



## Nové analytické vyjadrenie základných závislostí v obrábání

Karol Vasilko, Dr.h.c. prof. Ing. DrSc. Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove, [karol.vasilko@tuke.sk](mailto:karol.vasilko@tuke.sk)

Doterajšia teória obrábania kovov bola založená na stave vývoja rezných materiálov v priebehu 20. storočia. Najmä zdokonaľovanie rezných materiálov, ako aj nových štruktúr obrábaných materiálov, snaha o zvyšovanie rezných rýchlostí si žiada prehodnotenie doterajších definícií. Pri aplikácii v minulosti definovaných vzťahov medzi reznými podmienkami a výsledkami obrábania sa objavujú nepresnosti, ktoré môžu viesť k nesprávnej voľbe rezných podmienok v konkrétnych podmienkach obrábania strojárske súčiastok. Pokúsime sa analyzovať doterajšie rovnice, používané v praxi a na základe rozsiahlej experimentálnej analýzy optimalizovať ich tvar. Týka sa to posudzovania všetkých fyzikálnych a technologických parametrov, ako stlačenie triesky, mikogeometria obrobeného povrchu, rezné sily, opotrebenie a a trvanlivosť rezných nástrojov.

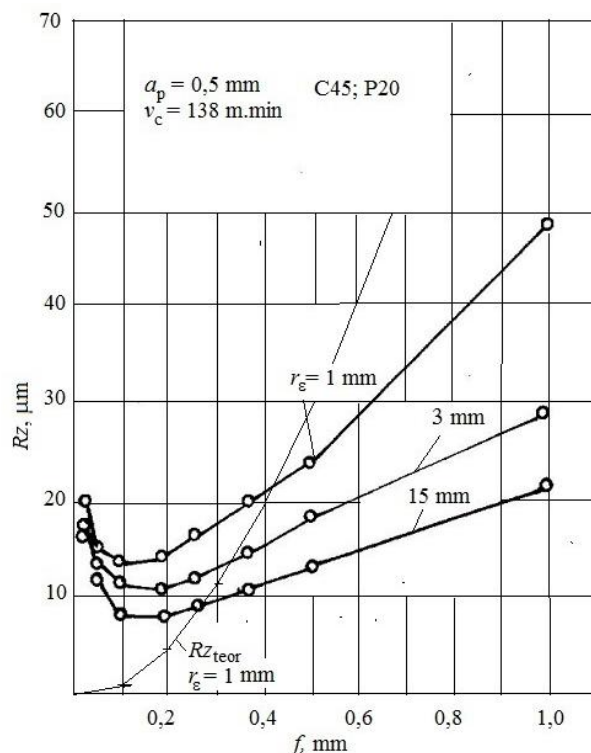
**Kľúčové slová:** obrábanie, trvanlivosť nástroja, rezné podmienky, kvalita obrobeného povrchu

### 1 Problémy identifikácie mikogeometrie obrobeného povrchu

Najväčšia výška nerovností obrobeného povrchu sa klasicky opisuje známou rovnicou [1], [4], [7], [15].

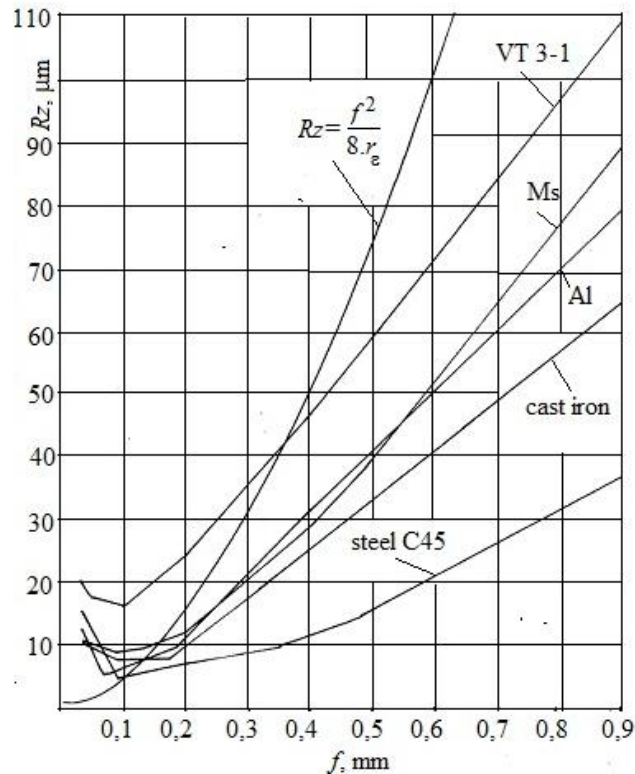
$$Rz = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad (1)$$

Grafickým obrazom vzťahu  $Rz = f(f)$  je parabola. Na obr. 1 je teoretická a experimentálne krivky tejto závislosti. Oproti teoretickému priebehu všetky krivky stúpajú pri posuvoch menších ako 0,1 mm. Je to spôsobené vplyvom polomeru zaoblenia reznej hrany  $r_n$ . Ak sa hrúbka odrezávanej vrstvy približuje polomeru zaoblenia reznej hrany, dochádza ku vŕhovaniu obrábaného materiálu pod rezný klin nástroja, čo je sprevádzané intenzívnou plastickou deformáciou povrchu a zhoršovaním jeho mikogeometrie.



**Obr. 1** Teoretická a experimentálne krivky závislosti  $Rz - f$ , získaná pri sústružení nástrojom zo spekaného karbidu s rozličnými polermi zaoblenia reznej hrany

Na obr. 2 sú podobné experimentálne krivky, získané tentoraz pri obrábání rozličných obrábaných materiálov. Vidno, že priebehy sú napriek rozličným rezným rýchlostiam identické s obr. 1.



**Obr. 2** Experimentálne krivky závislosti  $R_z$ - $f$ , získané pri sústružení rozličných kovov jedným rezným materiálom. Rezné podmienky:  $a_p = 0,5$  mm,  $r_{\square} = 0,8$  mm (u VT 3-1 0,4 mm),  $v_c$ : VT 3-1:  $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , Ms:  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , Al:  $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , cast iron:  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , C45:  $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , nástroj: P20+TiC

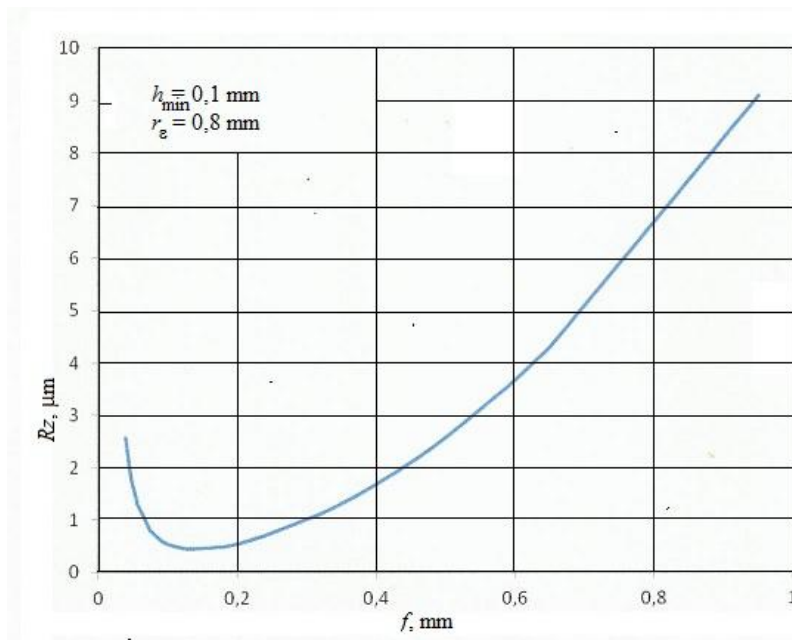
Rozdiel oproti teoretickej krivke je výrazný najmä v oblasti malých posuvov, pod 0,1 mm. Pri stanovení posuvu podľa teoretickej krivky ( $f = \sqrt{8 \cdot R_z \cdot r_e}$ ) by obsluha stroja v snahe zlepšiť kvalitu obrobeného povrchu mala snahu znižovať posuv pod 0,1 mm, čím by sa dosiahol opačný efekt.

Pri vyšších posuvoch (v tom prípade od  $f \geq 0,4$  mm) je reálna kvalita obrobeného povrchu v celom rozsahu lepšia ako teoretická.

Matematickou analýzou podobných experimentálnych kriviek ako na obr. 1 a 2 bola odvodená rovnica [3]:

$$R_z = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} + \frac{h_{\min}}{2} \left( 1 + \frac{r_e \cdot h_{\min}}{f^2} \right) \quad (2)$$

Obraz tejto rovnice, pri  $r_{\square} = 0,8$  mm a  $h_{\min} = 0,1$  mm je na obr. 3.



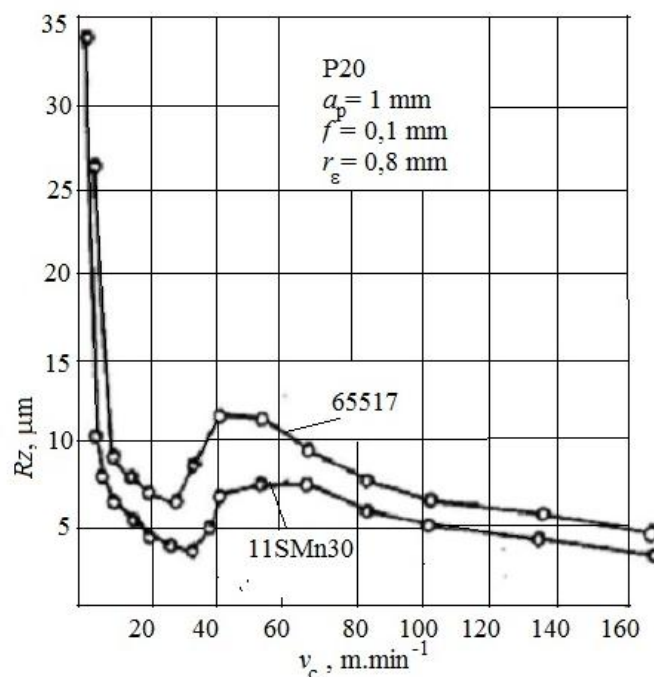
**Obr. 3** Krivka závislosti  $Rz$ - $f$ , získaná z rovnice (2)

Riešením rovnice (2) možno získať vzťah pre určenie  $f$  pri definovanej  $Rz$  a  $r_\square$  vo tvare:

$$f = \sqrt{8.Rz.r_\epsilon - 0,2.r_\epsilon + 4.r_\epsilon \cdot \sqrt{Rz^2 + 0,1.Rz}} \quad (3)$$

Pričom bola dosadená fixná hodnota  $h_{\min} = 0,1$  mm

Treba uviesť, že v rovniciach (1;2) nie je zastúpená rezná rýchlosť. Tá je však pri hodnotení  $Rz$  mimoriadne dôležitá. Na obr. 4 je experimentálna závislosť  $Rz$  na reznej rýchlosti, získaná pri obrábaní niektorých materiálov.



**Obr. 4** Experimentálna závislosť  $Rz - v_c$ , získaná pri sústružení dvoch ocelí

Vidno, že dochádza k anomálii v oblasti minimálnych rezných rýchlostí. Kvalita obrobeného povrchu sa výrazne zhoršuje vďaka krehkému stavu materiálu a trhlinotvornému procesu. Pri zvyšovaní reznej rýchlosti, teda aj teploty rezania sa kvalita povrchu prudko zlepšuje. Minimum dosahuje v sledovanom prípade pri reznej

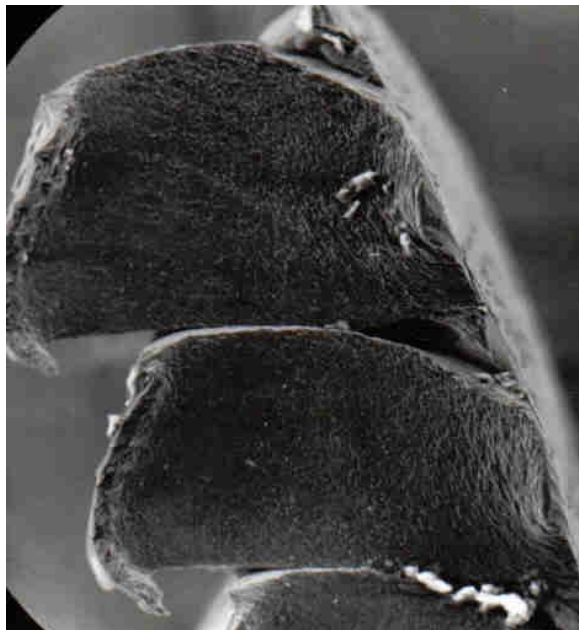
rýchlosti okolo  $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Potom nasleduje nárastková oblasť rezných rýchlostí, sprevádzaná zhoršovaním kvality obrobeného povrchu. Po prekročení určitej reznej rýchlosti (v danom prípade  $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) sa kvalita obrobeného povrchu kontinuálne zlepšuje. Materiál pred rezným klinom je v plastickom stave, obrobený povrch sa „plasticky vyhladzuje“. Konkrétny priebeh závislosti je podmienený druhom obrábaného a rezného materiálu.

## 2 Stlačenie triesky

Známy pojem stlačenie triesky sa v súčasnosti identifikuje ako pomer hrúbky triesky ( $h_t$ ) k hrúbke odrezávanej triesky ( $h$ ) [4], [8],[15], [20]:

$$k = \frac{h_t}{h} \quad (3)$$

Prvý z uvedených parametrov je však problematický, najmä pri obrábaní materiálov, ktoré dávajú elementárnu, alebo článkovitú triesku. V rade prípadov dochádza ku značným chybám, ak sa meria najväčšia, alebo aj „stredná“ hrúbka triesky. Typickým príkladom je trieska, vznikajúca pri obrábaní titánu (obr. 5).



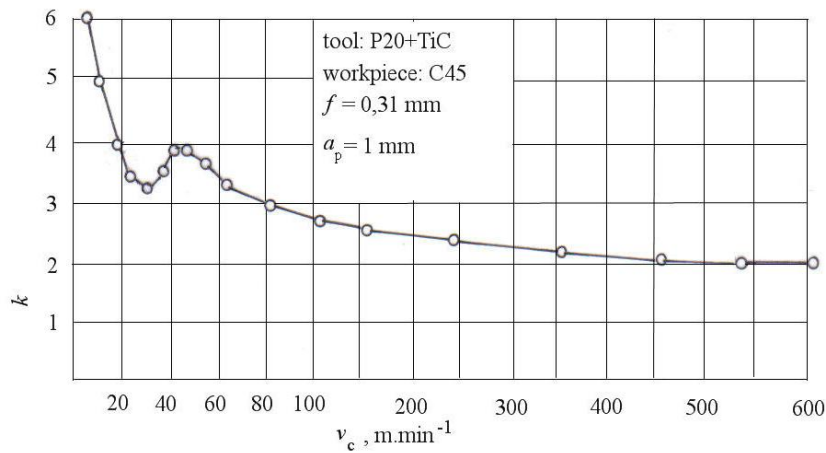
**Obr. 5** Príklad článkovitej triesky, získanej pri obrábaní titánovej zliatiny VT 3-1

Exaktné určenie stlačenia triesky je možné použitím rovnice [19].

$$k = \frac{1000 \cdot m_t}{l_t \cdot \gamma \cdot S}, \quad (3)$$

kde  $m_t$  je hmotnosť triesky dĺžky  $l_t$ , g,  
 $\gamma$  - hustota obrábaného materiálu,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  
 $S$  – plocha prierezu rezu ( $a_p \cdot x_f$ ),  $\text{mm}^2$ ,  
 $l_t$  – dĺžka vzniknutej triesky, mm

Na obr. 6 je získaná experimentálna závislosť stlačenia triesky na reznej rýchlosti v rozsahu bežných rezných rýchlostí, vyhodnotená s využitím rovnice (3).



**Obr. 6** Experimentálna závislosť stlačenia triesky na rezných rýchlostiach, získaná pri obrábaní nástrojom zo spekaného karbidu

Pri malých rezných rýchlostiach má  $k$  extrémne hodnoty. Potom prudko klesá s reznou rýchlosťou a dosahuje prvé minimum cca pri rezných rýchlostiach  $30 \text{ m.min}^{-1}$ . V nárastkovej oblasti rezných rýchlostí stúpa, pretože nárastok má veľký polomer zaoblenia „plastickej reznej hrany“.

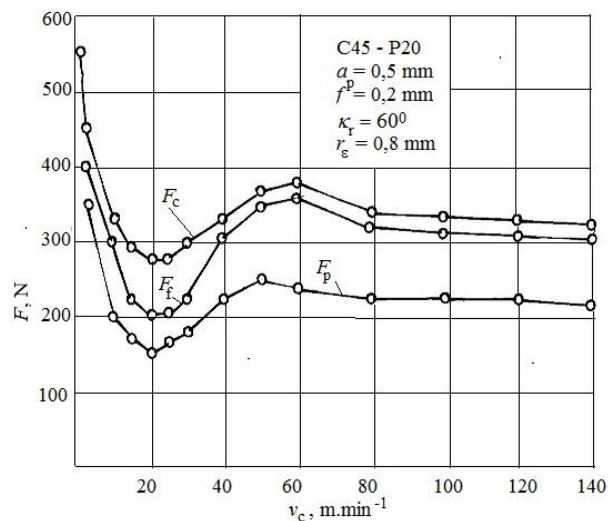
Oblasť rezných rýchlostí nad  $100 \text{ m.min}$  znamená pokles  $k$  v celom rozsahu  $v_c$  ale ani pri vysokých rezných rýchlostiach nedosiahne hodnotu 1.

### 3 Rezné sily

Tradičná hodnotenia závislosti rezných síl na rezných podmienkach je definovaná všeobecne známou rovnicou [1], [4], [15].

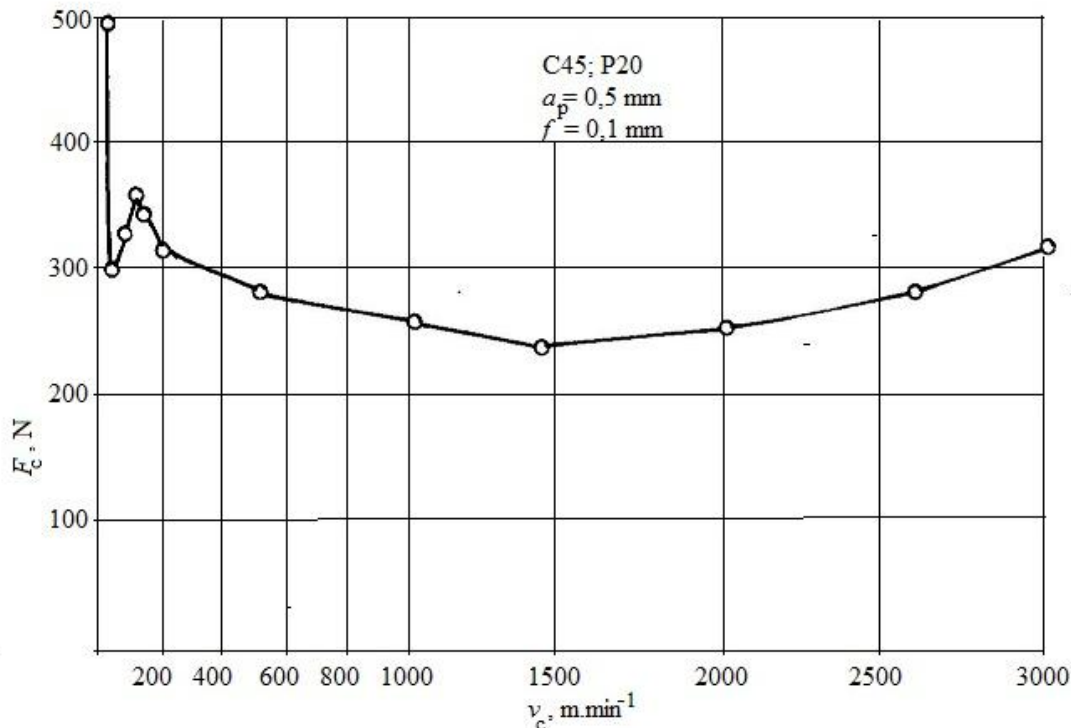
$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot v_c^{z_{F_c}} \quad (4)$$

Na obr.7 je priebeh všetkých zložiek rezných síl v závislosti na rezných rýchlostiach. Vidno, že rezná rýchlosť nemá vplyv na vzájomný pomer rezných síl, iba na ich absolútne hodnoty. V oblasti rezných rýchlostí pod  $20 \text{ m.min}^{-1}$  je merná rezná sila, teda pevnosť materiálu vysoká, rezné sily narastajú. Pri zväčšovaní rezných rýchlostí sa zlepšuje plasticita obrábaného materiálu, rezné sily klesajú. Následne v dôsledku vzniku nárastku znova rastú. Po prekročení nárastkovej oblasti sily monotónne klesajú. Preto je potrebné vzťah (3) spresniť vo vzťahu k rezným rýchlostiach. Táto závislosť nie je ani v dvojitej logaritmickú sústave lineárna a nedá sa teda charakterizovať priamkou so smernicou  $z_{F_c}$ .



**Obr. 7** Experimentálna závislosť absolútnych hodnôt rezných síl na rezných rýchlostiach

Pre zaujímavosť, pri sledovaní oblasti extrémnych rezných rýchlostí Klocke [13] ukázal, že po dosiahnutí rezných rýchlostí cca  $2000 \text{ m.min}^{-1}$  začína  $F_z$  (teda aj spotreba energie na obrábanie) stúpať (obr.8).



**Obr. 8** Predbežná experimentálna krivka závislosti  $F_c - v_c$  v širokom rozsahu rezných rýchlostí

Priebeh závislosti na obr. 7 je nápadne podobný obr. 4, 6. Zdá sa, že túto krivku možno zovšeobecniť aj pre ďalšie parametre procesu obrábania.

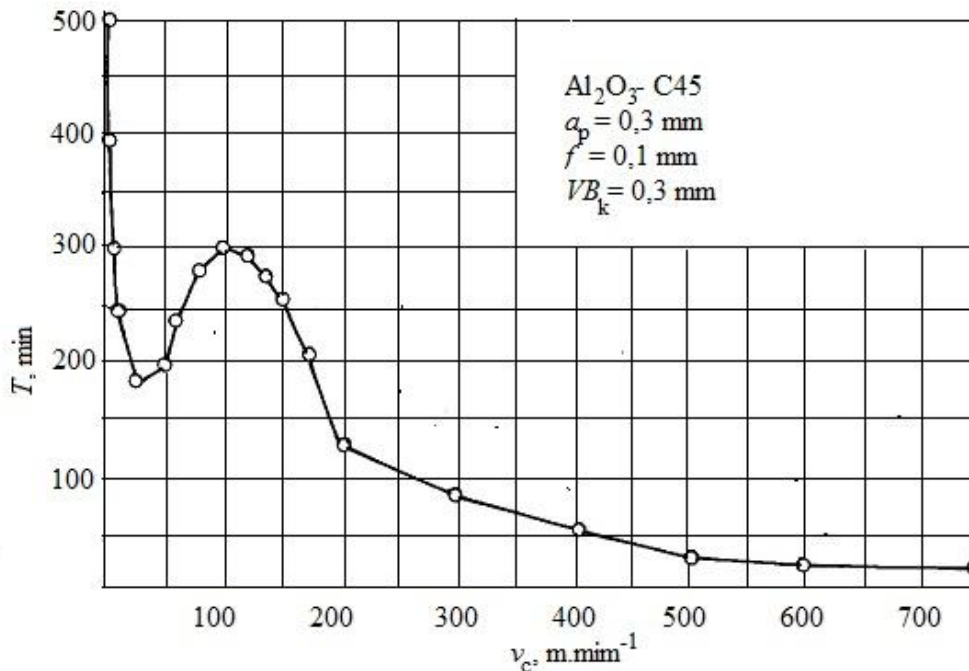
#### 4 Trvanlivosť nástrojov

Trvanlivosť rezných nástrojov sa doteraz posudzuje klasickým vzťahom Taylora [16] z r. 1906:

$$T = \frac{C_T}{v^m}, \quad (4)$$

kde  $C_T$  je myslená trvanlivosť nástroja pri reznej rýchlosti  $1 \text{ m.min}^{-1}$ ,  
 $m$  je tangens uhla sklonu lineárnej časti  $T-v_c$  závislosti, ktorého hodnota závisí na druhu rezného materiálu [4],[7],[15].

Je implantovaný aj do normy STN ISO 3685 pre všetky rezné materiály. Je však potrebné upozorniť, že v čase jeho vzniku existovala len rýchlorezná oceľ. Pre tento rezný materiál Taylorov vzťah presne platí. Jeho použitie pre nástroje zo spekaného karbidu a keramiky je ho však potrebné podstatne modifikovať. Na obr. 9 je príklad reálnej experimentálnej závislosti medzi trvanlivosťou nástroja z reznej keramiky a reznou rýchlosťou.

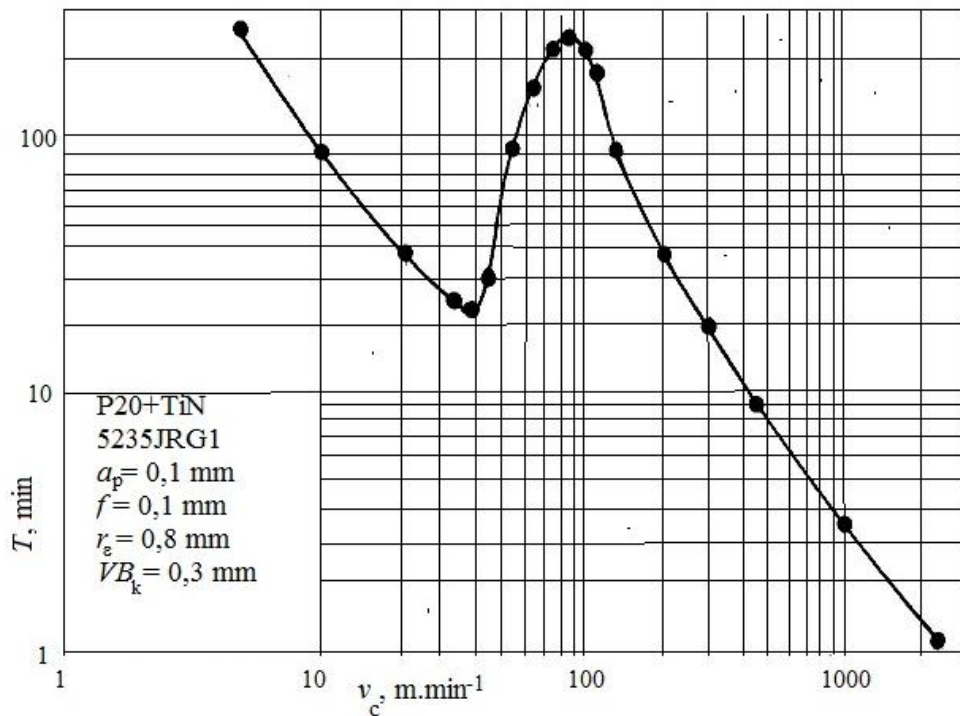


**Obr. 9** Podrobná experimentálna závislosť trvanlivosti nástroja z keramiky v lineárnej súradnicovej sústave

Priebeh je zložitý a znova má charakter, podobný obr. 4, 6, 7. Pri minimálnych rezných rýchlostiach je obrábaný materiál v krehkom stave, trieska je elementárna, kontakt triesky s čelom nástroja je malý, preto dochádza len k málo intenzívnemu abrazívnemu opotrebeniu nástroja. Minimum trvanlivosti nástroja sa dosahuje pri vzniku adhézneho kontaktu triesky s nástrojom, v danom prípade pri  $v_c = 20 \text{ m.min}^{-1}$ . Pri ďalšom náraste teploty rezania a znižovaní pevnosti obrábaného materiálu trvanlivosť nástroja stúpa. Maximálna trvanlivosť je dosahovaná v danom prípade pri reznej rýchlosti  $100 \text{ m.min}^{-1}$ . Potom trvanlivosť kontinuálne klesá v dôsledku nárastu teploty nástroja a znižovania jeho odolnosti proti opotrebeniu. Je zrejmé, že tak zložitý priebeh krivky priebeh sa nedá opísať klasickým Taylorovým vzťahom. Argumentom na aplikáciu lineárneho priebehu  $T-v_c$  závislosti bol predpoklad, že keramický rezný materiál sa aplikuje najmä pri rezných rýchlostiach nad  $100 \text{ m.min}^{-1}$ . Teda o trvanlivosti nástroja pod touto rýchlosťou nemáme vedieť?

Komplexnejší obraz na vzťah  $T-v_c$  možno získať len úplným experimentom, teda sledovaním trvanlivosti nástroja v celom rozsahu používaných rezných rýchlostí.

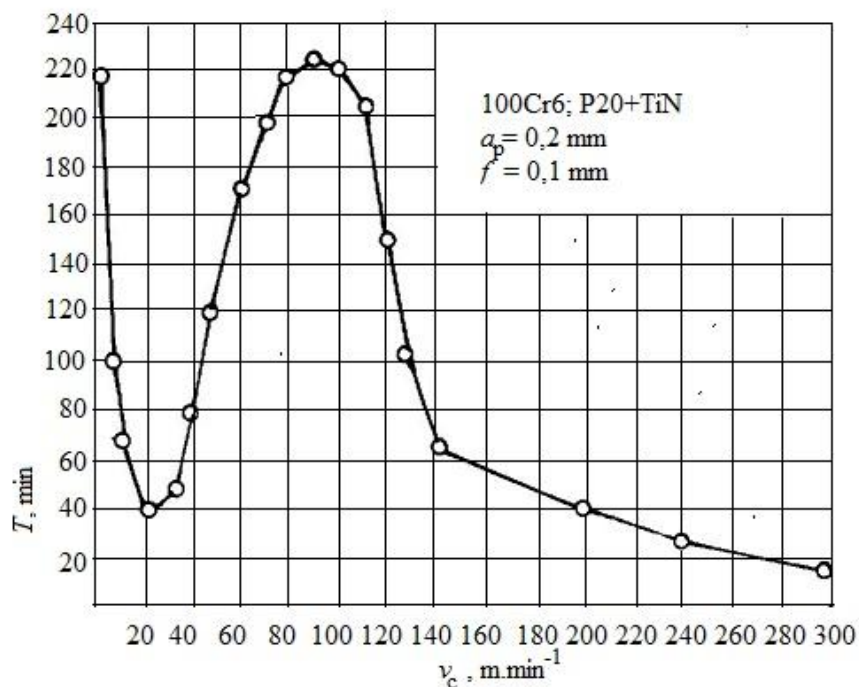
Na obr. 10 je ďalšia komplexná experimentálna závislosť, získaná vo veľkom rozsahu rezných rýchlostí. Vzhľadom na rozsah  $v_c$  je kreslená v dvojitej logaritmickú sústave.



**Obr. 10** Experimentálna závislosť  $T-v_c$ , získaná vo veľkom rozsahu rezných rýchlostí

Priebeh je identický s predchádzajúcimi prípadmi. Navyše krivka pokračuje k extrémnym rezným rýchlostiam. Napr. pri reznej rýchlosti  $2500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  sa trvanlivosť nástroja blíži len k niekoľkým sekundám [19].

Na obr. 11 je experimentálna  $T-v_c$  závislosť, získaná pri sústružení ložiskovej ocele 100Cr6. Priebeh krivky je znova takmer identický. V rozsahu rezných rýchlostí  $20 \leq v_c \leq 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  je rozdiel v trvanlivosti veľmi výrazný. Klasickou závislosťou Taylora sa táto oblasť rezných rýchlostí nedá postrehnúť.



**Obr. 11** Typická  $T-v_c$  závislosť, získaná pri sústružení legovanej ocele povlakovaným spekaným karbidom



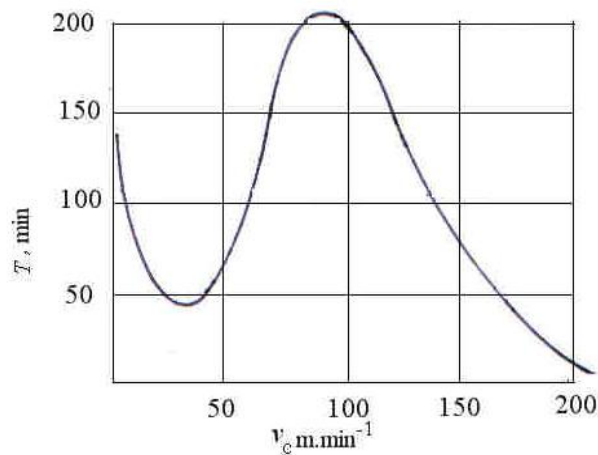
## 5 Podobnosť závislostí

Ako bolo uvedené, závislosti medzi reznými podmienkami a výsledkami obrábania majú vizuálne výraznú podobnosť (obr. 3, 6). Pokúsime sa vyjadriť analyticky ich všeobecnú rovnicu.

Matematickou analýzou bola odvodená rovnica pre trvanlivosť ktorá má tvar [18]:

$$T = \frac{\ln v_c^4 + \frac{1}{\ln v_c}}{e^{\ln v_c}}. \quad (5)$$

Jej grafické vyjadrenie je na obr. 12.

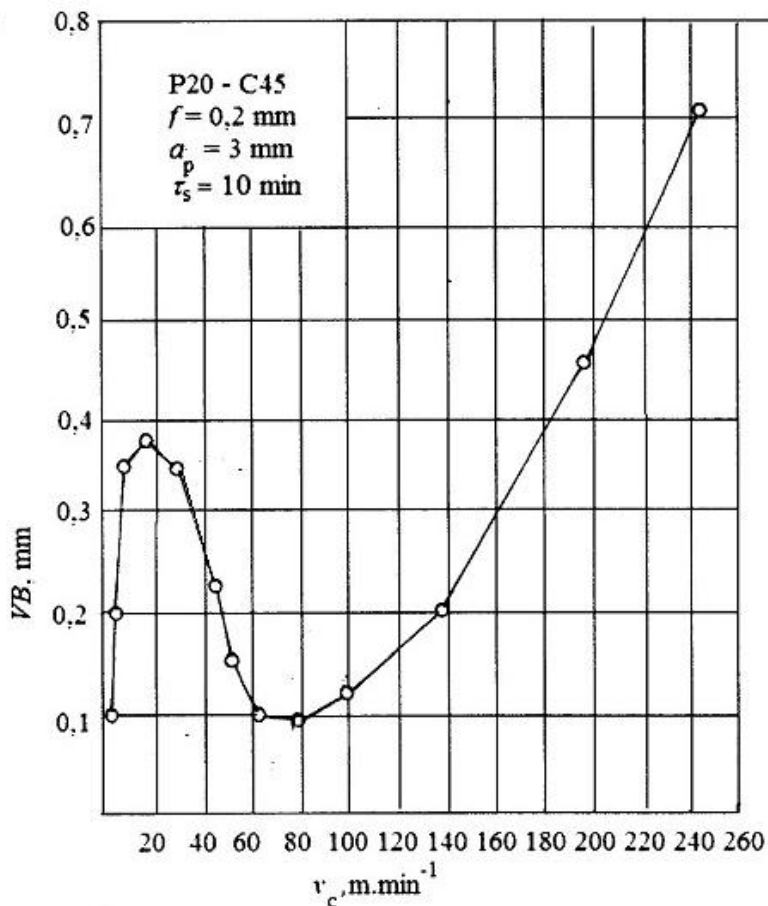


Obr. 12 Diagram  $T = f(v_c)$  z analytického vyjadrenia

Túto krivku možno považovať za charakteristickú, aj pre závislosti  $k-v_c$ ;  $R_z-v_c$ ,  $F-v_c$ .

## 6 Návrh skrátenej trvanlivostnej skúšky

Experimentálne stanovenie komplexnej  $T-v_c$  závislosti si vyžaduje veľké množstvo obrábaného materiálu a času na realizáciu. Rovnaký účel, ako komplexná závislosť trvanlivosti na reznej rýchlosti môže splniť závislosť veľkosti opotrebenia na reznej rýchlosti, pri konštantnom čase obrábania. Na obr. 13 je príklad takejto závislosti [19].



Obr. 13 Experimentálna závislosť  $VB-v_c$  po čase obrábania  $\tau_s = 10 \text{ min}$

Na prvý pohľad je diagram inverzným diagramom z obr. 9 - 11. Jednoduchou úpravou z neho možno spätne vytvoriť diagram  $T-v_c$  [19]. Výpovedná hodnota tejto závislosti je rovnaká ako závislosti  $T-v_c$ . Definuje oblasť maximálnej aj minimálnej intenzity opotrebenia nástroja a správanie sa nástroja v celom rozsahu rezných rýchlostí. Diagram možno použiť na hodnotenie rezných vlastností nástrojov v reálnom čase. Pri použití jedného druhu nástroja a rozličných obrábaných materiálov možno z diagramu vyhodnotiť relatívnu obrábateľnosť materiálov, podobne ako z  $T-v_c$  diagramu.

## 7 Záver

Doterajšie prístupy k sledovaniu parametrov a výsledkov obrábania vychádzali z teórií, vyslovených v 60-tych rokoch minulého storočia. K dispozícii boli vtedy okrem rýchloreznej ocele len klasické typy spekaných karbidov a opatrné pokusy o aplikáciu reznej keramiky. Prudký vývoj nástrojových materiálov a nové experimentálne poznatky vedú k potrebe prehodnotiť doterajšie teórie a definovať nové analytické vzťahy medzi reznými podmienkami a výsledkami obrábania. Ich poznanie povedie ku kvalifikovanému určovaniu rezných podmienok ( $f, v_c$ ), pre vopred stanovený rezný a obrábaný materiál.

## Literatúra

- [1] BÉKÉS, J.: *Inžinierska technológia obrábania kovov*. Bratislava: ALFA, 1981, 398 s.
- [2] BLÁŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M.: *Tribológia*. Bratislava: ALFA, 1990, 360 s., ISBN 80-05-00633-0
- [3] BRAMMERTZ, P., H.> Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen. *Industrie Anzeiger*, vol. 2, 1961, s. 25-32
- [4] BUDA, J., BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábania kovov*. Bratislava: ALFA, 1967, 698 s.
- [5] BUDA, J., SOUČEK, J., VASILKO, K.: *Teória obrábania*. Bratislava: ALFA, 1988, 392 s.

- [6] DLOUHÝ, M., HOUDEK, J., KOLOC, J.: *Slinuté karbidy pro obrábění*. Praha: SNTL, 1964, 313 s.
- [7] DMOCHOVSKI, J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. Warszawa, 1978, 586 s.
- [8] GAZDA, J.: *Teorie obrábění. Průvodce tvorbou třísky*. Liberec: TU, 2004, 112 s., ISBN 80-7083-789-6
- [9] GENSKÝ, R.: *Metal Cutting Operations*. Leipzig: Edition Leipzig, 1966, 191 s.
- [10] GRANOVSKIJ, G. I., GRANOVSKIJ, V. G.: *Rezanije metallov*. Moskva: vyššaja škola 1985, 304 s.
- [11] GRZESIK, W.: *Podstawy skawania materialow metalowych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2010, 526 s., ISBN 978-83-204-3668-6
- [12] HOSHI, K., HOSHI, T.: On the metal cutting mechanism with the built-up edge. *Mem.Fac. Engng. Hekkaide University* 12, č.3, 1969
- [13] KLOCKE, F., KRIEG, T.: Coated Tools for Metal Cutting – Feature und Application. *Annals of the CIRP*, Vol 48/2/1999, p. 515-520
- [14] LOLADZE, T. N.: *Stružkoobrazovanie pri rezanii metallov*. Moskva, Mašgiz, 1952
- [15] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. Praha: SNTL, 1982, 235 s.
- [16] TAYLOR, F. W.: On the art of cutting metals. *Transaction of the ASME*, 28, november 1906, s. 31-279, 281-350
- [17] TRENDT, E. M.: *Metal Cutting*. London – Boston: Ed. Oxford, Butterworths – Helnemann, 1991, 273 s., ISBN 0-7506-1068-9
- [18] VASILKO, K., MACUROVÁ, A.: Identifikácia rovnice  $T = f(v_c)$  pre spekaný karbid *Technologické inžinierstvo*, III, č.2/2006, s.8-11
- [19] VASILKO, K., MÁDL, J.: *Teorie obrábění*. Ustí n. Labem: UJEP, 2012, 526 s., ISBN 978-80-7414-460-8
- [20] ZOREV, N.N.: *Issledovanije elementov mehaniki processa rezanija*. Moskva: Mašgiz 1962

## Abstract

**Article:** New analytical expression of the essential dependence of machining

**Author:** Karol Vasilko

**Workplace:** Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Prešov

**Keywords:** machining, tool durability, cutting conditions, machined surface quality

During the application of recent relationships between cutting conditions and results of machining there occur unevennesses, which can land to incorrect choice of cutting conditions in concrete conditions of machining of engineering parts. Equations used in practice and on the base of wide experimental analysis to optimise their shape are being analysed in the paper. It concerns the evaluation of chip compression, machined surface microgeometry and cutting tools durability

