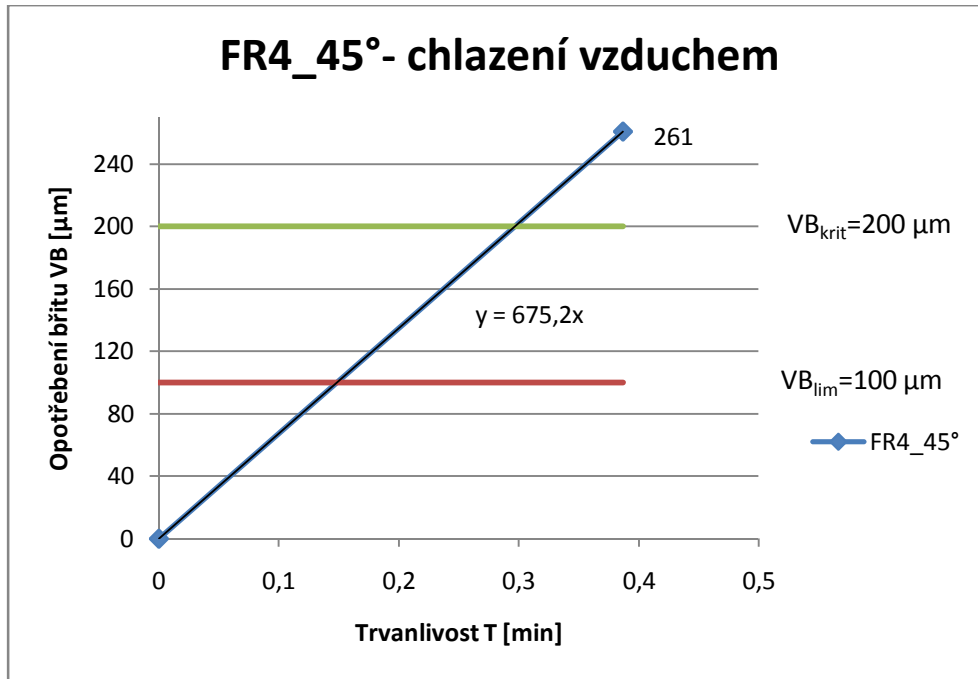
Obr. č. 51- Nový břit č. 2, FR4_30°



Obr. č. 52- Opotřebovaný břit č. 2, FR4_30°

4.2.9 Nástroj FR4_45° - chlazení vzduchem, $f_z = 0,13 \text{ mm}$, $v_c = 75 \text{ m/min}$

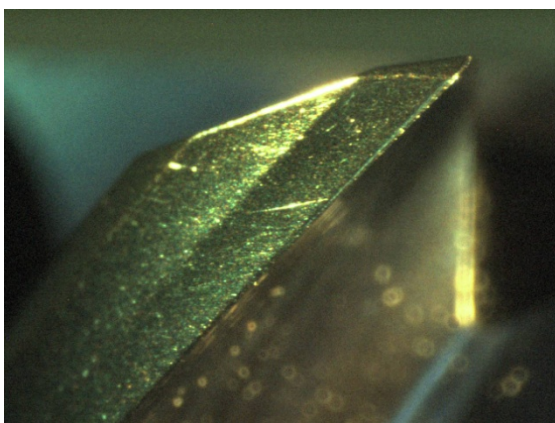
Test za vyšších podmínek posuvu na zub $f_z = 0,13 \text{ mm}$ byla další varianta experimentu. Nástroj byl vyřazen z dalšího testování téměř okamžitě. Po 24 sekundách došlo ke kritickému opotřebení $VB_N = 261 \text{ }\mu\text{m}$. Ke kritickému vyštípnutí na břitu č. 2. došlo z důvodu trojnásobně vyššího posuvu na zub než je doporučná katalogová hodnota.



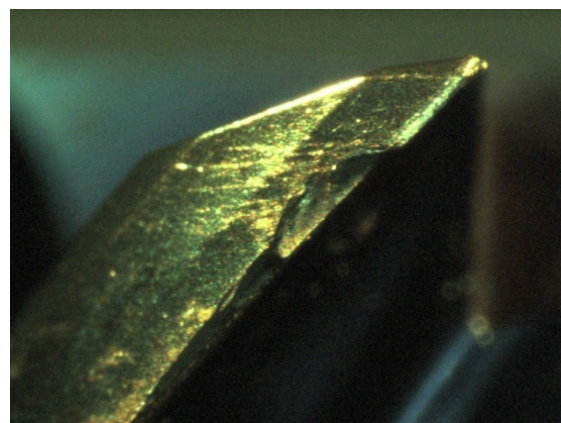
Graf č. 14- Průběh opotřebení na nástroji FR4_45°, břit 2

Základní tvar

Opotřebení $VB_N = 261 \text{ }\mu\text{m}$



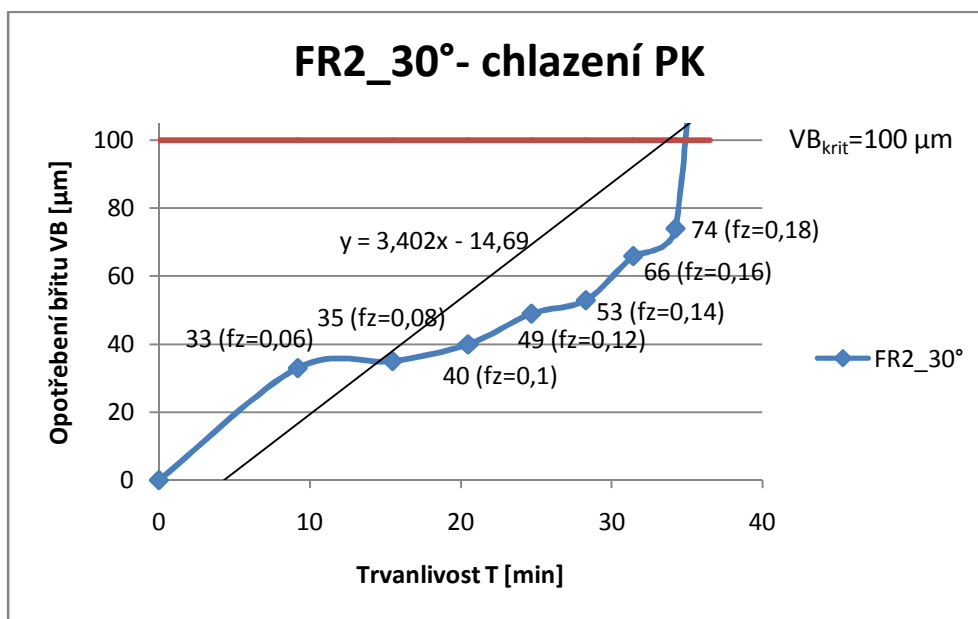
Obr. č. 53- Nový břit č. 2, FR4_45°



Obr. č. 54- Opotřeбенý břit č. 2, FR4_45°

4.2.10 Nástroj FR2_30° - chlazení procesní kapalinou, variabilní fz, $v_c = 75 \text{ m/min}$

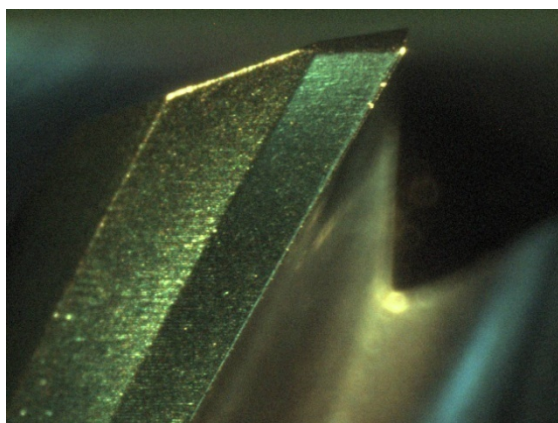
Nástroj FR2_30° byl vybrán pro testování s postupným navyšováním posuvu na zub v intervalech 40 přejezdů. Začínalo se posuvem na zub $f_z = 0,06 \text{ mm}$, tomuto parametru příslušela hodnota opotřebení $33 \text{ }\mu\text{m}$. Posuv na zub se postupně zvyšoval, až na hodnotu $f_z = 0,18 \text{ mm}$, kdy bylo opotřebení $74 \text{ }\mu\text{m}$. V testování se pokračovalo až na hodnotu $f_z = 0,2 \text{ mm}$, kdy již došlo k vylámání všech břitů.



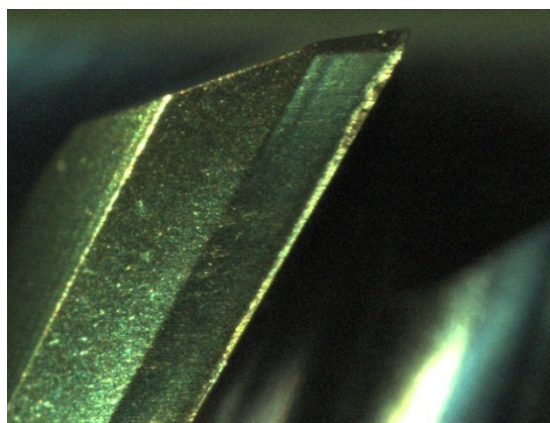
Graf č. 15- Průběh opotřebení na nástroji FR2_30°, břit 4

Základní tvar

Opotřebení $VB_B = 74 \text{ }\mu\text{m}$



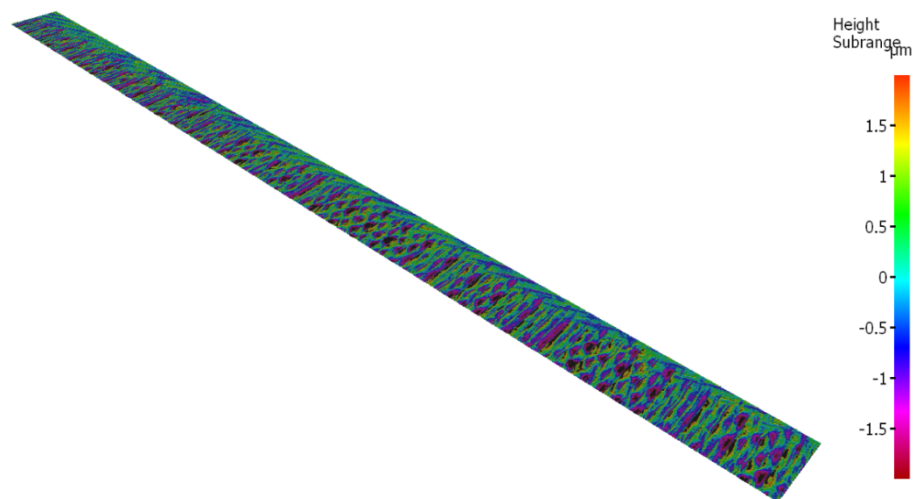
Obr. č. 55- Nový břit č. 4, FR2_30°



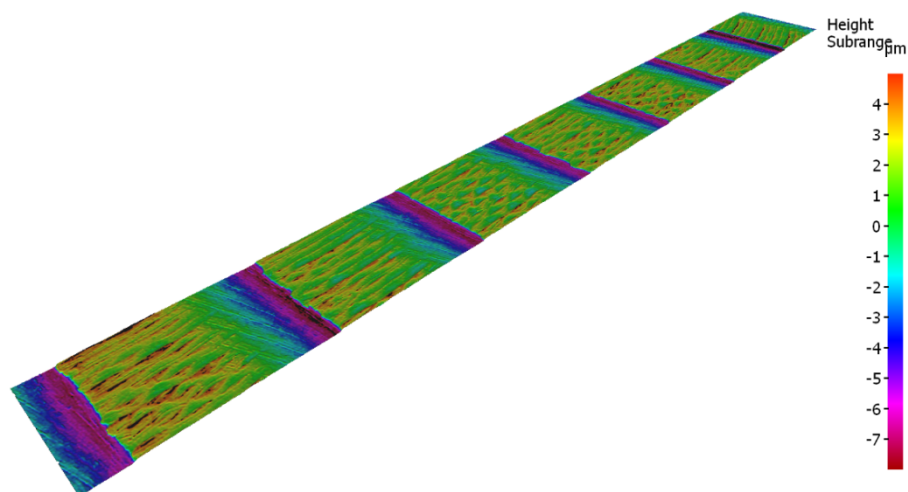
Obr. č. 56- Opotřeбенý břit č. 4, FR2_30°

4.3 Vyhodnocení drsnosti

Každá plocha byla měřena ve dvou směrech, podélném se směrem posuvu nástroje a kolmém ke směru posuvu. Přestože se má podle normy vyhodnocovat drsnost povrchu v kolmém směru na směr posuvu nástroje, bylo vzhledem k záběrovým podmínkám přistoupeno i k měření podélnému se směrem posuvu. Výsledky drsnosti v kolmém směru jsou ovlivněny zachycením vlnitosti povrchu, který vznikl vlivem malých přísuvů ($a_e = 1 \text{ mm}$). Vlnitost je způsobena plastickou deformací materiálu a vlivem přísuvů.



Obr. č. 57– Podélné měření drsnosti



Obr. č. 58– Kolmé měření drsnosti, zachycena vlnitost vlivem přísuvů

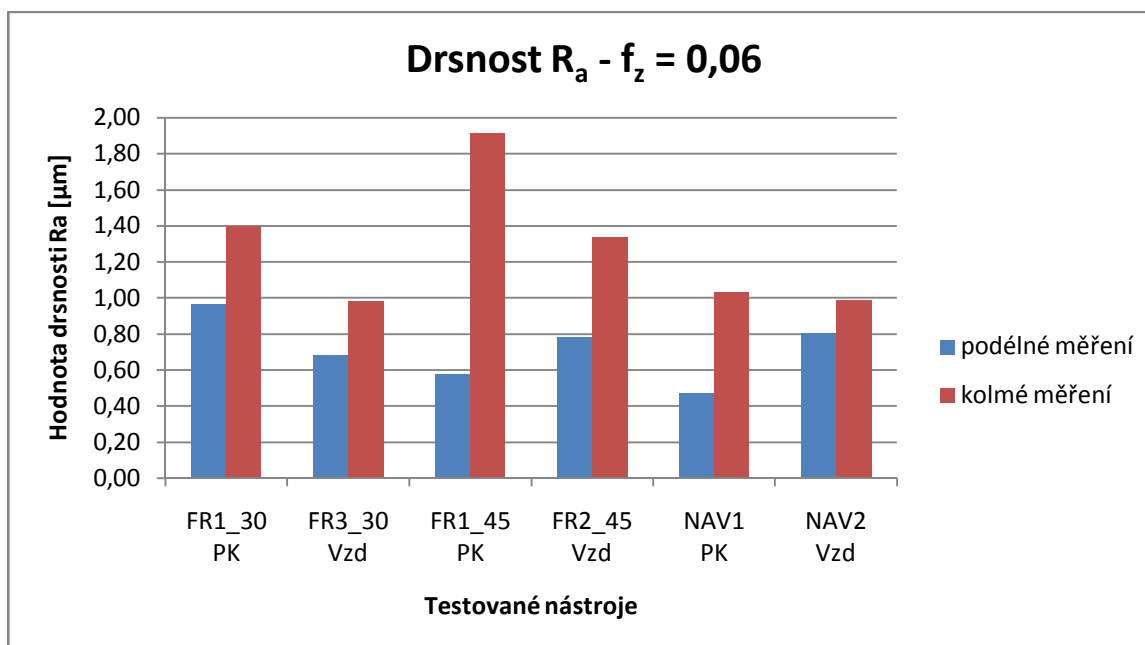
4.3.1 Plochy obráběné $f_z = 0,06$ mm

Drsnost byla měřena na plochách, které byly obráběny stejným parametrem posuvu na zub $f_z = 0,06$ mm, řezná rychlost byla taktéž konstanta, $v_c = 75$ m/min. Jednalo se tedy o 3 plochy obráběné při chlazení procesní kapalinou (nástroje NAV1, FR1_30, FR1_45) a 3 plochy obráběné při chlazením vzduchem (nástroje NAV2, FR3_30, FR2_45).

Porovnáním výsledků střední aritmetické odchylky profilu bylo zjištěno, že nejlepší výsledky drsnosti R_a má nástroj s označením NAV1 ($R_a = 0,47 \mu\text{m}$). Fréza vykazovala lepší drsnost povrchu pravděpodobně z důvodu antivibrační vlastnosti nerovnoměrné šroubovice. V korelaci s výsledky opotřebení lze prohlásit, že horší drsnosti povrchu byly naměřeny na plochách obrobenými více opotřeбенými nástroji.

Drsnost R_a - $f_z = 0,06$ mm						
Ra [μm]	FR1_30	FR3_30	FR1_45	FR2_45	NAV1	NAV2
podélné měření	0,97	0,68	0,58	0,78	0,47	0,81
kolmé měření	1,40	0,99	1,91	1,34	1,03	0,99

Tab. č. 12– Tabulka drsnosti R_a pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub

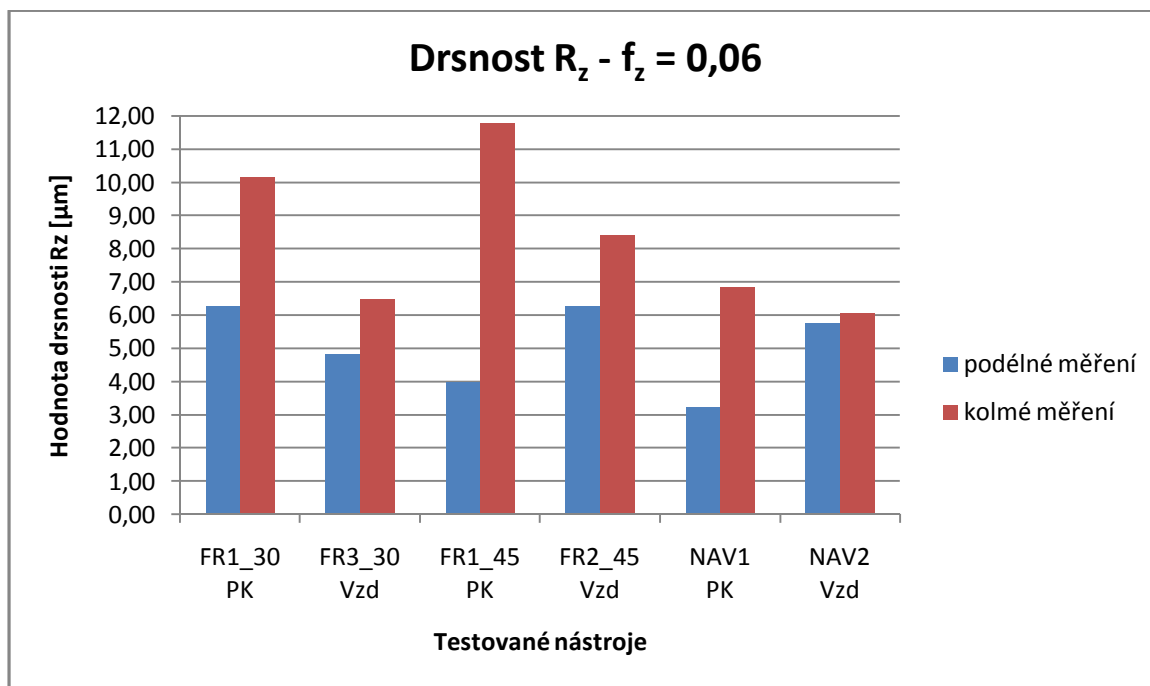


Graf č. 16- Graf drsnosti R_a pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm

Pro další prezentování drsnosti povrchu je uvedena tabulka s grafem pro maximální výšku profilu R_z . I zde je patrný stejný trend drsnosti pro měřené plochy.

Drsnost Rz - fz = 0,06 mm						
Rz [μm]	NAV1	NAV2	FR1_30	FR3_30	FR1_45	FR2_45
podélné měření	6,27	4,83	3,98	6,26	3,24	5,76
kolmé měření	10,15	6,49	11,77	8,41	6,86	6,04

Tab. č. 13- Tabulka drsnosti Rz pro posuv na zub fz = 0,06 mm



Graf č. 17- drsnosti Rz pro posuv na zub fz = 0,06 mm

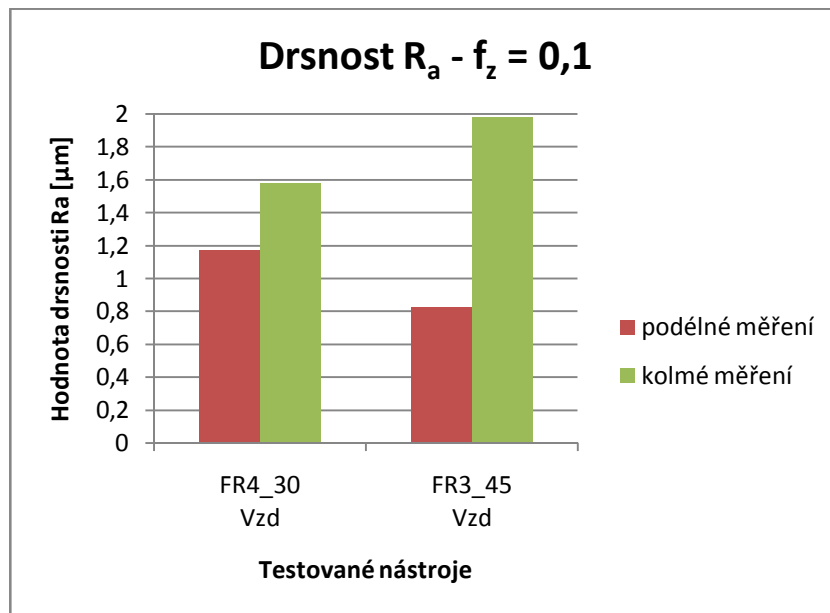
4.3.2 Plochy obráběné fz = 0,1 mm

Za zvýšených podmínek posuvu na zub fz = 0,1 mm bylo z časových důvodů obráběno pouze dvěma nástroji vyrobenými na Západočeské univerzitě. Jediná proměnná v tomto porovnání byla geometrie stoupání šroubovic. Bylo rozhodnuto, že oba testy proběhnou při chlazení vzduchem.

Z tabulky lze vypočítat, že horší drsnost Ra v podélném směru má fréza FR4_30, Ra = 1,17 μm. Důvodem je zajisté rychlé projevení vyštípnutí na břitu č. 2, které se dále šířilo do té doby, než dosáhl kritického maxima. Fréza FR3_45 měla podobnou deformaci na břitu č. 4, i když ne tak rozsáhlou, nedosáhlo se kritického opotřebení přes 200 μm. Výsledky kolmého měření drsnosti jsou opět ovlivněny vlnistostí materiálu způsobené plastickou deformací při obrábění.

Drsnost Ra - fz = 0,1 mm		
Ra [μm]	FR4_30	FR3_45
podélné měření	1,17	0,82
kolmé měření	1,58	1,98

Tab. č. 14- Tabulka drsnosti Ra pro posuv na zub fz = 0,1 mm

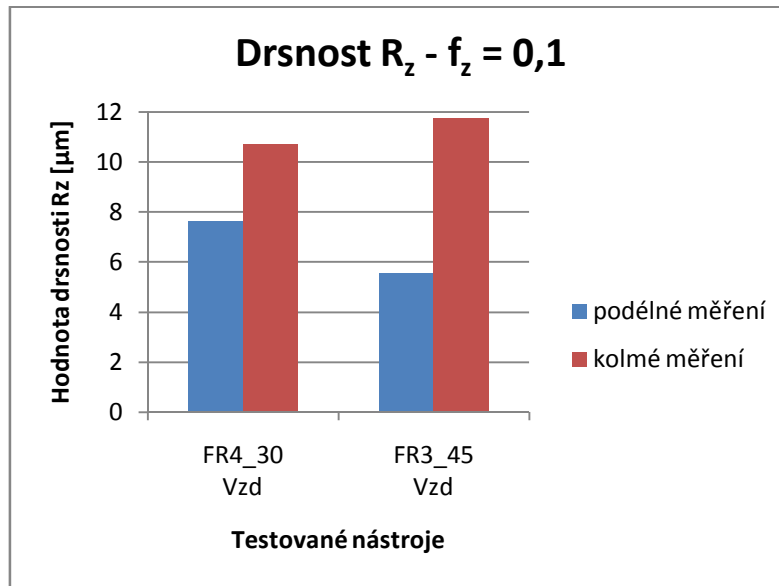


Graf č. 18- drsnosti Ra pro posuv na zub fz = 0,06 mm

Pro zajímavost jsou uvedeny i výsledky měření maximální výšky profilů Rz. Z grafického porovnání lze vidět stejný rozdíl mezi podélným a kolmým měřením jako u měření arytmetické odchylky Ra.

Drsnost Rz - fz = 0,1 mm		
Rz [μm]	FR4_30	FR3_45
podélné měření	7,63	5,55
kolmé měření	10,69	11,72

Tab. č. 15 - Tabulka drsnosti Rz pro posuv na zub fz = 0,1 mm

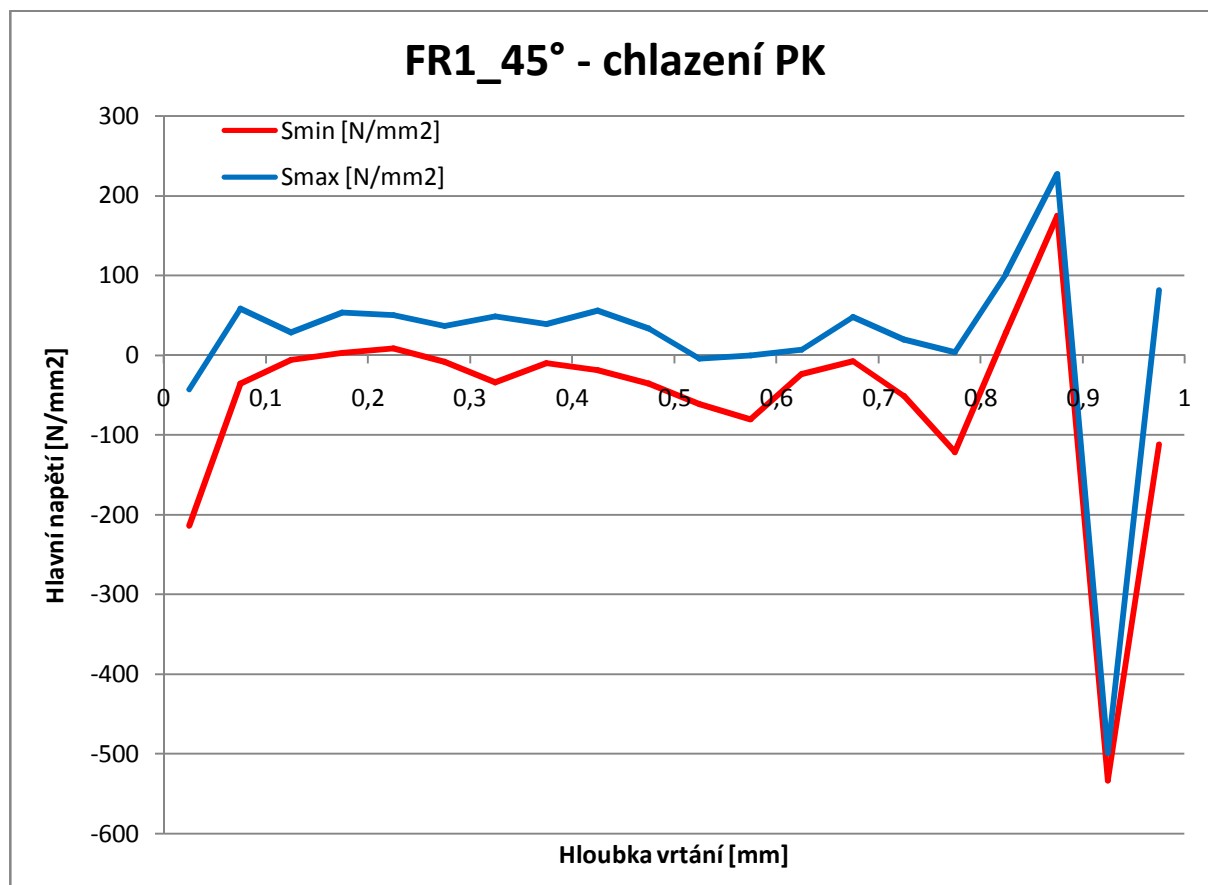


Graf č. 19- drsnosti R_a pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm

4.4 Vyhodnocení zbytkového pnutí

V rámci experimentu bylo rozhodnuto, že se bude měřit zbytkové pnutí v obrobku po dokončení experimentu trvanlivostí. Pro testy byly vybrány 4 plochy, které byly obráběny frézami FR1_30, FR3_30, FR1_45, FR2_45. Z časových a finančních důvodů nebylo realizované měření na frézách od společnosti Navel.

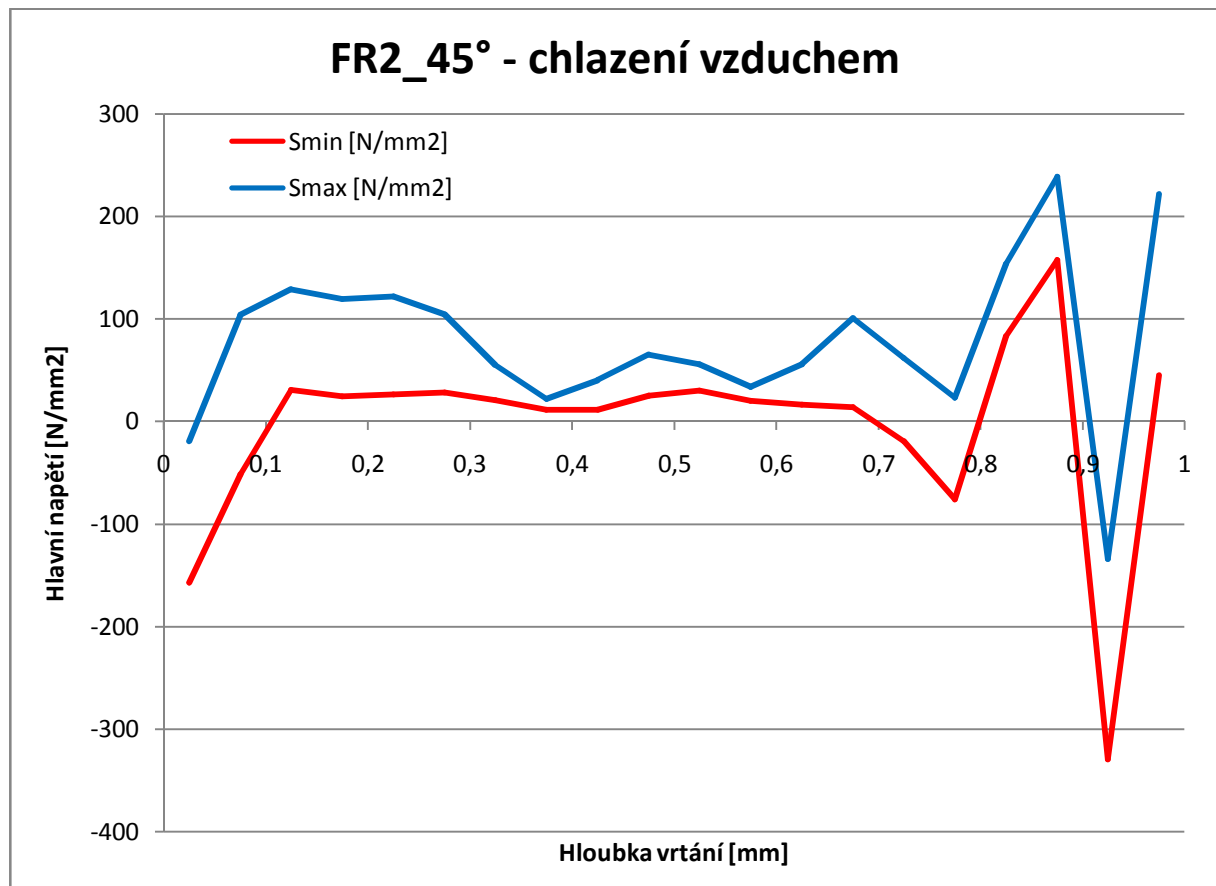
Zbytková pnutí se vyhodnocují pomocí grafu, kde jsou patrné dvě křivky. Červená vyjadřuje minimální zbytkové napětí a modrá maximální zbytkové pnutí. Bude sledováno maximální napětí.



Graf č. 20– Zbytkové pnutí FR1_45, chlazení provozní kapalinou

Na svislé ose reprezentují hodnoty do plusu tahová napětí a do mínusu tlaková. Tlaková napětí jsou takové hodnoty, které na obrobek působí pozitivně. Bude-li v obrobku trhlinka, budou se tato tlaková vnitřní pnutí snažit dále trhlinku nešířit. Oproti tahovým, která jsou pro obrobek nebezpečná, tzn. budou trhlinku tahově více rozšiřovat. To je důvod, proč bude sledována křivka pro maximální napětí. Na horizontální ose je stupnice, která reprezentuje hloubku vrtání.

Výše uvedený graf patří pro plochu obráběnou frézou FR1_45° chlazenou provozní kapalinou. Zde je vidět, že hodnoty maximálního napětí jsou převážně v tahových hodnotách, které na obrobek působí negativně. Druhý graf je hodnocený pro stejný typ frézy s rozdílem, že bylo chlazené vzduchem. Velikosti tahových napětí jsou v některých případech více jak dvojnásobné než v případě nástroje chlazeného procesní kapalinou. Křivka se zdá být více nerovnoměrná.



Graf č. 21- Zbytkové pnutí FR2_45, chlazení provozní kapalinou

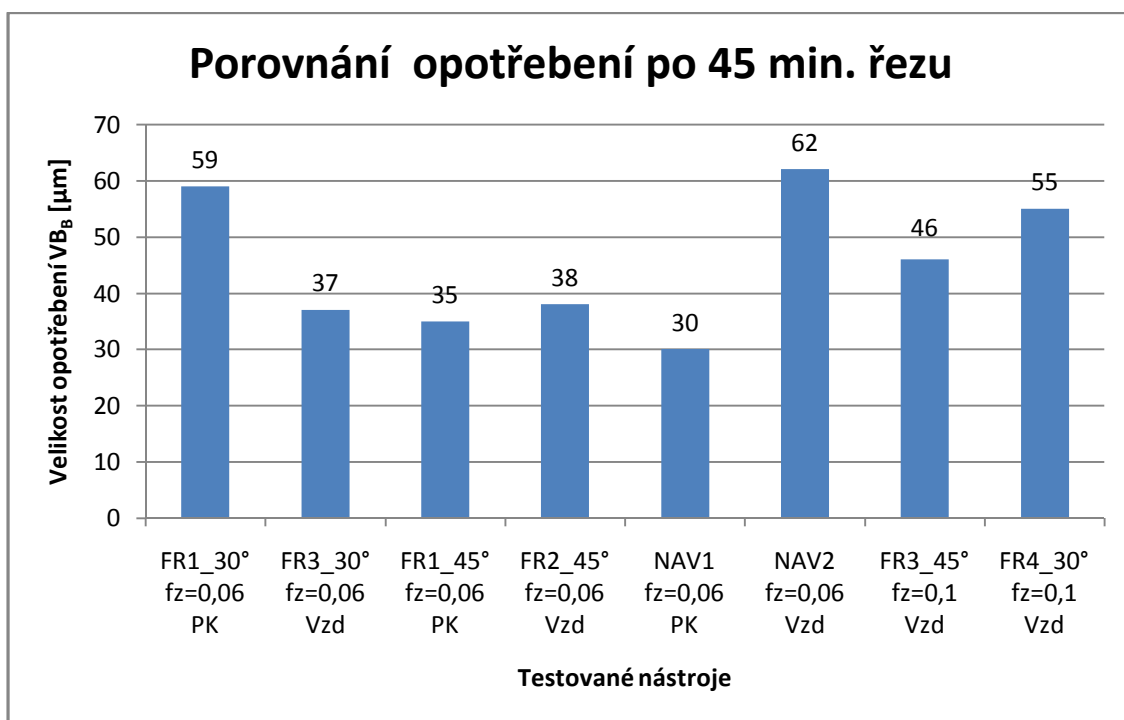
Bylo vysledováno, že chlazení procesní kapalinou působí na materiál z hlediska vznikajícího vnitřního pnutí lépe než chlazení vzduchem. Ekvivalentně byly vyhodnoceny další dva materiály, které obráběly univerzitní frézy se stoupaním šroubovice 30° (grafy viz přílohy).

4.5 Sumarizace

Opotřebení na hřbetu břitu bylo minimální. Neprojevilo se, že by s časem nějak výrazně narůstalo. Pokud se dosáhlo limitního opotřebení, tak jenom křehkým lomem, což nevypovídá nic o trvanlivosti nástroje. Ke křehkým lomům docházelo pravděpodobně z důvodu vady v řezném materiálu, překročení silového zatížení nástroje nebo tvorby nestabilního nárůstku. Jednotlivé experimenty byly vždy ukončené z časových důvodů. Ukázalo se, že na trvanlivost nástroje nemá výrazný vliv rozdílné stoupaní šroubovic ani rovnoměrná či nerovnoměrná geometrie.

4.5.1 Porovnání nástrojů z hlediska opotřebení VB

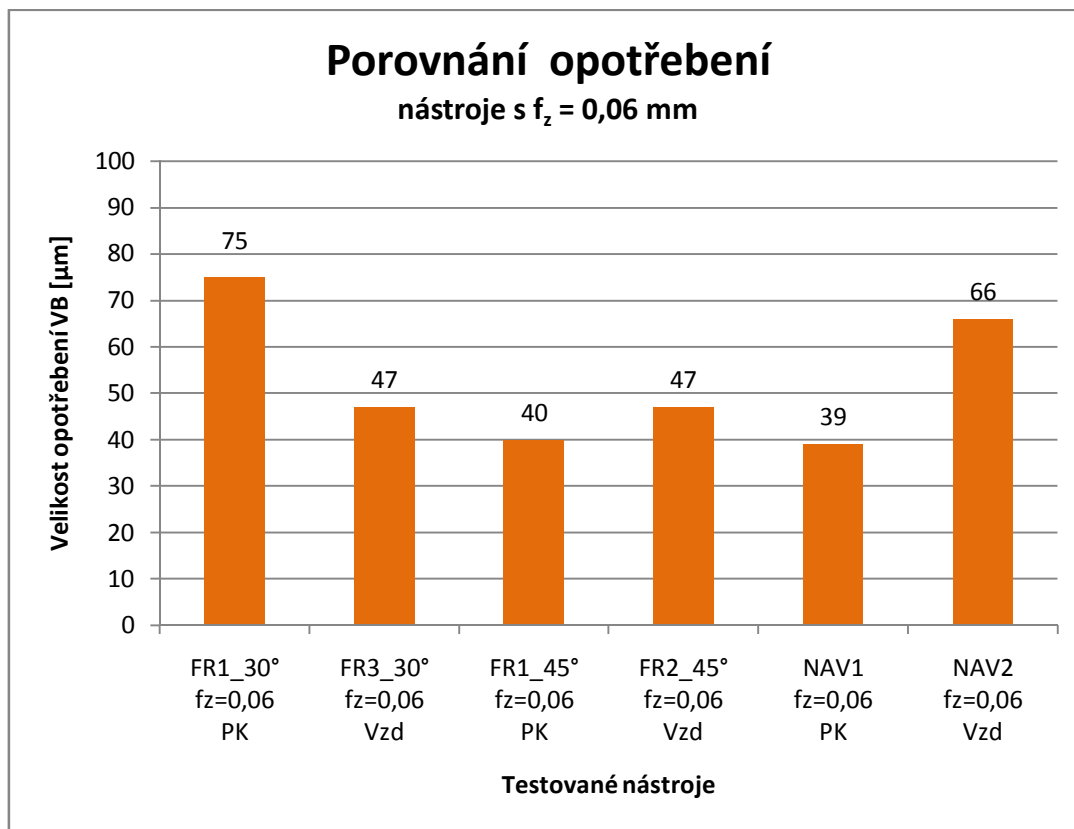
K porovnání výsledků hlavního experimentu bylo vybráno všech 8 nástrojů. V následujícím diagramu jsou rozpoznatelné rozdíly v opotřebení VB_B jednotlivých testovaných nástrojů. Porovnávané hodnoty jsou velikosti opotřebení VB_B v okamžiku 45 min čistého strojního obrábění. Tento časový úsek byl vybrán z důvodu, že všechny porovnávané nástroje dosáhly tohoto času bez rozdílu rychlosti posuvu na zub. V grafu je pod každým sloupcem poznamenán název testovaného nástroje, velikost posuvu na zub f_z a způsob chlazení (PK- procesní kapalina, Vzd- chlazeno vzduchem)



Graf č. 22– porovnání opotřebení po 45 minutách řezu

Z grafu je patrné, že nástroj FR1_30° má mezi porovnávanými nástroji poměrně vysoké opotřebení $VB_B = 59 \mu\text{m}$. U tohoto nástroje se nestabilní nárůstek tvořil více než u ostatních fréz. To byl pravděpodobně důvod větší intenzity opotřebení. Přestože se nárůstek tvořil výrazněji, nedošlo ke křehkému porušení ostří. Tento nárůstek nezpůsobil žádné vyštípnutí ani drolení břitu. Následující 4 nástroje (FR3_30°, FR1_45°, FR2_45°, NAV1) měly zanedbatelné výsledky opotřebení. Tvořil se nepatrně nárůstek, který nezpůsobil žádné deformace ve formě vyštípnutí ani vydrolení. Nástroj NAV2 byl jediný nástroj, kde se ke konci testu vyskytlo vyštípnutí ostří. Tento projev doprovázelo zvětšené opotřebení na hřbetu oproti předchozím nástrojům, $VB_B = 62 \mu\text{m}$. Poslední dva nástroje byly měřeny při zvýšeném parametru posuvu na zubu $f_z = 0,1 \text{ mm}$. Obě frézy mají podobné opotřebení, ale

musí se přihlídnout k tomu, že na obou nástrojích vznikly degradace ve formě vyštípnutí ostří, které nám jistě ovlivnily kvalitu obrobeného povrchu.

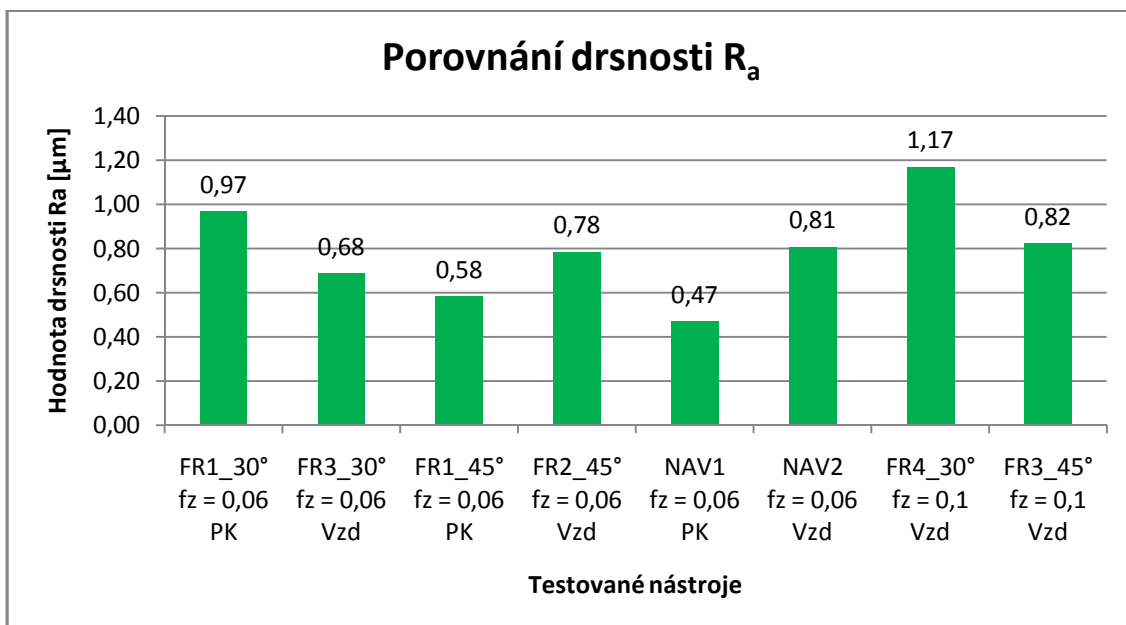


Graf č. 23– Porovnání opotřebení pro nástroje, které obráběli při $f_z = 0,06$ mm

V grafu č. 23 byl porovnán rozdíl v opotřebení mezi nástroji, které obráběly při posuvu na zub $f_z = 0,06$ mm a všechny dosáhly 75 min čistého obrábění. Mezi hodnotami v grafu č. 22 a 23 pro příslušné nástroje lze vidět nepatrný rozdíl v nárůstu opotřebení. U nástrojů se ani po dalších 30 minutách řezu neprojevovalo výraznější opotřebení. Výjimkou je nástroj NAV2, který měl dosažené opotřebení 66 μm , ale je třeba zmínit, že na 1 břitu se vytvořil vyštípnutí $VB_N = 202 \mu\text{m}$ (viz graf č.11).

4.5.2 Porovnání z hlediska drsnosti Ra

V návaznosti na porovnání opotřebení došlo k podobnému srovnání i u kvality obrobeného povrchu. Drsnost byla tentokrát měřena až po provedení celého experimentu. Všechny nástroje tedy provedly stejný počet přejezdů za různý čas, který je závislý na velikosti zvoleného posuvu na zub. Každý nástroj ujel dráhu 54 metrů.

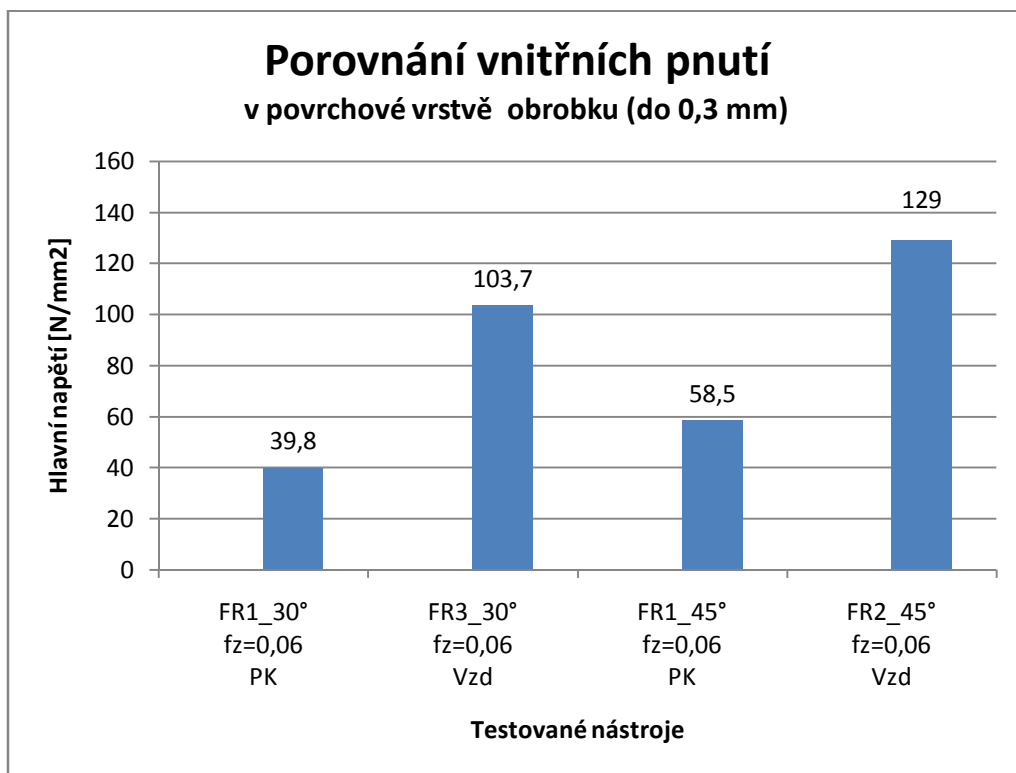


Graf č. 24– porovnání drsnosti R_a

Z grafu porovnání drsností jsou viditelné rozdíly mezi jednotlivými nástroji. Výsledky jsou uspokojivé. Většina z nich by se dala poměřovat s výsledky obrobené plochy po broušení, v horších případech s jemným frézováním. V případě frézy FR1_30°, kdy bylo $R_a = 0,97 \mu\text{m}$, byl tento výsledek jistě ovlivněn tvorbou nárůstku. Drsnost $R_a = 1,17 \mu\text{m}$, která byla změřena na nástroji FR4_30° ($f_z = 0,1 \text{ mm}$), byla dozajista ovlivněna vyštípnutím na jednom z břitů.

4.5.3 Porovnání z hlediska vzniku zbytkových pnutí v materiálu

Závěrem lze říci, že hodnoty vnitřního pnutí jsou pro všechny měřené materiály převážně v tahových hodnotách. Tahové hodnoty jsou pro obrobek zajisté negativní, protože tato napětí mohou dopomáhat k šíření trhlin v materiálu.



Graf č. 25– Porovnání vnitřních pnutí v povrchové vrstvě obrobku

V grafu č. 25 byla porovnána vnitřní pnutí v povrchové ploše (do 0,3 mm), kde dochází k největšímu ovlivnění obráběním. Je jasně patrné, že naměřené hodnoty vnitřních pnutí byly pro frézování s chlazením vzduchem (Vzd) více jak dvojnásobné než u frézování s chlazením procesní kapalinou (PK). Proto lze do technické praxe doporučit zvolit variantu chlazení procesní kapalinou, aby nevznikala tak výrazná tahová vnitřní pnutí v obráběném materiálu.

5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zaměřit se na optimalizaci fréz ze slinutého karbidu pro obrábění austenitických nerezových ocelí.

Práce se zaměřila na přínosy nerovnoměrné geometrie nástroje při obrábění nerezových materiálů. Na základě provedených experimentů lze prohlásit, že makrogeometrie nástroje neměla takový vliv na trvanlivost nástrojů, jaký zadavatel práce očekával. Proto není nutné obrábět nerezové materiály striktně nástroji s nerovnoměrnou geometrií.

Pro obrábění je možné doporučit i nástroje s rovnoměrnou geometrií. Nástroje s rovnoměrnou geometrií jsou výrobně jednodušší a tím i méně nákladné. Ušetřené náklady je možné investovat do předdepozičních úprav a modernější tenké vrstvy. Dále je možné pro obrábění nerezových materiálů doporučit použití procesní kapaliny. Nástroje obrábějící s procesní kapalinou vykazují menší sklony ke křehkému lomu a zbytková tahová pnutí v obrobeném povrchu dosahují nižších hodnot.

Během experimentu nedosáhly nástroje zvoleného limitního opotřebení hřbetu 100 mikronů ani po 75 minutách obrábění. Tento fakt má velmi pozitivní dopad na uživatele nástrojů. Proti tomu by se výrobce nástroje měl zaměřit na doporučené řezné podmínky, neboť potenciál nástroje není plně využit. Například je možno zvýšit posuv na zub, čímž bude zajištěno intenzivnější opotřebení bříty.

Pro další optimalizaci fréz by bylo vhodné zaměřit se na prudce se vyvíjející tenké vrstvy a jejich přínosy na trvanlivost nástroje. Moderní tenké vrstvy vedle prodloužení životnosti nástroje často umožňují nasazení intenzivnějších řezných podmínek. Ze zkušeností Regionálního technologického institutu je prokázána silná vazba mezi předdepozičními úpravami a tenkými vrstvami. Proto by bylo vhodné se spolu s tenkými vrstvami zaměřit i na předdepoziční úpravy. Takto optimalizované nástroje přinesou výrobcí mnoho výhod v silně konkurenčním prostředí výrobců nástrojů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele: Podklad k předmětu KTO/EMO*. Plzeň, 2011. ZČU v Plzni.
- [2] KUDERA, Miroslav. *Příručka obrábění*. Praha: Sandvik, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [3] MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum*. 4. vydání. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00323-X.
- [4] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *Nové směry v progresivním obrábění*. Učební text. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] ŘEHOŘ, Jan. *Teorie obrábění*. Skripta k předmětu KTO/TO, ZČU v Plzni. Plzeň.
- [6] KŘÍŽ, Antonín. *Korozivzdorné oceli*. Podklady k předmětu KMM/SMA, ZČU v Plzni. Plzeň.
- [7] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele: Podklad k předmětu KTO/EMO*. Plzeň, 2011. ZČU v Plzni.
- [8] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Praha: SNTL, 1975-1982
- [9] PETELE, Jan. *Efektivní frézování feriticko-martenzitických ocelí vliv mikrogeometrie nástroje na řezný proces*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Zdenek Janda.
- [10] ŘASA, J., GABRIEL, VI., *Strojírenská technologie 3: 1. díl*. Praha: Scientia, 2005.
- [11] HRONEK, Ondřej. *Zvyšování kvality povrchu proudem abraziva*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Ivana Zetková.

- [12] MRKVICA, I., MORAVEC, V., *Úpravy břitů a povrchů řezných nástrojů*. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. VŠB-TU Ostrava, 20.06.2007 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznych-nastroju.html>
- [13] JANČA, L., *Tryskání zvlhčeným abrazivem*. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 23.04.2008 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcenym-abrazivem.html>
- [14] *Tryskání povrchů TORBO* [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.tryskani-piskovani-ars.cz/system-torbo/>
- [15] ČUMPELÍK, J., *Tryskání suchým ledem*. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 12.04.2006 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-suchym-ledem.html>
- [16] SKOPEČEK, T., HOFMANN, P., ŠVANTNER, M., *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování*. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 23.05.2007 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>
- [17] ČEP, Robert, *Zbytková povrchová napětí po obrábění*. VŠB Technická univerzita v Ostravě, *Fakulta strojní* [online]. [cit.2019-04-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf
- [18] STAVIARSKY, Miroslav. *Trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Miroslav Zetek.
- [19] Elektronická učebnice [cit.2019-04-28] On-line.Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1219>

- [20] Datasheet procesní kapaliny [cit.2019-04-28] On-line. Dostupné z:
<https://www.lastuamismesteet.fi/wp-content/uploads/2017/02/Blasocut-BC-35-esite.pdf>
- [21] Web Regionálního technologického institutu [cit.2019-04-28] On-line.
Dostupné z: <http://www.rti.zcu.cz/laboratore/obrabeni/vybaveni.html>

7 SEZNAM OBRÁZKU

- Obr. č. 1 - Vlastnosti ovlivňující trvanlivost [18]
Obr. č. 2 – příklad opotřebování břitu [5]
Obr. č. 3 - Hlavní mechanizmy otupení břitu [3]
Obr. č. 4 - Vlivy na tvar a velikost otupení břitu otěrem [5]
Obr. č. 6- Závislost otěru na době řezání [5]
Obr. č. 5- Druhy opotřebení břitu [5]
Obr. č. 7 - Další vlivy na časový průběh otupení VB [5]
Obr. č. 8 - Ukázka otupení na nástroji [18]
Obr. č. 9 - Průběh experimentu [1]
Obr. č. 10 - Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky [1]
Obr. č. 11 - Logaritmická závislost T na v [1]
Obr. č. 12 - Vyznačení oblasti chemických složení korozivzdorných [6]
Obr. č. 13 - Lasturovitý lom [5]
Obr. č. 14 - Využití metod konečné úpravy ostří [8]
Obr. č. 15 - Stav břitu před a po úpravě mikrogeometrie [19]
Obr. č. 16 - Principy tryskání [11]
Obr. č. 17 - Princip tryskání pomocí zvlhčeného abraziva [11]
Obr. č. 18- Tryskání suchým ledem [14]
Obr. č. 19 - Původní Barkhausenovo uspořádání [17]
Obr. č. 20- Polotovar upnutý ve svěráku
Obr. č. 21- Univerzální frézovací centrum DMU 40 eVO linear
Obr. č. 22- Fréza NAVEL
Obr. č. 23- Fréza ZČU stoupání šroubovice 30
Obr. č. 24 -Fréza ZČU stoupání šroubovice 45°

- Obr. č. 25- Mikroskop MultiCheck PC500
- Obr. č. 26– Opticko-skenovací mikroskop IFM G4
- Obr. č. 27– Upnutí měřeného vzorku v přístroji MTS3000 RESTAN
- Obr. č. 28– Schéma zapojení tenzometrů při odvrtávací metodě.
- Obr. č. 29- Nový břit s maskou
- Obr. č. 30- Opotřebený břit – měření opotřebení
- Obr. č. 31- Nový břit č. 2, 4FR1
- Obr. č. 32- Opotřebený břit č. 2, 4FR1
- Obr. č. 33- Nový břit č. 4, 4FR+1
- Obr. č. 34- Opotřebený břit č. 4, 4FR+1
- Obr. č. 35- Nový břit č. 4, 4FR+1_45°
- Obr. č. 36- Opotřebený břit č. 4, 4FR+1_45°
- Obr. č. 37- Nový břit č. 4, FR1_30°
- Obr. č. 38- Opotřebený břit č. 4, FR1_30°
- Obr. č. 39- Nový břit č. 2, FR1_45°
- Obr. č. 40- Opotřebený břit č. 2, FR1_45°
- Obr. č. 41- Nový břit č. 4, FR3_30°
- Obr. č. 42- Opotřebený břit č. 4, FR3_30°
- Obr. č. 43- Nový břit č. 2, FR2_45°
- Obr. č. 44- Opotřebený břit č. 2, FR2_45°
- Obr. č. 45- Nový břit č. 4, NAV1
- Obr. č. 46- Opotřebený břit č. 4, NAV1
- Obr. č. 47- Nový břit č. 4, NAV2
- Obr. č. 48- Opotřebený břit č. 4, NAV2
- Obr. č. 49- Nový břit č. 4, FR3_45°
- Obr. č. 50- Opotřebený břit č. 3, FR3_45°
- Obr. č. 51- Nový břit č. 2, FR4_30°
- Obr. č. 52- Opotřebený břit č. 2, FR4_30°
- Obr. č. 53- Nový břit č. 2, FR4_45°
- Obr. č. 54- Opotřebený břit č. 2, FR4_45°
- Obr. č. 55- Nový břit č. 4, FR2_30°
- Obr. č. 56- Opotřebený břit č. 4, FR2_30°
- Obr. č. 57– Podélné měření drsnosti
- Obr. č. 58– Kolmé měření drsnosti, zachycena vlnitost vlivem přísuvů

8 SEZNAM GRAFŮ

- Graf č. 1– Univerzitní fréza FR2_45°- závislost opotřebení na trvanlivosti T
- Graf č. 2– Graf se 4 křivkami opotřebení pro nástroj FR2_45°-hlavní experiment
- Graf č. 3- Průběh opotřebení na nástroji 4FR1, břit 2
- Graf č. 4- Průběh opotřebení na nástroji 4FR2, břit 3
- Graf č. 5-Průběh opotřebení na nástroji 4FR+1, břit 4
- Graf č. 6- Průběh opotřebení na nástroji FR1_30°, břit 4
- Graf č. 7- Průběh opotřebení na nástroji FR1_45°, břit 2
- Graf č. 8- Průběh opotřebení na nástroji FR3_30°, břit 4
- Graf č. 9- Průběh opotřebení na nástroji FR2_45°, břit 1
- Graf č. 10- Průběh opotřebení na nástroji NAV1, břit 4
- Graf č. 11- Průběh opotřebení na nástroji NAV2, břit 4
- Graf č. 12- Průběh opotřebení na nástroji FR3_45°, břit 4
- Graf č. 13- Průběh opotřebení na nástroji FR4_30°, břit 2
- Graf č. 14- Průběh opotřebení na nástroji FR4_45°, břit 2
- Graf č. 15- Průběh opotřebení na nástroji FR2_30°, břit 4
- Graf č. 16- Graf drsnosti Ra pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Graf č. 17- drsnosti Rz pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Graf č. 18- drsnosti Ra pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Graf č. 19- drsnosti Ra pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Graf č. 20– Zbytkové pnutí FR1_45, chlazení provozní kapalinou
- Graf č. 21- Zbytkové pnutí FR2_45, chlazení provozní kapalinou
- Graf č. 22– porovnání opotřebení po 45 minutách řezu
- Graf č. 23– Porovnání opotřebení pro nástroje, které obráběli při $f_z = 0,06$ mm/zub
- Graf č. 24– porovnání drsnosti Ra
- Graf č. 25– Porovnání vnitřních pnutí v povrchové vrstvě obrobku
- Graf č. 26- FR1_30° - chlazení procesní kapalinou
- Graf č. 27– FR3_30° chlazení vzduchem

9 SEZNAM TABULEK

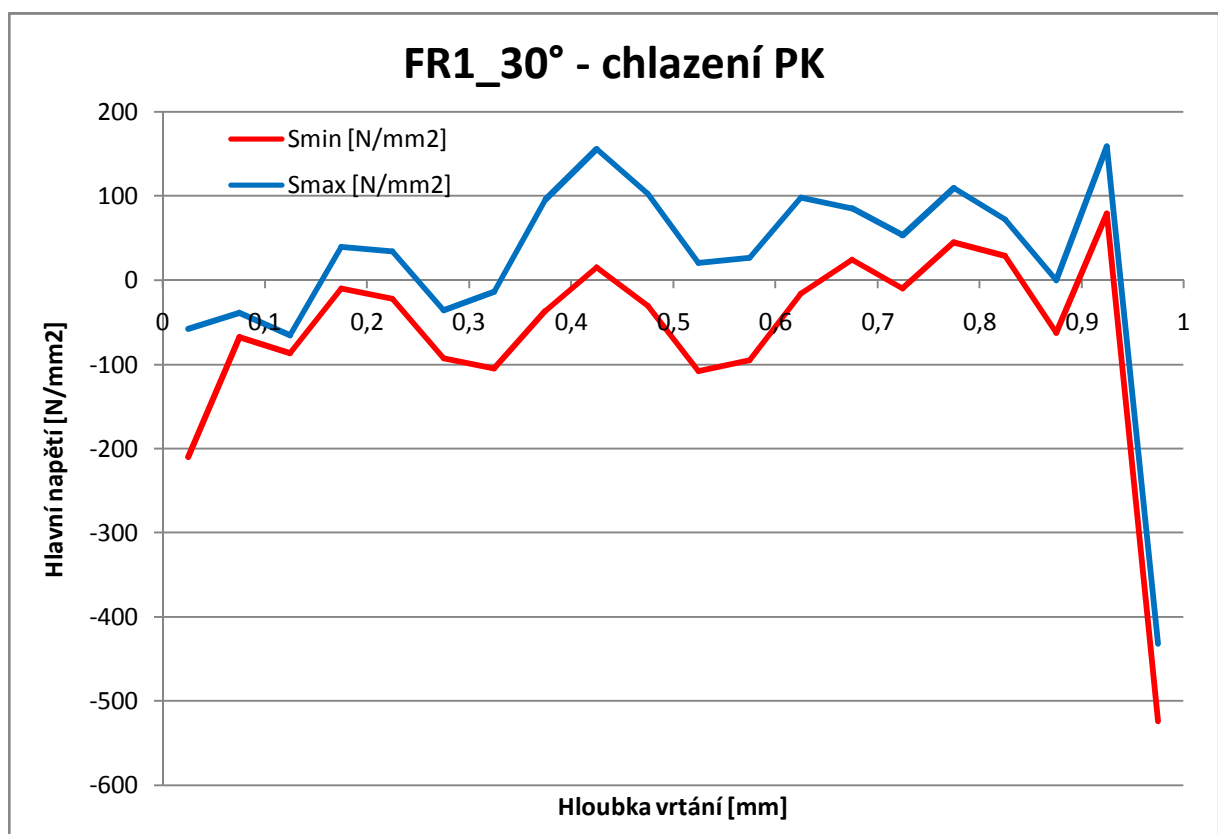
- Tab. č. 1- Chemické složení oceli 17 241
- Tab. č. 2- Fréza NAVEL tabulka rozměrů
- Tab. č. 3- Fréza ZČU stoupání šroubovice 30° tabulka rozměrů
- Tab. č. 4- Fréza ZČU stoupání šroubovice 45° tabulka rozměrů
- Tab. č. 5- Řezné podmínky – Preexperiment test 1
- Tab. č. 6- Řezné podmínky – Preexperiment test 2
- Tab. č. 7- Řezné podmínky – Preexperiment test 3
- Tab. č. 8- Řezné podmínky – Preexperiment test 4
- Tab. č. 9- Řezné podmínky – Preexperiment test 5
- Tab. č. 10- Řezné podmínky – Hlavní experiment test 1 a 2
- Tab. č. 11- Řezné podmínky – Hlavní experiment test 3 a 4
- Tab. č. 12– Tabulka drsnosti Ra pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Tab. č. 13- Tabulka drsnosti Rz pro posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub
- Tab. č. 14- Tabulka drsnosti Ra pro posuv na zub $f_z = 0,1$ mm/zub
- Tab. č. 15 - Tabulka drsnosti Rz pro posuv na zub $f_z = 0,1$ mm/zub

10 PŘÍLOHY

Seznam:

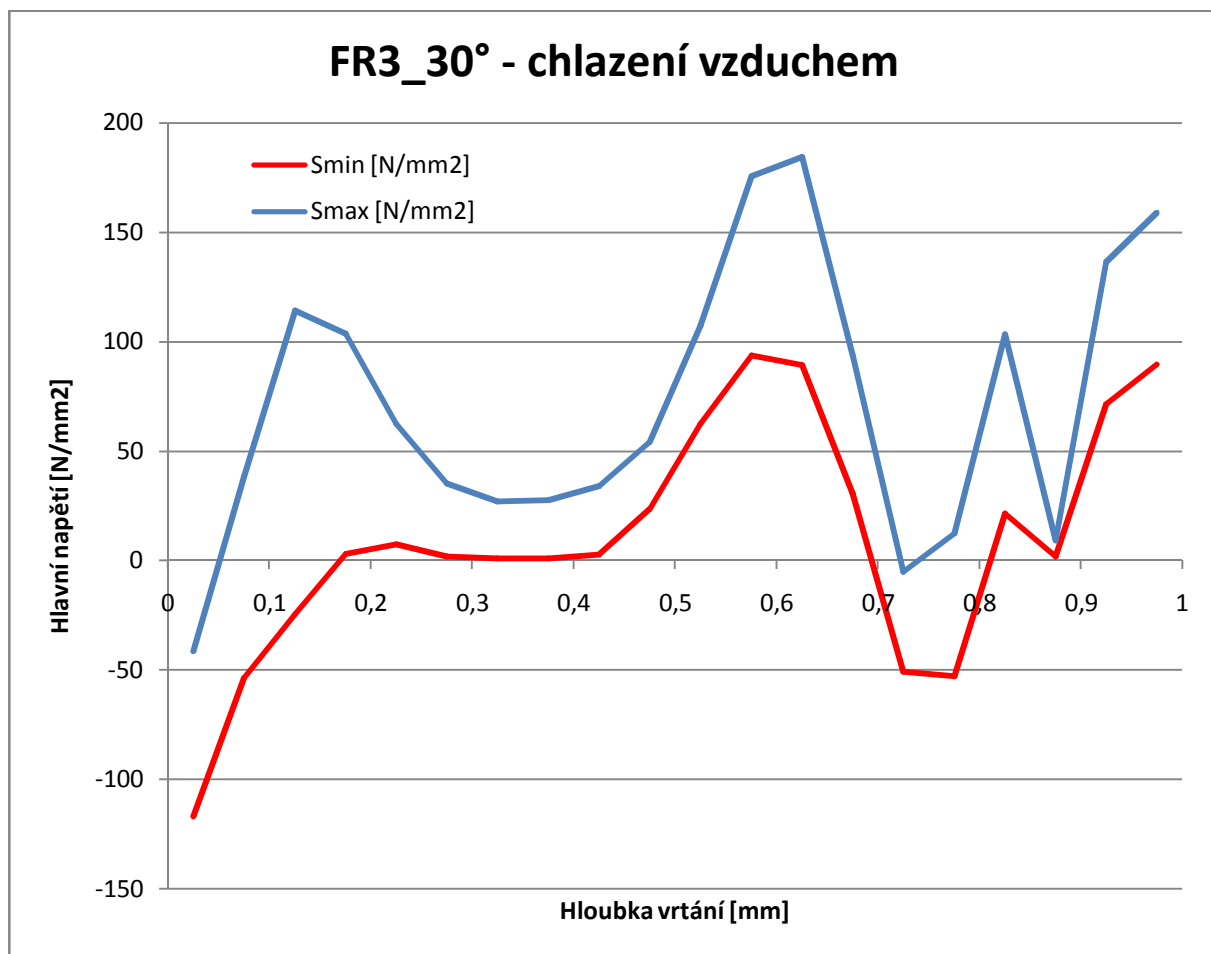
- Příloha č. 1** Graf zbytkových pnutí pro nástroj FR1_30°
Příloha č. 2 Graf zbytkových pnutí pro nástroj FR3_30°
Příloha č. 3 Měřicí protokol 4FR- nástroj bez předdepoziční úpravy
Příloha č. 4 Měřicí protokol 4FR+ - nástroj s předdepoziční úpravou

Příloha č. 1 Graf zbytkových pnutí pro nástroj FR1_30°



Graf č. 26- FR1_30° - chlazení procesní kapalinou

Příloha č. 2 Graf zbytkových pnutí pro nástroj FR3_30°



Graf č. 27– FR3_30° chlazení vzduchem

Příloha č. 3

Měřicí protokol 4FR

- nástroj bez předdepoziční úpravy

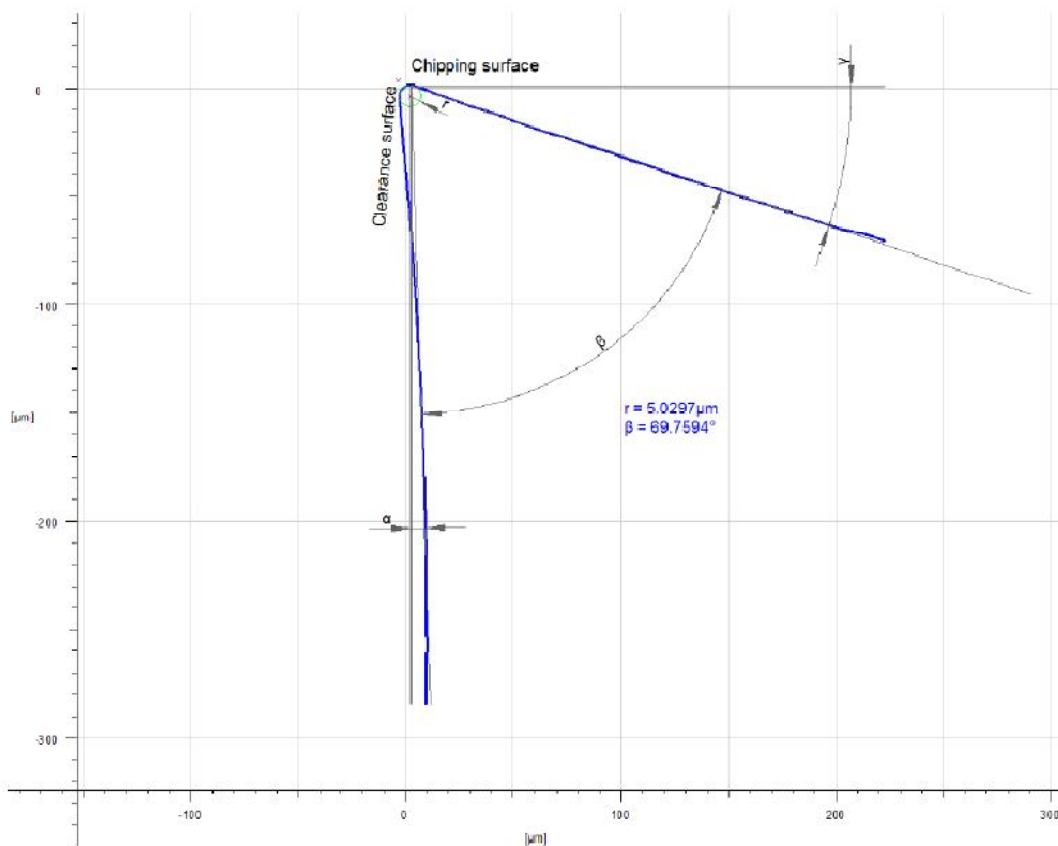
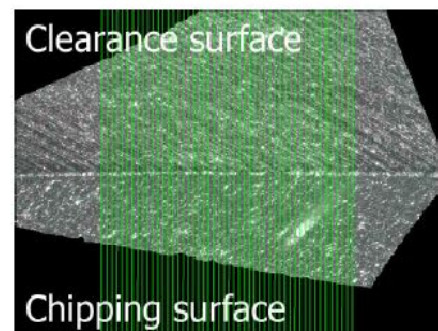
Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Píseň



Měřicí protokol Cutting Edge Measurement

ReferenceType: asdf
Number of extracted profiles: 50
Edge profile type: No Bevel
Date of measurement: 23.1.2019 8:49:54
Operator: Administrator

Name	Value	[U]	Description
r	5.0297	μm	Mean radius of mean edge
α	1.7778	°	Clearance angle
β	69.7594	°	Wedge angle
γ	18.4627	°	Chip angle
Sa	7.8688	μm	Dist. apex to end of clearance roundness (former: a)
Sy	7.6446	μm	Dist. apex to end of chipping roundness (former: b)
K	0.9715		Symmetry of cutting edge
Δr	4.2192	μm	Min. dist. of edge to apex (former: S)
W	5.7993	μm	Edge width
Ecq	0.0151	μm	Form deviation of circle (RMS)



Příloha č. 4 Měřicí protokol 4FR+ - nástroj s předdepoziční úpravou

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň



Měřicí protokol Cutting Edge Measurement

ReferenceType: asdf
Number of extracted profiles: 50
Edge profile type: No Bevel
Date of measurement: 23.1.2019 8:51:50
Operator: Administrator

Name	Value	[u]	Description
r	6.1133	μm	Mean radius of mean edge
α	2.8157	°	Clearance angle
β	74.0555	°	Wedge angle
γ	13.1288	°	Chip angle
Sa	6.2459	μm	Dist. apex to end of clearance roundness (former: a)
Sy	7.9779	μm	Dist. apex to end of chipping roundness (former: b)
K	1.2773		Symmetry of cutting edge
Δr	3.5555	μm	Min. dist. of edge to apex (former: S)
W	5.5922	μm	Edge width
Ecq	0.0656	μm	Form deviation of circle (RMS)
Form	Trumpet		Estimated Curvature

