

Dušan Štekláč - Miroslav Neslušán \*

## PREROZDEĽOVANIE TEPLA PRI BRÚSENÍ TITÁNOVEJ ZLIATINY VT9

### HEAT DISTRIBUTION WHEN TITANIUM ALLOY VT9 GRINDING

*Prerozdeľovanie tepla pri obrábaní patrí medzi fenomenologické charakteristiky tohto procesu, pretože významne ovplyvňuje funkčné vlastnosti obrobených povrchov. Článok sa zaoberá prerozdeľovaním tepla v zóne rezania pri brúsení titánovej zliatiny VT9. Analýza prerozdeľovania tepla je tu založená na experimentálnom meraní teploty na brúsenom povrchu (teplota styku brúsneho kotúča a obrobnku) a tangenciálnej zložky reznej sily. Prerozdeľovanie tepla pri brúsení titánovej zliatiny je odlišné od prerozdeľovania tepla pri brúsení kalenej ložiskovej ocele 14 209.4 ako jedného z klasických predstaviteľov brúsených kalených ocelí predovšetkým pre veľmi nízku tepelnú vodivosť titánových zliatin.*

#### Úvod

Titán a jeho zliatiny sú atraktívne materiály vzhľadom na jedinečný pomer medzi hmotnosťou a pevnosťou, ktorú si udržiavajú aj za zvýšených teplôt a ich výnimočnú odolnosť voči korózii. Titánové zliatiny sa zaraďujú medzi ťažkoobrábateľné materiály. Súčiastky vyrobené z titánových zliatin sú obyčajne vystavované únavovému zaťaženiu. Titán a jeho zliatiny sa najviac používajú v leteckom priemysle, kde sa používajú na rámy lietadiel a súčiastky motorov. Obrábanie s nízkymi hodnotami rezných parametrov obyčajne vedie k vysokým hodnotám únavovej pevnosti, ktorá je oveľa vyššia (takmer 5x) ako únavová pevnosť zodpovedajúca drastickým podmienkam obrábania [1]. Kahles a ost. [2] konštatovali, že povrch titánových zliatin sa ľahko poškodí počas operácií obrábania, predovšetkým počas brúsenia. Aj napriek tomu, že brúsenie je vykonávané správne v bežných rezných podmienkach, vedie k značnému zníženiu únavovej pevnosti vplyvom poškodenia povrchu.

Poškodzovanie povrchu pri brúsení je zväčša tepelne indukované a dane nielen teplotou, ktoré sa v zóne rezania vytvorí, ale aj teplotou povrchových vrstiev brúsených častí, jej gradientom a pomerom tepla vstupujúceho do obrobnku k celkovému vytvorenému teplu. Pri brúsení klasických ložiskových ocelí a aplikácii  $Al_2O_3$  brúsneho kotúča väčšina tepla vstupuje do obrobnku (90 %) [3,4]. Je to dané kinematikou procesu a skutočnosťou, že tepelná vodivosť klasických ložiskových ocelí (46 W/m.K) je vyššia ako  $Al_2O_3$  brúsneho kotúča ( $6 \div 30$  W/m.K, široký rozsah prezentovaného

*Heat distribution in machining is one of phenomenological characteristics of this process because it significantly influences functional properties of machined surfaces. The paper deals with heat distribution in the cutting zone when grinding titanium alloy VT9 based on experimental measurement of surface temperature and tangential component of cutting force. Heat distribution when grinding titanium alloy VT9 differs from heat distribution when grinding conventional roll bearing steel 14 209.4 as a typical representative of ground hardened steels first of all because of low heat conductivity of titanium alloys.*

#### Introduction

Titanium and its alloys are attractive materials due to their unique high strength-weight ratio that is maintained at elevated temperatures and their exceptional corrosion resistance. Titanium alloys are classified as difficult-to-machine materials. Machined parts made of titanium alloys are usually exposed to fatigue load because the major application of titanium has been in the aerospace industry, where it is used in airframes and engine components. Gentle machining operations usually result in a high cyclic fatigue strength that is much higher (up to nearly 5 times) than that of the corresponding abusive cutting conditions [1]. Kahles et al. [2] claim that the surface of titanium alloys is easily damaged during machining operations, especially during grinding. Even properly processed grinding practice using conventional parameters result in appreciably lower fatigue strength due to surface damage.

The damage of a workpiece when grinding is usually thermally induced and given not only by the heat generated in the cutting zone, but also by the temperature on the surface of a ground part, its gradient and the ratio of the heat entering the workpiece to the total heat. Most of energy enters the workpiece (90 %) when grinding conventional roll bearing steels and application alumina grinding wheel [3,4]. This is given by kinematical conditions and the fact that the heat conductivity of conventional roll bearing steels (46 W/m.K) is higher than alumina grinding wheel ( $6 \div 30$  W/m.K, wide range of the presented values). Heat

\* Doc. Ing. Dušan Štekláč, CSc., Dr. Ing. Miroslav Neslušán

Department of Technological Engineering, University of Žilina, Veľký diel, SK-010 26 Žilina, Slovak Republic,  
Tel.: +421-89-513 2786, +421-89-513 2785, e-mail: neslusan@fstroj.uz.sk

vaných hodnôt). Prerodžovanie tepla pri brúsení titárovej zliatiny VT9 sa odlišuje od prerodžovania tepla pri brúsení klasických ložiskových ocelí vzhľadom na zlé tepelné vlastnosti titánových zliatin (tepelná vodivosť titánových zliatin je 7,5 W/m.K).

### Metodika experimentov

Experimentálna analýza prerodžovania tepla je založená na „Teórii pohybujúcich sa tepelných zdrojov“ (Jaeger [5]). Tepelný zdroj konštantného tepelného toku na jednotku plochy  $q$ , dĺžky  $2l$ , sa pohybuje po povrchu polonekonečného nehybného telesa konštantnou rýchlosťou  $v_w$ . Tepelný zdroj je umiestnený do priesečníku osí  $x, z$ . Dvozmerný ustálený stav rozvrhnutia teploty pre takýto model je opísaný rovnicou (1)

$$\Theta \frac{\pi k v_w}{2q\alpha} = \int_{X-L}^{X+L} e^{-u} K_0 \{(Z^2 + u^2)^{0.5}\} du, \quad (1)$$

kde  $\Theta$  - nárast teploty nad teplotu okolia ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\alpha$  - tepelná difuzivita ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  
 $k$  - tepelná vodivosť ( $\text{W}/\text{m.K}$ ),  
 $q$  - tepelný tok ( $\text{m}^2.\text{kg}/\text{s}$ ),  
 $l$  - polovica dĺžky zdroja (m),  
 $K_0$  - modifikovaná Besselová funkcia,  
 $u$  - merná energia brúsenia ( $\text{J}/\text{m}^3$ ),  
 $X, Z, L$  - bezrozmerné veličiny ( $X = v_w * x/2\alpha, Z = v_w * z/2\alpha, L = v_w * l/2\alpha$ ).

Takazawa numericky integroval rovnicu (1). Jej zjednodušený tvar je rovnica (2)

$$\Theta \frac{\pi k v_w}{2Rq\alpha} = 3.1L^{0.53} \exp(-0.69L^{-0.37} Z) \quad (2)$$

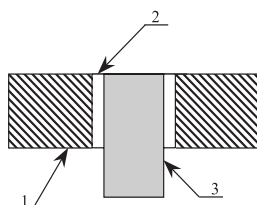
a rovnica pre teplotu na povrchu  $\Theta_s$  ( $z = 0$ ) je

$$\Theta_s = 0.947\alpha^{0.47} k^{-1} F_c R v_c v_w^{-0.47} l_c^{-0.47}, \quad (3)$$

kde  $R$  - koeficient prerodžovania tepla,  
 $F_c$  - tangenciálna zložka reznej sily (N),  
 $v_c$  - rezná rýchlosť (m/s),  
 $l_c$  - dĺžka kontaktu (m).

$F_c * v_c$  je celková energia, ktorá sa v zóne rezania vytvorí  $Q_c$ . Koeficient prerodžovania tepla  $R$  môže byť vypočítaný z rovnice (3), ak sa do nej dosadia namerané hodnoty  $\Theta_s$  a  $F_c$ .

Meranie  $F_c$  bolo vykonané na piezoelektrickom dynamometri KISTLER súčasne s meraním teploty. Meranie teploty bolo vykonané prostredníctvom poloumelého termočlánku (obrázok 1) navrhnutého Peklenikom [6] a zdokonaleného Guom a Wagerom [7] (obe veličiny merané cez A/D kartu do PC).



Obr. 1 Termočlánok podľa Peklenika na meranie teploty,  
 1 - obrobok, 2 - izolácia, 3 - vodič, 4 - spoj termočlánku, rozotrený kov  
 Fig. 1 Peklenik method for measurement of temperature (1 - workpiece,  
 2 - insulation, 3 - wire conductor, 4 - hot junction, smeared metal)

distribution when grinding titanium alloy VT9 differs from heat distribution when grinding conventional roll bearing steels because of poor thermal properties of titanium alloys (heat conductivity of titanium alloys is 7.5 W/m.K).

### Experimental method

Experimental analysis of heat distribution is based on “Moving Heat Source Theory” (Jaeger [5]). The heat source of constant heat flux per unit area  $q$ , length  $2l$ , moves along the surface of a semi-infinite stationary body at a constant velocity  $v_w$ . The origin of coordinate axes  $x, z$  is at the center of the heat source. A two-dimensional, steady-state temperature distribution for this model is obtained as

$$\Theta \frac{\pi k v_w}{2q\alpha} = \int_{X-L}^{X+L} e^{-u} K_0 \{(Z^2 + u^2)^{0.5}\} du \quad (1)$$

where  $\Theta$  - temperature rise above ambient ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\alpha$  - thermal diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  
 $k$  - thermal conductivity ( $\text{W}/\text{m.K}$ ),  
 $q$  - heat flux ( $\text{m}^2.\text{kg}/\text{s}$ ),  
 $l$  - half length of band source (m),  
 $K_0$  - the modified Bessel function,  
 $u$  - specific grinding energy ( $\text{J}/\text{m}^3$ ),  
 $X, Z, L$  - dimensionless quantities ( $X = v_w * x/2\alpha, Z = v_w * z/2\alpha, L = v_w * l/2\alpha$ ).

Takazawa obtained a solution for the equation (1) by numerical integration. Its simplified form is

$$\Theta \frac{\pi k v_w}{2Rq\alpha} = 3.1L^{0.53} \exp(-0.69L^{-0.37} Z) \quad (2)$$

and the equation for a maximum temperature rise  $\Theta_s$  ( $z = 0$ ) is

$$\Theta_s = 0.947\alpha^{0.47} k^{-1} F_c R v_c v_w^{-0.47} l_c^{-0.47} \quad (3)$$

where  $R$  - energy partition,  
 $F_c$  - tangential force component (N),  
 $v_c$  - wheel speed (m/s),  
 $l_c$  - contact length (m).

$F_c * v_c$  is the total energy created in the cutting zone  $Q_c$ . The energy partition  $R$  can be calculated by substituting the maximum temperature rise  $\Theta_s$  and the tangential grinding force  $F_c$  into equation (3).

The measurement of  $F_c$  was done by a piezoelectric KISTLER dynamometer together with the measurement of temperature. The temperature was measured by thermocouple technique (Fig. 1) introduced by Peklenik [6] and improved by Gu and Wager [7] (both quantities measured through A/D card to PC).

Podmienky experimentov:  $v_c = 25$  m/s,  $v_w = 4$  m/min, brúsny kotúč A99 60LVS, obrábané materiály boli titánová zliatina VT 9 (tepelná difuzivita  $2,87 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, medza pevnosti  $R_m = 900$  MPa, žihaná) a kalená ložisková oceľ 14 209.4 (tepelná difuzivita  $12,4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s). Štruktúra zliatiny VT9 je tvorená  $\alpha$  a  $\beta$  fázou. Jej chemické zloženie je uvedené v tabuľke 1.

The experimental conditions:  $v_c = 25$  m/s,  $v_w = 4$  m/min, grinding wheel A99 60LVS, machined materials titanium alloy VT 9 (thermal diffusivity  $2.87 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, yield strength  $R_m = 900$  MPa, after annealing) and hardened roll bearing steel 14 209.4 (thermal diffusivity  $12.4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s). The structure of VT9 consists of  $\alpha$  and  $\beta$  phase. Its chemical composition is in Table 1.

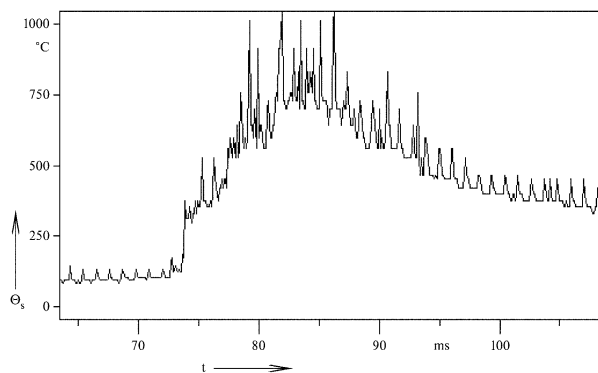
Chemické zloženie titánovej zliatiny VT9  
Chemical composition of titanium alloy VT9

Tab. 1  
Table 1

Element	Al	Mn	Si	Zr	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	C	Fe
%	5.8 - 7	2.8 - 3.8	0.2 - 0.3	0.8 - 2.5	≤ 0.15	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.1	≤ 0.25

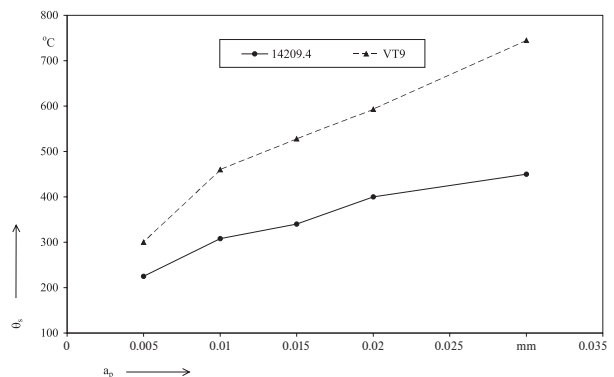
## Výsledky experimentov

## Experimental results



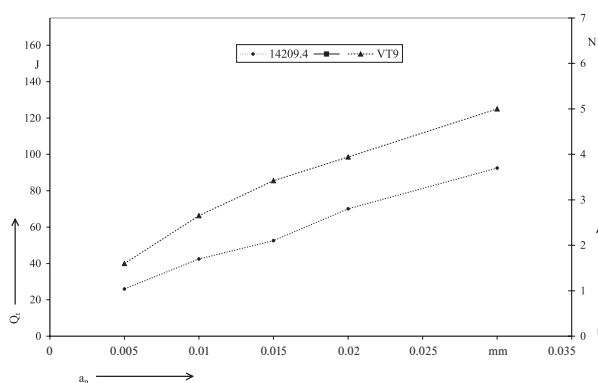
Obr. 2 Záznam teploty pri brúsení titánovej zliatiny VT9  
( $a_p = 0,03$  mm)

Fig. 2 Typical measured temperature rise when grinding titanium alloy VT9 ( $a_p = 0.03$  mm)



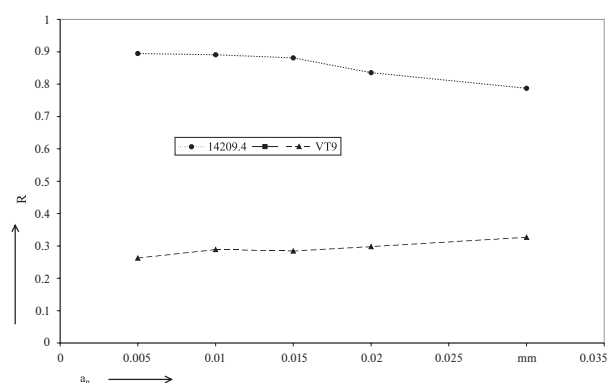
Obr. 3 Teplota na povrchu pre kalenú ložiskovú oceľ a titánovú zliatinu VT9

Fig. 3 Surface temperature for hardened roll bearing steel and titanium alloy VT9



Obr. 4 Celkové množstvo vyvinutého tepla  $Q_t$  a tangenciálna zložka reznej sily  $F_c$  pripadajúce na 1 mm šírky brúsenia

Fig. 4 Total heat  $Q_t$  and tangential component of grinding force  $F_c$  per 1 mm of grinding width



Obr. 5 Koeficient prerozdelenia tepla R

Fig. 5 Partition Ratio R

Teplota na povrchu  $\Theta_s$  je maximum hladkej krivky preloženej cez nameraný záznam. Vplyv hĺbky rezu na túto teplotu je zobra-

The temperature on the surface  $\Theta_s$  was obtained by putting a smooth curve through the measured trace. Figure 3 presents

zený na obrázku 3. Celkové množstvo vyvinutého tepla je dané meraním tangenciálnej zložky reznej sily a reznej rýchlosti, obrázok 4.

Koeficient prerozdelenia tepla  $R$  (obrázok 5) je pomer množstva tepla vstupujúceho do obrobku k celkovému teplu, ktorý je možné vypočítať z rovnice (3) na základe nameraných  $\Theta_s$  (obrázok 3) a tangenciálnej zložky reznej sily  $F_c$  (obrázok 4).

## Diskusia a záver

Pri operáciách brúsenia sa takmer všetka energia brúsenia premieňa na teplo v zóne rezania. Pri brúsení bez aplikácie reznej kvapaliny je teplo zo zóny rezania odvádzané: obrobkom, brúsnym kotúčom a trieskou. Maximálne možné množstvo tepla odvádzané trieskou môže byť vyjadrené na základe objemu odobratého kovu, jeho hustoty, merného tepla a rozdielu medzi teplotou tavenia materiálu a teplotou okolia [8]. Na základe tejto úvahy maximálne množstvo tepla vstupujúceho do triesky je pre 14 209.4 približne 8 % a 4,5 % pre titánovú zliatinu. Veľké množstvo vyvinutého tepla vstupuje do obrobku, čo má za následok extrémne vysoké teploty v mieste styku brúsneho kotúča a obrobku.

Ako preukázali výsledky experimentov, malé množstvo tepla vstupuje do brúsneho kotúča pri brúsení kalených ocelí. Na druhej strane približne 65 % tepla je odvádzané brúsnym kotúčom pri brúsení titánovej zliatinu. Veľké mechanické a tepelné zaťaženie brúsných zŕn pri brúsení titánových zliatin má za následok zvýšenie intenzity opotrebovania brúsneho zrna a silnej adhézie obrábaného materiálu a brúsných zŕn. [9]. Maximálny nárast teploty pre titánovú zliatinu je oveľa vyšší ako pre kalenú oceľ, hoci množstvo energie vstupujúcej do titánovej zliatinu je menšie, vzhľadom na to, že tepelná vodivosť titánovej zliatinu je oveľa menšia (v porovnaní s kalenou oceľou).

Vysoká teplota a jej veľký gradient často vedie k tepelnému poškodeniu dokončovaných povrchov. Toto poškodenie môže byť indikované štrukturálnymi zmenami v povrchových vrstvách, zmenou mikrotvrdoosti, viditeľným opalom povrchu, vznikom trhlin alebo ťahovými zvyškovými napätiami. Tlakové napätie je žiaduce, pokiaľ ide o únavovú pevnosť, kým vzniku ťahových napätí je žiaduce sa vyhnúť. Ťahové zvyškové napätia pod brúsnym povrchom sú dané tepelnou expozíciou podpovrchových vrstiev, predovšetkým rozdielnym ohrievaním a ochladzovaním vrstiev rôzne vzdialených od povrchu. Rovnica (2) umožňuje vypočítať teplotu vo vrstvách pod povrchom (obrázok 6).

Gradient teploty je väčší pre titánovú zliatinu ako pre kalenú ložiskovú oceľ. Hoci teplo vstupujúce do titánovej zliatinu je nižšie ako teplo vstupujúce do kalenej ocele, teplota na povrchu a gradient teploty je vyšší. Povrch titánových zliatin je preto možné ľahko poškodiť počas operácií brúsenia, predovšetkým pri drastických podmienkach obrábania (vyššie hodnoty  $a_p$ ), ktoré sa používajú v záujme zvýšenia produktivity výroby. Teplota na povrchu a energia vstupujúca do obrobku rastú s rastúcou hĺbkou rezu.

Aj napriek tomu, že teplota, ktorej je povrch súčiastok z titánových zliatin vystavený takmer neprekračuje prevádzkovú

a relation of surface temperature to a cutting depth. The total heat was determined by measuring a tangential force and wheel speed (Figure 4).

The partitioning ratio  $R$  (Figure 5) is the portion of the heat entering the workpiece to the total heat calculated by substituting the maximum temperature rise  $\Theta_s$  from Figure 3 and the tangential grinding force  $F_c$  from Figure 4 into equation (3).

## Discussion and conclusion

In grinding operation almost all the grinding energy is converted into heat within a small grinding zone. There are three significant heat sinks in dry grinding: workpiece, grinding wheel and grinding chips. The maximum possible heat entering grinding chips may be expressed in terms of the specific metal removal, the density, the specific heat capacity and the difference between the melting temperature and the ambient temperature [8]. On the basis of this assumption the maximum heat entering the grinding chips is about 8 % for 14 209.4 and about 4.5 % for titanium alloy. A large part of the generated heat flows into the workpiece, which results in extremely high temperatures at the interface between the wheel and the workpiece.

On the base of the experimental results it is possible to say that a small portion of energy enters the grinding wheel when grinding hardened steel. On the other hand about 65 % of heat is entering the grinding wheel when grinding titanium alloy. The high mechanical and thermal load of grains when grinding titanium alloy leads to a high grain wear rate and strong adhesion between a machined material and cutting grain [9]. The maximum temperature rise for titanium alloy is much higher than that of roll bearing steel, although the net energy input for titanium alloy is smaller than for hardened steel. This is because the thermal conductivity of titanium alloy is much smaller than that of the hardened steel.

The high temperature and its high gradient often lead to a thermal damage on finished surfaces. The damage can be indicated by structural changes in the surface layers, change of microhardness, visible surface burn, creation of cracks or tensile residual stresses. The compressive residual stress is beneficial when fatigue strength is being considered, while the tensile residual stresses should be avoided. Tensile residual stresses under the ground surface are given by a thermal exposition of layers under the surface, first of all different heating and cooling layers of different distance from the surface. Equation (2) enables to calculate temperatures in different layers under the surface (Figure 6).

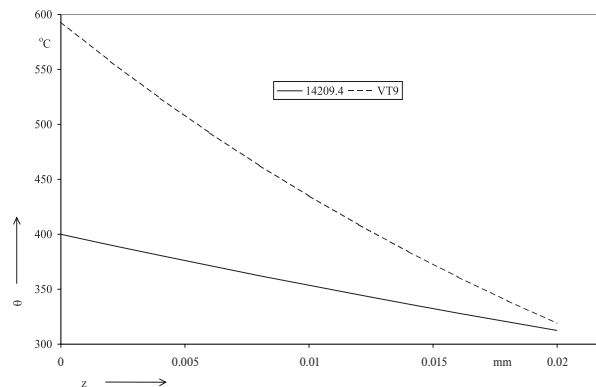
The temperature gradient for titanium alloy is much higher than that for hardened roll bearing. Although the heat entering the titanium alloy is lower than the one entering the hardened steel, surface temperature and temperature gradient are higher and so the surface of titanium alloys is easily damaged during grinding operations, especially during abusive cutting conditions (higher  $a_p$ ) that are used to increase productivity. The surface temperature and energy entering the workpiece increase with the increase of a cutting depth.

Even though the surface temperature must not overcome the working temperature for the parts made of titanium alloys, the

teplotu, zvyškové napätia touto teplotou indukované môžu viesť k značnému zníženiu únavovej pevnosti vplyvom poškodenia povrchu.

Tepelnému poškodeniu brúsených povrchov súčiastok z titánových zliatin bez zníženia produktivity sa možno vyhnúť použitím brúsnych kotúčov na báze diamantu, alebo KNB, pri aplikácii ktorých rovnakou metódikou merania ako pri kotúči na báze  $Al_2O_3$  sú teploty namerané na povrchu obrobku nižšie. Na druhej strane vysoká cena KNB a diamantových kotúčov limituje ich aplikáciu.

Recenzenti: K. Vasilko, S. Novák



Obr. 6 Teplota pod brúseným povrchom ( $a_p = 0,02$  mm)

Fig.6 Temperature under the ground surface ( $a_p = 0.02$  mm)

tensile residual stresses induced this temperature can result in appreciably lower fatigue strength due to a surface damage.

The use of diamond and CBN grinding wheels enables to reduce tendency for thermal damage of ground surfaces of parts made of titanium alloys without productivity decreasing. Surface temperatures for CBN and diamond grinding wheels measured by the same technique are significantly lower than those measured for  $Al_2O_3$ . On the other hand, high costs of CBN and

diamond grinding wheels limit their application.

Reviewed by: K. Vasilko, S. Novák

#### Literatúra - References:

- [1] ZLATIN, N. - FIELD, M.: *Procedures and Precautions in Machining Titanium Alloys*, Titanium Science and Technology, 1 1973, p. 489-504.
- [2] KAHLES, J. F. - FIELD, M. - EYLON, D.- FROES, F. H.: *Machining of Titanium Alloys*, Journal of Metals, IV 1985, p. 27 - 35.
- [3] ROWE, W. B. - BLACK, S. C. - MILLS, B. - QI, H. S. - MORGAN, M. N.: *Experimental Investigation of Heat Transfer in Grinding*, CIRP 44/1/1995, p. 329-332.
- [4] KATO, T. - FUJII, H.: *Energy Partition in Conventional Surface Grinding*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121/1999, p. 393-398.
- [5] JEAGER, J. C.: *Moving Source of Heat and the Temperature at Sliding Contact*, Proc. of the Royal Society of New South Wales, 76/1942, p. 203-224.
- [6] PEKLENIK, J.: *Ermittlung von geometrischen and physicalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des schleifens*, PhD. Thesis, 1957, Aachen.
- [7] GU, D. Y. - WAGER, J. G.: *New Evidence on the Contact Zone in Grinding*, CIRP 37/1/1988, p. 335-338.
- [8] ROWE, W. B. - PETTIT, J. A. - BOYLE, A. - MORUZZI, J. L.: *Avoidance of Thermal Damage in Grinding and Prediction of the Damage Threshold*, CIRP 37/1/1988, p. 327-330.
- [9] VASILKO, K. - BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*, ALFA Bratislava 1988.