

Vliv řezného prostředí a řezných podmínek na velikost teplot a zbytkového napětí v obrobeném povrchu při frézování slitiny titanu Ti6Al4V.

Ing. Jan Malý, Ing. Pavel Zeman Ph.D., Prof. Ing. Jan Mádl CSc.

VCSVTT Ú-12242, Horská 3, 128 00 Praha 2, tel: 731 628 552, j.maly@rcmt.cvut.cz

Provedený experimentální výzkum byl zaměřen na určení vlivu řezných podmínek a řezného prostředí na velikost teplot a velikost, směr a charakter zbytkového napětí v obrobeném povrchu při frézování těžkoobrobitelné slitiny titanu Ti6Al4V. Pro experiment byla použita kombinace tří řezných rychlostí v_c : 50, 100, 150 m.min⁻¹, tří posuvů na zub f_z : 0,05, 0,085, 0,12 mm a tří řezných prostředí: obrábění za sucha, olejová mlha (aerosol vzduchu a oleje) a povodňové chlazení olejovou emulzí. Znalost teplot při obrábění je v daném případě nezbytná vzhledem ke skutečnosti, že při teplotách větších než 600 °C má Ti a jeho slitiny vysokou afinitu k intersticiálním prvkům obsažených ve vzduchu (a řezném prostředí), které vedou k tvorbě tvrdé vrstvy kysličníků a pod ní ležící zpevněné vrstvy. V kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí slitiny Ti6Al4V dochází k lokalizaci vysokých teplot v těsné blízkosti břitu a tedy i pod obrobeným povrchem. Tato skutečnost posléze výrazně ovlivňuje velikost a charakter zbytkových napětí.

Klíčová slova: obrábění slitiny titanu, zbytková napětí, teploty při obrábění

1 Úvod

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů v současné době řeší řada průmyslových podniků. Tyto materiály se vyznačují špatnou tepelnou vodivostí, nízkým modulem pružnosti a nevhodným utvářením třísky při obrábění. Všechny tyto faktory vyvolávají silně nehomogenní deformaci v oblasti primární plastické deformace před břitem nástroje a výrazné opotřebení břitu nástroje [4,5]. Problém velké intenzity opotřebení břitu nástroje je spojen také s vysokou teplotou obrábění a se zhoršenými charakteristikami integrity povrchu a energetické náročnosti obrábění. Do skupiny těžkoobrobitelných materiálů řadíme především slitiny na bázi Ni nebo Ti a korozivzdorné oceli. Jedním z nejpoužívanějších materiálů je slitina titanu Ti6Al4V (až 70 % obrobků z Ti slitin je právě z této slitiny). Má nízkou měrnou hmotnost (4430 kg.m⁻³), vysokou pevnost v tahu (900-1000 MPa), vysokou smluvní mez kluzu (800-900 MPa) a vynikající korozní odolnost zejména proti chloru. K nežádoucím vlastnostem této slitiny z hlediska obrobitelnosti patří nízká tepelná vodivost (7,56 W.m⁻¹.K⁻¹), nízký modul pružnosti (113 GPa) a hexagonálně těsně uspořádaná mřížka [3].

2 Experimentální práce

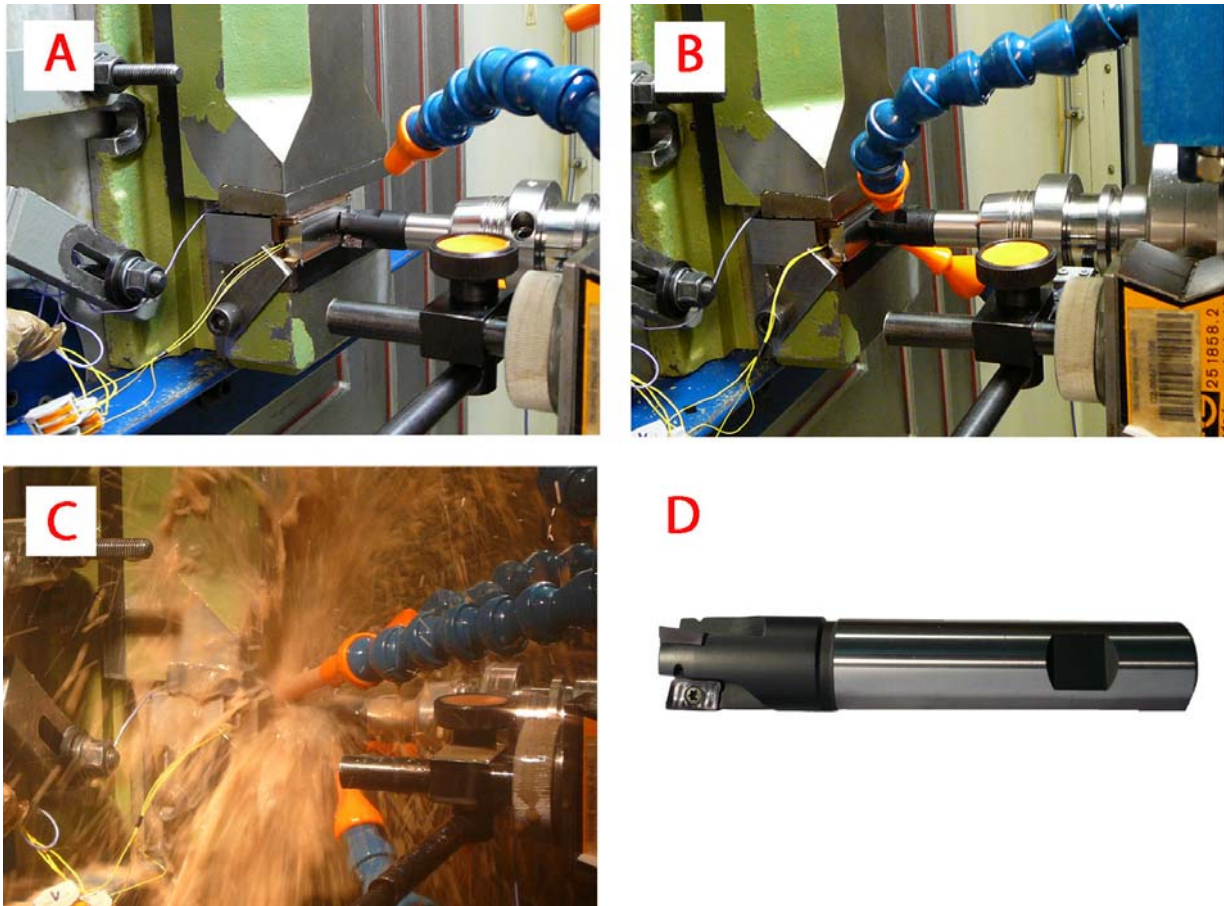
Cílem experimentálního výzkumu bylo stanovit optimální řezné podmínky a řezné prostředí z hlediska velikosti teplot při obrábění a zbytkového napětí v obrobeném povrchu. Pro provedený výzkum byly zvoleny řezné podmínky pro dokončovací frézování. Právě pro tyto podmínky je určen použitý nástroj z povlakovaného slinutého karbidu. Pro experiment byla zvolena tříbřitá stopková fréza Alpha mill AMS 2022S (obr.1d) osazená břitovými destičkami s označením APXT 11T3PDSR-MF PC9530, které jsou určeny pro dokončovací frézování. Tato břitová destička byla vybrána díky lepší trvanlivosti břitu nástroje. Trvanlivost břitu byla předmětem předchozího výzkumu [1].

Pro studium velikosti teplot při obrábění a zbytkového napětí v obrobeném povrchu byla použita kombinace tří řezných rychlostí v_c : 50, 100, 150 m.min⁻¹, tří posuvů na zub f_z : 0,05,

0,085, 0,12 mm a tři různých řezných prostředí: obrábění za sucha obr.1a, olejová mlha obr.1b (vzduch + LubriOil) a povodňové chlazení 5,5% emulzí (voda + Ecocool 2520) obr.1c. Pro každou kombinaci řezných podmínek a řezného prostředí byly použity nové břitové destičky. Měření se opakovalo dvakrát, aby byl eliminován vliv náhodných jevů, které by mohly ovlivnit měření. Obráběcím strojem bylo horizontální frézovací centrum s maximálním výkonem na vřetenu 40 kW, které umožňuje použití všech zmíněných řezných prostředí. Použitou obráběcí operací bylo čelní sousledné frézování. Pracovní přejezdy, které vykonával obrobek, byly prováděny vždy jen v jednom směru.

Tab. 1 : Pracovní podmínky použité při experimentech

obráběcí stroj		horizontální frézovací centrum - LM2
obráběný materiál		Ti6Al4V
typ obráběcí operace		sousledné frézování
nástroj	typ	stopková fréza z VBN- Alpha mill AMS 2022S
	VBD	povlakovaný SK - APXT 11T3PDSR-MF PC9530
řezné prostředí		frézování za sucha
		olejová mlha
		povodňové chlazení



Obr. 1: A-řezné prostředí bez chlazení, B-řezné prostředí olejová mlha, C-řezné prostředí povodňové chlazení emulzí, D-použitý nástroj Alpha mill AMS 2022S

3 Stanovení vlivu řezných prostředí a řezných podmínek na velikost teplot při obrábění

Měření velikosti teplot při obrábění bylo rozděleno na dvě části: na měření teploty řezání a na měření teploty povrchu obrobku.

Pro měření teploty řezání bylo použito principu přirozeného termočlánku. Pod pojmem přirozený termočlánek se rozumí termočlánek tvořený materiály, které se zúčastňují řezného procesu, a to materiálem obrobku a materiálem břitu řezného nástroje. Měřicí spoj přirozeného termočlánku je tedy vytvořen na ploše styku nástroje s obrobkem. Plocha styku představuje soustavu elementárních termočlánků s různou teplotou v jednotlivých bodech. Výsledné napětí je aritmetickým průměrem termoelektrických napětí těchto termočlánků.

Pro měření teploty na povrchu obrobku bylo použito principu poloumělého termočlánku. U tohoto termočlánku je jedním jeho materiálem materiál obrobku a druhým je slabý drátek z materiálu Chromega. V obráběném materiálu byl vyvrtán malý otvor (o průměru 0,5 mm), do kterého byl vložen slabý drátek, který nebyl zbaven izolace. Ve chvíli, kdy byl drátek společně s odebíraným materiálem nástrojem odstřižen, tak došlo k odstranění izolace drátku u povrchu obrobku a obnažený drátek byl deformován a přitisknut na hranu otvoru u obrobku pod obráběcím nástrojem. Tím vznikl měřicí spoj, který zaznamenával hodnoty termoelektrických napětí.

Velikost termoelektrického napětí generovaného přirozeným a poloumělým termočlánkem byla snímána modulem EPAD-TH8-P. Měřicí modul byl dále propojen kabelem s notebookem s vyhodnocovacím softwarem Dewesoft, který zaznamenával a vyhodnocoval naměřená data. Vyhodnocená data byla nadále přepočítávána na reálné hodnoty pomocí kalibračních rovnic pro přirozený a poloumělý termočlánek. Podrobný popis měřících metod a kalibrace termočlánku je uveden ve výzkumné zprávě [6]. Obrobek byl pro měření teplot upraven na rozměry (d x š x v) 54 x 21 x 11 mm. Axiální hloubka řezu byla $a_p = 1$ mm a radiální hloubka řezu $a_e = 19$ mm.

Výsledky měření teploty řezání

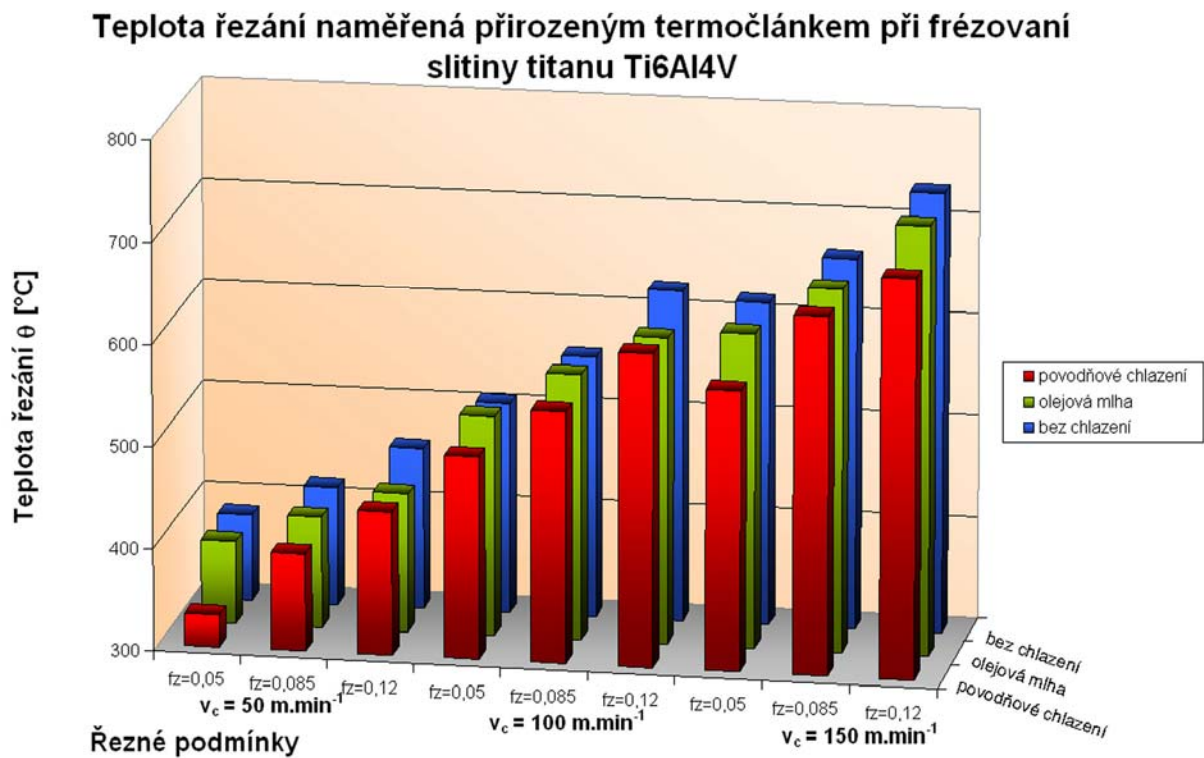
Výzkum prokázal, že velikost teploty řezání roste s narůstající řeznou rychlostí v_c a s rostoucím posuvem na zub f_z , resp. s tloušťkou odřezávané vrstvy. Hodnoty teploty řezání získané pomocí přirozeného termočlánku jsou uvedeny v tab.2. Teplota řezání θ se pohybovala v intervalu od 331 °C do 732 °C. Největší podíl na velikosti teploty řezání má řezná rychlost v_c .

Vliv řezného prostředí na teplotu řezání nebyl tak výrazný jako u řezné rychlosti. U olejové mlhy docházelo ke snížení tření mezi obrobkem a nástrojem a to vedlo ke snížení teploty řezání. U povodňového chlazení nebyl vliv řezného prostředí na velikost teploty tak výrazný, jak se předpokládalo. Bylo to nejspíše způsobeno tím, že se emulze nedostala do těsné blízkosti břitu nástroje, či přímo mezi břit nástroje a odcházející třísku. Dosažení lepšího účinku chlazení emulzí by mohlo být dosaženo použitím vysokotlakého chlazení. Při tomto způsobu chlazení by se mohla procesní kapalina dostat mezi břit nástroje a odcházející třísku a tím výrazněji snížit teplotu řezání.

Pe vzduší použitých řezných podmínkách nebyla překročena teplota přeměny (882 °C), tudíž nemohlo při obrábění dojít k přeměně fáze α (hexagonální těsně uspořádaná fáze) na fázi β (kubicky těsně uspořádaná fáze). Při určitých řezných podmínkách (tab.2) však byla překročena teplota difuze 600 °C. Při této teplotě mají slitiny titanu vysokou afinitu k intersticiálním prvkům obsažených v chu a v řezném prostředí. Tyto prvky vedou k tvorbě tvrdé vrstvy kyslíčnicků, které můžou ovlivnit povrchovou vrstvu obrobku.

Tab. 2 : Teplota řezání θ [°C] naměřená při experimentu

Teplota řezání θ [°C]				
Řezné podmínky		Řezné prostředí		
v_c [m.min ⁻¹]	f_z [mm]	bez chlazení	povodňové chlazení	olejová mlha
50	0,05	384	331	381
	0,085	415	395	409
	0,12	458	440	436
100	0,05	506	498	515
	0,085	556	546	560
	0,12	624	606	600
150	0,05	616	574	608
	0,085	663	650	655
	0,12	732	691	721



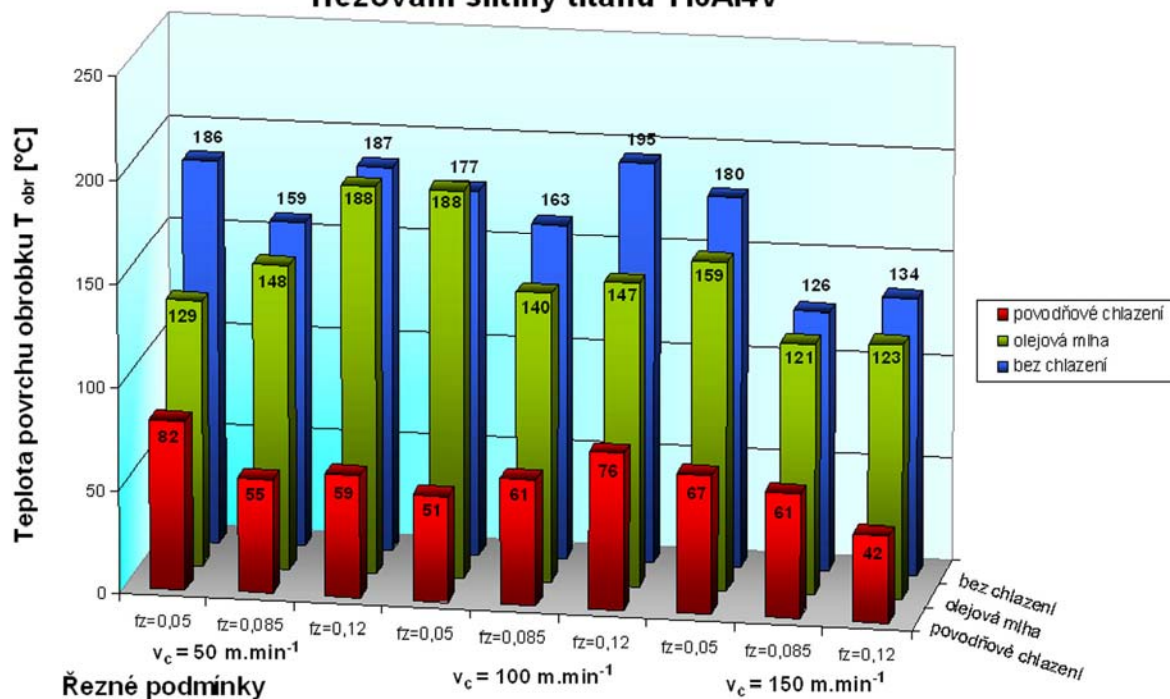
Obr. 2: Teplota řezání naměřená přirozeným termočlánkem při frézování slitiny titanu Ti6Al4V pro všechny použité řezné podmínky a řezné prostředí

Výsledky měření teploty povrchu obrobku

Hodnoty teploty obrobku získané pomocí poloumělého termočlánku se pohybovaly v intervalu od 42 °C do 195 °C. Naměřené hodnoty teploty povrchu pro jednotlivé kombinace řezných podmínek a řezného prostředí jsou uvedeny na obr. 3.

Experiment prokázal, že největší vliv na velikost teploty povrchu má povodňové chlazení emulzí. Při tomto způsobu chlazení je velké množství vodní emulze dopravováno do těsné blízkosti řezného nástroje obr. 1c, a tím se zaplaví i obráběná plocha obrobku a to má za následek snížení teploty povrchu obrobku.

Teplota povrchu obrobku naměřená poloumělým termočlánkem při frézování slitiny titanu Ti6Al4V



Obr. 3: Teplota povrchu naměřená poloumělým termočlánkem při frézování slitiny titanu Ti6Al4V pro všechny použité řezné podmínky a řezné prostředí.

4 Stanovení vlivu řezných prostředí a řezných podmínek na zbytkové napětí v obrobku

Velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě byla vyhodnocována pomocí destruktivní metody měření. Při této metodě je z vyšetřované plochy postupně elektrolyticky odebírána vrstva materiálu. Odstraněním vrstvy dochází k deformaci, ze které je možno stanovit napětí úměrné této změně rovnováhy. Přesnost měření je závislá na množství konstantně odebrané vrstvy na celé sledované ploše. Princip této metody spočívá v tom, že zbytkové napětí se určuje na základě deformace vzorku, která vznikne po odebrání povrchové vrstvy. Velikost této deformace je pak úměrná napětí, které bylo v odebrané vrstvě. Obrobek byl pro měření zbytkového napětí upraven na rozměry (d x š x v) 80 x 9 x 10 mm. Axiální hloubka řezu byla $a_p = 1$ mm a radiální hloubka řezu $a_e = 9$ mm.

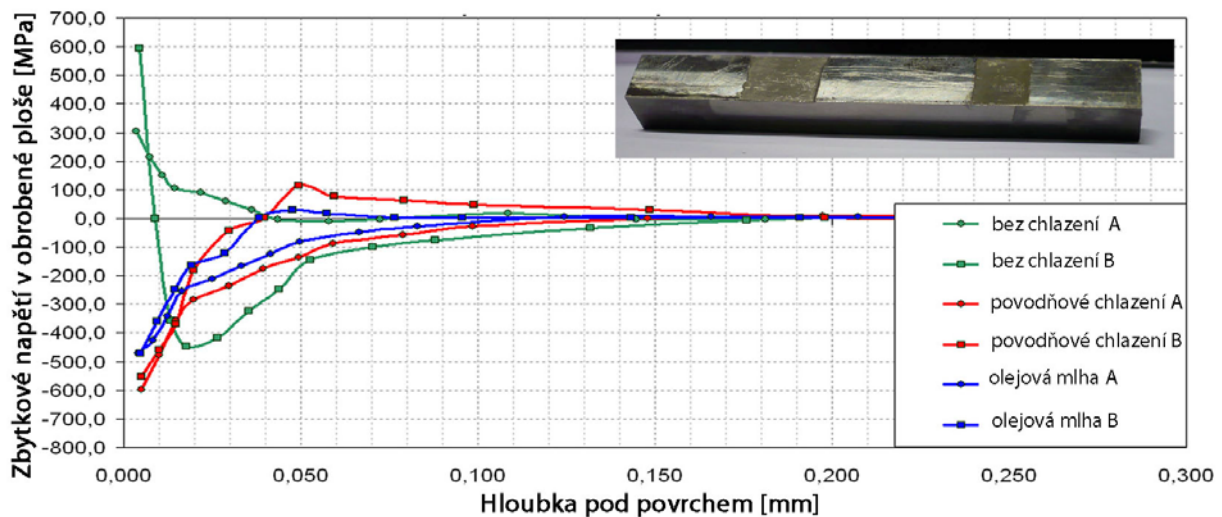
Výsledky měření zbytkového napětí v obrobeném povrchu

Významný vliv na průběh zbytkového napětí má teplota vzniklá při obráběcí operaci. Vzhledem k tomu, že má slitina titanu Ti6Al4V velice nízkou tepelnou vodivost ($7,56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), koncentruje se teplota v těsné blízkosti pod obrobeným povrchem. V souvislosti s tímto procesem nastává v povrchových vrstvách zvýšený tlak, protože se materiál snaží roztahovat. Maximální hloubka ovlivněné vrstvy zbytkovým napětím pro dané experimenty byla 0,2 mm.

Při malých řezných rychlostech $v_c = 50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je povrchová vrstva plasticky prodloužena, což má za následek vznik tlakových napětí v obrobeném povrchu. U vyšších řezných rychlostí $v_c = 100, 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (obr. 4) nastává zejména při menší intenzitě chlazení v některých případech v těsné blízkosti pod povrchem (do hloubky 0,05 mm) tahové napětí zapříčiněné nejspíše vysokou teplotou vzniklou vlivem přetvoření materiálu a struktury. Vyšší teploty při obrábění vznikají také při obrábění opotřebeným břitem nástroje, toto rychlé opotřebení se mohlo projevit u vysokých řezných rychlostí $v_c = 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a velkých posuvů na zub $f_z = 0,085 \text{ mm}$ a $f_z = 0,12 \text{ mm}$. Vliv posuvu na zub f_z je méně výrazný pro velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě.

Použití chlazení má za následek posun k tlakovým napětím. U povodňového chlazení emulzí je to patrně způsobeno ochlazováním vrstev v těsné blízkosti obrobeného povrchu. Při použití olejové mlhy se nejspíše sníží tření mezi nástrojem a obrobkem (odchod třísky z místa řezu a snížení tření mezi vedlejším ostřím a obrobenou plochou), které má za následek snížení teploty v oblasti řezu a menší ovlivnění obrobené plochy.

Zbytkové napětí v obrobené ploše pro $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0,12 \text{ mm}$ a různé řezné prostředí.



Obr. 4: Zbytkové napětí v obrobené ploše pro $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f_z = 0.12 \text{ mm}$ a různé řezné prostředí

5 Závěr

Na základě tohoto výzkumu lze pro sousledné dokončovací frézování slitiny titanu Ti6Al4V nástrojem ze slinutého karbidu (s povlakem TiAlN) doporučit z hlediska velikosti teplot při obrábění a zbytkového napětí v obrobeném povrchu obrábění malými posuvy na zub (f_z okolo 0,05 mm), a to při řezných rychlostech mezi 50 m.min⁻¹ a 100 m.min⁻¹. Při těchto řezných podmínkách nedochází ke vzniku příliš vysokých řezných teplot, není u nich překročena teplota difuze (600 °C). Zbytkové napětí v obrobeném povrchu má pro tyto řezné podmínky tlakový charakter. Nejvhodnějším řezným prostředím je potom povodňové chlazení 5,5% emulzí (voda + Ecocool 2520). Použití povodňového chlazení emulzí vede ke znatelnému snížení teploty povrchu. Nevýhodou je, že při povodňovém chlazení emulzí nástrojem ze slinutého karbidu při obrábění titanových slitin může docházet k náhlým destrukcím břitů nástroje. Slitina titanu má totiž nízkou tepelnou vodivost a značná část tepla odchází nástrojem. Příčinou destrukcí jsou potom tepelné šoky, které vedou ke vzniku a šíření mikrotrhlin a následnému vylamování břitů nástroje.

Tyto výsledky byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje 1M684077000.

6 Použitá literatura

- [1] ZEMAN, Pavel. *Výzkum trvanlivosti břitů při frézování slitiny Ti6Al4V*. Praha : VCSVTT, Výzkumná zpráva V-07-002, 2007. 28 s.
- [2] MALÝ, Jan; ZEMAN, Pavel. *Vliv řezných prostředí a řezných podmínek na velikost sil a integritu povrchu při frézování slitiny Ti6Al4V*. Praha : VCSVTT, Výzkumná zpráva V-07-090, 2007. 84 s., 1 příl..
- [3] KVASNIČKA, Ivo. *Soubor současných poznatků o obrábění titanových slitin nástroji s definovaným břitem*. [s.l.], 1990. 48 s. Habilitační práce.
- [4] LÓPEZ DE LACALLE, L.N, PÉREZ, J, LLORENTE, J.I. *Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys*. Journal of Materials Processing Technology. 2000, no. 100, p. 1-11.
- [5] JAWAID, A, SHARIF, S, KOKSAL, S. *Evaluation of wear mechanisms of coated carbide*. Journal of Materials Processing Technology. 2000, no. 99, s. 266-274.
- [6] MALÝ, Jan; ZEMAN, Pavel. *Výzkum vlivu řezného prostředí a řezných podmínek na teploty při obrábění slitiny Ti6Al4V*. Praha : VCSVTT, Výzkumná zpráva V-08-063, 2008.

Effect of Cutting Media and Cutting Conditions on Temperature and Residual Stress of Machined Surface at Milling of Difficult-to-cut Alloy Ti6Al4V.

Ing. Jan Malý, Ing. Pavel Zeman Ph.D., Prof. Ing. Jan Mádl CSc.

RCMT, Horská 3, 128 00 Praha 2, tel: 731 628 552, j.maly@rcmt.cvut.cz

Key words: titanium alloy cutting, residual stress, temperatures at cutting

This research deals with a determination of effect of cutting conditions and cutting environment on temperature and behaviour of residual stress in machined surface. The experiment was based on milling of difficult-to-cut titanium alloy Ti6Al4V. A combination of three cutting speeds: 50; 100; 150 m.min⁻¹, three feed per tooth: 0,05; 0,085; 0,12 mm and three different cutting media: dry cutting, oil mist and flood cooling, has been applied in the experiment. Understanding to behaviour of cutting temperature is necessary. Titanium alloys have very high affinity to interstitial elements contained in air (and cutting medium). When the cutting temperature is higher than 600°C, these chemical elements create hard oxidic cover and hardened underlays. The highest temperature is localized very close to cutting edge and also under machined surface. The reason is low thermal conductivity of Ti6Al4V. Phenomena mentioned above influence magnitude and character of residual stress in machined surface.

Measurement of temperatures has been split on two parts – measurement of cutting temperature and measurement of temperature of machined surface. A natural thermocouple has been used for measuring of cutting temperature. For surface temperature measurement has been used a semi synthetic thermocouple. The magnitude of residual stress in surface layer was analysed using a destructive method of measurement. The method is based on electrolytic removal of material from inspected surface. Removing of surface layer causes a deformation, which is possible to determine a stress, which is proportional to the deformation. The accuracy of the measurement is dependent on thickness of removed layer, which has to be equal all over the surface.

In accordance to the results of this research it is possible to recommend for finish milling of Ti6Al4V alloy by sintered carbide cutting tool following cutting conditions - cutting speed between 50 m.min⁻¹ and 100 m.min⁻¹, feed per tooth f_z approximately 0,05 mm. These cutting conditions have been determined with reference to cutting temperature and residual stress in machined surface. The most suitable type of cutting environment is the flood cooling (5,5% Ecocool 2520 + water). Usage of flood cooling lowers surface temperature and cutting temperature. That causes decrease of residual stress in machined surface. A disadvantage of the flood cooling is, that sudden destruction of tool tip can occur. The titanium alloy has a very low heat conductivity, therefore most of heat goes through the cutting tool. The reason of sudden destruction is a thermal shock, which causes chipping of tool tip.

These results were obtained thanks to financial support of Ministry of education of Czech Republic in terms of research and development project 1M684077000.

