



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

RYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ, JEHO FYZIKÁLNÍ PODSTATA A JEHO UPLATNĚNÍ V MODERNÍ DOBĚ

HIGH SPEED CUTTING ITS PHYSICAL PRINCIPLES AND ITS USE IN MODERN
PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

L'UBOŠ ŠIŠJAK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. BOHUMIL BUMBÁLEK, CSc.

BRNO 2009

ABSTRAKT

Táto práca poskytuje stručný prehľad o technológii vysokorýchlostného obrábania. Zaoberá sa vlastnosťami materiálu pri vysokej deformačnej rýchlosti v primárnej a sekundárnej oblasti a tvorbe triesky. Nadväzuje voľba nástrojového materiálu a použitie pri rôznych typov materiálu. Práca sa taktiež venuje problematike vysokorýchlostného brúsenia, popísaním základného mechanizmu a analýze tohto procesu a jeho perspektívami.

Kľúčové slová

vysokorýchlostné obrábanie, rýchlosť deformácie, plastická deformácia, segmentová trieska

ABSTRACT

This thesis gives a brief overview of high speed cutting technology. It outlines material behavior at high strain rates in primary and secondary shear zone and chip forming. It continues in choice of tool material and using in various work material. There is also a reference to high speed grinding, defining its base mechanism and analyzing this process and its perspectives.

Key words

high speed cutting, strain rate, plastic strain, segmented chip

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠIŠJAK, L. *Rychlostní obrábění, jeho podstata a jeho uplatnění v moderní době*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 44 s., příloh 0. Vedúci bakalárskej práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma *Rychlostní obrábění, jeho podstata a jeho uplatnění v moderní době* vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname.

25.5.2009

.....
Šišjak Ľuboš

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto pánovi prof. Ing. Bohumilovi Bumbálkovi, CSc. za cenné pripomienky a rady pri vypracovaní bakalárskej práci.

OBSAH

Abstrakt	2
Prehlásenie.....	3
Podakovanie.....	4
Obsah	5
Úvod	6
1 HISTÓRIA	7
2 PERSPEKTÍVY RYCHLOSTNÉHO OBRÁBANIA.....	8
3 VLASTNOSTI MATERIÁLU PRI VYSOKEJ DEF. RÝCHLOSTI.....	10
3.1 Deformačné chovanie materiálu v primárnej oblasti.....	11
3.2 Deformačné chovanie materiálu v sekundárnej oblasti	12
4 VPLYV REZNEJ RÝCHLOSTI NA TVORBU TRIESKY	12
5 VOĽBA NÁSTROJA	17
6 VYUŽITIE RYCHLOSTNÉHO OBRÁBANIA PRI OBRÁBANÍ OCELÍ A INÝCH MATERIÁLOV	19
6.1 Korozivzdorné oceli.....	19
6.2 AISI 4340	24
6.3 Hliník a titán	25
7 SÚHRN VYSOKORÝCHLOSTNÉHO OBRÁBANIA.....	27
7.1 Sily na nástroji.....	28
7.2 Opatrebenie nástroja.....	28
7.3 Hospodárnosť obrábania.....	29
8 RÝCHLOSTNÉ BRÚSENIE.....	29
8.1 Mechanizmus a analýza procesu rýchlostného brúsenia	30
8.2 Brúsiace kotúče.....	31
8.3 Príkon a príchod chladiva.....	33
8.4 Perspektívy rýchlostného brúsenia.....	34
Záver	35
Zoznam použitých zdrojov	36
Zoznam použitých skratiek a symbolov	38

ÚVOD

Vysokorýchlostné obrábanie je pokročilá výrobná technológia s do budúcnosti. Ale ako sa to už stalo u mnohých iných procesov, zavádzanie základných vedomostí do priemyselnej výroby zabralo relatívne dlhú dobu. V tomto prípade, obdobie približne 60 rokov nebolo spôsobené len opatrným prístupom priemyslu, ale taktiež nedostatočnou vybavenosťou výrobných parkov v čase, keď už boli dostupné prvé výsledky výzkumu.

Vďaka dynamickému rozvíjaniu nových obrábacích procesov a postupnému zlepšovaniu obrábacích strojov, rezných nástrojov a samotných technológií obrábania vo vysokých rotačných rýchlostiach sa vysokorýchlostné obrábanie stáva ekonomicky výhodným výrobným procesom k produkovaniu súčiastok s vysokou presnosťou a kvalitou povrchu, čo si ale nevyhnutne vyžaduje znalosti optimálneho rozsahu rezacích parametrov (opotrebenie nástroja, trvanlivosť, kvalita povrchu, rezné sily, vyvinuté teplo atp.).

Donedávna bola technológia vysokorýchlostného obrábania využívaná hlavne k opracovaniu hliníkových zliatin pre výrobné zložité súčiastky použité v leteckom priemysle. Následne sa po významných zlepšeniach začalo využívať pri obrábaní foriem z ocelových zliatin, ktoré slúžili k výrobe širokého okruhu automobilových a elektronických súčiastok, ako aj k tvorbe plastových výliskov.

História

V 30-tych rokoch minulého storočia, Trent¹⁰ a jeho spolupracovníci poskytli jasný metalografický dôkaz o existencii tepelne nepriepustných zón šmyku v deformačných procesoch vo vysokej rýchlosti deformácie.

V roku 1957¹¹, Cottrell oslovil konferenciu zaoberajúcou sa vlastnosťami materiálov vo vysokých deformačných rýchlostiach so zhodnotením, že ak rýchlosť tvárnenia je dostatočne vysoká, nemusí byť dostatok času vyvieť vytvorené teplo a táto teplota môže narásť dostatočne na to, aby znížila pevnosť nástroja.

V roku 1964, Recht¹² vytvoril model pre katastrofálnu strihovú nestabilitu v kovoch v podmienkach dynamického zaťažovania. Poznamenal, že v určitých kombináciach teploty a napätia sa naklonenie krivky ťah-tlak môže stať nulovým alebo klesajúcim. Tento jav môže predovšetkým nastať v prípade, ak tepelné odpevnenie prevažuje nad deformačným zpevnením.

Tieto obecné bádania materiálových vedcov boli inšpiráciou pre experimenty z oblasti obrábania, pričom prvé testy sa vykonávali už v roku 1958.

Počas 60-tych a 70-tych rokoch minulého storočia prebiehali experimenty s projektilmi a vysokorýchlostného obrábania vedené niekoľkými výzkumnými tímami, v jednom z nich bol práve Recht. Ich podstatou bolo vystreľovanie obrobku s využitím vojenského dela skrz nástroj vybavený tenzometrom. Rezné sily boli merané na rôznych rýchlostiach až k balistickým hodnotám. Tieto experimenty prebiehali neskôr v 80-tych rokoch v tak veľkom merítku, že americké letectvo zaistovalo program vedený firmou General Electric, ktorá dosiahla výsledky vzťahujúce sa k materiálovým vlastnostiam a tvorbe triesok.

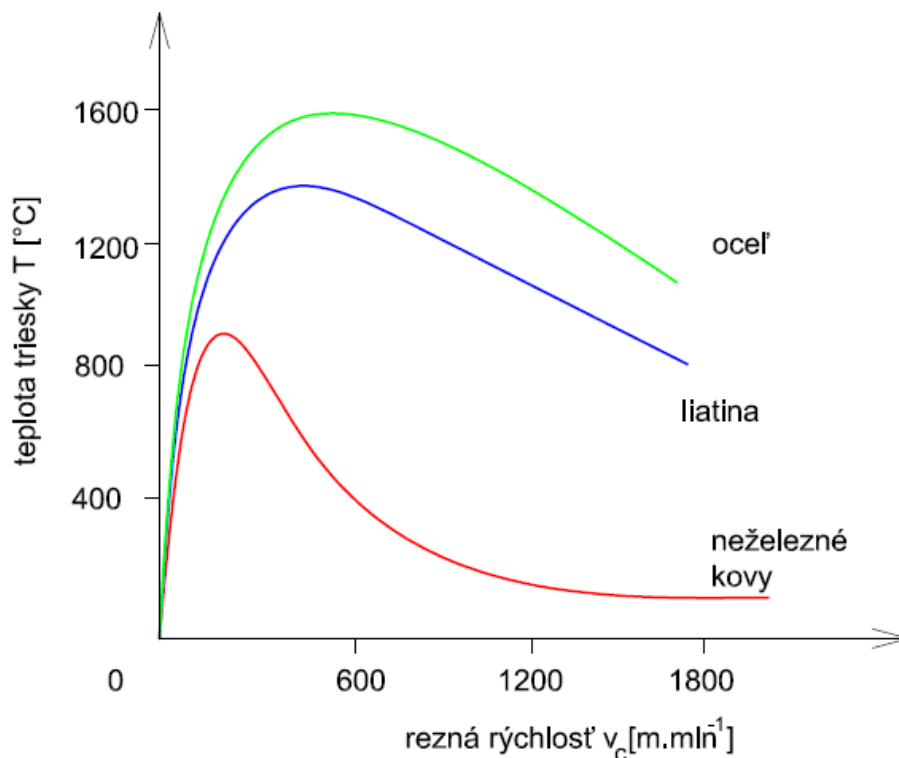
Za celú dobu bola technológia vysokorýchlostného obrábania použitá vo veľkom rozsahu kovových a nekovových materiáloch, vrátane výroby komponentov so špecifickými požiadavkami na kvalitu povrchu, ako aj pri obrábaní materiálov s tvrdosťou 50 HRC a vyššou.

Perspektívy rýchlostného obrábania

Vysokorýchlostné obrábanie má mnoho dôležitých výhod. Zvyšovaním reznej rýchlosti (Obr. 2.2) môže dochádzať k znižovaniu reznej sily, odvádzanie veľkej časti tepla odchádzajúcou trieskou, zlepšenie akosti povrchu, zníženie vibrácií pri obrábaní.

Výrobný proces, predovšetkým návrh a následne samotná výroba sa mení, aby bol schopný vhodnejšie riešiť vzťahy medzi:

- a) novými dostupnými technológiami
- b) ekonomickými podmienkami



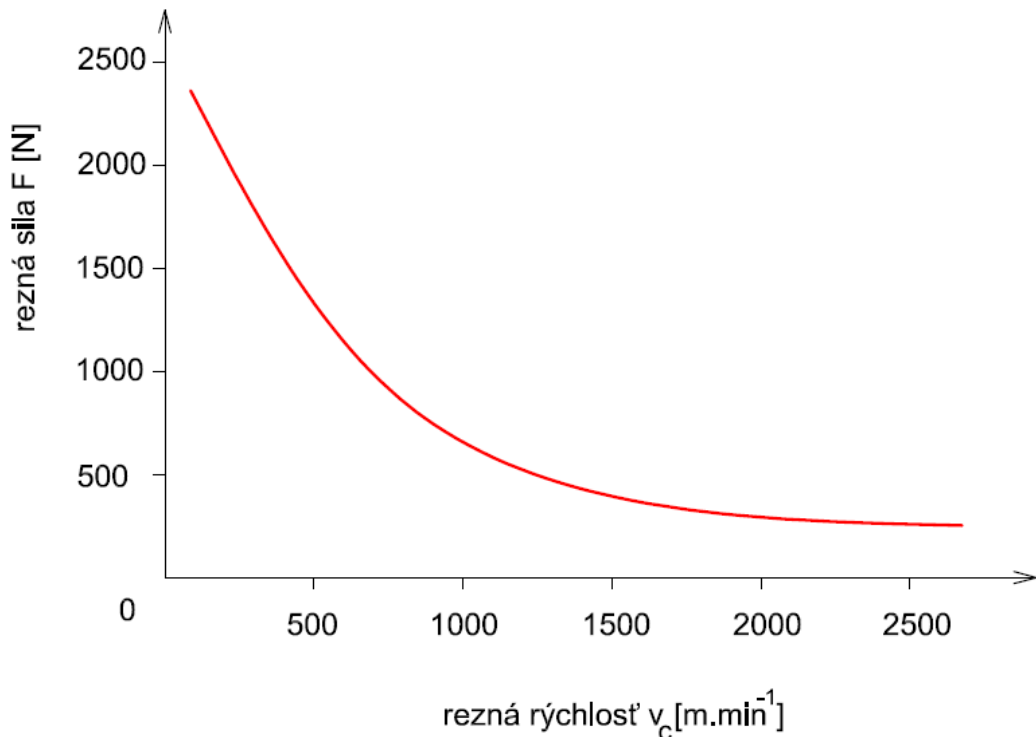
Obr. 0.1 Závislosť teploty triesky na reznej rýchlosti (8)

To sa dosiahne postupným zavádzaním inovácií, ktoré zahŕňa:

- zlepšovanie technológií rezných nástrojov
- riadenie presnosti rýchlostného obrábania
- dostupnosť a využívanie tuhších nástrojov a vysokých otáčok vretena
- schopnosť obsiahleho testovania, ukázať vhodnosť celkov vyrobených z jedného kusu
-

Do inovovania však zároveň vstupujú požiadavky trhu:

- na vzrastajúce náklady sprievodných operácií, ktoré môžu byť automatizované len z časti a ktoré si často vyžadujú manuálne zachádzanie (napr. upnutie)
- znižovanie počtu operácií, čím sa zníži aj počet nastavovania, upínania, dokumentácie



Obr. 0.2 Závislosť reznej sily na reznej rýchlosti (8)

Pri zavádzaní nových technológií a postupov, je treba o výrobnom procese uvažovať ako o celku a neoptimalizovať jednotlivé zložky samostatne. Ak sa na návrh a výrobu bude prihliadať so širšej perspektívy, bude jednoduchšie zlepšovať, zjednodušovať a zlacňovať výrobu.

Ako príklad sa môže vziať znižovanie strojného času s cieľom znížiť čas celkový. Avšak na to, aby sme celkový čas zkrátili natoľko, aby výroba bola ekonomicky výhodná, je nutné znižovať aj čas vedľajší a čas nástroja.

Samozrejme znížením strojného času dosiahneme isté skrátenie celkového času, ale pri nezmenení ostatných časov nebude toto skrátenie tak efektívne.

Vzťah pre operačný čas jednotkovej práce (4) :

$$t_A = t_{AS} + t_{AV} + t_{Ax} / Q_T \quad (2.1)$$

t_{AS} – jednotkový strojný čas

t_{AV} – jednotkový vedľajší čas

t_{Ax} – čas jednotkovej nepravidelnej obsluhy

Q_T – počet kusov obrobených za jednu tvanlivosť nástroja

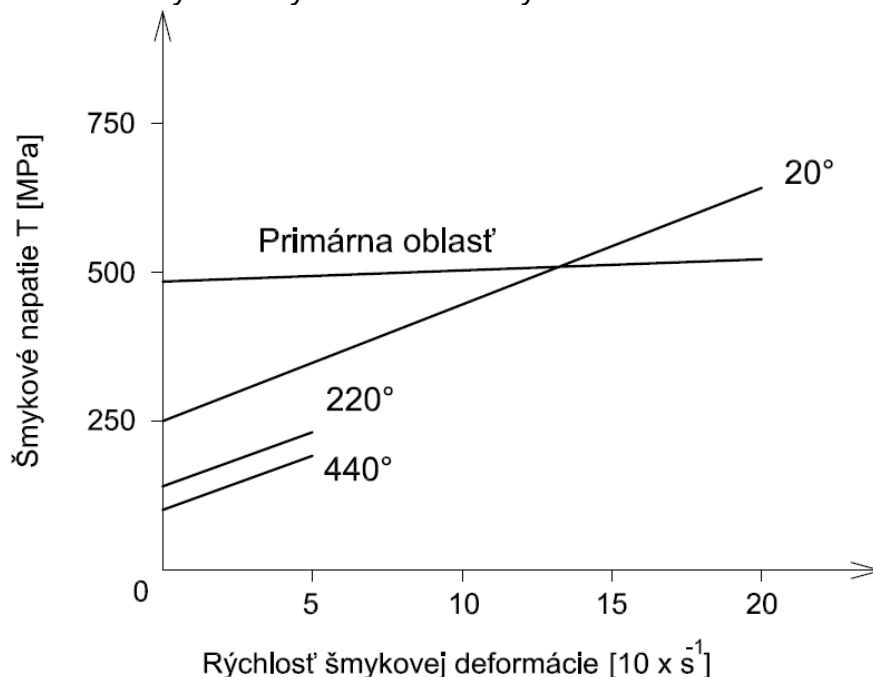
Vlastnosti materiálu pri vysokej def. rýchlosti

Chovanie materiálu v procese rezania je závislé na:

- tom, akým spôsobom je ovplyvnený začiatok plastickej deformácie rastúcou rýchlosťou deformácie,
- charakteristike materiálu z hľadiska deformačného zpevnenia,
- časovej závislosti medzi napätím a teplotou vytvorenou počas plastickej deformácie.¹⁷

Rozsah rýchlostí defomácií pri obrábaní kovov začína približne u hodnoty 10^4 s^{-1} , za ktorou začne rýchlo narastať. V tejto oblasti je rýchlosť pohybu dislokácií daná elektronovým mechanizmom a bolo spozorované, že pevnosť na medzi klzu vzrastá lineárne s rýchlosťou deformácie.

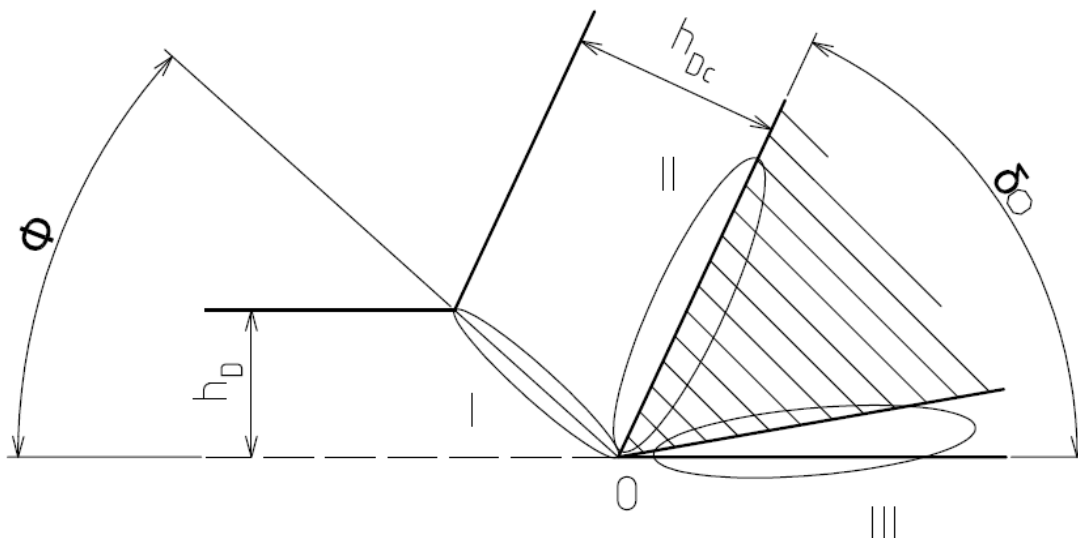
Je možné usudzovať, že všetká primárna plastická deformácia sa deje v samostatne ohraničenej oblasti I (obr. 3.2). Elementy vstupujúce do tejto oblasti rýchlo dosahujú mez pevnosti upravenú rýchlosťou deformácie a sú ďalej spevňované. Znalosti súvisiace s chovaním vznikajúcej plastickej deformácie môžu byť získané z dynamických alebo lomových zkúšok.



Obr. 0.1 Porovnanie Kececioglových výsledkov obrábania a Campbellových a Fergusonových údajov z Hopkinsových testov pri rôznych teplotách (1)

Na získanie údajov o medzi klzu pri vysokých deformačných rýchlostiach deformáciach boli vykonávané Hopkinsonove testy na nízko uhlíkovej oceli pri rôznych teplotách. V diagrame je tiež krivka hodnôt šmykových napätí v primárnej oblasti podľa Kececiogla, ktoré zostávajú skoro konštantné a to vo veľkom rozsahu rýchlostí deformácie

Výsledky týchto testov sú porovnateľné s hodnotami rýchlostí šmykových deformácií z praxe pri komerčnom využití vysokorýchlostného obrábania, ktoré sa pohybujú v rozsahu $2 - 20 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$.



Obr. 0.2: Oblasti plastických deformácií (5)

Φ – uhol roviny max. šmykových napätí

δ_0 – nástrojový ortogonálny uhol rezu δ

h_D – menovitá hrúbka rezu

h_{DC} – hrúbka triesky

Deformačné chovanie materiálu v primárnej oblasti

Vytvára sa pred britom nástroja a tvar a veľkosť tejto oblasti je závislá na reznej rýchlosti a vlastnostiach materiálu, pričom tvrdé krehké materiály podliehajú minimálnej plastickej deformácii a zvyšujúcou sa deformačnou rýchlosťou, čo je príčinou transformácie lomového mechanizmu z tvárneho na krehký lom, sa táto oblasť nahrádza rovinou.

Primárna a sekundárna oblasť sú od seba vzájomne oddelené rovinou maximálnych šmykových napätí. Elementy materiálu smerujú k primárnej oblasti a vstupovaním cez hranicu jej počiatku sa materiál deformuje v závislosti rýchlosti deformácie a počiatkovej teploty. Na tejto hranici sa materiál deformuje, avšak nie je podstatne zahriaty.

V primárnej oblasti je materiál ďalej deformovaný po pretvorení. V tomto procese nastávajú vysoké hodnoty šmykovej deformácie. Takto intenzívne deformačné zpevnenie je sprevádzané dislokačným mechanizmom.³ Zároveň zplastizovanie spôsobuje nárast tepla. Elementy sa nachádzajú v primárnej oblasti po dobu približne $200 \mu\text{s}$ a teda nestrávia dostatok času na značné odpevnenie.

Deformačné chovanie materiálu v sekundárnej oblasti

Jedná sa o plastickú deformáciu, ktorá prebieha v oblasti styku povrchovej vrstvy triesky s čelom nástroja. Elementy materiálu sú v tejto oblasti ovplyvňované vo väčšej miere, jej dĺžka je 1 - 2 mm v závislosti od materiálu, pričom dĺžka primárnej oblasti je len 0,1 - 0,2 mm. V sekundárnej oblasti sú elementy pretvárané po celej dĺžke styčnej plochy. Na hrane nástroja prechádzajú elementy z primárnej oblasti v bode O, menia smer a vchádzajú do oblasti sekundárnej deformácie.

Rýchlosť deformácie môže dosahovať vysokých hodnôt $1 - 3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ a výnimočne až $10 - 50 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ a teplota ostria napríklad u oceliach býva 600 °C pri reznej rýchlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a môže ďalej narastať pozdĺž stykovej plochy až na teplotu 1000 °C.

Zo vzoriek, získaných na špeciálnych prerušovačoch triesky je naznačované, že u ťažšie obrobiteľných zliatín je tvorba sekundárnej oblasti plastickej deformácie sprevádzaná vysokým stupňom deformačného zpevnenia už v prvotnej časti strihovej roviny.¹²

Pri obrábaní korozivzdornej ocele, legovanej ocele a leteckých ocelí sú tieto teploty vyššie, avšak vyššie teploty nemusia spôsobovať odpevňovanie. V oblasti dotyku špičky s obrobkom v blízkosti bodu O môžu byť napätia relatívne nízke než ich priemerná hodnota. Napätie v oblasti trenia však rýchlo narastá na priemernú hodnotu predtým ako sa znova zníži. Šmykové napätie v rastá so zvyšujúcou sa pevnosťou materiálu a množstvom legujúcich prvkov.

So zvyšujúcou sa rýchlosťou dochádza v prvotnej časti sekundárnej plastickej deformácie k väčšiemu ovplyvneniu materiálu tlmením dislokácií a deformačným zpevnením.¹⁷ Tieto vplyvy sú omnoho výraznejšie u korozivzdorných ocelí, legovaných ocelí, titánu a niklových zliatín. Celkovým výsledkom je to, že postup triesky podĺž čela nástroja je zadržovaný narastajúcou strižnou silou pri zvýšenej reznej rýchlosti.

Vplyv reznej rýchlosti na tvorbu triesky

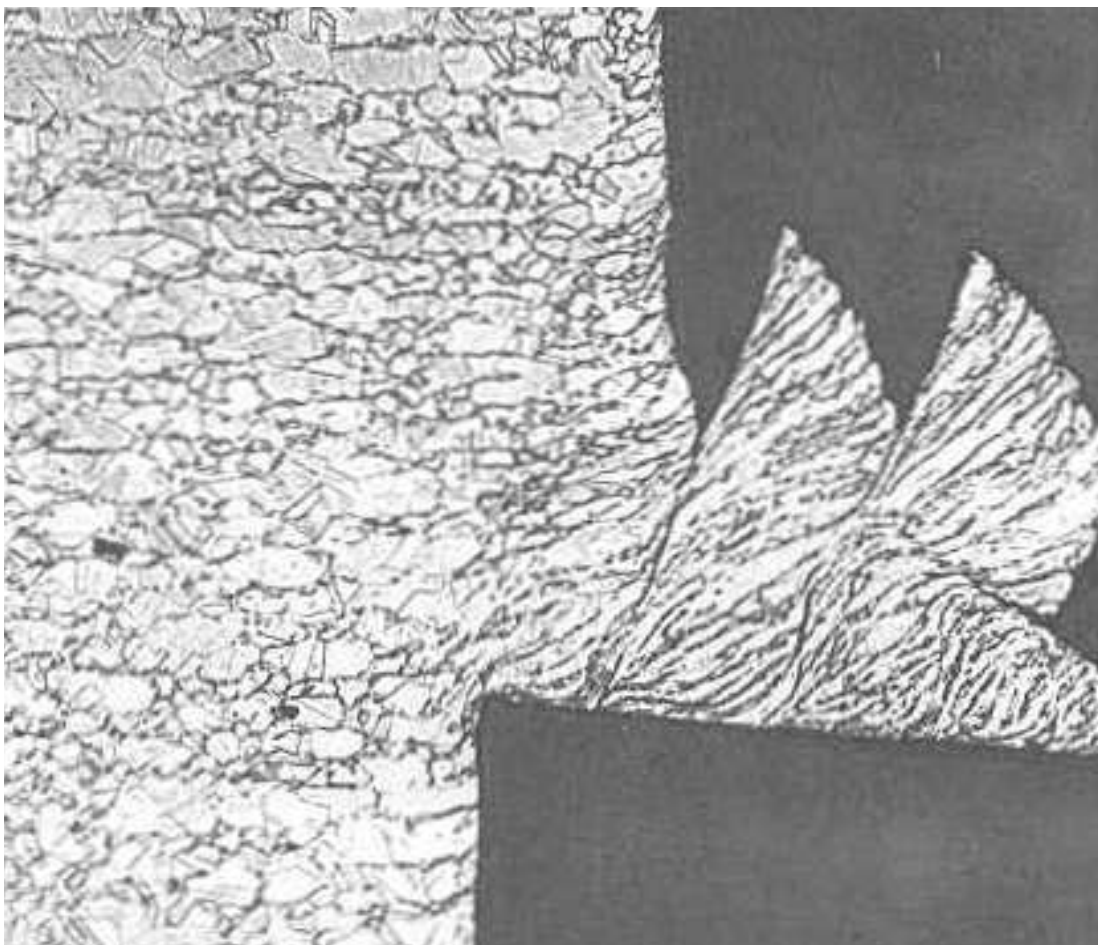
Správna voľba obrábacích podmienok je kľúčová k dosiahnutiu požadovaných parametrov. Akonáhle sú k dispozícii všetky fyzikálne faktory obrábania, musia byť určené, respektíve vypočítané rezné podmienky (rezná rýchlosť, posuv, hĺbka rezu), ktoré majú rôzny vplyv na proces obrábania, na jeho priebeh a výsledky.

V minulosti boli klasifikované typy triesok do 3 skupín:

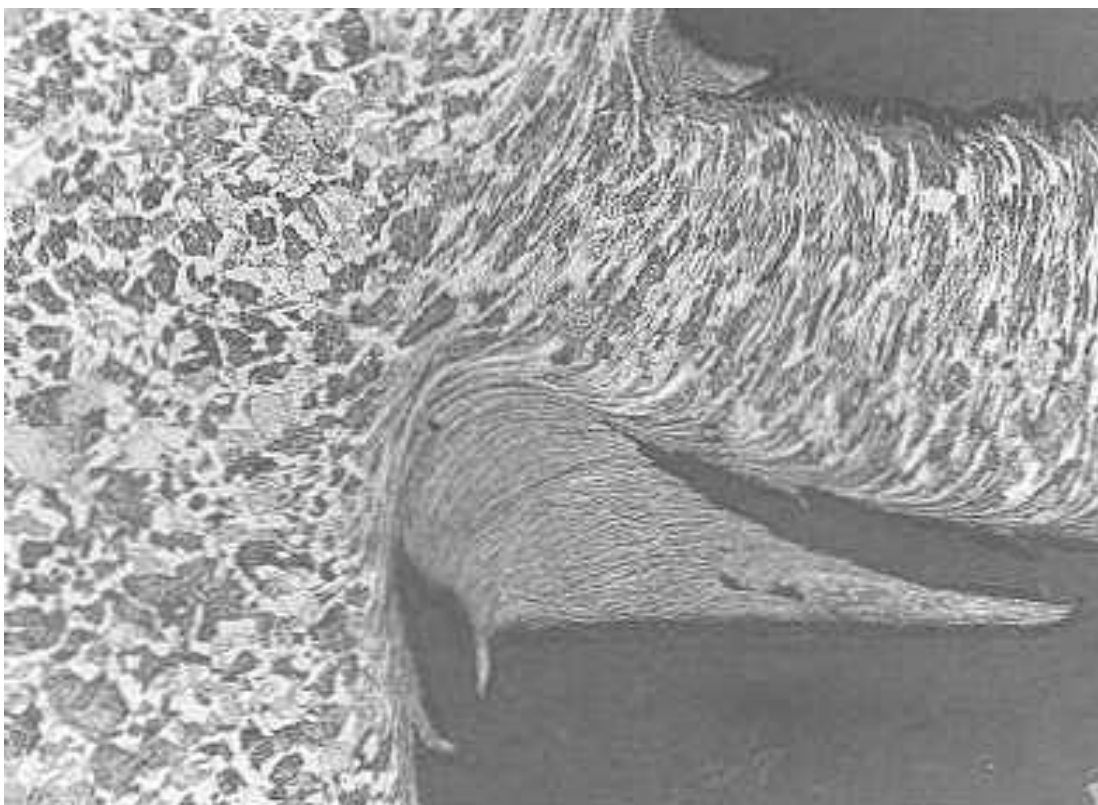
- prerušovaná,
- s nárastkom,
- plynulá.¹⁵

Dlhú dobu bolo toto rozdelenie považované za klasické typy utvárania triesky.

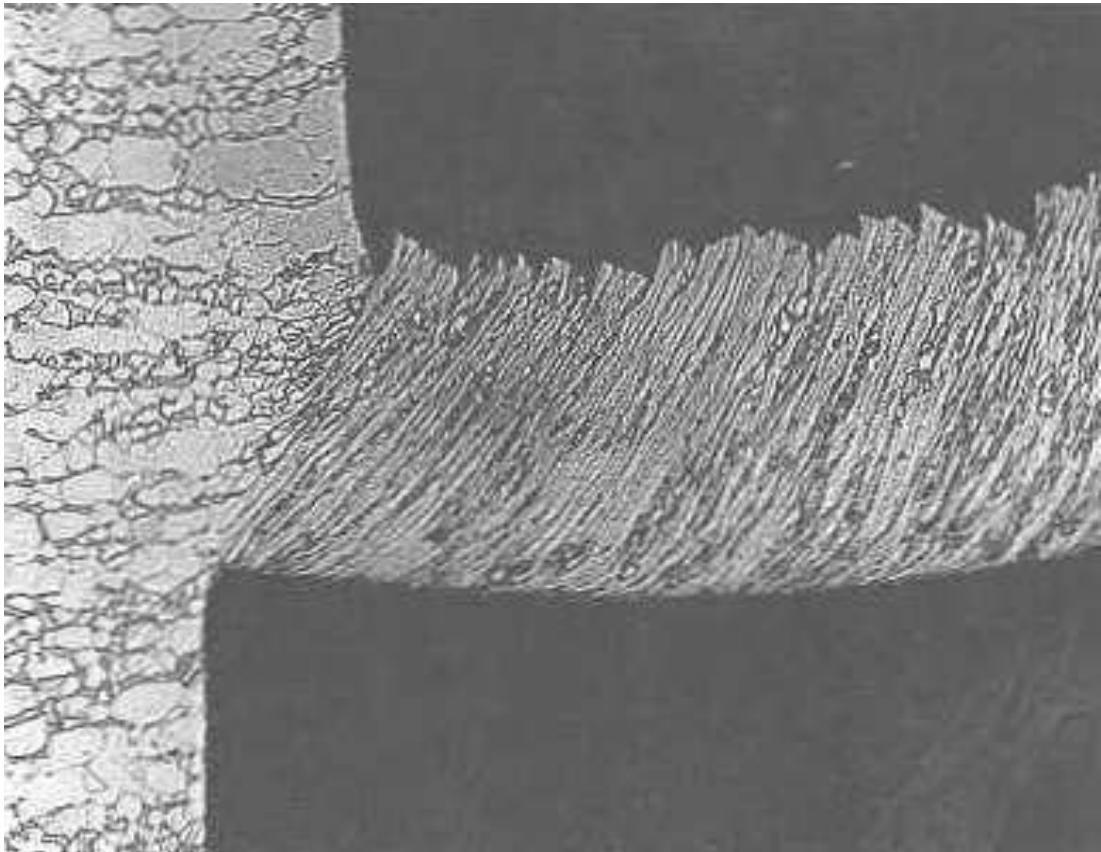
Avšak, v súčasnosti, využívaním vyšších rýchlostí pri obrábaní materiálov bol definovaný ďalší typ triesky a to segmentový.



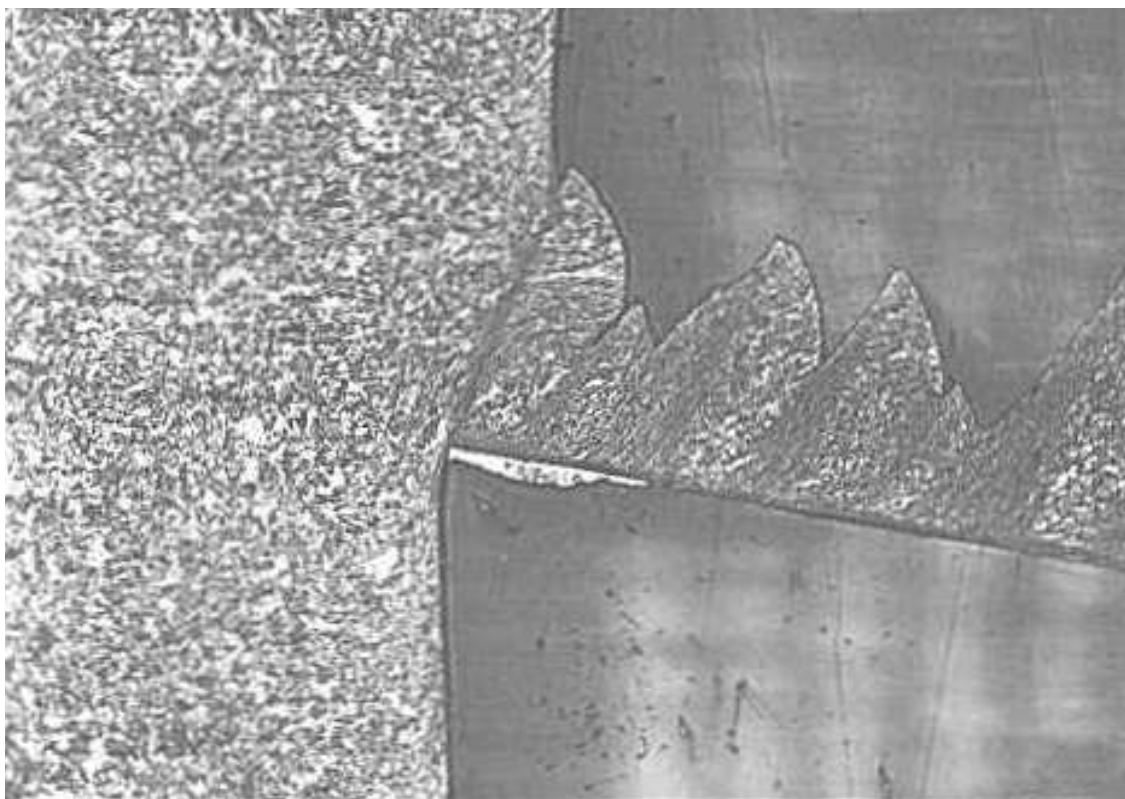
Obr. 0.1 Prerušovaná trieska (1)



Obr. 0.2 Trieska s viditeľným nárastkom (1)



Obr. 0.3 Plynulá trieska (1)



Obr. 0.4 Segmentová (1)

Prerušovaná trieska sa vytvára pri nízkych rýchlostiach. Nízke teploty spôsobujú, že prvý materiál sa začne mechanicky zpevňovať a prilepovať na

čelo nástroja. Prichádzajúci materiál je zadržiavaný týmto nahromadením a vytvárajú sa zhľuky homogénnych napätí vo veľkých kusoch materiálu pred nástrojom. Vzniká trhľina v rovine strihu, trieska odpadne a zklízne po nástroji. Tento proces sa následne opakuje.

Trieska s nárastkom vzniká pri bežných rýchlostiach 30 m.min^{-1} u ocelí so stredným obsahom uhlíku. Teploty ostávajú nízke a niekoľko mechanicky zpevnených nahromadení ostáva na reznej hrane a trieska sa ponad ne posúva.

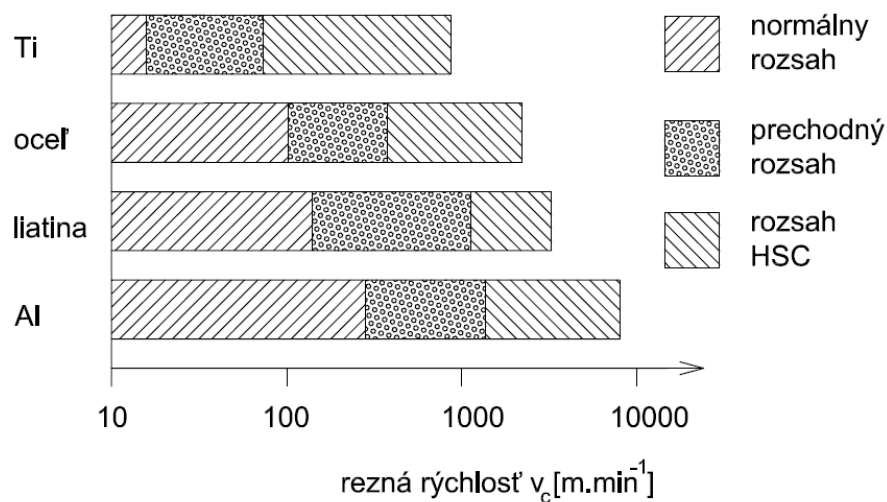
Plynulá trieska je tvorená pri vyšších rýchlostiach a z toho dôvodu aj pri vyšších teplotách. Teplota odstraňuje nárastok, ktorý sa premiestňuje s odchádzajúcou trieskou. V primárnej oblasti sa vytvárajú zreteľné roviny strihu a odchod triesky je veľmi hladký.

S rastúcou reznou rýchlosťou dochádza u väčšiny materiálov k premene z plynulej triesky na segmentovanú. Tento typ triesky pretrváva s ďalším zvyšovaním rýchlosti. Žiadne dodatočné zmeny alebo návrat k plynulej trieske nebol zaznamenaný aspoň do rýchlosti $30\,500 \text{ m.min}^{-1}$. Deformácia triesky je nerovnaká v každej vrstve. V úzkom páse medzi segmentami je deformácia veľmi vysoká. Naproti tomu, deformácie nachádzajúce sa v segmentoch sú relatívne malé. Bolo zistené, že výnimočne tenké roviny strihu (až $0,002 \text{ mm}$) sú oddelené omnoho väčšími oblasťami malého napätia. Z fyzikálneho hľadiska sa môže takáto trieska podobáť prerušovanej trieske.

Prechod, pri ktorom dochádza k premene typu triesky z plynulej na segmentovanú zvyšujúcou sa rýchlosťou, je typický pre mnohé obrábané materiály a s ďalším zvyšovaním rýchlosti tento typ triesky vytrváva. Deformácia triesky je nehomogenná v závislosti na hrúbke pásma.

Rezná rýchlosť, pri ktorej dochádza k premene typu triesky na segmentovanú je rôzna, vzhľadom k opracovávanému materiálu. U titánových zliatin stačí nízka rezná rýchlosť 10 m.min^{-1} , u superzliatin na báze niklu je to približne 61 m.min^{-1} a v prípade ocelí triedy AISI 4340 je to 244 m.min^{-1} . U týchto ocelí bolo spozorované, že rezná rýchlosť, pri ktorej dochádza ku katastrofickému strihu a jednotlivé segmenty sú vzájomne úplne izolované, klesá so zvyšujúcou pevnosťou. Podobné výsledky boli dosiahnuté aj pri titánových zliatinách a superzliatinách na báze niklu.

V prípade austenitických korozivzdorných ocelí je prechodná rýchlosť približne 35 m.min^{-1} . Tvorba segmentovanej triesky bola spozorovaná až do rýchlosti 300 m.min^{-1} , avšak pri ktorých bola životnosť nástroja prakticky nevyužitelná.



Obr. 0.5 Rozsah rýchlostí pri niektorých typoch obrábaných materiálov (8)

V doterajších výskumoch bolo overené, že segmentovaná trieska nieje vyvolávaná vibráciami nástroja, ale súvisí so základnými metalurgickými vlastnosťami obrábaného materiálu pri použitých obrábacích podmienkach.

	v_c [m.min ⁻¹]	a_p	a_e	f_z [mm]
Hrubovanie	100	6 – 8 % D	35 – 40 % D	0,05 – 0,1
Jemné hrubovanie	150 - 200	3 – 4 % D	20 – 40 % D	0,05 – 0,15
Dokončovanie	200 - 250	0,1 – 0,2 mm	0,1 – 0,2 mm	0,02 - 0,2

Tabulka 0.1: Prehľad podmienok obrábania kalenej ocele u jedn. operáciach s použitím nástroja zo slinutého karbidu s povlakom TiC,N (8)

Tieto hodnoty sú samozrejme približné. Závisia na určitých podmienkach, ako napr. priemer nástroja, tvrdosť materiálu atp.

Voľba nástroja

V oblasti výroby foriem sú maximálne rozmery obrobku z hľadiska ekonomickej výhodnosti od hrubovania až po dokončovanie vysokými rýchlosťami približne 400x400x150 (d,š,v). Tieto rozmery odpovedajú relatívne malému úberu materiálu a samozrejme taktiež dynamike a rozmerom nástroja. V praxi sú však tieto rozmery menšie.

Nástroje majú priemer 1-20 mm. Tieto nástroje (čelná, guľová fréza) sú vyrobené zo slinutého karbidu, cemetu a ďalších materiálov. Slinutý karbid je produkt práškovej metalurgie tvorený rôznymi karbidmi a kovovým pojivom. Jedná sa o výhodnú kombináciu vlastností. Výhodná je voľba guľových fréz a nástrojov, ktoré dokážu obrábať popri strmých stenách obrobku.

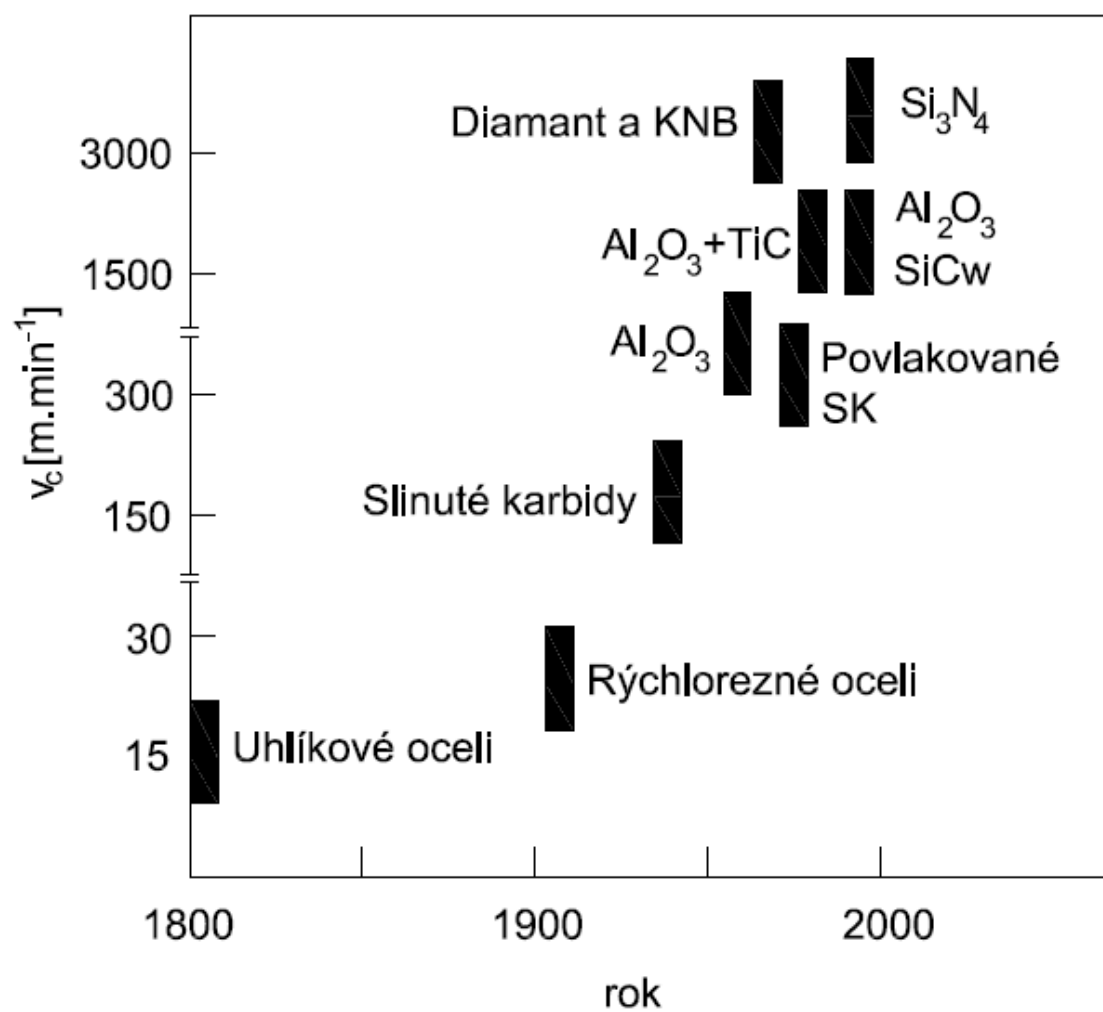
Karbonitridové cermety sú vďaka vysokej entalpii tvorby TiC, TiN odolné voči tvorbe nárastku na čele nástroja, vydrolovaniu ostria a tvorbe výmolu. Z dôvodu priaznivého vývoja opotrebenia na chrbte nástroja pri vyšších rýchlostiach sa predlžuje trvanlivosť nástroja. Z týchto uvedených vlastností je zrejmá vhodnosť tohto materiálu k použitiu pri polodokončovaní nelegovaných a korozivzdorných a nelegovných ocelí pri vysokých rýchlostiach.

Pri vysokorýchlostnom obrábaní hliníka sa používa polykryštalický diamant, kde rýchlosti presahujú aj $5000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jedným z hlavných parametrov pri dokončovaní je použitie malej hĺbky rezu, ktorá by nemala presiahnuť u hodnôt a_p, a_e cca 0,2 mm, čím sa predchádza nadmernému vychýleniu nástroja a držiaku a zároveň sa dosahuje vysoká geometrická presnosť a úroveň tolerancie.

Požiadavky na nástroje zo slinutého karbidu:

- vysoká presnosť nabrúsenia, čím nedochádza k hádzaniu cez $3 \mu\text{m}$,
- zrnitosť slinutého karbidu nepresahuje $0,5 \mu\text{m}$,
- neutrálny alebo negatívny uhol nastavenia,
- použitie nanovrstiev,
- krátke rezné hrany na zníženie risku vibrácií, rezných síl a odchýliek,
- kuželovité frézy hlavne pre menšie priemery,
- materiály pre povlakovanie karbid titánu TiC, oxid hlinitý Al_2O_3 , ktoré vytvárajú veľmi tvrdé vrstvy zaručujúce odolnosť voči opotrebeniu a chemickú neutralitu tým, že medzi nástrojom a trieskou vzniká chemická a fyzikálna (tepelná) bariéra,
- nástroje, v ktorých sú vedené kanáliky pre vedenie podtlakového vzduchu alebo chladiacej kvapaliny.



Obr. 0.1 Vývoj nástrojových materiálů (2)

Využitie rychlostného obrábania pri obrábani ocelí a iných materiálov

Korozivzdorné oceli

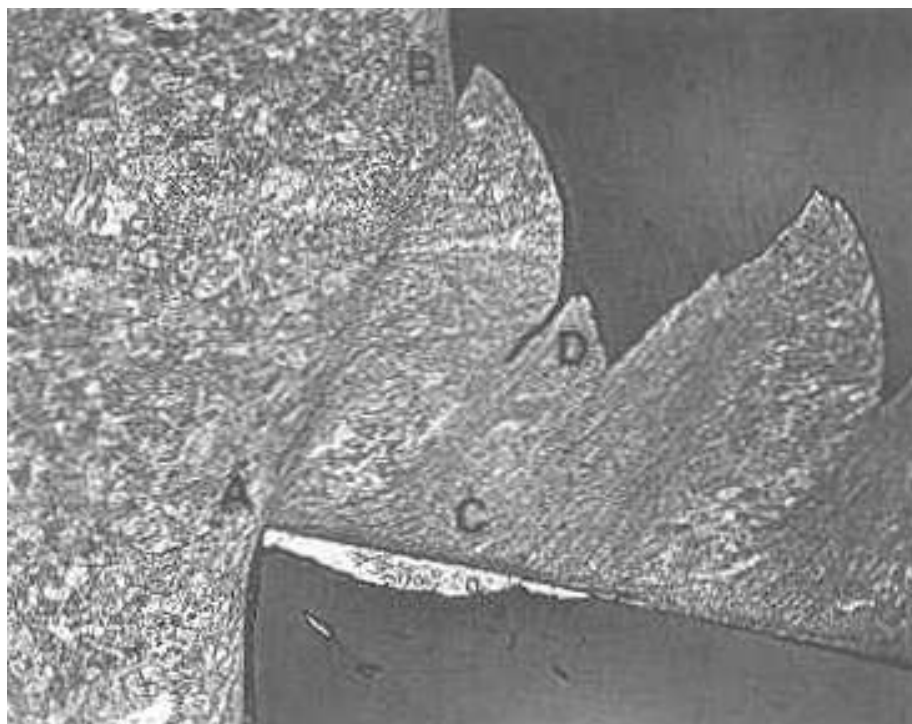
Pre väčšinu týchto ocelí je charakteristický značný obsah legujúcich prvkov, pričom hlavným legujúcim prvkom je chróm, čím sa vytvára snaha o zmenu štruktúry za účelom zlepšenia odolnosti proti korózií a ďalším vlastnostiam a taktiež na dosiahnutie vyššej pevnosti. Iné vlastnosti závislé na štruktúre sú značne sprevádzané kolísaním pevnosti. Pri obrábaní korozivzdorných oceli, či už ide o feritické, martenzitické alebo austenitické sa využívajú rozsahy nízkych a vyšších rýchlostí a to $40-90 \text{ m.min}^{-1}$ a $180-400 \text{ m.min}^{-1}$ a práve medzi týmito oblasťami vzniká problém vzniku nárastku.

So zvyšujúcim sa obsahom legujúcich prvkov v korozivzdorných oceliach sa samotné obrábanie stáva náročnejším a nákladnejším. Požiadavky na vlastnosti materiálu na odolnosť voči korózií však obmedzujú v určitých oblastiach použitie potrebného množstva prísad, ktoré by napomáhali zamedzovaniu tvorby nárastku na brite nástroja.

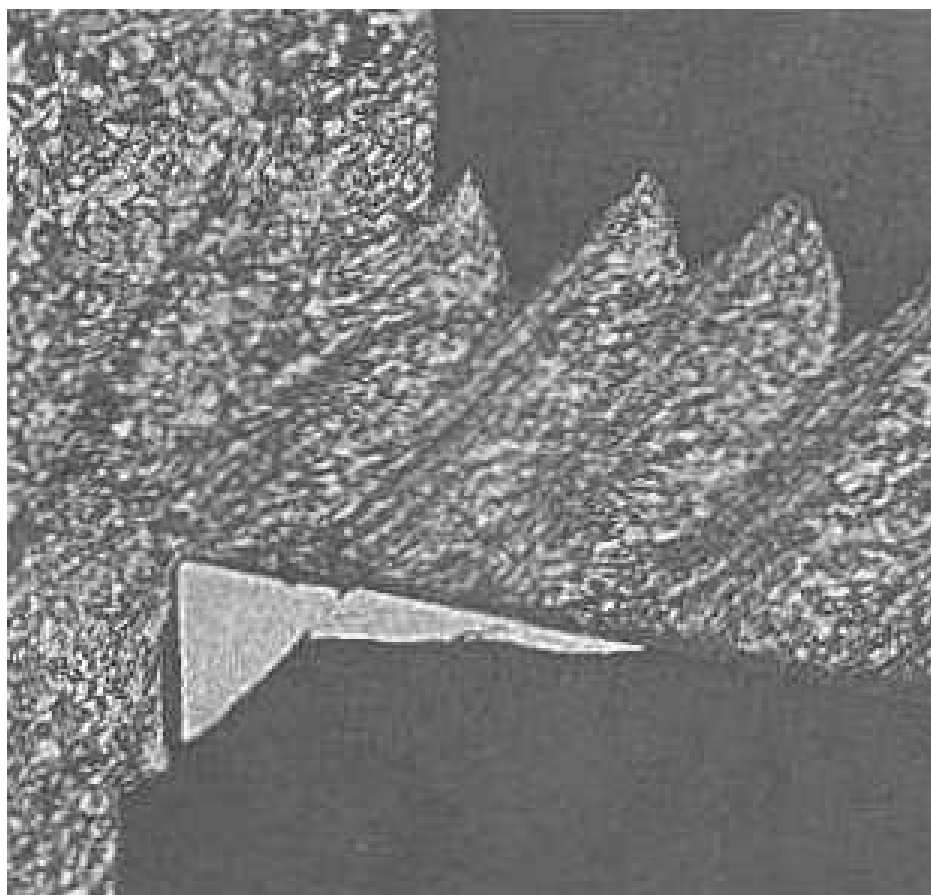
Charakteristickými vlastnosťami a následkami pre korozivzdorné oceli je silný sklon k deformačnému zpevneniu (opotrebenie v tvare vrubu na chrbte nástroja), stabilné húževnaté chovanie (vysoké rezné sily a obtiažny lom triesky), sklon k nalepovaniu (tvorba nárastku).

Obecne treba pristupovať k obrábaniu korozivzdorných ocelí nasadením strojov so stabilnou konštrukciou, čo znamená že vysoká tuhosť obrábacieho stroja a spoľahlivosť chodu vretena sú veľmi dôležité. Nástroje a obroby musia byť čo najstabilnejšie upnuté. Geometria britu by mala zlučovať vysokú ostrosť britu s dodatočnou spoľahlivosťou ostria a je nutné voliť vhodný polomer špičky pre dané použitie.

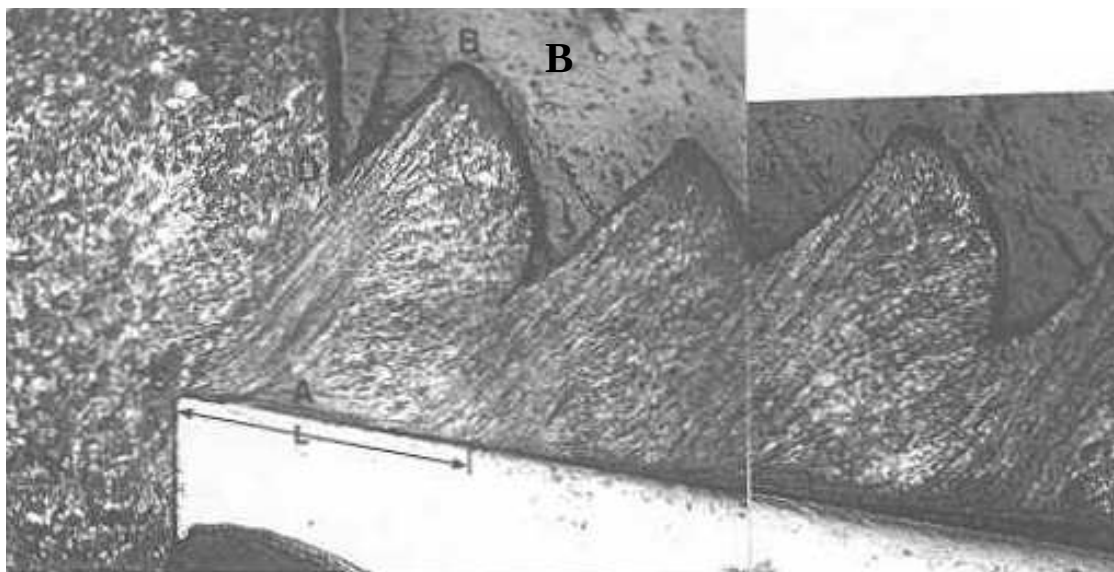
Sled udalostí typických pre cyklus segmentácie triesky bol stanovený pomocou fotografických záznamov (obr. 6.1 až 6.4) na špeciálnych prerušovačoch rezu. Tieto zábery boli získané pri obrábaní rýchlosťami $50 - 150 \text{ m.min}^{-1}$ avšak proces tvorby týchto pilovitých tvarov pokračoval až do rýchlosti 300 m.min^{-1} .



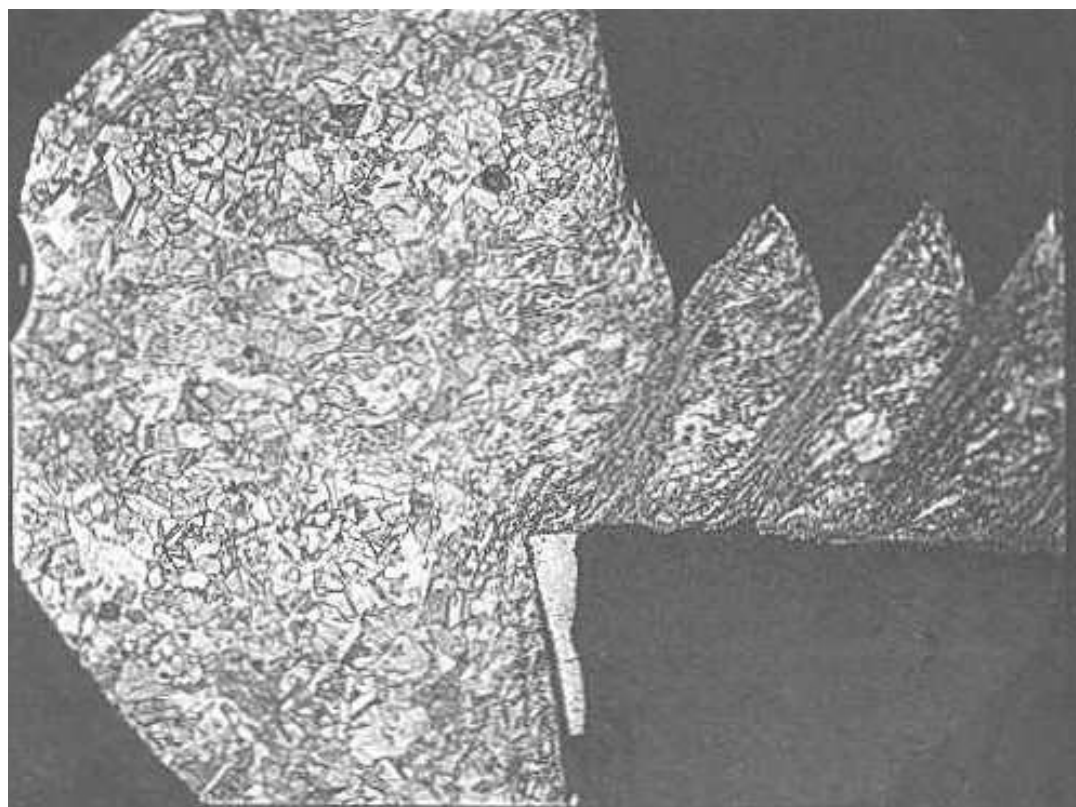
Obr. 0.1 Naznačený vznik strihu v strihovej rovine AB (1)



Obr. 0.2 Postupné opakovanie strihu od strihovej roviny (1)



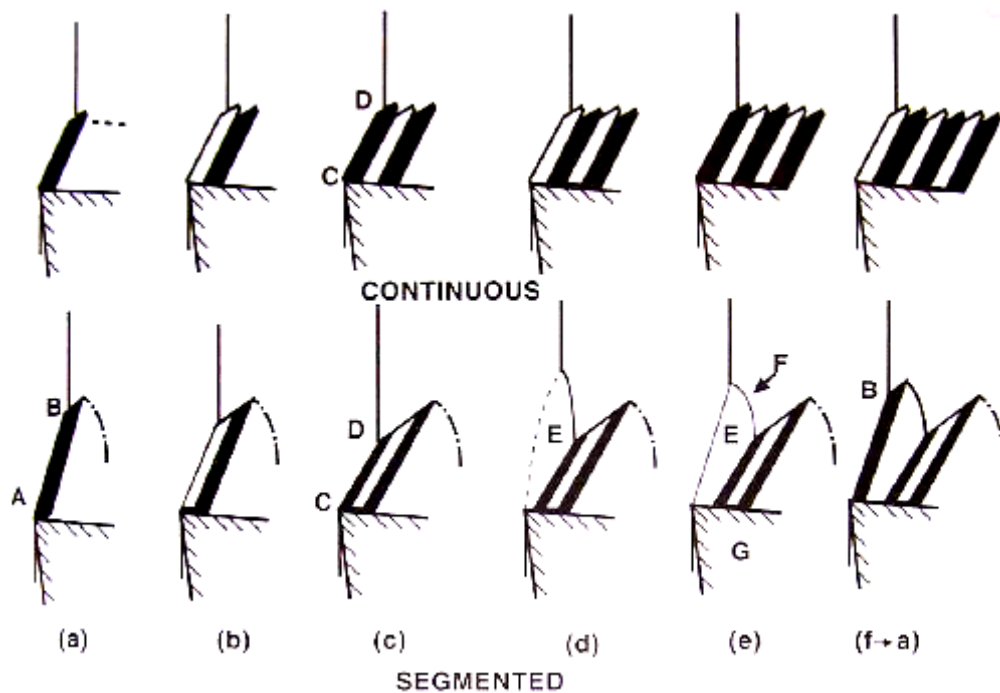
Obr. 0.3 Naznačenie konca strihu na kratšej strihovej rovine CD (1)



Obr. 0.4 Dočasne zadržaný strih (1)

Obr. 6.1 a 6.5a ukazujú tú časť procesu, pri ktorej sa začína strihová nestabilita pozdĺž dlhej strihovej roviny AB. Jediný klzový pás viditeľný v bode B je podobný klzu ako na obr. 4.3, ale je jasné že následné pokračovanie vzniku klzu už nemá pôvodnú dĺžku AB ako je to práve u plynulej triesky. Táto dĺžka strihovej roviny sa zkráti na CD. Jasný dôkaz je zreteľný na obr. 6.4, ktorý bol

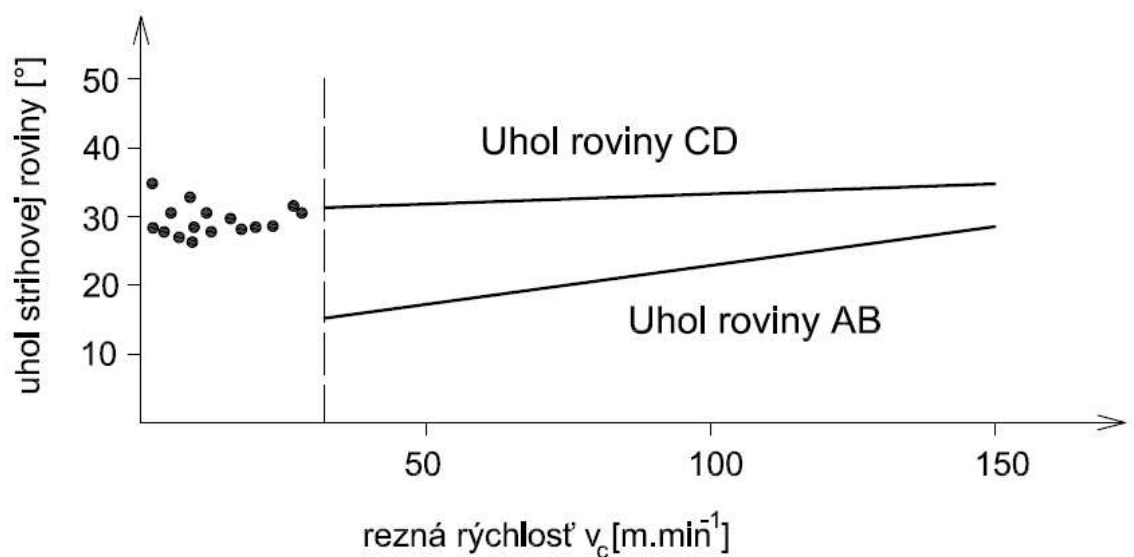
zachytený na konci vybranej časti procesu strihu. Tento cyklus zkracovania strihovej roviny je postupný a je naznačený na obr. 6.5 a-c.



Obr. 0.5 Schematický diagram tvorby plynulej pod $35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a segmentovej triesky nad $35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (1)

Dĺžka CD je približne rovnaká u oboch typov triesky a uhol tejto roviny strihu je $\Phi_{CD} \sim 30^\circ$, naopak uhol strižnej roviny AB je $\Phi_{AB} \sim 18^\circ$. Tieto údaje ukazujú, že uhol roviny strihovej roviny sa mení počas jednotlivých častí cyklu tvorby triesky.

Rozdiel medzi jednotlivými uhlami boli spočítané využitím minimálnej a maximálnej hrúbky triesky, ktorých hodnoty boli získané zmeraním rozmerov segmentov. Tieto hodnoty (obr 6.6) boli začlenené do výsledkov meraní uhlu Φ u plynulej triesky pri rýchlosti do $35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

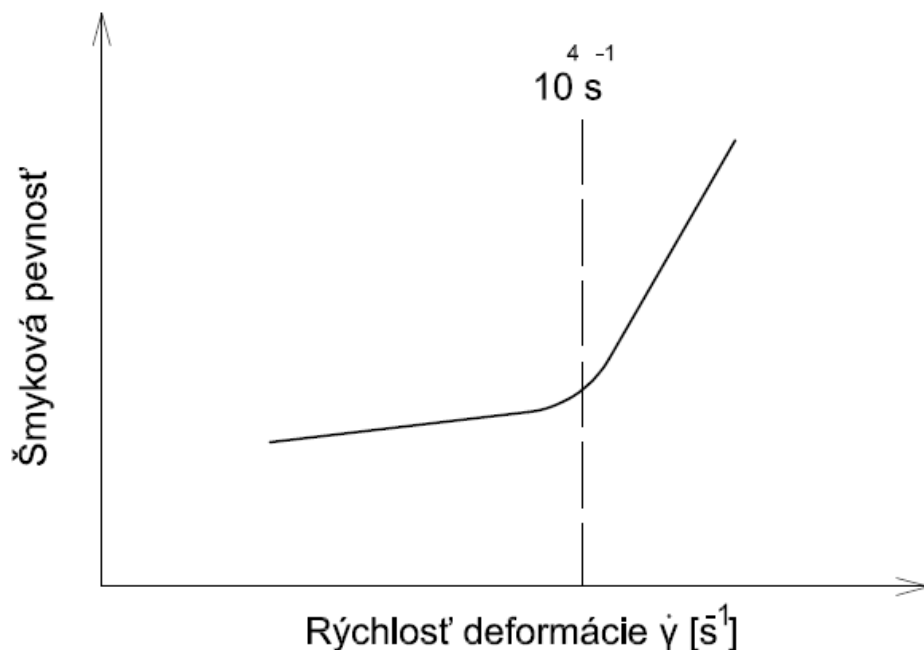


Obr. 0.6 Uhly rovín strihu (1)

Tieto výsledky boli neskôr získané použitím štandardnými meracími a váhovými spôsobmi, ktoré stanovujú hrúbku triesky a uhol šmykovej roviny.

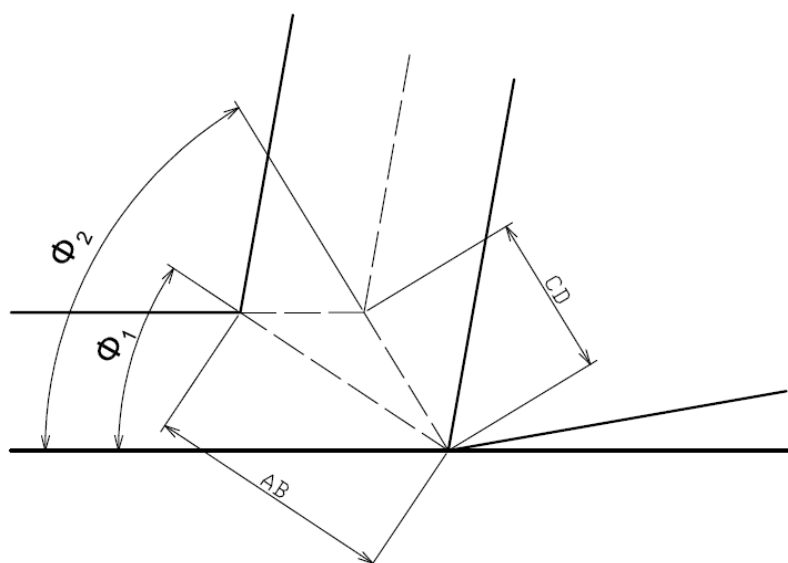
Pri analyzovaní tvorby segmentovej triesky korozivzdornej ocele treba riešiť striedavé predlžovanie prim. oblasti strihu pri rýchlostiach nad 35 m.min^{-1} , ktoré vo výzkumoch pokračovalo až do max. možnej rýchlosti 300 m.min^{-1} , strih nepokračuje v tejto rovine, vzdialenosť AB sa následne zkracuje na CD ako je znázornené na obr. 6.1 až 6.4. Tento proces predchádza dočasnému zadržovaniu strihu a nárastku pred nástrojom.

Tieto pozorovania naznačujú, že aby sa rovina strihu stala dočasne kratšia pri vyšších rýchlostiach, musí sa viaznutie cyklickej povahy zaviesť do sekundárnej oblasti. A z tohto dôvodu sa pri vysokých rýchlostiach mechanizmus uviaznutia a klzu vytvára na čele nástroja, čo vedie k tomu, že počas uzamknutia strihu je rýchlosť triesky značne nižšia ako u časti cyklu, kedy dochádza k sklzu.



Obr. 0.3 Zmena priebehu šmykovej rýchlosti deformácie (1)

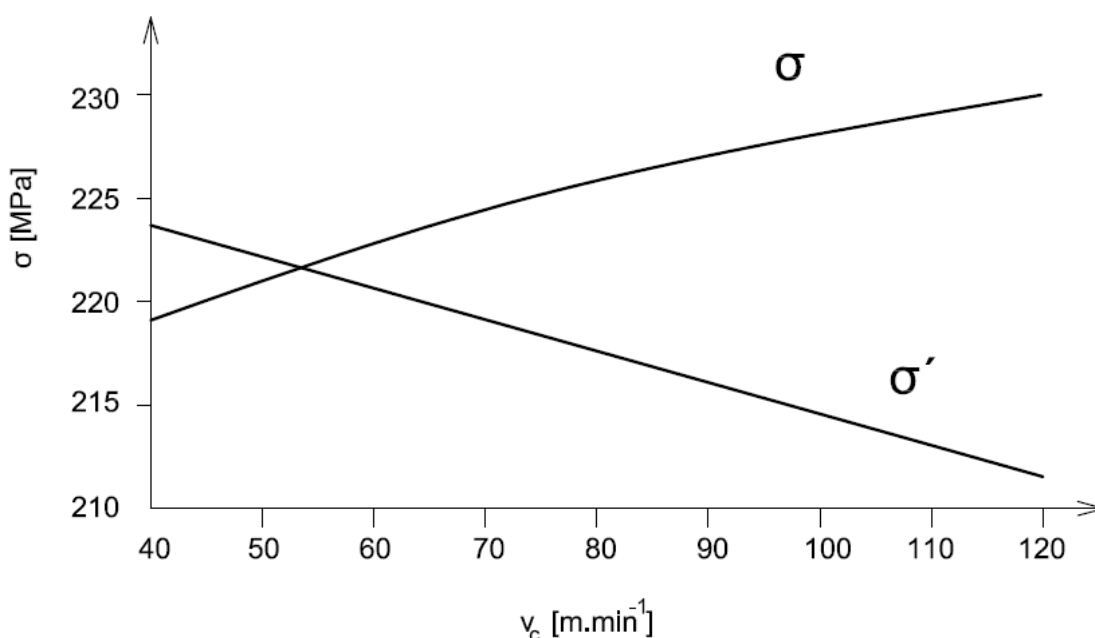
Pri určitej prahovej rýchlosti vstupuje materiál v sekundárnej zóne šmyku do oblasti, kde krivka začne prudko narastať (obr. 6.3). Materiál s vyššou pevnosťou v šmyku spôsobuje uviaznutie na čele nástroja. Toto zadržiava odchod triesky a zapríčiňuje, že uhol strihovej roviny sa mení k hodnote 18° . O okamžik neskôr sa materiál v sekundárnej oblasti zmäkčí teplotným pôsobením a na krivke sa vráti opäť pod úroveň 10^4 s^{-1} , trieska znova zrýchluje, pričom dovoľuje aby sa strižná rovina stala kratšou na hodnotu uhlu 30° .



Obr. 0.4 Vplyv úhlu Φ na dĺžku strihovej roviny (5)

AISI 4340

Pri výzkumoch tvorby segmentovej triesky vyhotovili Hou a Komanduri model tejto triesky, ktorý vytvorili pomocou zistení z metalurgických vzoriek a to po obrábaní ocele AISI 4340 rýchlosťou 61 m.min^{-1} . Základom pre tento model bola termomechanická nestabilita strihu v primárnej oblasti. Taktiež poznamenali, že sa tam v priebehu utvárania triesky nachádza niekoľko zdrojov tepla, ktoré keď sa zlúčia, vytvoria tak predhrievanú veľkú oblasť pred nástrojom.



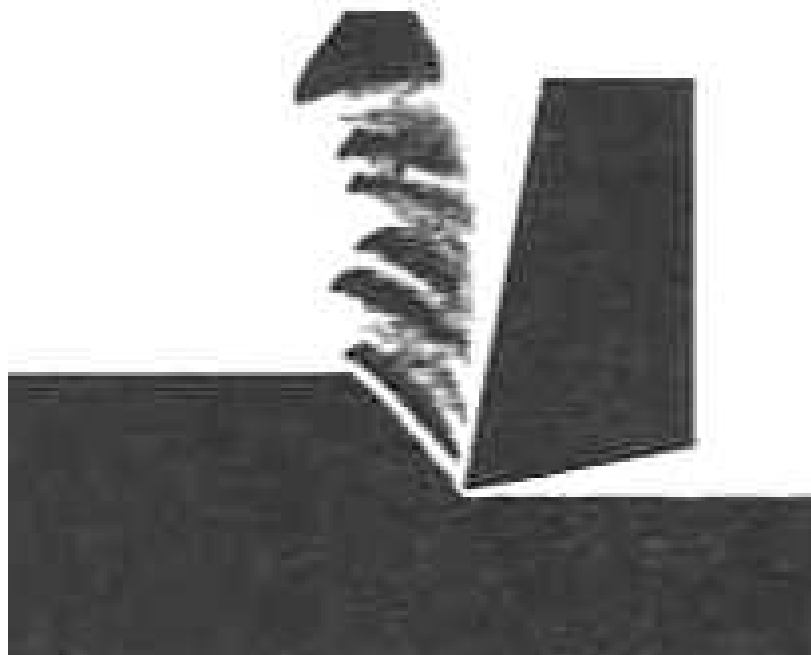
Obr. 0.5 Analýza počiatku vzniku segmentovej triesky pri rýchlosti 52 m.min^{-1} (1)

Ďalším výzkumom bolo zistené, že dochádza k zmene šmykového napätia a to pre σ' pri teplote šmykovej roviny a pevnosti šmyku nahromadeného materiálu a pre napätie σ pri predhrievacej teplote, pri

zvýšenej rýchlosti obrábania. V prípade, ak je hodnota napätia σ' väčšia alebo rovná hodnote σ , tak nedochádza k lokalizácii strihu od momentu, kedy deformačné zpevnenie prevažovalo v pásu strihu. To je v prípade, kedy rýchlosť neprekračuje $52 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Nad touto rýchlosťou, kedy platí $\sigma' < \sigma$, začne prevládať teplotné odpevňovanie nad zpevnením, z toho dôvodu sa proces utvorenia triesky blíži k lokalizácii strihu a segmentácii. Priesečnica týchto dvoch kriviek udáva rýchlosť, pri ktorej dochádza k počiatku lokalizácii strihu.

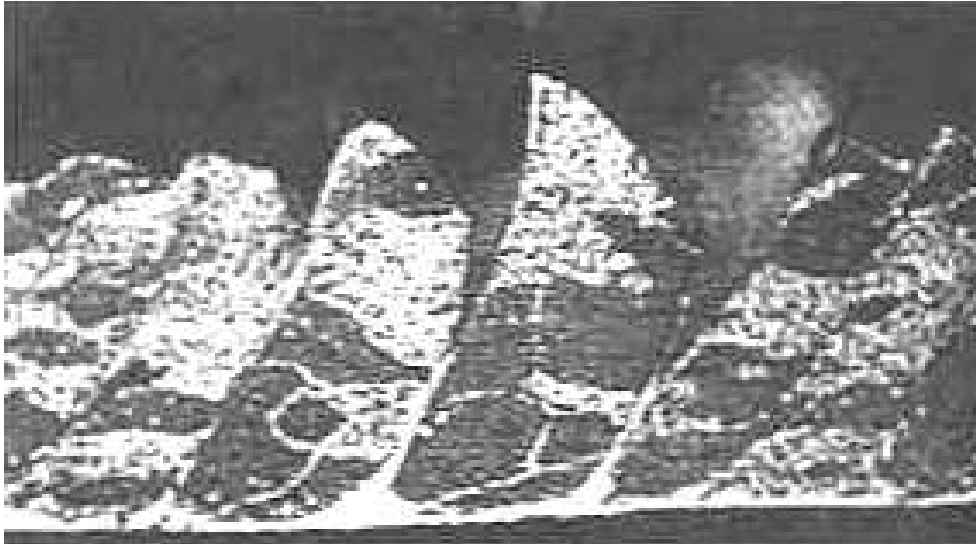
Hliník a titán

Pre pochopenie tvorby segmentovej triesky rýchlostným obrábaním bola použitá metóda konečných prvkov. V tejto časti bola u oboch materiálov, hliník 7050-T7451 a titán Ti-6Al-4V, použitá modelová rýchlosť $3060 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 0.6 Plastická deformácia triesky hliníka 7050-T7451, $v_c = 3060 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (1)

Hliník, ktorý sa používa pri obrábaní je vo forme zliatin. Čistý hliník je pomerne nestabilný s ľahou tvariteľnosťou. Zliatiny hliníku majú veľmi dobré vlastnosti pre obrábanie, teploty pri obrábaní sú nízke, čo vedie k použitiu vyšších rýchlostí. V primárnej oblasti u materiálu 7050-T7451 narastá priemerná teplota vo väčšine triesky na 105°C . Jednotlivé teploty v rozsahu medzi $120 - 190^\circ\text{C}$ boli izolované v lokalizovaných užších pásoch strihu medzi segmentami. Naopak, v sekundárnej oblasti, teplota a plastická deformácia narastá výraznejšie. V zadnej časti tejto oblasti dosahujú teploty hodnoty až 660°C , približne až do bodu tavenia a skutočná plastická deformácia prekračuje 2000 %. Nárast deformácie je väčší ako nárast teploty, pretože dostatkom času dochádza k prechodu tepla skrz triesky do nástroja. Strih je účinne lokalizovaný v sekundárnej oblasti a trieska nadobúda ostrý profil.



Obr. 0.7 Metalografický výbrus triesky 7050-T7451, $v_c = 3060 \text{ m.min}^{-1}$ (1)

Obdobné výsledky boli zistené pri obrábaní titánu. Na obr. 6.8 v detaile je naznačený postupný proces utvárania triesky. Prvý obrázok ukazuje začiatok rezania. Postupným vnikaním nástroja do obrobku sa vytvára strihová rovina a trieska odchádza po čele nástroja; tečná zložka reznej sily dosahuje svoje vrcholné hodnoty. Následne sa začala v obrobku vytvárať nová strihová nestabilita v primárnej oblasti, doprevádzaná uvoľnením napätia. V tomto momente má tečná zložka reznej sily najnižšie hodnoty.



Obr. 0.8 Proces utvorenia triesky (postupné tvorenie) Ti-6Al-4V, $v_c = 610 \text{ m.min}^{-1}$

(1)

V tomto poradí sa tento proces naďalej opakuje. V poslednom obrázku je znázornené zadržanie strihu, čo je dočasné a strih sa v primárnej oblasti znovu začne vytvárať. V tomto okamžiku sa napätie ešte neuvoľnilo, a teda tečná zložka reznej sily je na jej maxime, toto sa začne znižovať akonáhle sa začne vytvárať strih.

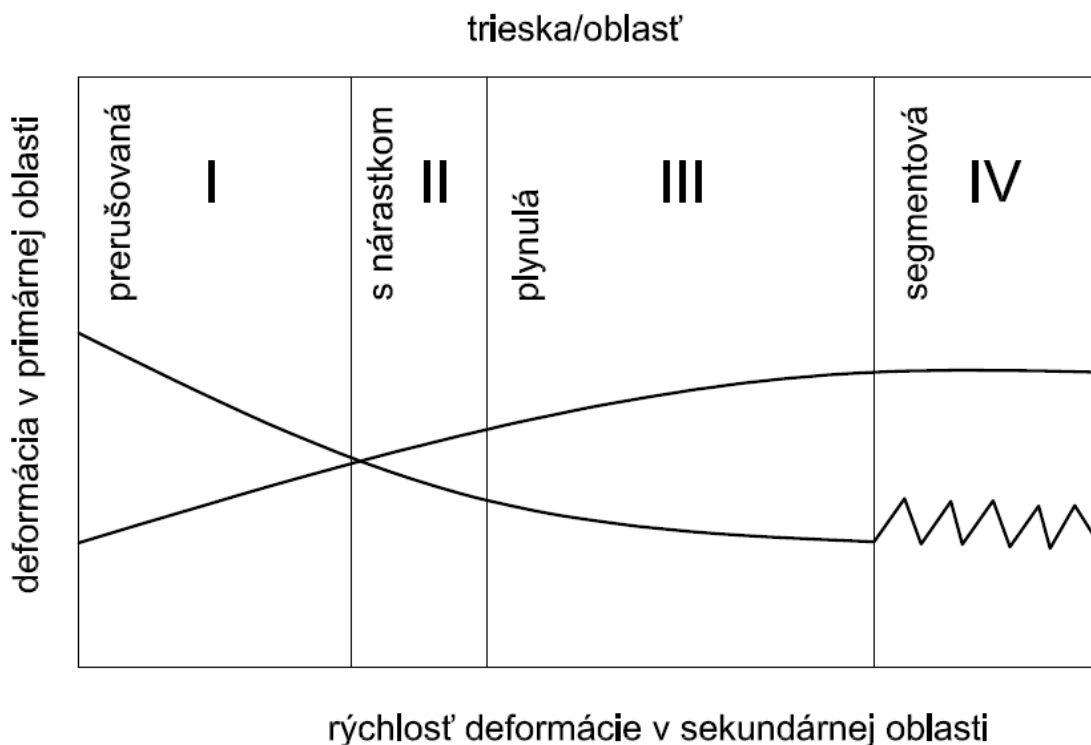


Obr. 0.9 Proces utvorenia triesky (postupné tvorenie) Ti-6Al-4V, $v_c = 610 \text{ m.min}^{-1}$

(1)

Súhrn vysokorýchlostného obrábania

Na jednej strane je celkový cyklus tvorby segmentovej triesky v súčasnej dobe stanovený, k čomu slúžia obr. 6.5 a 6.8, ale na druhej strane fyzikálne udalosti, ktoré vyvolávajú vznik segmentovanej triesky pri prahovej rýchlosti obrábania, nie sú zatiaľ tak spoľahlivé. Obr. 7.1 slúži k prehľadu rôznych typov triesky, avšak nie pre všetky druhy obrábaných materiálov.



Obr. 0.1 Diagram zmeny šmykovej deformácie meniacou sa reznou rýchlosťou (1)

Oblasť I: pri nízkych rýchlostiach sa neprejavuje odpevňovaním materiálu, vyskytuje sa zachytávanie materiálu. Materiál následne podstupuje navrstvenie pred nástrojom.

Oblasť II: rezná rýchlosť je relatívne nízka, vyskytujú sa studené zvary a vznikajú nárastky. Nárast napätí je taký, že trieska a nárastok sú oddelené oblasti.

Oblasť III: zvyšovaním reznej rýchlosti sa zamedzuje tvorbe studených zvarov a dochádza k tvorbe plynulej triesky.

Oblasť IV: účinok rýchlosti deformácie v sekundárnej oblasti sa stáva dôležitým a môže zaviesť mechanizmus zachytávania a sklznutia na čele nástroja. Toto zapríčiňuje, že deformácia v primárnej oblasti je rôzna a vedie k tvorbe segmentovej triesky. Prerušovaná trieska sa vytvára u krehkých

materiálov, ako je liatina. U vysoko húževnatých materiálov sa vytvára trieska plynulá trieska až do vysokých rýchlostí.

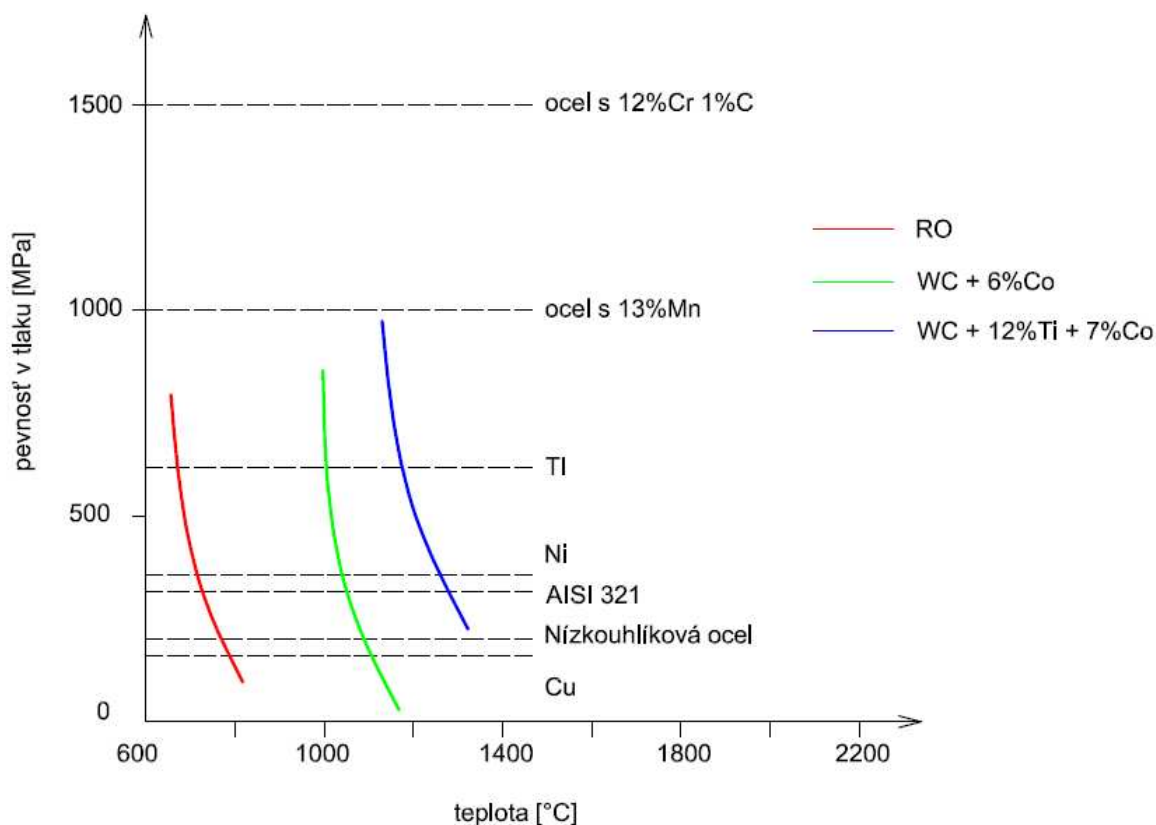
Sily na nástroji

Hlavne pri obrábaní liatiny využívanie v leteckom priemysle, ktoré majú tenkostenné miesta je nutné, aby sily medzi nástrojom a obrobkom boli znižované, z dôvodu znižovania pevnosti materiálu vyplývajúcej zo zvýšenej teploty. Napríklad pri vysokorýchlostnom obrábaní hliníku bolo zistené, že priemerné sily pôsobiace na obrobok sa znižujú, a to až o 15 – 20 %. Pri rýchlosti nad $75 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pri obrábaní ocelí sa vytváranie nárastku začína vytrácať a sily sa postupne znižujú. Najväčší pokles sily nastáva v rozsahu nízkyh a stredných rýchlostí $30 - 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Vypadá to tak, že u všetkých materiálov v rozsahu $200 - 3000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ sa krivka začne vyrovnávať a klesne o 10 – 20 %.

Opotrebenie nástroja

Pri zkúmaní tvorby segmentovej triesky bolo zistené, že tento proces je doprevádzaný únavovým lomom a zreteľným oterom. Kolísavé napätie priam podporuje takýto druh opotrebenia. Predpokladá sa teda, že ak sa zníži intenzita tvorby triesky, tak bude zníženie aj opotrebenie. S tým súvisí aj tlmenie vibrácií nástroja, ktoré bude taktiež priaznivejšie.

Použitie vysokých rýchlostí obrábania je využiteľné, ak rezná hrana bude schopná vydržať vytvorené napätie. Na obr. 7.2 je znázornená pevnosť v tlaku závislá na teplote a jasne naznačuje, že vhodnosť použitia karbidov s obsahom Ti je prevažujúca nas karbidmi s obsahom WC. Tieto krivky sú výrazne strmé, čo je dôvodom katastrofického porušenia reznej hrany pri dosiahnutí limitnej hodnoty rýchlosti a teploty.



Obr. 0.2 Normálové napätia nástrojov (1)

Hospodárnosť obrábania

Ekonomické výhody vysokorýchlostného obrábania sa prejavujú v situáciách, kedy je potrebné nový alebo upravený návrh veľkej monolitckej štruktúry opracovať trieskovým obrábaním. Cieľom je rýchle odoberanie materiálu a dosiahnutie vysokej výkonnosti. Podstatou segmentovej triesky je veľké viaznutie na čele nástroja, na potlačovanie tohto efektu a zvýšenie obrobitelnosti je dôležitá voľba nástroja a Al_2O_3 povlaku, ďalej je to zkrátenie dĺžky kontaktnej plochy a voľba utvárača triesky, čo zníži zachytávanie materiálu na nástroji.

Rýchlostné brúsenie

Rýchlostné brúsenie ako forma obrábania nedefinovanou geometriou nástroja sa v súčasnosti dostáva do popredia záujmu v dokončovacích procesoch výroby, pretože ponúka vynikajúce možnosti zabezpečenia kvality akosti opracovanej plochy.

Vývoj výkonných brúsiacich kotúčov a ich systémov ukázal, že rýchlostné brúsenie v kombinácii s výrobou plotovarov liatim alebo tvárením s malými prídavkami umožní nové usporiadanie operácií s vysokými prevádzkovými kapacitami.

Pre správny prístup k vyriešeniu tohto postupu je dôležité analyzovať základný systém všetkých súčastí tohto procesu. Pričom tieto treba najskôr skúmať ako celok. Ďalej je nutné posudzovať kritéria vzťahujúce sa k úprave brúsiacich kotúčov a strojov.

Mechanizmus a analýza procesu rýchlostného brúsenia

Pre pochopenie tohto procesu bol zavedený vzťah 7.1 geometrický parameter triesky $h_{\max}$ maximálnej hrúbky triesky (18, 19, 20):

$$h_{\max} = C_{gw} \cdot \left(\frac{v_o}{v_k} \right)^e \cdot \left(\frac{a_e}{d_{eq}} \right)^{\frac{e}{2}} \quad (7.1)$$

kde:

C_{gw} - konštanta pre topografiu brúsiaceho kotúča

v_o - obvodová rýchlosť obrobku

v_k - obvodová rýchlosť kotúča

a_e - prísuv

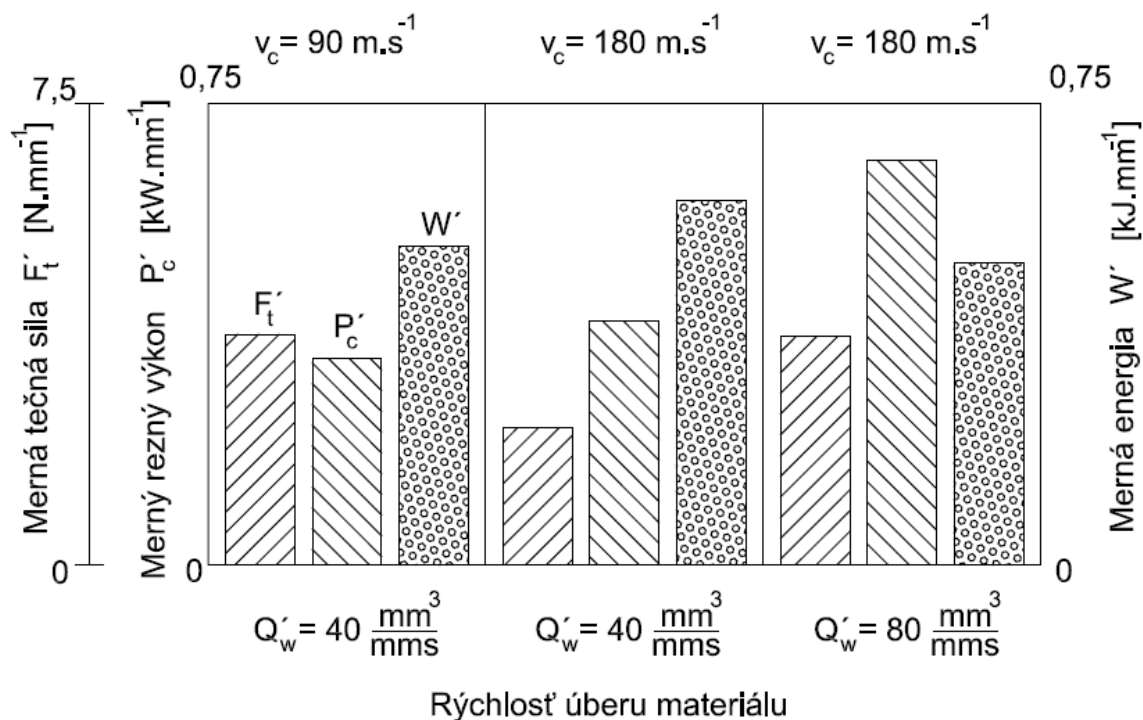
d_{eq} - ekvivalent priemeru kotúča

e - exponent ($e > 0$)

Z tohto vzťahu je zrejmé, že pri zvyšovaní hodnoty v_k obvodovej rýchlosti kotúča za podmienky zachovania konštantnosti ostatných parametrov, dochádza k znižovaniu maximálnej hrúbky triesky teda aj k znižovaniu rezných síl a zlepšenie kvality povrchu a taktiež zníženiu opotrebenia brúsneho kotúča. Tieto výhody majú za následok zlepšenie rozmerových a tvarových vlastností obrobku.

Ďalej je možné zvyšovať obvodovú rýchlosť obrobku a kotúča zároveň pri zachovaní maximálnej hrúbky triesky s cieľom zvyšovať produktivitu, avšak v závislosti na zvolených charakteristikách a požiadavkách na obrobok. S týmto zvyšovaním rýchlosti súvisí aj zmena mechanizmu tvorby triesky.

Je nutné uvažovať aj teplo vznikajúce pri brúsení, kedy so zvyšujúcou rýchlosťou sa jeho množstvo zväčšuje. Toto množstvo môže byť zredukované v prípade, ak sa zkrátí čas vzájomného kontaktu medzi nástrojom a obrobkom.



Obr. 0.1 Zmena merných veličín v závislosti na rezných rýchlostiach a rýchlosti úberu materiálu (6)

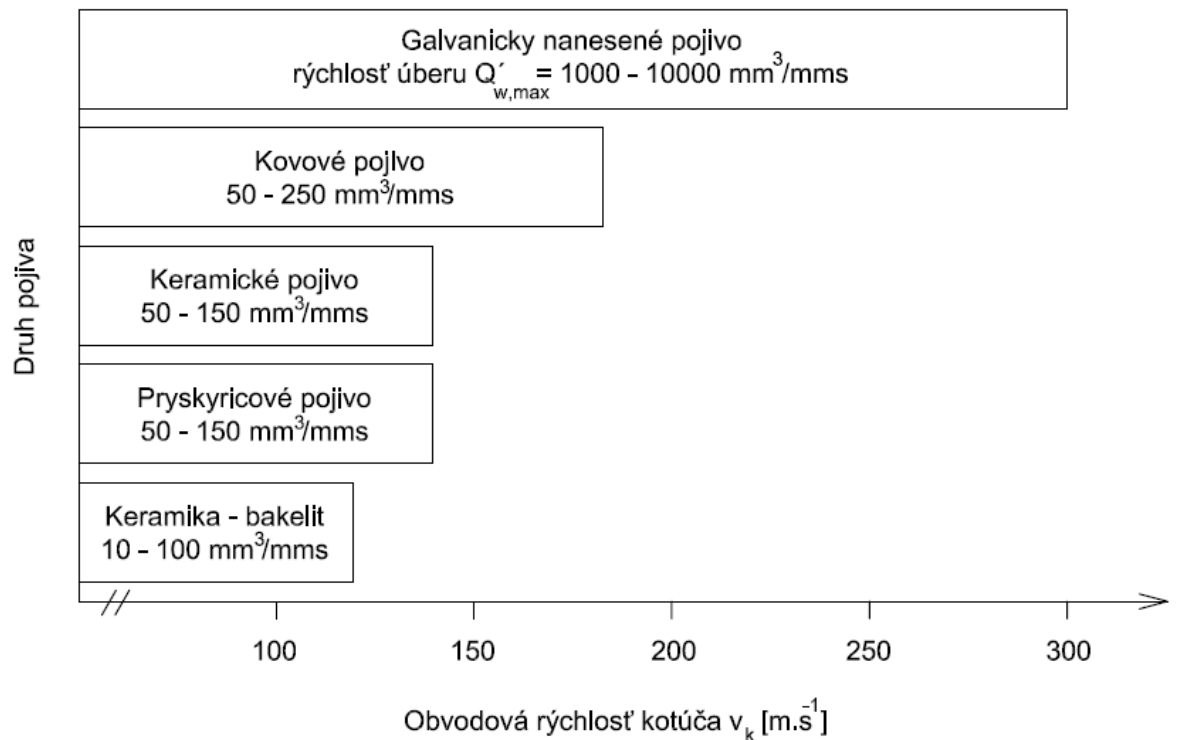
Na obr. 7.1 je naznačené, že dvojnásobné zvýšenie rezných rýchlostí má za následok zníženie tečnej zložky mernej sily F_t' , pričom ale stúpa merný rezný výkon W' , avšak nie tak výrazne. Ak sa zvýši rezná rýchlosť a zároveň aj rýchlosť úberu, potom sa zvýši tečná sila ako aj merný rezný príkon. Hodnota mernej energie však klesne s porovnaním s predchádzajúcimi hodnotami. Dá sa teda očakávať menší prestup tepla do obrobku, čo naznačuje, že produktivita obrábania môže byť zvýšená bez výraznejšieho prejavu nežiadúceho tepelného účinku na obrobok.

Brúsiace kotúče

Pre rýchlostné brúsenie sú brúsiace kotúče tvorené telesom s vysokou mechanickou pevnosťou a tenkou vrstvou brúsiaceho materiálu, ktorá je nanosená na toto teleso. Doporučované sú predovšetkým kotúče KNB, ktoré sú s ohľadom na vysoké obvodové rýchlosti a vďaka svojim vlastnostiam, ako opotrebenie na degradáciu telesa kotúča vhodné pre rýchlostné brúsenie. Táto vhodnosť vychádza z jeho vysokej tvrdosti a tepelnej a chemickej stálosti. Pre brúsenie malých dávok do rýchlosti 125 m.s⁻¹ sú vhodné aj bežné kotúče.

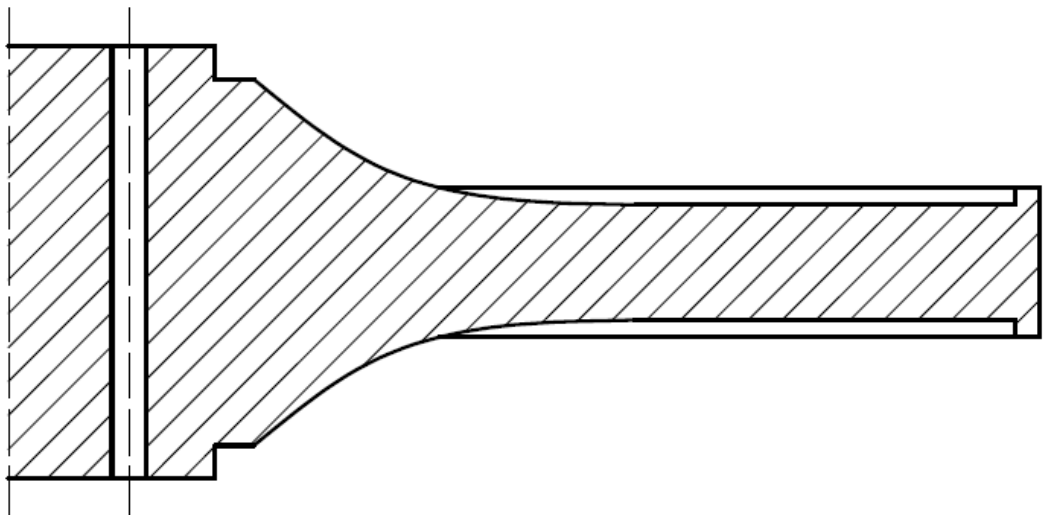
Kotúče využívané pre rýchlostné brúsenie sú tvorené kovovým pojivom, jednovrstvové a s povlakom naneseným galvanicky. Takto upravené sú práve kotúče KNB, ktoré v súčasnosti zvládajú rýchlosti až do 300 m.s⁻¹. Slinované viacvrstvové kovové pojivá sa vyznačujú väčšou tvrdosťou a odolnosťou voči opotrebeniu. Za zmienku stojí aj možnosť využitia keramických pojív s veľkou odolnosťou voči abrazívnemu opotrebeniu, pričom pri týchto typoch pojív je vrstva brusiva vystavená

veľkému zaťaženiu s možnosťou vzniku trhlín. Preto sa využívajú segmentové kotúče s týmto typom pojiva.



Obr. 0.2 Typy pojí pre kotúče KNB (6)

Pri voľbe vhodného pojiva treba brať do úvahy aj teleso brúsiaceho kotúča s ohľadom na zvolenú obvodovú rýchlosť a malo by byť zbavené zbytkových pnutí.



Obr. 0.3 Tvar kotúča pre rýchlostné brúsenie v reze (6)

Tvar brúsiacich kotúčov pre rýchlostné brúsenie sa líši od kotúčov s rovnomerným tvarom, pretože skutočná vypočítaná hodnota napätia je menšia ako tečná zložka napätia na upínacej diere. Toto vypočítané napätie teda nesmie prekročiť mez pevnosti materiálu kotúča.

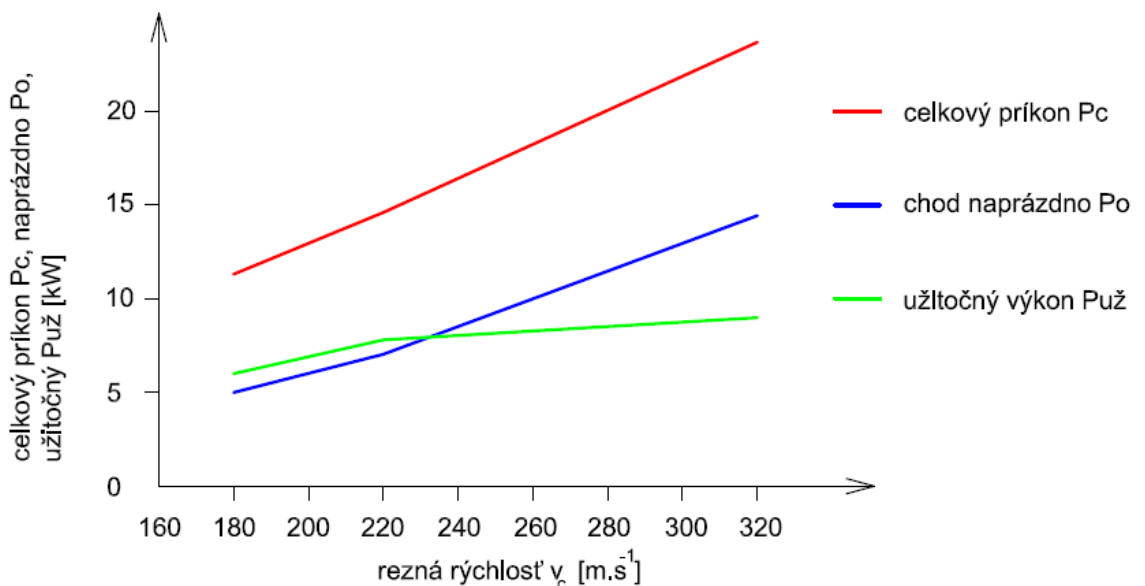
Pri využití supertvrdých materiálov sú telesá kotúčov vyrobené z ocele, hliníkových zliatin, uhlíkových vlákien alebo zosílených plastov. Pre porovnanie sú v tab. znázornené niektoré vlastnosti ocelí a uhlíkových vlákien.

Materiálové vlast. telesa	Jednotka	Oceľ	Zosílené uhl. vlákno
Merná hmotnosť ρ	$[\text{N.dm}^{-3}]$	78,4	15,8
Modul pružnosti E	$[10 \times \text{N.mm}^{-2}]$	200	70
Pevnosť v ťahu τ_y	$[\text{N.mm}^{-2}]$	350	470
Koef. lineárnej rozťažnosti α	$[10^{-6} \text{ K}]$	12	1

Tabuľka 0.1 Porovnanie materiálových vlastností oceli a zosílených uhlíkových vlákien (6)

Príkon a príchod chladiva

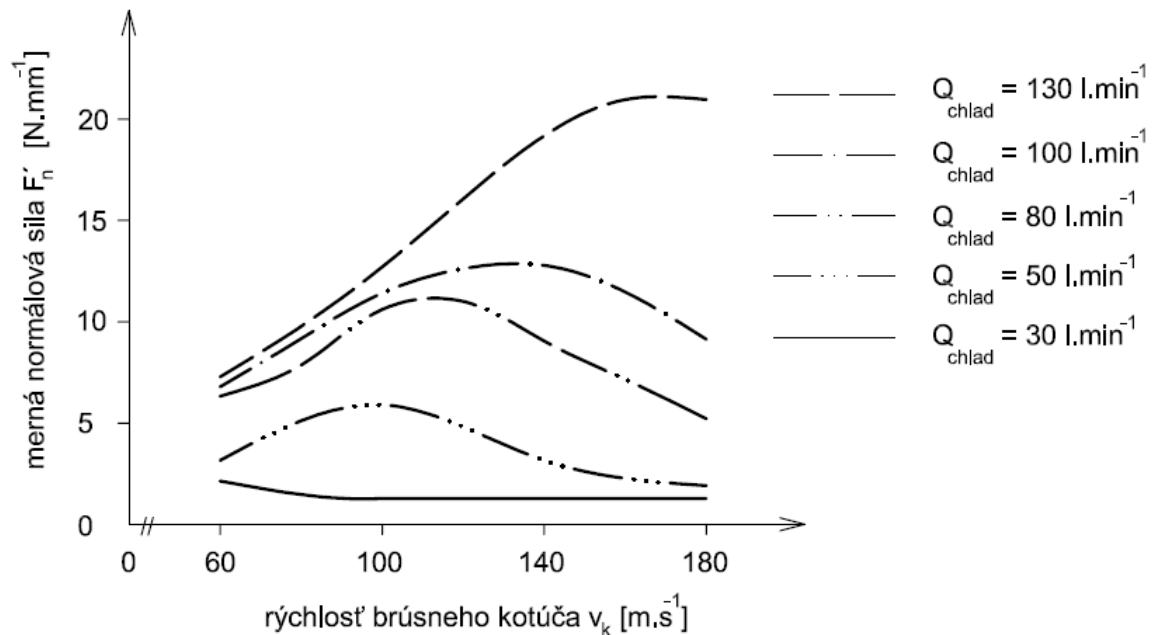
Výhody rýchlostného brúsenia pomocou kotúčov KNB sú využiteľné jedine vtedy, ak sú k tomu usporiadané aj stroje, ktoré musia byť dokonale tuhé a to tak, aby boli schopné vyvinúť na vretene až $20\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ (podľa priemeru kotúča) pre potreby vysokoproduktívnej technológie, s čím súvisí samozrejme schopnosť náhonu a ložísk zvládnuť takto náročné podmienky bez vibrácií. Pri zkúmaní zameraných na hodnoty príkonu bolo zistené, že príkon rastie so zvyšujúcou sa reznou rýchlosťou úmerne (obr. 7.4).



Obr. 0.4 Príkon na vretení v závislosti na reznej rýchlosti. Kotúč KNB, šírka 2,5 mm, materiál 16MnCr5, $Q'w = 100 \text{ mm}^3/\text{mms}$ (18)

Zvýšenie príkonu môže byť taktiež spôsobené trením vzduchu a chladiaceho média, ktoré zrýchluje na hodnotu reznej rýchlosti kotúča do takej miery, že hodnoty tohto zvýšenia bývajú až 8 kW v prípade, že rozmer

kotúča je 350 mm a rýchlosť je 400 m.s^{-1} . Normálová zložka reznej sily rastie v závislosti na množstve privádzaného chladiaceho média, čo je ale možné ovplyvniť možnosťami jeho prívodu napríklad použitím dýzy.



Obr. 0.5 Hodnoty mernej normálovej sily pre rôzne množstvá privádzanej chladiacej kvapaliny (18)

Tieto dýzy modifikované podľa tvaru tvaru a rozmerov kotúča, sú schopné chladiť miesto styku medzi kotúčom a obrobkom efektívne, čím sa znižuje aj množstvo chladiwa. Pre porovnanie dýza spotrebuje 10 l/min, chladienie kotúčom 2 l/min a pri vstrekaní je to až 50 l/min.

Perspektívy rýchlostného brúsenia

V súčasnosti sa pri použití dosahujú obvodové rýchlosti kotúča v rozsahu $80 - 250 \text{ m.s}^{-1}$ a to pri brúsení ozubených kolies, súčiastiek z ložiskovej ocelli alebo pri brúsení zalomených hriadelí automobilových motorov. Kotúče využité pri týchto operáciach majú galvanicky nanesenú vrstvu KNB.

Z týchto príkladov je zrejmé, že využitím supertvrdých materiálov sa poskytujú možnosti pre nové technológie brúsenia. Výhodou je taktiež možnosť spojovať hrubovacie a dokončovacie brúsenie na zkrátenie celkového času tohto procesu. Zamerať sa treba aj na kotúče KNB s keramickým pojivom a ich ďalším zlepšovaním. Neposlednou zložkou tohto procesu je chladienie, špeciálne jeho množstva a vplyvu na okolie.

Rýchlostné brúsenie napomáha zvyšovať produktivitu, je však nutné túto technológiu naďalej vylepšovať a zdokonaľovať s ohľadom na výrobné prostredie.

ZÁVER

V súčasnosti sú znalosti hnacou silou, čo platí samozrejme aj v strojírenství a cena týchto znalostí neustále rastie. Investovaním do pracovníkov, ako aj vedenia môže teda priniesť značný náskok pre konkurenciou. Rychlé uplatnenie vedomostí a znalostí znamená aj väčšiu účinnosť, a ich nevyužitie vedie k ztrátam.

Vysokorýchlostné obrábanie a brúsenie nepochybne prináša výhody využiteľné v rôznych oblastiach strojírenskej technológie a priemyslu. Vylepšovaním a ďalším výzkumom, hlavne nástrojových materiálov, bude využitie tejto technológie viesť k zlepšeniu povrchových, tvarových a geometrických vlastností.

Vysoké teploty a napätia vytvorené pri vysokorýchlostnom obrábaní, sú ovplyvnené z veľkej časti vlastnosťami nástroja (geometria, materiál, povlak). Pokračujúci výzkum naznačuje, že tieto teploty a napätia môžu byť určené s určitou presnosťou, s využitím napr. metódy konečných prvkov. Takto je možné predvídať a kontrolovať možné porušenie (difúzia, opotrebenie, vydroľovanie), optimalizovať podmienky obrábania k zvýšeniu trvanlivosti nástroja a navrhovať tvar nástroja pre špecifické účely.

Samozrejme dochádza k zvyšovaniu reznej rýchlosti a posuvov, čo má vplyv na výrobný čas obrobku, pričom si je však podstatné uvedomiť, že treba prihliadať na proces výroby s využitím tejto technológie ako na celok. Týmto spôsobom prístupu je možné podstatnejšie znížiť celkový výrobný čas. Optimalizáciou samotnej technológie síce dosiahneme určité skrátenie strojného času, ale čas výrobného procesu je závislý aj na ďalších časových zložkách.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. TRENT, M.E. - WRIGHT, P.K. *MetalCutting*. 4. vyd. Butterworth – Heinemann 2000. 446 s. ISBN 0-7506-7069-X
2. HUMÁR, A. a PÍŠKA, M. *Materiály pro řezné nástroje*. MM Průmyslové spektrum – Speciální vydání, 2004. ISBN 1212-2572.,
3. SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*. Oxford Science Publication, Clarendon Press-Oxford. Reprint 1997. ISBN 0-19-859020-2
4. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd.. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2
5. BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání* [online]. Študijné opory pre podporu samoštúdia v obore ``Strojírenská technológia``. VUT v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 125 s. Dostupné na World Wide Web < http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf>
6. BUMBÁLEK, B. *Rychlostní broušení* Študijné opory pre podporu samoštúdia v obore ``Strojírenská technológia``. VUT v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 8 s.
7. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Prel. M.Kudela. I .vyd. Praha: Sciencia, s.r.o. 1997. 857 str. Přel .z Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6
8. AB SANDVIK COROMANT *Die and Mould Making- Applicartion Guide* [online]. Študijné opory pre podporu samoštúdia v obore ``Strojírenská technológia``. VUT v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 189 s. Dostupné na World Wide Web < http://cnc.fme.vutbr.cz/Articles/die_mold.pdf >
9. AYRES, R.U. and MILLS, S.M. *Robotics: Applications and Social Implications*. Ballinger Press, Cambidge MA, 1983
10. TRENT, E.M. *J.I.S.I*, 1941, s. 401

11. COTRELL, A.M. *Conf. and Props. of Materials at High Rates of Strain*, Inst. of Mech. Eng, London, 1957
12. RECHT, R.F. *Journal of Appl. Mech. Trans ASME*, s. 189, 1964
13. KECECIOGLU, D. *TRANS ASME*, 1958, 158 p.
14. KOMANDURI, R. - SCHROEDES, T.A. *Journal of Engineering for Industry*, 1986, 108 p.
15. ERNST, H. *The Machining of Metals*, The American Society of Metals, Cleveland, Ohio, 1938
16. HOU, Z.B. – KOMANDURI, R. *Int. J. Mech. Sci*, 1997, 1273 p.
17. HODOWANY, J.N. *On the Conversation of Plastic Work into Heat*, Pasadena CA, California Institute of Technology, 1997
18. KLOCKE, F. – BRINKMEIER, E. – EVANS, C. – HOWEST, T. – INASAKI, I. – MINKE, E. – TONSHOFF, H. – WEBSTER, J.A. – STUFF, D. *High speed Grinding*, Annals of CIRP, 1997, Vol. 46/2, 716 – 724 p.
19. TONSHOFF, H.K. – PETERS, J. – INASAKI, I. – PAULT, T. *Modeling and Simulation of Grinding Process*, Annals of CIRP, 1992, Vol. 41/2, 677 – 688 p.
20. INASAKI, I. *Grinding Process Simulation based on the Wheel Topography Measurment*, Annals of CIRP, 1996, Vol. 45/1, 347 – 350 p.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
C_{gw}	[-]	konštanta pre topografiu brúsiaceho kotúča
F	[N]	celková rezná sila
Q_T	[-]	počet kusov obrobených za jednu trvanlivosť nástroja
Q'_w	[mm ³ /mms]	rýchlosť úberu materiálu
T	[°C]	teplota
a_e	[mm]	radiálna hĺbka rezu
a_p	[mm]	šírka záberu ostria
d_{eq}	[mm]	ekvivalent priemeru kotúča
e	[-]	exponent
f_z	[mm]	posuv na zub
h_D	[mm]	menovitá hrúbka rezu
h_{Dc}	[mm]	hrúbka triesky
h_{max}	[mm]	maximálna hrúbka triesky
t_A	[min]	operačný čas jednotkovej práce
t_{AS}	[min]	jednotkový strojný čas
t_{AV}	[min]	jednotkový vedľajší čas
t_{Ax}	[min]	čas jednotkovej nepravidelnej obsluhy
v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
v_k	[m.s ⁻¹]	obvodová rýchlosť kotúča
v_o	[m.s ⁻¹]	obvodová rýchlosť obrobku
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	rýchlosť deformácie
δ_o	[°]	nástrojový ortogonálny uhol rezu
σ	[MPa]	napätie
τ	[MPa]	šmykové napätie
Φ	[°]	uhol roviny maximálnych šmykových napätí