

Střední povrchová teplota třísky a řezné síly při experimentálním soustružení v režimu HSC

Švec, Jan, Ing., Katedra technologie obrábění, Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638512, visis@kto.zcu.cz

Janda, Zdeněk, Ing., Katedra technologie obrábění, Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638516, zjanda@kto.zcu.cz;

Fulemová, Jaroslava, Ing., Katedra technologie obrábění, Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638515, fulemova@kto.zcu.cz;

Řehoř Jan, Ing., Ph.D., Katedra technologie obrábění, Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638500, rehor4@kto.zcu.cz;

Příspěvek pojednává o problematice soustružení legované oceli – 58 HRC. Hlavní pozornost byla zaměřena na analýzu střední povrchové teploty třísky, měřené pomocí radiačního pyrometru a pomocí termokamery v souvislosti se silovým zatížením břitu nástroje, osazeného řeznou keramikou (VBD – Toshiba Tungaloy LX11). Cílem příspěvku je konfrontovat výsledky a určit nejvhodnější řezné podmínky z hlediska teplot a řezných sil pro soustružení nástrojových ocelí řeznou keramikou v režimu HSC.

⇒ Klíčová slova: HSC, soustružení, řezná keramika, teplota, řezné síly

1 Úvod

Inovace technologií je důležitým faktorem pro zajištění konkurenceschopnosti nových strojírenských výrobků uváděných na trh. Předmětem tohoto článku je teplotní ovlivnění třísky měřené pomocí dvou různých bezdotykových technologií.

Jedná se o 2 v současné době nejpoužívanější bezdotykové technologie pro měření teplot, a to termovize a pyrometry. Termovize je infračervený systém přenosu teplot pozorovaného objektu pomocí televizního signálu. Na speciálním monitoru je zobrazováno teplotní rozložení povrchu snímaného objektu, což umožňuje zkoumat dynamický vývoj teplotního pole [1]. Pyrometry jsou při obrábění také často využívány, a to ve spojení s optickým vláknem. V tomto článku se budeme dále zabývat pyrometrem bez optického vlákna, aby bylo měření porovnatelné s termokamerou. Pomocí pyrometru je možné úspěšně měřit např. teplotu břitu vrtáku [2] nebo teplotu hřbetu VBD při frézování [3].

Tento článek vznikl v rámci interního grantu FST 2007 (částečně dokončovaný v r. 2009) a navazuje na předešlé interní granty a dlouhodobě řešené výzkumy v oblasti aplikace řezné keramiky v režimu HSC.

2 Charakteristika a příprava experimentu

Experimentální zkoušky při měření pomocí radiačního pyrometru byly prováděny jednak jako krátkodobé tak, aby byl v co největší míře vyloučen vliv opotřebení na teplotu a také jako dlouhodobé, aby byl patrný vliv opotřebení na teplotu. Při měření pomocí termokamery byly prováděny pouze krátkodobé zkoušky. Veškeré experimenty probíhaly při obrábění za sucha, řezné podmínky byly pro všechny experimenty stejné, a to:

$v_c = 150; 200; 250 \text{ m/min}$ ($v_c = 300 \text{ m/min}$ byla použita pouze při dlouhodobých zkouškách)

$v_f = 0,05; 0,1; 0,15 \text{ mm/ot}$

$a_p = 0,3 \text{ mm}$

2.1 Charakteristika obrobku

Jako obrobek byla zvolena kruhová tyč z materiálu ČSN 19 452, zušlechťená na tvrdost 58 HRC. Jedná se o nízkolegovanou nástrojovou ocel (Si-Mn-Cr), určenou především na upínací nástroje, sklíčidla, pouzdra, nářadí do pneumatických kladiv a dřevoobráběcí nástroje.

2.2 Charakteristika použitého nástroje

Jako nástroj byl použit soustružnický nůž firmy Hofmeister. Držák byl pro experimenty osazen VBD kruhového tvaru z řezné keramiky. Řezná geometrie je dvojité negativní, je tedy zvláště vhodná pro obrábění zušlechťených ocelí, kde požadujeme nejvyšší stabilitu břitu [4].

Při experimentech byly použity VBD ze směsné řezné keramiky firmy Toshiba Tungaloy LX11 s vrstvou TiN, typ VBD RNGN 120400 T01020.



Obr. 1 Soustružnický nůž
Fig. 1 Turning tool

2.3 Charakteristika použitého stroje

Veškeré experimenty byly prováděny v halových laboratořích KTO na univerzálním hrotovém soustruhu MASTURN 50 CNC od firmy Kovosvit Sezimovo Ústí, určeném především pro soustružnické a vrtací operace. Obrábět je možné buď ručním řízením, nebo automatickým systémem s podporou CNC.

2.4 Charakteristika radiačního pyrometru AMiR 7838-21

Pyrometr je tvořen kvalitní, robustní a precizní infračervenou měřicí hlavou s ručně nastavitelnou emisivitou. Rozsah měřících teplot je +200 až +1000 °C, doba odezvy 165 ms, optika 33:1 a spektrální vlnová délka 3,9 μm.

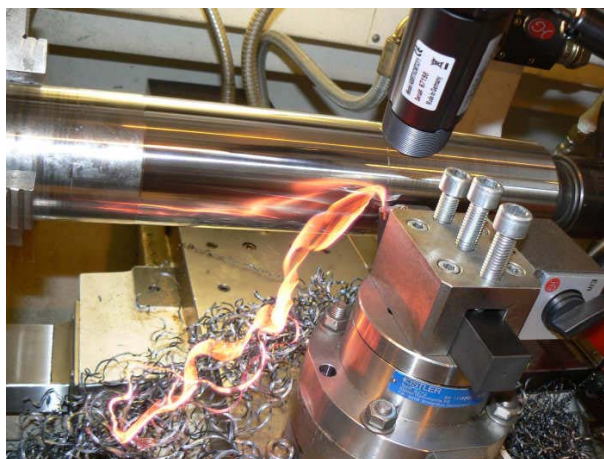
2.5 Charakteristika termokamery ThermaCam SC 2000

Jedná se o ruční termovizní systém s 24° objektivem, která pracuje v infračerveném spektrálním rozsahu, které se dále přeměňuje na digitální obraz teplotního pole měřeného povrchu. Rozsah měřících teplot je -40 až +500 °C (nebo až 1 000°C a 2 000 °C). Teplotní citlivost < 0,1 °C a přesnost měření 2%.

3 Střední povrchová teplota řezání měřená pyrometrem

Pyrometr byl zaměřen na odchozí třísku v místě řezu. Při experimentech se tříška stáčela proti směru posuvu nože a pyrometr v tu chvíli byl zaměřen na lícovou stranu třísky, která byla při oddělování od obrobku v kontaktu s čelem VBD. Tato tříška je nejvíce teplotně ovlivněna a bylo tak zajištěno, že budou měřeny nejvyšší teploty v místě řezu.

Pyrometr byl umístěn ve vzdálenosti cca. 76 mm od místa řezu, aby byla zajištěna jeho nejvyšší přesnost (měření průměrné teploty z plochy o průměru 2,5 mm).

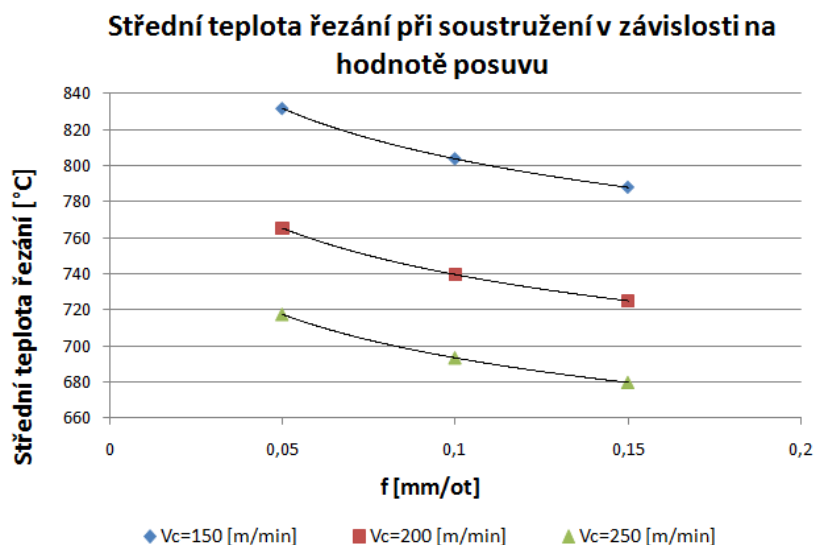


Obr. 2 Zamíření pyrometru
Fig. 2 Focusing of pyrometer

3.1 Krátkodobé experimenty

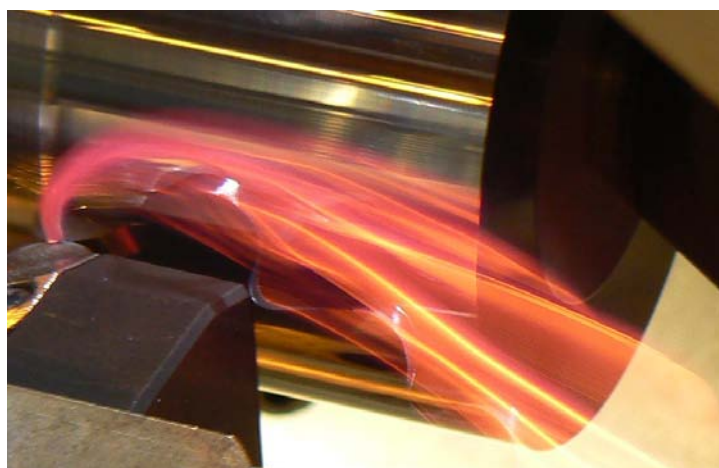
Všechna krátkodobá měření probíhala tak, že jeden náměr trval 15 s, ve kterých se zaznamenávala teplota, a následovalo další měření s jinými reznými podmínkami. Jedna rezná hrana byla použita vždy pouze jedenkrát, aby byl co nejvíce vyloučen vliv opotřebení.

Při krátkodobých zkouškách byly dosaženy maximální teploty v místě řezu cca 830°C, což značí i viditelně rudé zbarvení třísky. Průběh teplot je uveden na následujícím obrázku, ze kterého je patrné, že se vzrůstající hodnotou posuvu klesá naměřená teplota. Vysvětlení se nachází v průřezu odřezávané vrstvy, která se automaticky zvyšuje s rostoucím posuvem. Vzniklé teplo, které je generováno především v oblasti primární a sekundární plastické deformace je rozptýleno do většího objemu materiálu a dojde k naměření nižších teplot.



Obr. 3 Závislost střední povrchové teploty třísky na řezných podmínkách
 Fig. 3 Dependence of the middle surface temperature of chip on the cutting conditions

Z předchozího grafu je ale také patrné, že s rostoucí hodnotou řezné rychlosti klesá naměřená teplota. Toto ovšem obecně odporuje zásadám technologie obrábění. Vysvětlení se nachází na následující fotografii z měření.



Obr. 4 Detail odchozí třísky
 Fig. 4 Detail of outgoing chip

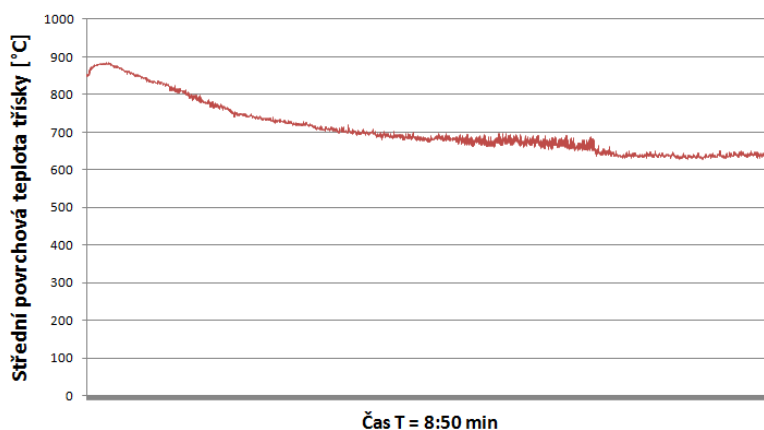
Tato fotografie byla pořízena při nejvyšší použité řezné rychlosti (250 m/min) a je zřetelně vidět zbarvení třísky, které přechází z červené barvy do žluté. V měřeném bodě (těsně za místem řezu) je tříška zbarvena do červena, což představuje teplotu do 800°C. Cca 5 cm za místem řezu má tříška již žlutou barvu, což představuje teplotu do 1100°C. Při vyšší řezné rychlosti musela být tříšce předána mnohem větší energie, ale tříška se prohřála v celém svém průřezu až za zlomek vteřiny (cca 0,01 s). Vysoká teplota řezání spojená s HSC obráběním se tak projevila až za měřeným místem a pyrometrem byly proto v místě řezu měřeny nižší teploty při vyšší řezné rychlosti.

Na základě krátkodobých měření teplot při HSC soustružení lze konstatovat, že s rostoucí řeznou rychlostí se v místě řezu akumuluje vyšší energie spojená s odříznutím vrstvy, ale střední povrchová teplota řezání v místě řezu klesá.

Pro TiN povlaky je považována limitní teplota max. 700°C [5], která při tomto měření byla zcela jistě překročena a tímto mohla být narušena trvanlivost nástroje. Studie trvanlivosti ale není předmětem tohoto příspěvku. Pro budoucí HSC soustružení by bylo vhodné použít nástroj, který dlouhodobě odolá teplotám minimálně 900°C.

3.2 Dlouhodobé experimenty

Dlouhodobé experimenty byly s ohledem na zkoumání trvanlivosti rozšířeny o řeznou rychlost 300 m/min oproti krátkodobým zkouškám. Dlouhodobé zkoušky byly omezené kritériálním opotřebením $VB_{krit} = 0,2$ mm. Tohoto kritériálního opotřebením bylo nejrychleji dosaženo již v čase 1:30 min, což je pro praktické nasazení této technologie v průmyslu nevhodné a s nejvyšší pravděpodobností to bylo způsobeno nevhodným výběrem řezného materiálu a jeho TiN vrstvy (viz odst. 3.1).



Obr. 5 Závislost střední povrchové teploty třísky na řezných podmínkách při dlouhodobé zkoušce ($v_c=150$ m/min, $f=0,1$ mm/ot)

Fig. 5 Dependence of the middle surface temperature of chip on the cutting conditions at long term experiment ($v_c=150$ m/min, $f=0,1$ mm/ot)

Na předchozím grafu je patrná tendence teploty klesat s přibývajícím časem. Pro tento jev se nachází dvě vysvětlení:

1. S přibývajícím časem obrábění se řezná hrana „přizpůsobovala“ daným podmínkám a vytvářela si pro sebe optimální „geometrii“. Na základě toho lze ale konstatovat, že vhodněji vybraný nástroj s jinou geometrií by vykazoval jiné výsledky.
2. Použitá tenká vrstva materiálu TiN na keramické břitové destičce může zvláště při HSC obrábění způsobit vznik tenké vrstvy oxidů Ti_3O_5 , které snižují tření a díky tomu pokles vznikajícího tepla vlivem tření. [6]

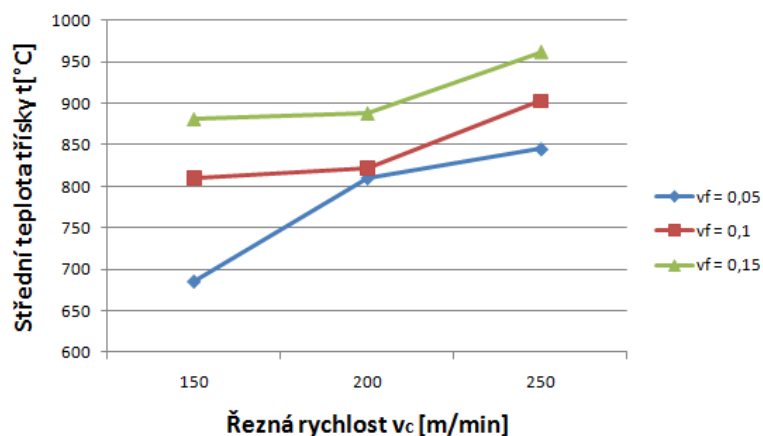
4 Střední povrchová teplota třísky měřená termokamerou

Průběh měření sestával ze 7s úseků s frekvencí 5Hz. Při jenom krátkodobém naměru bylo tedy zaznamenáno 35 termogramů. Z nich bylo vyhodnoceno měření a porovnáno s měřením pomocí radiačního pyrometru. Na následující obrázku je pro názornost uveden příklad termografu, na kterém je naměřena max. teplota cca 870°C.



Obr. 6 Termogram při $v_c=150$ m/min, $f=0,15$ mm/ot
 Fig. 6 Thermograph at $v_c=150$ m/min, $f=0,15$ mm/ot

Pro potvrzení, nebo vyvrácení teorie prezentované výše v kapitole o měření pyrometrem je zde uveden následující graf průběhu střední povrchové teploty třísky v místě řezu a těsně za místem řezu. Z termografů byly vybrány nejteplejší místa povrchu třísky, ze kterých plyne, že tříška se opravdu má tendenci v celém svém průřezu prohřát až za místem řezu. Toto lze dokázat pouze termovizní, která snímá celý řezný proces.



Obr. 7 Závislost střední povrchové teploty třísky na řezných podmínkách
 Fig. 7 Dependence of the middle surface temperature of chip on the cutting conditions

Z grafu je patrný nárůst střední povrchové teploty třísky se vzrůstající řeznou rychlostí, neboť se jedná o vyhodnocení nejteplejšího místa třísky i za místem řezu. Při vyhodnocování teplot pouze v místě řezu, vykazovala termokamera obdobné hodnoty jako radiační pyrometr a střední povrchová teplota řezání v místě řezu klesala s rostoucí řeznou rychlostí.

5 Řezné síly

Při soustružení působí na břit nástroje výsledná řezná síla F , která se rozkládá na tři složky:

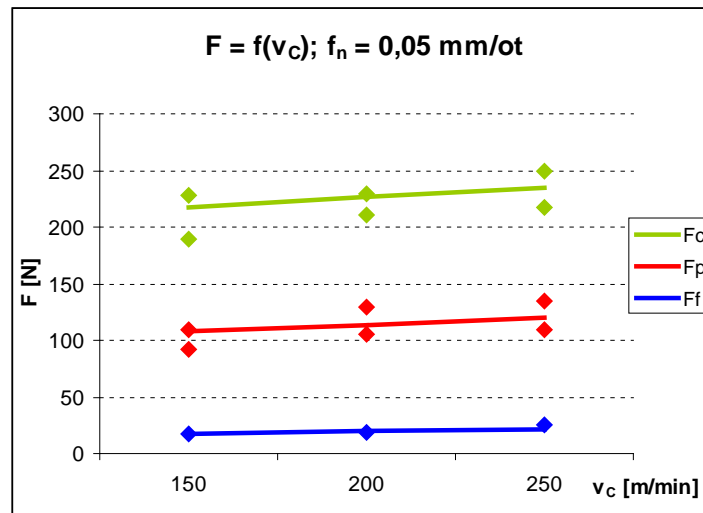
F_c - tangenciální (řezná) síla, složka která působí ve směru hlavního řezného pohybu. Znalost této složky je potřebná z hlediska určení výkonu stroje, pevnosti nástroje a pevnosti součástí pohybových mechanismů hlavního řezného pohybu;

F_p , radiální (pasivní) síla, složka, která působí v radiálním směru. Ovlivňuje především průhyb obráběných součástí a tuhost obráběcího stroje, čímž má výrazný vliv na přesnost výroby. Její znalost je proto potřebná právě při stanovení přesnosti obráběných součástí a tuhosti soustavy S-N-O;

F_f , axiální (posuvová) síla, složka která působí ve směru osy obrobku. Velikost této složky je třeba znát z důvodu stanovení tuhosti součástí posunového mechanismu.

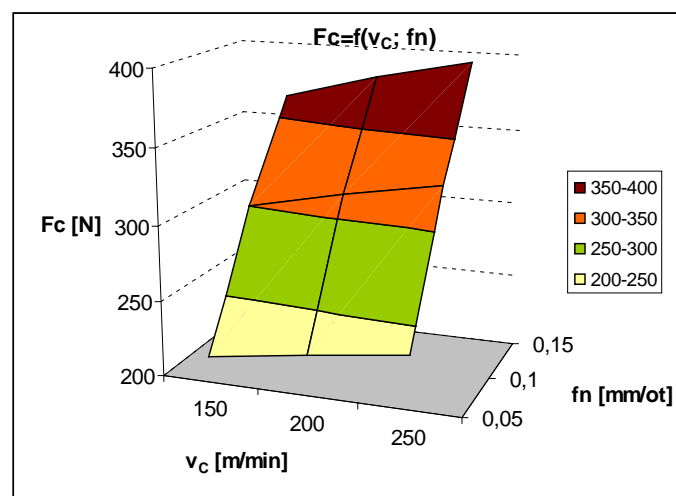
Při měření řezných sil byl zaznamenáván krouticí moment M_k , dále pak síla F_p a F_c při skenovací frekvenci 1000 Hz. Krouticí moment byl poté přepočten na sílu F_f . Při měření byly zaznamenávány časové úseky dlouhé 15s. Z každého náměru byla získána průměrná hodnota (F_c , F_p , F_f) jednotlivých maximálních sil, které byly poté zaneseny do grafu.

Řezné síly zjištěné během experimentálního měření jsou zobrazeny v následujících grafech na obrázcích 8 a 9. Z porovnání těchto grafů vychází zjištění, které plně podporuje dosavadní teoretické i praktické poznatky, a sice že nejvyšších hodnot dosahuje tangenciální složka F_c , a nejnižších hodnot axiální složka F_f . Vyšší hodnoty F_c během našeho experimentu byly také dosahovány především tím, že byl použit nástroj s výrazně negativní geometrií břítu oproti běžně používaným nástrojům. Velikost složek řezných sil je také ovlivňována poloměrem špičky VBD. Je známo, že čím větší je poloměr špičky, tím větší jsou radiální a tangenciální složky. Použitím kruhové VBD proto dochází k vyvození vyšších hodnot těchto složek. Teorie běžně uvádí, že předpokládaný vzájemný poměr jednotlivých složek by měl být přibližně $F_c : F_p : F_f = 4 : 2 : 1$. Tento poměr ovšem platí pouze pro okrajové podmínky, zejména však pro ty, které se týkají geometrie břítu. V našem případě vlivem výše popsanych skutečností je poměr $4 : 2 : 0,5$ (jak je patrné z grafu na obr. 8).



Obr. 8 Složky řezné síly v závislosti na řezné rychlosti pro $f_n = 0,05$ mm/ot
 Fig. 8 Dependence of components of cutting force on cutting speed ($f_n = 0,05$ mm/ot)

Ze všech grafů je patrné, že řezné síly výrazně rostou se zvyšující se hodnotou posuvu. Tento fakt je způsoben tím, že posuv je jeden z parametrů ovlivňující velikost objemu odebraného materiálu (v případě soustružení je dalším parametrem hloubka řezu a_e a řezná rychlost v_c), a je známo, že složky řezné síly rostou s přímou úměrou právě k objemu odebíraného materiálu. Proto je vhodné sledovat vliv těchto parametrů spíše souhrnně než jednotlivě.



Obr. 9 Vliv řezné rychlosti a posuvu na složku F_c
 Fig. 9 Influence of cutting speed and feed rate on F_c

Zajímavý je však vliv řezné rychlosti na řezné síly. Jak je vidět na grafech, ve všech případech se zvyšující se řeznou rychlostí roste silové zatížení. Toto zjištění nesouhlasí s teoretickými poznatky, které uvádějí, že naopak při HSC obrábění dochází k poklesu řezných sil v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti. V tuto chvíli přicházejí v úvahu dvě možná vysvětlení. První, že nárůst sil je v tomto případě způsoben výrazně negativní geometrií nástroje. Z hlediska samotného řezného materiálu a řezných podmínek, doporučených pro něj výrobcem, by šlo o HSC obrábění. Avšak použitím nástroje s výrazně negativní geometrií došlo k posunutí hranice HSC na vyšší hodnotu. Jedná se tedy o HSC obrábění, avšak výrazné změny očekávané od této strategie v použitém intervalu řezných rychlostí ještě nenastaly. Negativní geometrie nástroje spolu s narůstající řeznou rychlostí způsobuje zmenšení oblasti primární plastické deformace, proto se při dalším zvýšení řezné rychlosti dá předpokládat očekávané snížení řezných sil. Dalším možným vysvětlením je vliv teploty třísky. Tříška, jak je uvedeno v kapitole 3.1.1, se vlivem vysoké rychlosti v místě řezu nestačí dostatečně prohřát, a tím není dosaženo požadovaného teplotního „odpevnění“, což má za následek zvyšování řezných sil se zvyšující se řeznou rychlostí.

6 Závěr

Z grafů závislostí teplot na posuvu a řezné rychlosti vyplývá, že jak při zvyšující se řezné rychlosti, tak posuvu se snižuje teplota řezání. Jestliže se zvyšuje hodnota posuvu, je odřezáván větší objem materiálu, to má dle teorie za následek nárůst teploty řezání. Teplota je naměřena nižší, protože vzniklé teplo nestačí třísku prohřát v celém objemu tak dokonale, jako při nižším posuvu. Pokles teplot se zvyšující se řeznou rychlostí, jak je popsáno v odst. 3.1, je způsobeno prohříváním třísky až za místem řezu, což je běžné při HSC obrábění.

Při dlouhodobých experimentech teploty výrazně klesaly s časem obrábění. Tento pokles teplot byl pravděpodobně způsoben kombinací faktorů zařezávání řezné hrany a vzniku povlaku Ti_3O_5 , který způsobí snížení tření a jeho vznik je typický pro HSC obrábění.

Termokamerou byly potvrzeny výsledky z měření pyrometrem a teorie, že střední povrchové teploty třísky v místě řezu mohou klesat s rostoucí hodnotou řezné rychlosti. Vlivem vysoké řezné rychlosti se tříška prohřívá až za místem řezu.

V experimentech bylo také zjištěno, že v místě řezu jsou překročeny limitní teploty pro vrstvu TiN, která byla deponována na použité VBD ze směsné keramiky. Pro další experimenty je doporučeno použít VBD deponované jinou vrstvou, která odolá vyšším teplotám, alespoň 900°C a více.

S ohledem na zatížení nástroje byl prokázán nárůst řezných sil se zvyšujícím se posuvem, což naplnilo očekávání. Z toho vyplývá, že v případě potřeby minimalizace zatížení soustavy S-N-O je nutné volit nižší hodnotu posuvu. Méně očekávané bylo zjištění, že se zvyšující se řeznou rychlostí narůstají také řezné síly, neboť dle platných definic s ohledem na použité řezné rychlosti a řezný materiál již šlo o HSC obrábění. Vysvětlení bude pravděpodobně ve výrazném vlivu negativní geometrie nástroje. Proto by bylo vhodné, nasadit ještě vyšší řezné rychlosti, avšak s ohledem na řezné teploty.

Experiment dále potvrdil vhodnost nasazení pyrometru pro měření středních povrchových třísky v místě řezu při HSC soustružení a byl by jistě vhodný i pro měření teploty obrobeného povrchu těsně za místem řezu. Ve spolupráci s termokamerou, která dává perfektní přehled o teplotách v celém řezném procesu, se jedná o nástroj, který lze doporučit pro podobná měření.

7 Použitá literatura

- [1] NOVÁ, Iva, KRÝSLOVÁ, Stanislava, KRÝSLOVÁ, Zdeňka. Metody bezdotykového měření teploty. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, s. 78.
- [2] UEDA, T., NOZAKI, R., HOSOKAWA, A. *Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling : Effect of Oil Mist*. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kanazawa, Japan : [s.n.], 2007. 4 s.
- [3] Ueda, T., Hosokawa, A., Oda, K., Yamada, K., *Temperature on Flank Face of Cutting Tool in High Speed Milling*, Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University, Japan, 2001
- [4] ČESÁKOVÁ, I. Diagnostika stavu řezného břítu při HSC obrábění řeznou keramikou. Plzeň: ZČU, 2008. 74 s. Diplomová práce na Fakultě strojní

- [5] BENEŠ, P., SOSNOVÁ, M., KRÍŽ, A.. Teplotní odolnost PVD vrstev vůči laserovému povrchovému ohřevu
- [6] ŠVEC, Jan. Teplotní jevy při tvrdém frézování progresivní řeznou keramikou v režimu HSC. Plzeň, 2007. 77 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] VAVRUNĚK, Jan. Diagnostika teplotního zatížení řezného procesu při HSC obrábění řeznou keramikou. Plzeň, 2009. 67 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] JANDA, Z.: Řezné síly při tvrdém frézování progresivní řeznou keramikou v režimu HSC. [Diplomová práce] Plzeň: ZČU 2007

8 Souhrn

Mean temperature of chip surface and cutting forces on the experimental HSC turning

Švec, Jan, Ing., Department of machining technology, The University of West Bohemia, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638512, visis@kto.zcu.cz
Janda, Zdeněk, Ing., Department of machining technology, The University of West Bohemia, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638516, zjanda@kto.zcu.cz;
Fulemová, Jaroslava, Ing., Department of machining technology, The University of West Bohemia, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638515, fulemova@kto.zcu.cz;
Řehoř Jan, Ing., Ph.D., Department of machining technology, The University of West Bohemia, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, +420377638500, rehor4@kto.zcu.cz;

The paper deals with the problems of the turning of the alloy steel - 58 HRC. The main attention is focused on the analysis of force load cutting edge with circle inserts from cutting ceramics (indexable inserts - Toshiba Tungaloy LX11) in relation to the median surface temperature of chips. For the measuring of the temperature the radiation pyrometer was used. The aim is to confront the results and determine the best cutting conditions in terms of cutting forces and temperatures for the turning of tool steel by cutting ceramic in the HSC regime.

⇒ Keywords: HSC, turning, cutting ceramic, temperature, cutting forces

