

Titán a technologické problémy jeho obrábania

Karol Vasilko, Faculty of Manufacturing Technology Technical university of Košice with the seat in Prešov. karol.vasilko@tuke.sk

Titán je považovaný za kov 21. storočia [14]. Dávno sa žiadal materiál, ktorý by mal malú hustotu (aspoň 2-3x menšiu ako železo), plasticnosť, tvarovateľnosť, vysokú pevnosť, tvrdosť a životnosť. Aby nestrácal tieto vlastnosti pri vysokých teplotách, aby sa nedegradovali jeho vlastnosti na vzduchu, v riečnej a morskej vode, aby nebol rozpustný v kyselinách a lúhoch. Pritom by jeho obsah v zemskej kôre bol dostatočný. Takýmto materiálom titán je. Pre svoje špecifické vlastnosti sa jeho aplikácie rozširujú do mnohých odborov, medicína (implantáty), kozmos (materiály pre kozmickú techniku), chemické zariadenia, lode pre námornú dopravu (odolnosť voči kyselinám a soliam), skoby pre horolezcov (malá hustota a vysoká pevnosť)... Mechanické vlastnosti titánu však vedú k novým problémom pri technologickom spracovaní. Významné odlišný prístup je potrebné aplikovať pri jeho obrábaní. Pri obrábaní sa titán a jeho zliatiny správajú špecificky a je treba toto správanie poznať a využiť na efektívnu výrobu súčiastok.

Key words: machining, titanium alloys, turning, grinding

1 Vlastnosti titánu

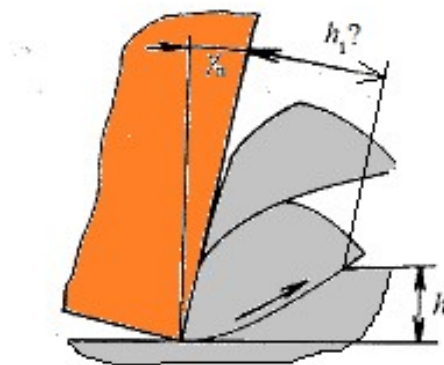
V Mendelejevovej periodickej sústave prvkov má titán poradové číslo 22. Jeho neutrálny atóm pozostáva z jadra o 22 protónov a sústavy 22 elektrónov. Počet neutrónov býva 24-28. Preto je aj počet izotopov titánu rozličný. Do titánu možno pridať niektoré kovy. Ktoré zvyšujú jeho trvanlivosť desiatky až stovky krát. Je to napr. Zr, Hf, Ta, W. Pridaním 20-30% Mo možno dosiahnuť takú koróznú stabilitu titánu, akú má zlato. Titán je ťažko tavitelný. Teplota tavenia čistého titánu je najvyššia so všetkých konštrukčných kovov: 1668°C. Vysoká je húževnatosť titánu. Preto dobre odoláva kavitácii. Je vhodným materiálom na lodné skrutky. Vyznačuje sa zvláštnou vlastnosťou – tvarovou pamäťou. V zliatine s niektorými kovmi, napr. s niklom si pamätá tvar súčiastky, ktorú sme vyrobili pri istej teplote. Ak napr. stočíme z materiálu za tepla pružinu, pri ohreve na teplotu, pri ktorej bola vyrobená sa vráti do pôvodného tvaru. To sa využíva v kozme (otváranie predtým zložených antén), medicíne (do zúženej cievy sa zavedie drôt, ktorý sa pri teplote tela stočí do pružiny a roztiahne cievu). Titán má malú tepelnú vodivosť ($\lambda = 0,071 \text{ J.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), ktorá je 3x menšia ako železa [13]. Koeficient lineárnej tepelnej vodivosti je pri izbovej teplote $8,5.10^{-6}.\text{°C}^{-1}$. Elektrická vodivosť je pri izbovej teplote $42,1.10^{-6} \Omega.\text{cm}$. Je typickým paramagnetikom. Má však aj negatívne vlastnosti. Má sklon k samovznieteniu, v niektorých prípadoch je výbušný. Vo forme jemnej triesky, alebo prášku sa môže vznietiť aj bez prívodu tepla. Mechanické vlastnosti si zachováva titán do vysokých teplôt (400-500°C). Neporušuje sa do teploty – 235°C. Patri k ľahkým kovom. Jeho hustota je $4,517 \text{ g.cm}^{-3}$. Je teda 1,4x ťažší ako hliník a 1,5x ľahší ako železo. Pevnosťou ich však prevyšuje. Pri vyšších teplotách absorbuje plyny, najmä kyslík a dusík, čím klesá jeho plasticnosť a narastá pevnosť a tvrdosť (využíva sa u lopatiek plynových turbín) [5]. Čistý titán je tvrdý, pevný, húževnatý plastický kov, Jeho HB je okolo 1000 MN.m^{-2} , $E = 108 \text{ tis.MN.m}^{-2}$, $R_e = 250 \text{ MN.m}^{-2}$.

Má najväčší koeficient trenia spomedzi všetkých kovov, preto nie je vhodný na súčiastky, ktoré sú v trecom kontakte s inými súčiastkami (vodítka, klzné ložiská).

2 Problémy obrábania titánu

Obrábanie je sťažené z dôvodu vysokého koeficientu trenia titánu. Titán sa nalepuje na pracovné plochy nástrojov. Prakticky nedochádza ku klzaniu triesky po čele nástroja. Plocha styku triesky s čelom nástroja je veľmi malá. Na tejto ploche vznikajú veľké tlaky a teploty. Odvádzanie tepla je sťažené, pre malú tepelnú vodivosť titánu. Nalepovanie častíc titánu na nástroj sa mení jeho geometria a rýchle stráca schopnosť obrábať. Vhodným nástrojovým materiálom je diamant, ktorá má spomedzi rezných materiálov najmenší koeficient trenia.

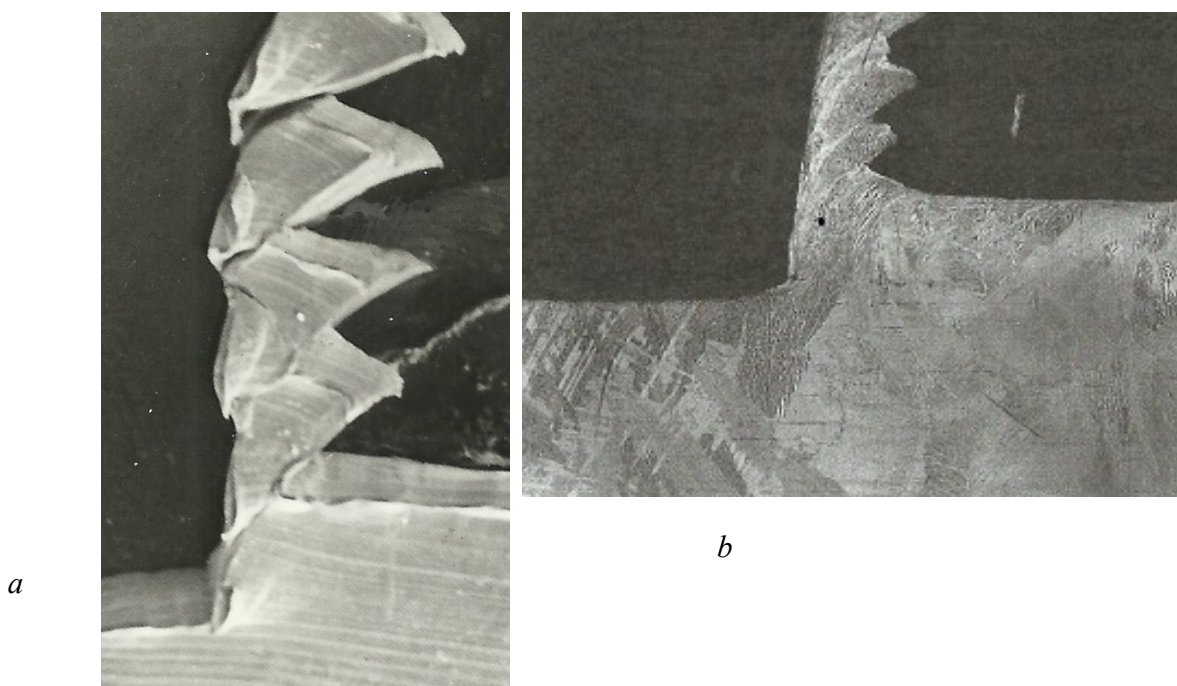
Titán a jeho zliatiny radíme k ťažko obrábateľným materiálom. Charakter obrábania sa výrazne líši od obrábania iných kovových materiálov. Trvanlivosť nástrojov je veľmi malá v dôsledku deformácie rezného klina a zväčšovania polomeru zaoblenia reznej hrany. Teplo sa koncentruje do úzkej oblasti v reznom klíne nástroja, pretože malá tepelná vodivosť titánu bráni odvodu tepla do triesky a obrobku. Na druhej strane, rezné sily a spotrebovaný výkon je výrazne menší ako pri obrábaní ocele. Problém je v tom, že trieska nie je celistvá, ale zložená s elementov, ktoré vznikajú ako dôsledok vysokého koeficientu trenia medzi nástrojovým a obrábaným materiálom [4], [7], [11]. Trieska neodchádza po čele nástroja, ale nahor a vytvára segmenty, ako dôsledok periodických šmykov v materiáli (obr. 1).



Obr. 1 Mechanizmus vzniku triesky pri obrábaní titánu

Postupné stlačovanie rodiaceho sa segmentu triesky vytláča segment nahor. Kontakt medzi vytvoreným segmentom a novým sa postupne premiestňuje v dôsledku vyrovnávania segmentu zo strany noža. Rýchlosť pohybu triesky pozdĺž čela noža bude rovnaká, ako rýchlosť stlačovania elementu triesky. Pretože šmyk vznikol a rýchle sa rozširuje, bude posúvať vznikajúci element vo smere rovnobežne s plochou šmyku. To v podstate musí urýchliť premiestňovanie elementu. Táto časť cyklu, ktorá je vyznačená pohybom segmentu po čele noža má periodické zabrzdenia, ktoré majú tú zvláštnosť, že pre stlačenie segmentu je potrebná minimálna sila.

Na obr. 2 je fotografia tvoriacej sa triesky.



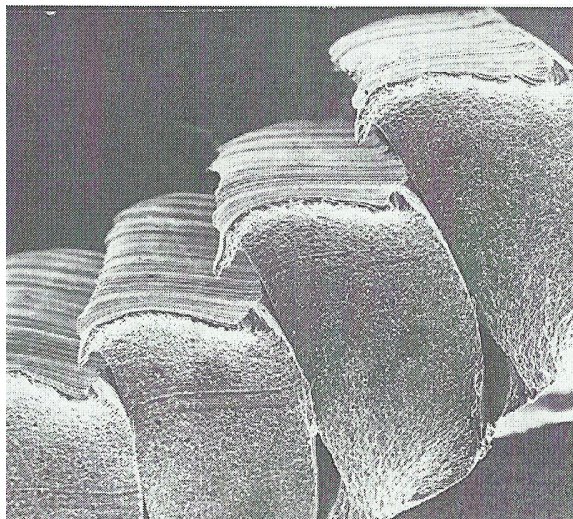
Obr. 2 Vznik titánovej triesky, *a*-pohľad, *b*-metalografický výbrus

Vidno, intenzita plastickej deformácie v trieske je výrazne variabilná. V strede elementov sa nachádza málo deformovaná štruktúra, medzi segmentami dochádza k periodickému adiabatickému šmyku. Segmentácia triesok zrejme súvisí s nestabilným charakterom deformácie, ktorý je podmienený vzájomným pôsobením dvoch mechanizmov.

- zníženie pevnosti vplyvom ohrevu teplom trenia a deformácie
- deformačné spevnenie

Vytváranie pásikov koncentrovaného šmyku je spojené so zlou tepelnou vodivosťou materiálu. Tepelná energia sa koncentruje do pásu. Sledovanie tvorenia triesky rýchlostnou kamerou ukázalo striedavé zabrzdenie pohybu triesky, ktorého príčinou môžu byť zvarové spojenia triesky a nástroja. To vysvetľuje vysokú intenzitu opotrebenia nástrojov.

Na hraniciach segmentov je výrazný sklz. Výraznú deformáciu vidno na zadnej strane triesky, ktorá bola predtým prechodovou plochou obrobku- *obr. 3*. Ako vidno, často dochádza k úplnému oddeleniu jednotlivých elementov triesky.



Obr.3 Fotografia titánovej triesky z riadkovacieho mikroskopu

Pozitívnym aspektom je teda skutočnosť, že pri obrábaní titánu nie je problém s tvarovaním triesky. Trieska je elementárna, málo súdržná a rozpadáva sa pri náraze na prekážku. Tvarovač triesky na nástroji nie je potrebný. Negatívnym dôsledkom opísaného mechanizmu tvorenia triesky je samobudené kmitanie nástroja.

Postupnosť javov pri tvorení segmentovej triesky možno rozdeliť na dve štádiá.

- V prvom štádiu zaznamenávame plastickú nestabilitu, ktorá vedie k lokalizácii deformácie pozdĺž plochy šmyku. Táto plocha začína na reznej hrane a je najprv orientovaná vo smere vektora reznej rýchlosti, potom sa ohýba nahor, kde sa pretne s obrábanou plochou. Šmykové porušenie triesky sa objavuje na jej vonkajšej strane vo forme trhlín a na vnútornej strane vo forme silne deformovaných pásov.
- V druhom štádiu vzniká postupné vyrovňovanie (vyhladzovanie poloklina (sklonenej strany segmentu triesky, orientovanej k obrábanému materiálu v dôsledku premiestňovania nástroja. V dôsledku toho bude hrúbka triesky približne rovná hrúbke odrezávanej vrstvy.

To viedlo viacerých autorov k mylnému záveru, že pri obrábaní titánu je veľký uhol hranice primárnej plastickej deformácie. Teda stlačenie triesky by malo byť rovné 1, čo je v rozpore so zákonmi plastickej deformácie (zákon zachovania objemu). Použitie pojmu „uhol šmyku“ sa totiž pre tento prípad nehodí. Proces deformácie v tomto úzkom páse je s veľkou pravdepodobnosťou adiabatickým šmykom. Porušenie nastáva v dôsledku stlačenia od susedných vrstiev kovu (prípady plošnej deformácie). Po stranách triesky je materiál voľný a ničím nepridržiavaný (plošne napätý stav), čo dovoľuje segmentu rozširovať sa a vytvárať trhliny.

V tejto súvislosti nastáva otázka, ako v tomto prípade posudzovať parameter stlačenie triesky. Klasický postup spočíva v meraní hrúbky odrezávanej vrstvy a hrúbky triesky podľa *obr. 1*. Hodnota h_1 je však sporná. Geometrickým meraním sa totiž hrúbka triesky nedá identifikovať (h_t z *obr.1* je len odhadnutá hodnota). Je potrebné použiť nasledovný postup. Zvážime zachytenú triesku určitej dĺžky a pri známej hustote obrábaného materiálu vypočítame stredné stlačenie triesky z rovnice:

$$k = \frac{100 \cdot m_t}{l_t \cdot \gamma \cdot S} \quad (1)$$

kde:

m_t je hmotnosť triesky, dĺžky l_t , g

S – plocha prierezu rezu ($a_p \cdot x_f$), mm²

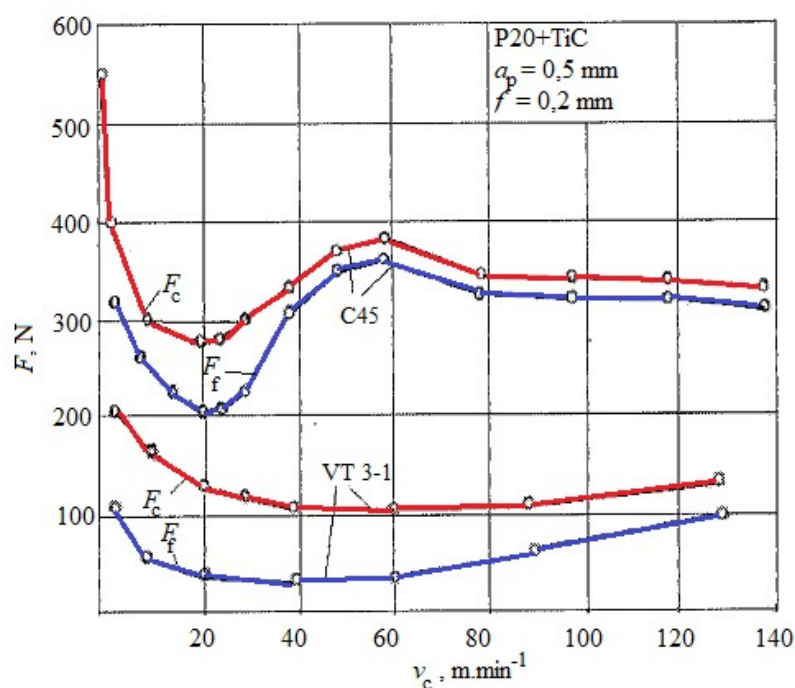
l_t – dĺžka zachytenej triesky, mm

γ – hustota obrábaného materiálu, g.mm⁻³

3 Niektoré experimentálne výsledky

Pri experimentálnom obrábaní bola použitá frekventovaná titánová zliatina VT 3-1 (5,5-7%Al; 2-3%Mo; 1-2,5%Cr; 0,15-0,4%Si; 0,2-0,7%Fe).

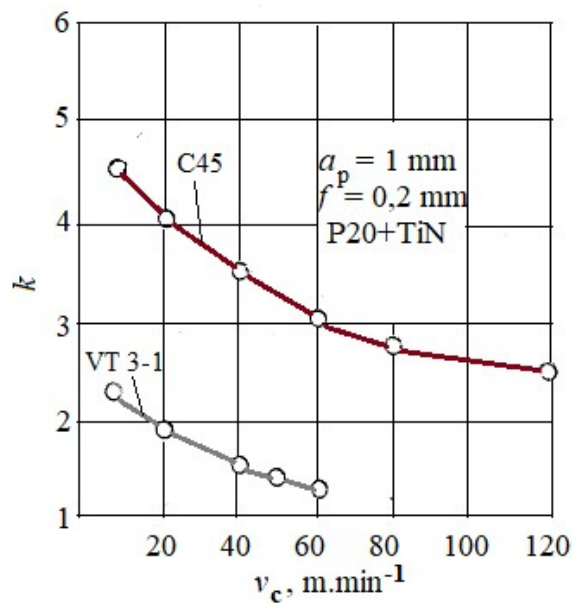
Ako bolo uvedené, rezné sily sú napriek vyššej pevnosti titánu menšie ako pri obrábaní ocele. Na *obr. 4* je experimentálna závislosť rezných síl na reznej rýchlosti pre oba sledované materiály.



Obr. 4 Experimentálna závislosť rezných síl na reznej rýchlosti pri obrábaní titánu a ocele

V celom rozsahu sledovaných rezných rýchlostí sú rezné sily pri obrábaní titánu výrazne menšie. Zatiaľ čo u ocele možno identifikovať minimum sily, asi pri reznej rýchlosti 20 m.min⁻¹ a maximum pri reznej rýchlosti v danom prípade cca 60 m.min⁻¹, titán sa správa úplne ináč. Rezná sila kontinuálne klesá až do reznej rýchlosti 60 m.min⁻¹, potom mierne stúpa.

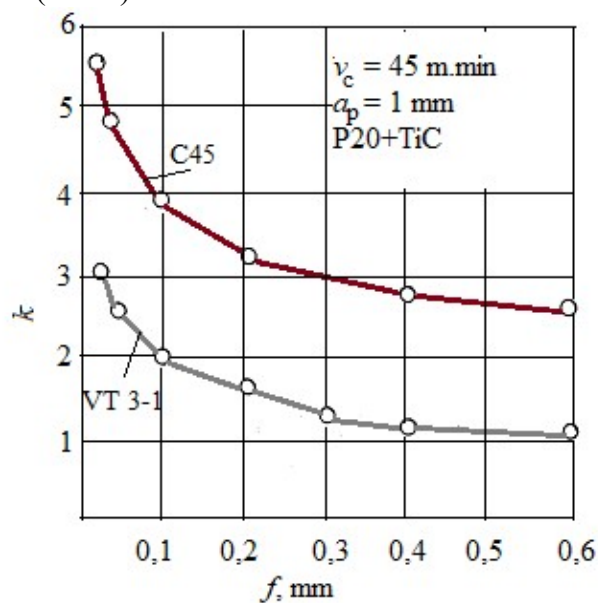
Stlačenie triesky, v závislosti na reznej rýchlosti, vyhodnotené s využitím vzťahu (1) je na *obr. 5*.



Obr. 5 Experimentálna závislosť stlačenia triesky na reznej rýchlosti pre ocel C45 a titánovú zliatinu VT 3-1

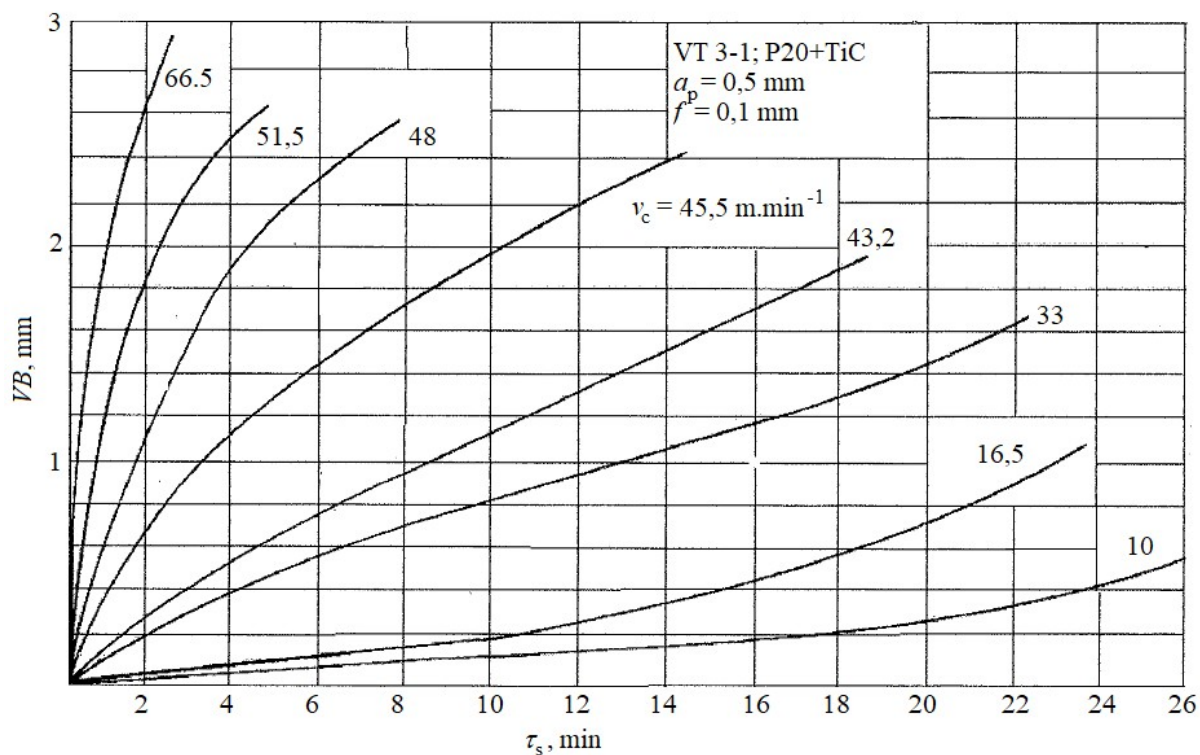
Ako vidno, priebeh oboch závislostí je značne rozdielny. U titánu sa pri vyšších rezných rýchlostiach blíži jednej. Je to dané mechanizmom vytvárania elementov, kde dochádza k pravidelným adiabatickým šmykom, pričom v strede elementov je materiál deformovaný minimálne (obr. 2).

V závislosti na posuve u oboch materiálov je priebeh v absolútnych hodnotách rozdielny, ale kontinuálne klesajúci (obr. 6).



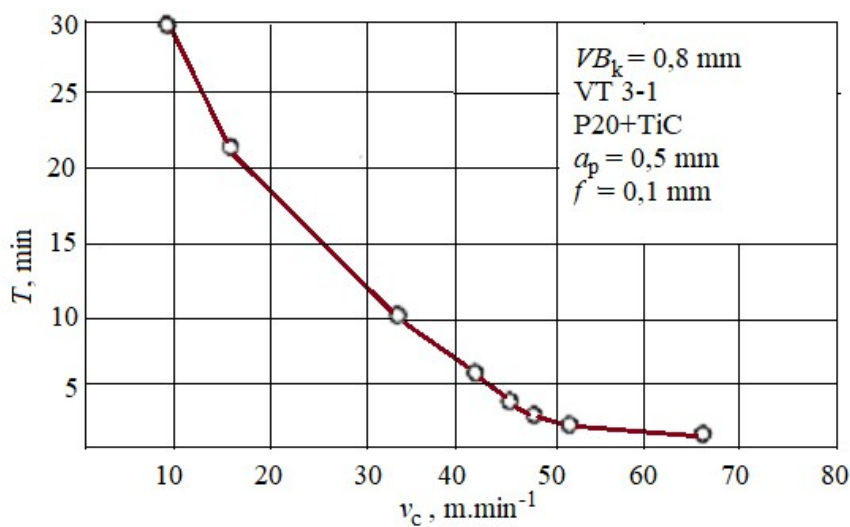
Obr. 6 Experimentálna závislosť stlačenia triesky na posuve pre sledované materiály

Špecifické mechanické vlastnosti titánu podmieňujú aj mechanizmus opotrebenia nástrojov [9]. Na *obr. 7* sú experimentálne krivky závislosti opotrebenia nástrojov na chrbte v závislosti na zase obrábania a reznnej rýchlosti, získané pri sústružení zliatiny titánu VT 3-1 nástrojom zo spekaného karbidu P20 s povlakom TiC.



Obr. 4 Experimentálne krivky závislosti VB - τ_s

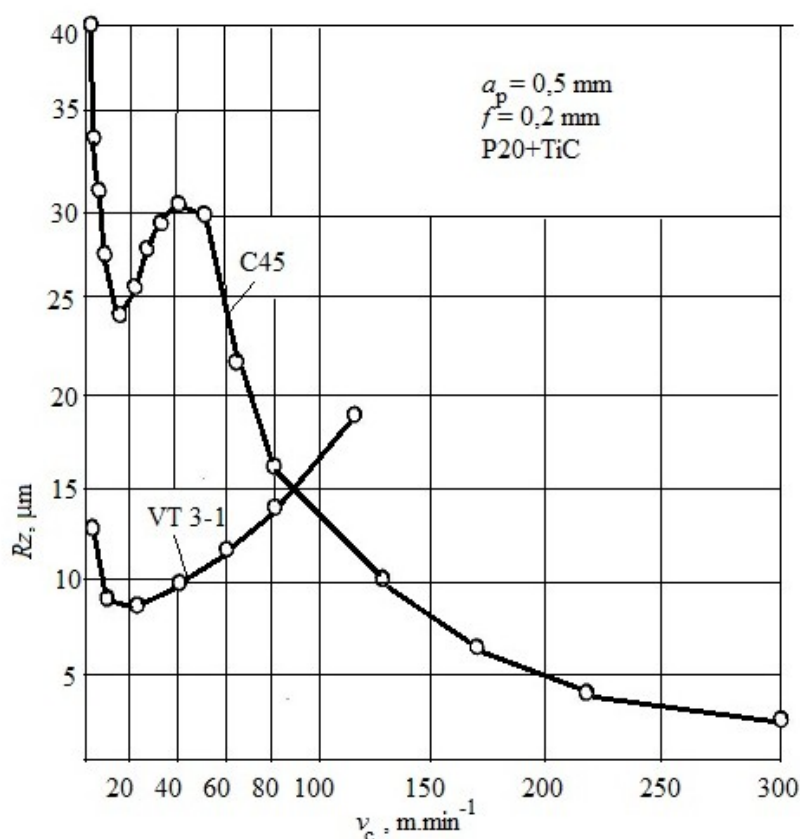
Vidno, že so stúpajúcou reznou rýchlosťou intenzita opotrebenia nástroja prudko rastie. Názornejšie je to viditeľné na závislosti T - v_c , získanej z *obr. 5* pri kritériu otupenia $VB_k = 0,8$ mm, na *obr. 8*.



Obr. 8 Experimentálna závislosť trvanlivosti nástroja na reznej rýchlosti

Je to typická hyperbolická závislosť, dokumentuje výrazne menšiu trvanlivosť nástroja ako pri obrábaní ocele v celom rozsahu týchto rezných rýchlostí. Vyplýva z nej nevhodnosť vyššej reznej rýchlosti ako 60 m.min^{-1} . Možno uviesť všeobecnú zásadu pre voľbu reznej rýchlosti, že má byť približne desatinová ako pri obrábaní ocele ($v_{cti} = 0,1 \cdot v_{cFe}$) pri rovnakom použitom reznom materiáli.

Dôležitým parametrom obrábania titánu je kvalita obrobeného povrchu [2] [3]. Na obr. 9 je experimentálny diagram závislosti R_z - v_c .

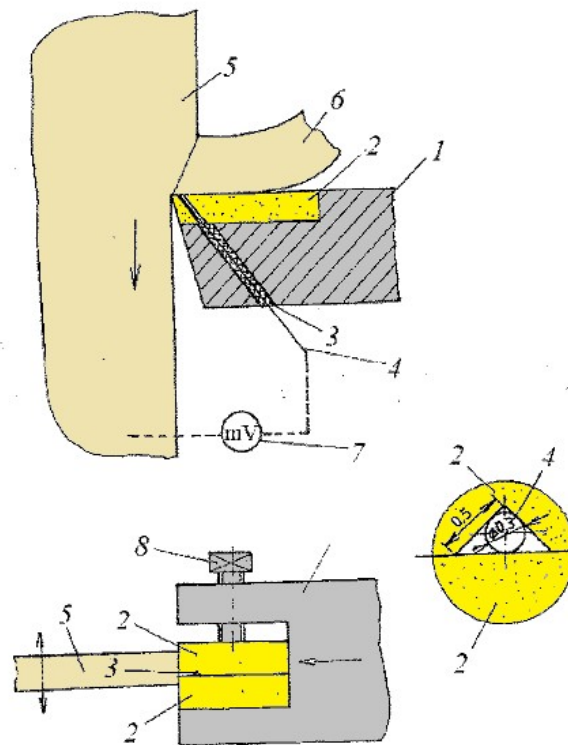


Obr. 9 Experimentálna závislosť najväčšej výšky nerovnosti obrobeného povrchu na reznej rýchlosti pri sústružení ocele C45 a titánovej zliatiny ($r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$).

Závislosť prebieha výrazne odlišne ako pri sústružení ocele. Pri minimálnych rezných rýchlostiach R_z narastá u ocele aj titánu v dôsledku trhlínovotvorného procesu pri tvorení triesky. Podobne, ako u ocele pri rezných rýchlostiach okolo 20 m.min^{-1} dosahuje minimum. S nárastom reznej rýchlosti nad 20 m.min^{-1} sa R_z pri obrábaní titánu sa kontinuálne zhoršuje. Rezná rýchlosť vyššia ako 60 m.min^{-1} nie je pre obrábanie titánu vhodná. Experiment mohol byť realizovaný pri vyšších rezných rýchlostiach iba v trvaní niekoľko sekúnd, pretože dochádzalo ku spontánnemu

opotrebeniu nástrojov. V celom rozsahu rezných rýchlostí do $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je kvalita obrobeného povrchu titánu výrazne lepšia ako u ocele. Potom ju však prekračuje, asi od hodnoty $90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

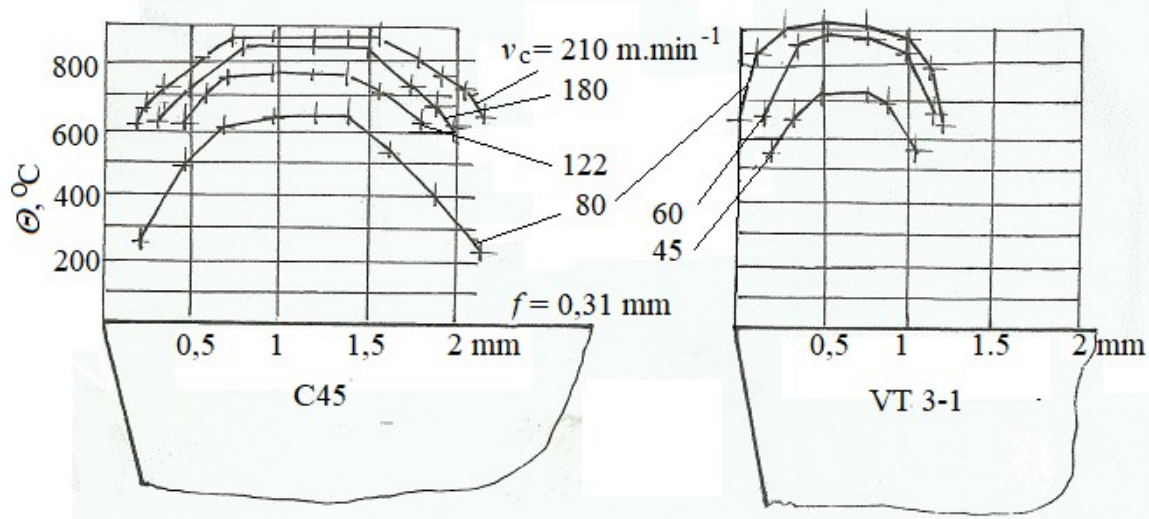
V ďalšej fáze skúšok bola porovnávaná teplota styku nástroja a triesky. Na sledovanie okamžitých teplôt bol aplikovaný princíp podľa obr. 10.



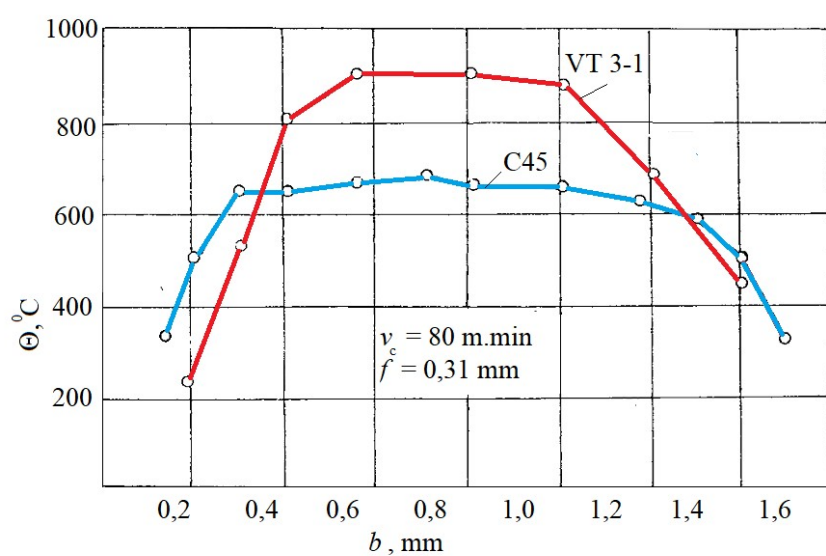
Obr. 10 Meranie kontaktnej teploty medzi trieskou a čelom noža. 1- nástroj, 2-keramická rezná platnička, 3-izolácia, 4-platinový drôtik, 5-obrobok, 6-trieska, 7-milivoltmeter, 8 -upínacia strutka.

V nožovom držiaku 1 sú pomocou skrutky upevnené dve keramické platničky 2. V jednej z nich je vybrúsená drážka v ktorej je vložený platinový drôtik 4. Pri dotyku drôtika o triesku milivoltmeter okamžite zaznamená hodnotu termoelektrickej sily medzi trieskou a čelom nástroja. Pričným presunom nástroja oproti obrobku možno zaznamenať zmenu teploty v priečnom smere. V pozdĺžnom smere sa teplota zaznamenáva po výmene vybrúsenej platničky s inou polohou drážky.

Výsledok merania znázorňuje obr. 11.



a



b

Obr. 11 Priebeh teplôt na čele noža pri obrábání ocele a titánu v dvoch rovinách, a-radiálnom, b-axiálnom

Ako vidno, pri obrábání titánu je podstatne menšia dĺžka styku triesky s čelom nástroja.. Pri rovnakých rezných rýchlostiach je teplota kontaktu podstatne vyššia ako u ocele. Obe tieto skutočnosti vedú k vyššiemu tepelnému namáhaniu rezného klina a tým ku znižovaniu

trvanlivosti nástroja. Opatrebenie sa prejavuje plastickým zaobl'ovaním rezného klina a nárastom polomeru r_n . Spájkované nástroje sa pri obrábaní titánu sa preto musia často preostrovať. Povlakovaním nástrojov sa zväčšuje r_n , čo pri obrábaní titánu pôsobí negatívne.

4 Záver

Je zrejmé, že aplikácie titánu a jeho zliatin sa bude rozširovať na rozličné aplikácie v strojárskom, chemickom, potravinárskom, leteckom a kozmickom priemysle. Preto poznanie podmienok hospodárneho obrábania tohto materiálu má dôležitý význam. Fyzikálno-mechanické a chemické vlastnosti titánu ho predurčuje na ľahké a pevné konštrukcie. Spôsobuje však značne ťažkosti pri jeho technologickom spracovaní. Najmä jeho vysoká pevnosť spôsobuje, že nemožno aplikovať vyššie rezné rýchlosti. Nízka tepelná vodivosť spôsobuje, že teplo sa pri obrábaní neodvádza do triesky a obrobku. Koncentruje sa v reznom klíne a spôsobuje jeho degradáciu, po krátkom čase obrábania. Je dôležité, aby rezný klin bol stále ostrý, s minimálnym polomerom zaoblenia reznej hrany. Preto je hospodárna trvanlivosť reznej hrany výrazne nižšia ako pri obrábaní ocele. Mimoriadne vysoký koeficient trenia titánu s ľubovoľným iným kovom, teda aj s nástrojovým materiálom spôsobuje problémy pri tvorení triesky a obrobeného povrchu. Z dôvodu adhézneho spojenia nie je vhodné použiť rezné nástroje, ktoré obsahujú titán. Trieska sa neklíže po čele nástroja, ale odchádza pod uhlom hranice šmykových deformácií ϕ vo forme málo súvislých elementov. Preto pri obrábaní titánu nemožno použiť klasické poznatky o tvorení triesky, známe z obrábania ocele.

Literatúra

- [1] BOYER, P, R.: An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Material Science and Engineering*, 1976. A. Vol. 213, pp. 103-114
- [2] BUMBALEK, B., BUMBALEK, Z.: Surface Layer Properties of Titanium Alloys Ti6Al4V, Ti7Al3, 3MoO3Si after Milling and Grinding Operation and Their Influence on the Fatigue. *Manufacturing Technology*, 2008, Vol VIII, pp 40-46
- [3] CZAN, A. et al.: Studying of Cutting Zone When Finishing Titanium Alloy Application of Multifunction Measuring System. *Manufacturing Technology*. December 2013, Vol. 13, No.4, ISSN 1213-2489
- [4] GENTE, A., HOFMEISTER, H. W., EVANS, C. J.: Chip Formation in Machining Ti6Al4V at extremely High Cutting Speeds. *Annals of the CIRP*, Vol 50/1/2001, pp. 49-54
- [5] GLAZUNOV, S. G., MOJSEJEV, V. N.: *Metallurgija titana*. Moskva, Mašinostrojenije, 1974
- [6] KARASEVSKAYA, O. P. et al.: Deformation behavior of beta titanium alloys, *Materials Science and Engineering*, 2003, Vol. 354, pp. 121-123. Titanium a technical guide
- [7] KOMANDURI, R.: Some Classification on the Mechanics of Chip Formation of Titanium Alloys. In: 2nd Int. *Conference on High Speed Machining*. Darmstadt, 1999, pp. 21-28
- [8] KÖNIG, W., SCRODER, K. H.: Stirnfräsen von Titanwerkstoffen. *Industrie Anzeiger*, 1975, Nr. 77, s. 1657-1661
- [9] KREIS, K.: Verschleissursachen beim Drehen von Titanwerkstoffen. *VDI. Zeitschrift*, 116, 1974, s. 57-57
- [10] NOVAKOVA, L., HOMOLA, P., KAFKA, V.: Microstructure Analysis of Titanium Alloys

- after Deformation by means of Asymmetric Incremental Sheet Forming. *Manufacturing Technology*, 2012, No. 13, Vol 12, pp. 201-206
- [11] ORTMAN, R.: Drehbearbeitung der Titanlegierung TiAl6V4, mit Werkzeugen aus dem Schnellarbeitsstahl S10-43-10. *KEM* 1974, Nr. 4
- [12] VASILKO, K.: *Obrábanie titánu a jeho zliatin*. FVT TU v Košiciach, 2001, ISBN 80-7099 683-8
- [13] WAISS, I., SEMIATIN, S, L.: Thermomechanical processing of beta titanium. *Science and Engineering*, 1998, Vol. 243, pp. 46-65
- [14] ZUBKOV, I, B.: *Kozmicheskiy metal*. Moskva: Nauka. 1987, 128 s.