

Karol Vasilko \*

# NOVÁ METODIKA NA ZOSTROJENIE ZÁVISLOSTI TRVANLIVOSTI NÁSTROJA NA REZNEJ RÝCHLOSTI

## A NEW METHOD FOR DURABILITY DEPENDENCE OF A CUTTING TOOL ON A CUTTING SPEED

*V celej histórii rozvoja teórie obrábania sa na opis závislosti medzi trvanlivosťou rezného nástroja a reznou rýchlosťou používa Taylorov vzťah, ktorý vznikol r. 1905. Predložená práca analyzuje doterajšie pokusy o vylepšenie tohto vzťahu. Návrh vyúsťuje do metodiky zostrojenia  $T-v$  závislosti, ktorá zabezpečuje výrazne lepšiu zhodu s experimentom. V druhej časti práce je metodika verifikovaná experimentálne na významnom počte typických príkladov.*

### 1. Súčasný stav poznania a použitia $T-v$ závislosti

Najdôležitejšia zákonitosť obrábania-vzťah medzi trvanlivosťou rezného nástroja a reznou rýchlosťou je predmetom záujmu výskumných pracovníkov v celej histórii procesu poznávania obrábania ako technologickej metódy.

Už v r. 1905 Američan TAYLOR definoval priebeh tejto závislosti a zostrojil ju v dvojitej logaritmickej sústave, pričom jej matematické vyjadrenie malo tvar:

$$T = \frac{C_T}{v^m} \quad (1)$$

kde  $C_T$  je trvanlivosť nástroja pri reznej rýchlosti  $v = 1$  a  $m$  je tangens závislosti

V tomto tvare sa traktuje doteraz [2, 3, 5].

Od uvedenej doby bolo zaznamenaných oveľa viac úspešných alebo menej úspešných pokusov o presnejšiu definíciu a matematický opis tejto funkcie. V r. 1933 SAFONOV [4] definoval vzťah:

$$T = \frac{C_T}{v^{bv}} \quad (2)$$

kde  $b$  je konštanta.

Vzťah opisuje  $T-v$  závislosť o niečo presnejšie, je však komplikovanejší pre praktické použitie a nezahrňuje klesajúcu vetvu krivky.

Za úspešný pokus možno označiť prístup TEMČINA, ktorý v r. 1957 vylepšil Taylorov vzťah tým, že mu v menovateli pridal člen:

$$\frac{C_T}{v^m} \quad (3)$$

*In the entire history of the development of the metal cutting theory Taylor's which appeared in 1905, has been used to describe the relation between a cutting tool durability and a cutting speed. This relation was established in 1905. This work presents the analysis of the up to now attempts carried out to improve the mentioned relation. The submitted proposal results in the method of creation of the  $T-v$  relation, which provides a much better identity with the experiment. In the second part of the work the method is verified experimentally on a series of experimental results.*

### 1. The current state of the $T-v$ relation and its use

The most important principle of cutting – a relation between the durability of a cutting tool and a cutting speed has been the subject of interest of research workers in the whole history of the process of a cutting acquisition as a technological method.

As early as in 1905, the American scientist TAYLOR defined the course of this relation and created it as a double logarithmic set; its mathematical formula was as follows:

$$T = \frac{C_T}{v^m} \quad (1)$$

The formula has been used up to now [2,3,5].

Since that time, there were many, more or less successful, attempts to provide a more precise definition and mathematical description of this function. In 1933 SAFONOV [4] defined the relation:

$$T = \frac{C_T}{v^{bv}} \quad (2)$$

The relation describes  $T-v$  relation more precisely, however, it is more complicated for practical use and it does not comprise a declining curve.

In 1957 TEMČIN successfully improved the TAYLOR's relation by adding a term to a denominator:

$$\frac{C_T}{v^m} \quad (3)$$

\* Prof. Ing. Karol Vasilko, DrSc.

Faculty of Production Technologies, Technical University of Košice, with the seat in Prešov, Plzenská 10, SK-080 01 Prešov  
E-mail: vasilko@fvt.sk

kde  $T_m$  je maximálna hodnota trvanlivosti v celom rozsahu sledovaných rezných rýchlostí.

Celý vzťah potom nadobudne tvar:

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

Rozdiel oproti klasickému Taylorovmu vzťahu je ten, že pri malých hodnotách rezných rýchlostí veľkosťou prevažuje druhý člen v menovateli a vzťah konverguje k priamke, rovnobežnej s osou rezných rýchlostí. Naopak, pri dostatočne veľkej reznej rýchlosti je prvý člen v menovateli výrazne väčší ako druhý a vzťah sa transformuje na Taylorov.

Ďalší pokus sa vzťahuje k japonskému autorovi VU [8], ktorý v r. 1963 definoval vzťah:

$$T = \frac{C_T}{v^{b_0 + b_1 v}} \quad (5)$$

kde  $b_0$  a  $b_1$  sú konštanty.

V rovnakom roku GRANOVSKIJ [8] definoval vzťah:

$$T = a_0 + a_1 \cos y + a_2 \cos 2y + \dots + a_n \cos ny + b_1 \sin y + b_2 \sin 2y + \dots + b_n \sin ny \quad (6)$$

kde:  $y = \frac{2\pi(v - v_o)}{v_n - v_o}$ ; pričom:  $v_o \leq v \leq v_n$

KONEVŠOV a KSJUNINA [5] definovali v r. 1964 nasledovný vzťah:

$$T = 100e^{\sqrt{1 - b(\ln v - \ln v_{100})}} \quad (7)$$

Z ďalších pokusov si pozornosť zaslúži MATCHISEN, ktorý v r. 1965 odvodil vzťah:

$$T = \frac{C_T - av + bv^2}{v} \quad (8)$$

Tým sa však reťaz neuzatvára. Spomedzi novších riešení treba uviesť autorov KÖNIG a DEPEREUX [1] s modifikovaným vzťahom:

$$T = \frac{k}{(v + v_o)^z} \quad (9)$$

a poľského autora FTOREKA s tromi vzťahmi [1]:

$$\begin{aligned} T e^{av} &= D \\ T a^{av} &= E \\ T e^{(v + v_o)} &= H_o \end{aligned} \quad (10)$$

V r. 1981 BÉKÉS [1] publikoval vzťah:

$$T^{\frac{1}{p}} = C_o + C_1 v^{\frac{1}{q}} + C_2 f^{\frac{1}{r}} \quad (11)$$

where  $T_m$  is maximal value of durability in the whole range of cutting speeds.

The whole relation is then as follows:

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

Compared to the classical Taylor's relation, the difference lies in the fact that with small values of cutting speeds, the second in the denominator prevails and the relation converts to a straight line which is parallel to the axis of the cutting speeds. On the contrary, if the cutting speed is sufficient, the first term in the denominator is considerably bigger than the second term and the relation converts to the Taylor's one.

The next is connected with the name VU [8] who in 1963 defined the following relation:

$$T = \frac{C_T}{v^{b_0 + b_1 v}} \quad (5)$$

In the same year GRANOVSKIJ [8] defined the relation:

$$T = a_0 + a_1 \cos y + a_2 \cos 2y + \dots + a_n \cos ny + b_1 \sin y + b_2 \sin 2y + \dots + b_n \sin ny \quad (6)$$

where:  $y = \frac{2\pi(v - v_o)}{v_n - v_o}$ , while:  $v_o \leq v \leq v_n$ .

NONEVŠOV and KSJUNINA [5] defined the following relation in 1964:

$$T = 100e^{\sqrt{1 - b(\ln v - \ln v_{100})}} \quad (7)$$

MATCHISEN also deserves attention as in 1965 he defined the following relation:

$$T = \frac{C_T - av + bv^2}{v} \quad (8)$$

The chain, however, had not been closed by this. Newer solutions are connected with the following authors: KONIG-DEPEREUX [1] with a modified relation

$$T = \frac{k}{(v + v_o)^z} \quad (9)$$

and Polish author FTOREK with three relations [1]:

$$\begin{aligned} T e^{av} &= D \\ T a^{av} &= E \\ T e^{(v + v_o)} &= H_o \end{aligned} \quad (10)$$

In 1981 BÉKÉS [1] published the relation:

$$T^{\frac{1}{p}} = C_o + C_1 v^{\frac{1}{q}} + C_2 f^{\frac{1}{r}} \quad (11)$$

Do komplexu treba uviesť GRANOVSKÉHO [1], ktorý v r. 1985 uviedol nasledovný vzťah:

$$T = C_T v^h e^{-cv} \quad (12)$$

Zo súčasných pozícií predstavujú záujem najmä polynómy, s ktorými sa pomerne ľahko realizujú výpočty. Bez problémov sa diferencujú a sú známe aparáty na výpočet ich koeficientov a viac sú vhodné na použitie výpočtovej techniky.

Napriek uvedeným riešeniam možno pretrvávajúce Taylorovho vzťahu zdôvodniť tým, že je jednoduchý pri praktických aplikáciách a to napriek argumentu, že súčasná výpočtová technika dokáže pracovať so vzťahmi ľubovoľnej zložitosti. Základným postulátom pri definícii klasického Taylorovho vzťahu je správna voľba kritéria otupenia, pri ktorom ho definujeme. Toto kritérium vychádza z použitia nástroja, ktorý pracuje pri reznej rýchlosti blízkej optimálnej, pre použitý rezný materiál. Je zrejme, že pri takejto voľbe nebudú ostatné rezné nástroje využité až do otupenia, teda nebudú využité ich rezné vlastnosti. Aplikácia NC obrábacích strojov, ktorá vedie k používaniu intenzívnych rezných podmienok a definovanej frekvencii výmeny nástrojov si žiada uplatniť nový pohľad na kritérium otupenia. V ideálnom prípade treba využiť každý nástroj do otupenia. V realizácii tohto cieľa postupujeme v ďalšom.

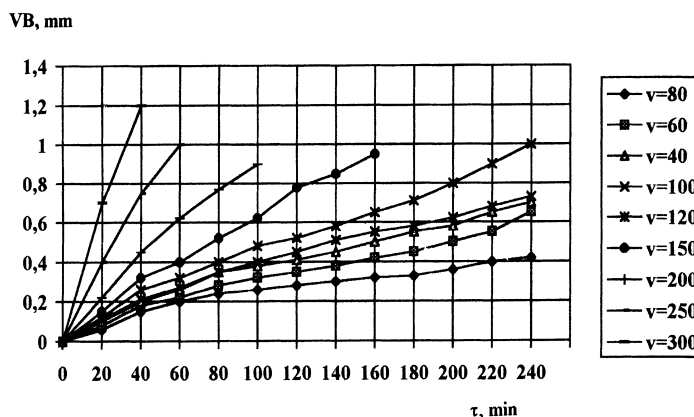
## 2. $T-v$ závislosť s konštantným kritériom otupenia

Ako je známe, klasický prístup k zostrojeniu  $T-v$  závislosti spočíva v získaní experimentálnej krivky  $VB = f(\tau)$  pri rozličných rezných rýchlostiach.

Zo sústavy kriviek sa odčítajú trvanlivosti nástrojov pri konštantnom kritériu otupenia. Na obr. 1 je sústava takýchto experimentálnych kriviek, získaná za podmienok:

- rezný materiál: SK P 20
- obrábaný materiál: oceľ 12 060.1
- nástrojový ortogonálny uhol čela:  $\gamma_o = 0^\circ$
- nástrojový ortogonálny uhol chrčba:  $\alpha_o = 8^\circ$
- nástrojový uhol nastavenia:  $\kappa_r = 60^\circ$
- uhol sklonu reznej hrany:  $\lambda_o = 0^\circ$
- polomer zaoblenia hrotu noža:  $r_\epsilon = 1 \text{ mm}$
- $a_p \times f = 1 \times 0,31 \text{ mm}$

Na obr. 2 je zodpovedajúca  $T-v$  závislosť. Krivka je nahradená Taylorovým vzťahom tak, že tento platí v rozsahu rezných rýchlostí nad  $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .



Obr. 1 Experimentálne krivky  $VB = f(\tau_s)$

Fig. 1 Experimental curves  $VB = f(\tau_s)$

To name all, in 1985 GRANOVSKIJ introduced the following relation [1]:

$$T = C_T v^h e^{-cv} \quad (12)$$

At present attention is especially drawn by polynomials, by the help of which calculations can be done easily. They are differentiated without any problems and there are apparatuses to calculate their coefficients. Moreover, they are suitable for the use of computer technique.

Leaving out of the account the mentioned solutions, the topicality of the Taylor's relation can be explained by the fact that it is simple for practical applications in spite of fact that the latest computing technique is able to work with relation of any difficulty.

The basis postulate of the definition of the classical Taylor's relation is correct choice of the blunting through which it is defined. This criterion is based on the use of a tool working at a cutting speed, which is close to an optimal one for a used cutting material. It is obvious that which such a choice the other cutting tools will not be utilized until blunting appears, i.e. their cutting properties will not be utilized. The application of NC cutting tools, which leads to the applications of intensive cutting conditions as well as a defined frequency of tool change, requires a new approach to blunt criterion of blunting. Each cutting tool should be utilized until it is blunt. The realization of this aim is shown in the following.

## 2. $T-v$ relation with constant blunt criterion

As it is known, the classical approach to a creation of the  $T-v$  relation is based on obtaining an experimental curve  $VB = f(\tau)$  with various cutting speeds.

From the set of curves the tools durability with a constant criterion of blunting is subtracted. In Fig. 1 there is a set of such experimental curves obtained under the following conditions:

- cutting material: P 20
- worked material: steel 12 060.1
- tool orthogonal face angle:  $\gamma_o = 0^\circ$

- tool orthogonal back angle:  $\alpha_o = 8^\circ$
- tool approach angle:  $\kappa_r = 60^\circ$
- back slope angle:  $\lambda_o = 0^\circ$
- point radius:  $r_\epsilon = 1 \text{ mm}$
- $a_p \times f = 1 \times 0,31 \text{ mm}$

In Fig. 2 shows a corresponding  $T-v$  relation. The curve is substituted by Taylor's relation so that it is valid within in the range of cutting speeds over  $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Ako vidno, exponent  $m = 5,7$ ,  $C_v = 250$ .

Odtiaľ:  $C_T = C_v^m = 4,6 \cdot 10^{13}$ .

Experiment ukazuje skutočnosť, že mimo oblasti, kde je krivka nahradená priamkou, sa pri aplikácii Taylorovho vzťahu dopúšťame rádovej chyby. To je vlastne dôvod záujmu autorov o túto problematiku.

As it can be seen, the exponent  $m = 5,7$ ,  $C_v = 250$ .

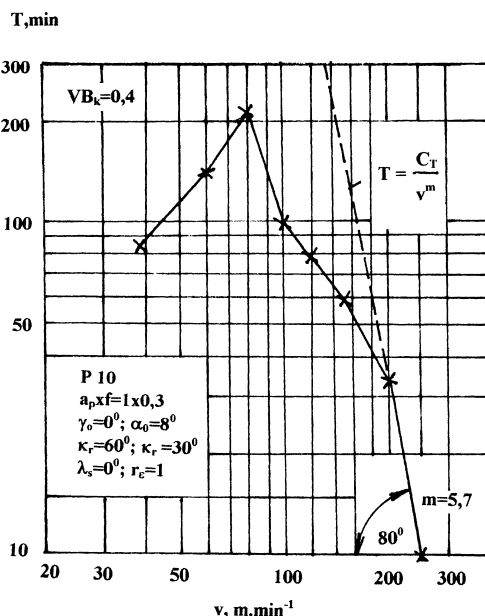
Hence:  $C_T = C_v^m = 4,6 \cdot 10^{13}$ .

The experiment shows that outside the areas where the curve is substituted by a straight line, we make a serious mistake in the applications of the Taylor's relation. This is in fact the reason why many authors are interested in this problem.

### 3. $T-v$ závislosť pri variabilnom kritériu otupenia

O možnosti, zostrojiť  $T-v$  závislosť s variabilnými kritériami otupenia sa objavuje zmienka v monografii GRANOVSKICH z r. 1985 [3]. Nebola však definovaná metóda, ako jednotlivé kritériá stanoviť. Bližšie štúdium veľkého množstva kriviek závislosti  $VB = f(\tau)$  vedie k záveru, že existuje pomerne presne definované kritérium otupenia, ktoré sa aplikuje pri „optimálnej“ reznej rýchlosti podľa metód ZOREVA a LARINA. Možno reálne očakávať, že tieto metódy sa dajú uplatniť aj pri neúplných krivkách opotrebenia. Z toho vychádzajú aj ďalšie úvahy.

Zvoľme si pre pokus súbor kriviek z obr. 1. Pri reznej rýchlosti  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  je kritérium otupenia vizuálne zrejmé a je v tom prípade  $VB_k = 0,4 \text{ mm}$ . Ak od tohto bodu preložíme priamku smerom k podobnému bodu na krivke pre rýchlosť  $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a ďalej, ohraničili sme „intuitívne“ kritérium otupenia aj pre ostatné rezné rýchlosti. Ak podľa nich zostrojíme krivku  $T-v$ , bude sa výrazne odlišovať od obr. 2. Jej priebeh je na obr. 3 (trojuholníky). Pri identifikácii uhla sklonu  $T-v$  závislosti a exponentu  $m$  zisťujeme, že je menší. Ďalší rozdiel spočíva v tom, že pri menších rezných rýchlostiach ( $40 - 60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) sú zaznamenané vyššie hodnoty trvanlivosti, ako pri klasickom postupe. Maximum trvanlivosti je menej výrazné. Všetky tieto odlišnosti sú sprievodným znakom vyššieho kritéria otupenia, prakticky v celom rozsahu rezných rýchlostí.



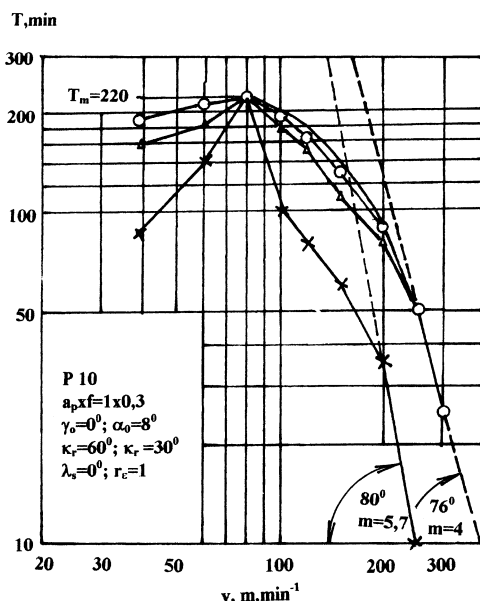
Obr. 2  $T-v$  závislosť, získaná z obr. 1  
Fig. 2  $T-v$  relation, obtained from Fig. 1

### 3. $T-v$ relation with a variable criterion of blunting

The possibility of creation of the  $T-v$  relation with a variable criteria of blunting appears in the monograph by GRANOVSKICH, 1985 [3]. However the method how to determine different criteria was not defined. Closer studies of a large number of the relation curves  $VB = f(\tau)$  lead to the conclusion that there is a relatively precise definition of the criterion of blunting which is applied with the “optimal” cutting speed according to the methods of ZOREV and LARIN. It can be actually expected that those methods can also be used also for incomplete wear curves. The following approaches are based on the above mentioned conclusions.

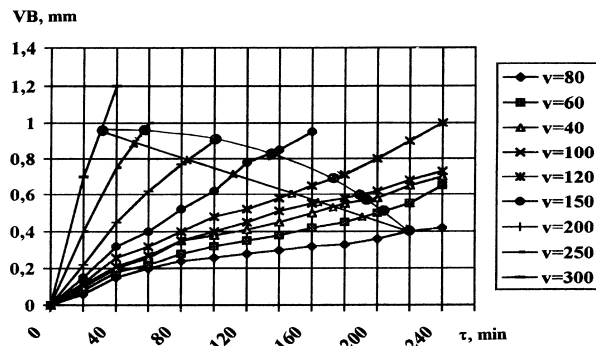
For the experiment, let us choose the set of curves from Fig.1. With the cutting speed  $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  the criterion the blunting is visually evident, and in this case it is  $VB_k = 0.4 \text{ mm}$ . If we draw a straight line from this point towards a similar point on the curve for speed  $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  and further on, we also bordered “intuitive” criterion of blunting for other cutting speeds. If we draw a  $T-v$  curve according to this, it will be very different from Fig. 2. Its course is in Fig. 3 (triangles). At the identification of the slope angle of the  $T-v$  relation and the exponent  $m$ , we find out that it is smaller.

The next difference is that with smaller cutting speeds ( $40$  to  $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ), higher durability than during a classical process are recorded. Durability maximum is less significant. All the differences is an



Obr. 3  $T-v$  závislosti pri konštantných a variabilných kritériách otupenia  
Fig. 3  $T-v$  relation during constant and variable wear criteria

Pokúsme sa zvoliť kritériá otupenia odlišne. Na obr. 4 je hranicou kritérii kružnica. Zodpovedajúca  $T-v$  závislosť je na obr. 3. Vznikla plynulejšia krivka, pričom exponent  $m$  má rovnakú hodnotu. Tento postup napovedá, že sa bližšie ku správemu kritériu otupenia.



Obr. 4 Lineárne a kruhové kritérium otupenia  
Fig. 4 Linear and arched weak criterion

accompanying feature of a higher criterion of blunting practically in the whole range of cutting speeds.

Let us try to choose the criteria of blunting differently. In Fig. 4 the border of criteria is a circle. The corresponding  $T-v$  relation can be seen in Fig. 3. A more fluent curve was created, while the exponent  $m$  has the same value. This approach indicates that we are approaching the correct criterion of blunting.

### 3.1. Zovšeobecnený opis $T-v$ závislosti

Z obr. 3 vidno, že aplikácia klasického Taylorovho vzťahu by neprinesla pokrok oproti doterajším postupom. Preto na opis  $T-v$  závislosti sa použil TEMČINOV vzťah (4), ktorý bol úspešne aplikovaný aj v ďalších doterajších prácach [6, 8, 9, 10]. Jeho prednosťou je skutočnosť, že je postavený na Taylorovom vzťahu, čím je jeho užívateľom blízky.

Dôležité je stanoviť hodnotu  $T_m$ , ako maximálnu trvanlivosť, ktorá sa dosiahne v celom rozsahu rezných rýchlostí. Jej stanovenie súvisí s tým, ako presne sa odhadne rezná rýchlosť, ktorej zodpovedá maximálna trvanlivosť a pri nej sa vykoná experiment.

V predchádzajúcom experimente bola táto hodnota rezných rýchlostí pre rezný materiál P 10 zhodou okolností odhadnutá presne ( $80 \text{ m.min}^{-1}$ ).

Druhým dôležitým parametrom je konštanta  $C_T$ . Treba upozorniť, že v tomto prípade má iný význam, ako u klasickej Taylorovej závislosti, teda nie je to už úsek na osi trvanlivosti. Táto skutočnosť žiada stanoviť  $C_T$  analyticky. Po úprave Temčinovho vzťahu dostávame:

$$C_T = \frac{Tv^m T_m}{T_m - T} \quad (13)$$

$T$  a  $v$  sú konkrétne hodnoty trvanlivosti a reznej rýchlosti, odčítané z klesajúcej vetvy krivky a to z jej úseku, kde už predpokladáme platnosť Taylorovho vzťahu. V sledovanom prípade boli dosadené hodnoty:  $v = 300$ ,  $T = 25$ ,  $T_m = 220$ ,  $m = 4$ , čo po dosadení dáva:  $C_T = 2,3 \cdot 10^{11}$ .

Po dosadení do vzťahu (4) možno pre ľubovoľné zvolené  $v$  vypočítať  $T$ . Výsledok je nasledovný:

$v, \text{m.min}^{-1}$	39	60	80	100	120	150	200	250	300
$T, \text{min}$	220	219	214	203	185	149	87	40	25

Na obr. 3 je takto vypočítaná krivka znázornená plnou čiarou. Vidno veľmi dobrú zhodu tejto krivky s experimentom, neporovnateľne väčšiu, ako pri aplikácii Taylorovho vzťahu. Analýza via-

### 3.1 Generalized description of $T-v$ relation

From Fig. 3 it can be seen that the application of the classical Taylor's relation would not lead to any progress when compared to the up to now approaches. Therefore, to describe  $T-v$  relation the Temčín's relation was used (4). It was successfully applied also in other up to the present works [6, 8, 9, 10]. The advantage of this relation is the fact that it is based on the Taylor's relation and therefore it is well known to the users.

It is important to determine  $T_m$  value as maximum durability which can be obtained within the entire range of cutting speeds. Its determination depends on the accuracy of the cutting speed estimate which corresponds with the maximum durability. The experiment is carried out under the mentioned conditions.

In previous experiment the value of the cutting speed for the cutting material P 10 was by a coincidence precisely estimated ( $80 \text{ m.min}^{-1}$ ).

Another important parameter is the constant  $C_T$ . It should be noted that in this case it has different meaning when compared to the classical Taylor's relation, i.e., this is not a section on durability axis. This fact requires that  $C_T$  is determined analytically. After the Temčín's relation is modified we obtain:

$$C_T = \frac{Tv^m T_m}{T_m - T} \quad (13)$$

$T$  and  $v$  are particular values of both a durability and a cutting speed which are subtracted from a declining branch range of the curve in the section where the validity of the Taylor's relation is expected. In the observed case, there were the following values used:  $v = 300$ ,  $T = 25$ ,  $T_m = 220$ ,  $m = 4$ , which after the substitution is  $C_T = 2,3 \cdot 10^{11}$ .

After substitution to the relation (4), it is possible to calculate  $T$  for any optional  $v$ . The result is as follows:

In Fig. 3, the curve calculated this way is represented by a bold line. A very good coincidence of this curve with the experiment is evident, it is incomparably higher than with the applica-

cerých prípadov ukázala, že maximálna chyba je len 8 %. Táto skutočnosť dáva reálnu nádej na aplikáciu použitého vzťahu v praxi.

### 3.2 Exaktné kritériá otupenia

Voľba kritérií otupenia podľa predchádzajúceho postupu sa vyznačuje nepresnosťou a subjektivnosťou. Preto cieľom ďalších aktivít bolo nájsť exaktnejší postup. Návodom sa stal LARINOV postup stanovenia optimálneho otupenia [7]. Ako je známe, tento postup spočíva v nasledovnom:

Je potrebné definovať hrúbku reznej platničky „ $b$ “, ktorú možno odstrániť pri preostrovaní. Pre tento účel môže byť volená ľubovoľne, pretože nám nejde o kontrétnu hodnotu počtu preostrení, ale hľadané lokálne maximum.

Pre zvolené hodnoty kritéria otupenia (napr. 0,1; 0,2; 0,3 ... mm) sa určí teoretický počet preostrení nástroja „ $n$ “, podľa vzťahu:

$$n = \frac{b}{VB_k} \quad (14)$$

Napr.: Ak hodnota, ktorú možno z platničky odbrúsiť je 3 mm, bude počet preostrení pre jednotlivé  $VB_k$  nasledovný:

$VB_k$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n$	30	15	10	7,5	6	5	4,3	3,8	3,3	3

Pochopiteľne,  $n$  nemusí byť celé číslo.

V ďalšom sa zostrojí závislosť:  $nT=f(VB_k)$  pre každú reznú rýchlosť, pričom  $T$  je vždy zodpovedajúca trvanlivosť pri konkrétnom  $VB_k$  a  $v$ .

Tento postup bol uplatnený pre niektoré krivky z obr. 1. Výsledok je na obr. 5. Ide v podstate o závislosť životnosti nástroja na zvolenom kritériu  $VB_k$ . Z každej krivky je vyhodnotené maximum a jemu zodpovedajúce optimálne  $VB_k$ . Hodnoty konkrétnych  $VB_k$  sú spätne vynesené na krivky opotrebenia a dostávame situáciu podľa obr. 6.

Je vidieť, že predchádzajúce pokusy sa len priblížili k tejto situácii. Zatiaľ nie je cieľom určiť rovnicu tejto čiary. Dôležité je, že tento postup možno považovať za exaktný, pretože berie do úvahy reálne zákonitosti procesu obrábania.

Komplexný výsledok je na obr. 7, kde je krivka závislosti  $T-v$  vytvorená na základe obr. 6 a jej vyhodnotenie podľa uvede-

tion of the Taylor's relation. The analysis of several cases showed that the maximum error was only 8 percent. This fact leads to the conclusion that there is much hope of the application of used relation in the practice.

### 3.2 Exact criteria of blunting

The choice of the criteria of blunting according to the previous method is accompanied by inaccuracy and subjectivity. Therefore, the aim of further activities was to find more exact approach. It appeared that the forgotten Larin's approach could be the method of determination of the optimal blunting [7]. As we know, this approach is based on the following.

It is necessary to define thickness of the cutting plate „ $b$ “ which can be removed during the re-sharpening. For this purpose it can be chosen freely because we do not consider a concrete value of the re-sharpening number, but the we searched local maximum.

For the chosen values of the criterion of blunting (e.g. 0.1; 0.2; 0.3 ... mm) a theoretical number of re-sharpenings of a tool „ $n$ “ is determined according to the relation:

$$n = \frac{b}{VB_k} \quad (14)$$

For example: If the value which can be removed from the plate by grinding is 3 mm, the number of the re-sharpening for the individual  $VB_k$  is as follows:

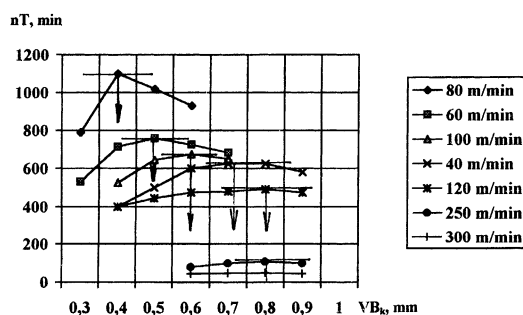
Of course,  $n$  does not have to be a whole number.

In the following the relation is determined for each cutting speed:  $nT = f(VB_k)$  whereas  $T$  is always a corresponding durability of a concrete  $VB_k$  and  $v$ .

This approach was applied to some curves from Fig. 1. The result is shown in Fig. 5. Basically, it refers to the dependence of the tool durability upon the chosen  $VB_k$  criterion. Of each curve, the maximum and a corresponding optimal  $VB_k$  is evaluated. The values of concrete  $VB_k$  are given back on the curves of wear and we obtain a situation according to Fig. 6.

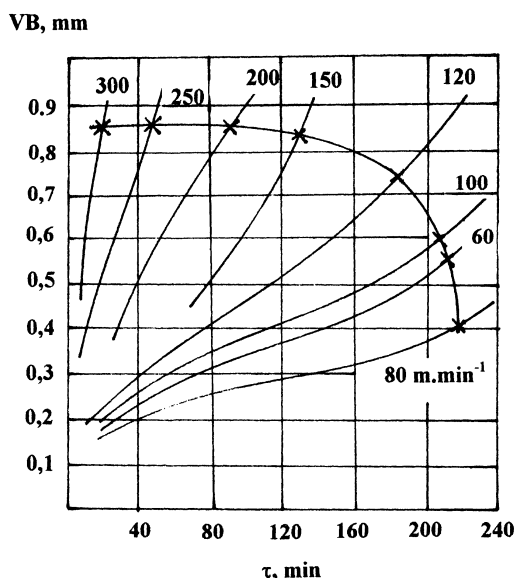
It can be seen that previous tests were only approaching this situation. So far the aim is not to create the equation of this line. It is important that this approach can be considered as an exact one because into account the realistic principles of the cutting process.

A complex result can be found in Fig. 7, where the curve of  $T-v$  is created on the base of Fig. 6 and its evaluation is done according to the



Obr. 5 Krivky závislosti životnosti nástroja od kritéria otupenia  
Fig. 5 Relation curves of tool durability on wear criterion





Obr. 6 Závislosť  $VB = f(\tau)$  s kritériami otupenia z obr. 5  
Fig. 6 Relation  $VB = f(\tau)$  with wear criteria from Fig. 5

ného postupu. Chyba nie je väčšia, ako je rozptyl nameraných hodnôt trvanlivosti.

V súvislosti s týmto výsledkom sa natíska možnosť aplikovať túto novú  $T-v$  závislosť na bežné výpočty v technológii obrábania. Takto by bolo možné spresniť pojem obrábatelnosť materiálu a reznosť nástroja.

V ďalšej sérii skúšok sa budeme venovať verifikácii naznačeného postupu v rozličných prípadoch obrábania a stanovenia metodiky zostrojenia exaktnej  $T-v$  závislosti.

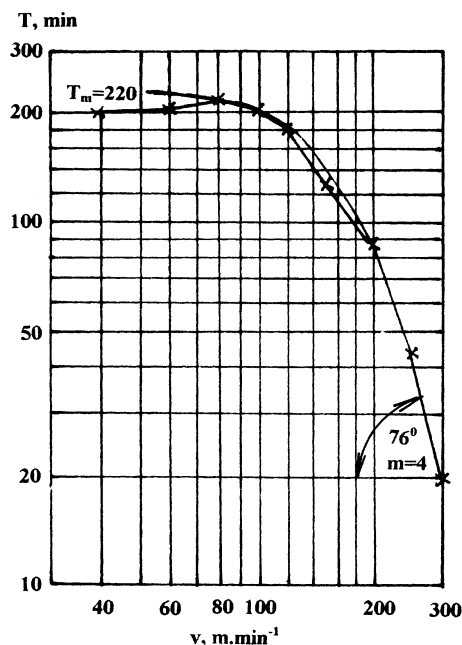
### 3.3 Verifikácia postupu zostrojenia $T-v$ závislosti a návrh metodiky

Na obr. 8 je priebeh piatich kriviek opotrebenia, ktoré boli získané v uvedených podmienkach. V spodnej časti je diagram závislosti:  $nT = f(VB)$ , s vyhodnotením jednotlivých  $VB_k$ .

Na obr. 9 je výsledná  $T-v$  závislosť, pričom krúžkami sú znázornené experimentálne hodnoty. Výsledok je v podstate zhodný s predchádzajúcim. Napriek menšiemu počtu rezných rýchlostí je  $T-v$  závislosť dostatočne presná. Naznačuje to možnosť zmenšit rozsah experimentálnych skúšok.

Na obr. 10 je súbor štyroch kriviek opotrebenia, získaných podrobným meraním (po 10 minútach obrábania).

V dolnej časti je diagram  $nT = f(VB)$  pri troch rezných rýchlostiach. Zhoda je podobná ako v predchádzajúcich prípadoch.



Obr. 7  $T-v$  závislosť, získaná z obr. 6  
Fig. 7  $T-v$  relation obtained from Fig. 6

given method. The error is not more important than the dispersion of the measured durability values.

Referring to this results, the possibility of the application of this new  $T-v$  relation with the common calculations of the cutting technology appears. Thus, it would be possible to specify the term "cutting" of the material as well as a "cutting tool efficiency".

The following series of tests deals with the verification of the outlined procedure with the various cases of cutting and the determination of the methodology of the creation of the exact  $T-v$  relation.

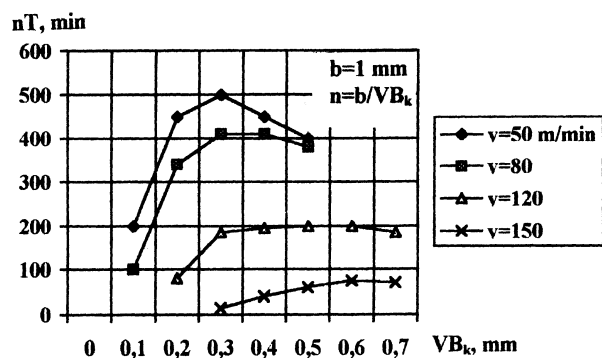
### 3.3 Verification of the creation procedure of the $T-v$ relation and the methodology proposal

Fig. 8 shows the course of the five wear curves which were obtained under the given conditions. In the lower part, there is a diagram of the relation  $nT = f(VB)$  with the individual  $VB_k$  evaluation.

In Fig. 9 there is a final  $T-v$  relation while the circles mark the experimental values. The result is, in fact, identical with the previous one. In spite of a lower number of cutting speeds, the  $T-v$  relation is sufficiently precise. It shows the possibility of decreasing range of experimental tests.

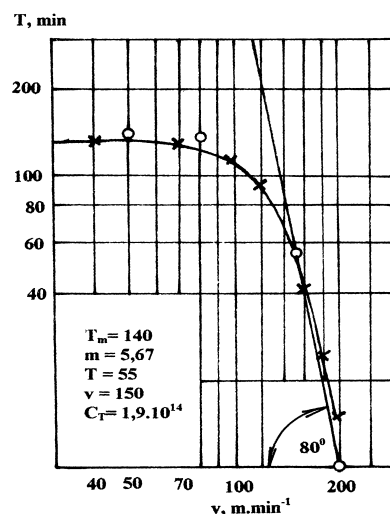
In Fig. 10 there is a set of four wear curves obtained by a detailed measuring (after 10 minutes of cutting).

In the lower part, there is a diagram  $nT = f(VB)$  with 3 cutting speeds.



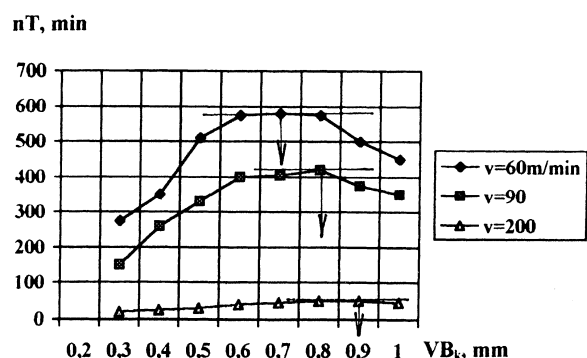
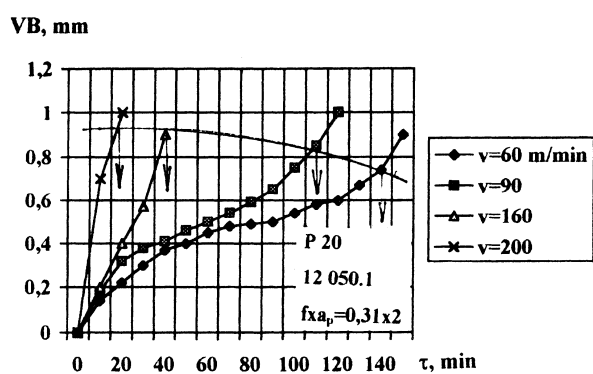
Obr. 8 Experimentálne krivky  $VB = f(\tau)$  a  $nT = f(\tau)$

Fig. 8 Experimental curve  $VB = f(\tau)$  and  $nT = f(\tau)$



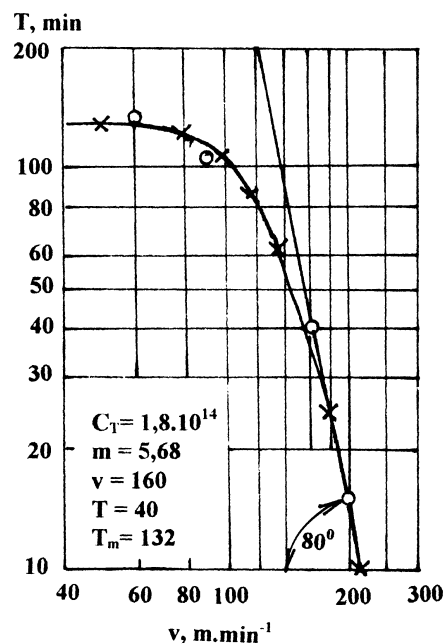
Obr. 9 Závislosť  $T = f(v)$

Fig. 9 Relation  $T = f(v)$



Obr. 10 Iný príklad experimentálnej závislosti

Fig. 10 Other case of experimental relation



Obr. 11 Ďalší príklad experimentálnych výsledkov

Fig. 11 Next case of experimental results

Ďalší príklad experimentu je na obr. 11. Ukazuje na ďalšiu možnosť skrátenia skúšok, ktorá spočíva v nasledovnom:

- zostrojiť krivku opotrebenia pri reznej rýchlosti, ktorú pre daný rezný materiál podľa skúsenosti a údajov výrobcu možno považovať za optimálnu, dávajúcu maximálnu trvanlivosť. Z tejto krivky možno stanoviť  $T_m$  a  $VB_k$ ,

Another example of the experiment is in Fig. 11. It shows another possibility of the tests shortening which lies in the following:

- to set a wear curve at a cutting speed which for a given cutting material, according to the experience as well as the information from the producer, can be considered as optimal and, at the same time, providing a maximum durability. This curve is used to derive  $T_m$  and  $VB_k$ ,



- zostrojiť dve krivky opotrebenia pri rezných rýchlostiach, výrazne vyšších od  $v_1$ . Z kriviek možno určiť  $VB_k$  (pre obe rezné rýchlosti) a  $m$ .

Na obr. 12 je  $T-v$  závislosť.

V ďalšom príklade je pokus o overenie metodiky s použitím troch kriviek opotrebenia. Na obr. 13 sú krivky opotrebenia pri rôznych rezných rýchlostiach: 70, 100 a 130  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Ako obrábaný materiál bola použitá vývojová oceľ pre valivé ložiská (NLO), ktorá má vyššiu pevnosť a asi o triedu horšiu obráбатeľnosť sústružením ako klasická (14 109.3) - obr. 9. Z hľadiska metodiky skúšok vidno, že nebolo potrebné sledovať krivku opotrebenia nad  $VB = 0,4$  mm. Skúšky pri vyšších rezných rýchlostiach vyžadovali pomerne krátky čas.

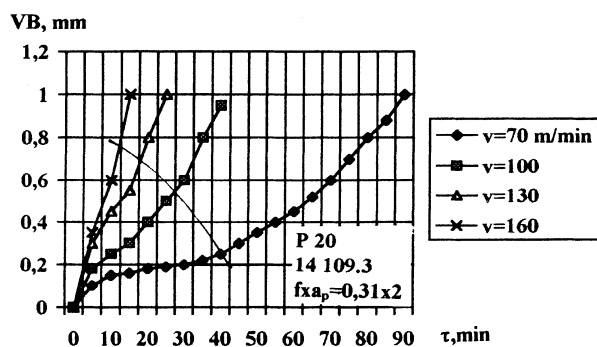
Krivky pre  $z = nT = f(VB)$  boli zostrojené len prvé dve rezné rýchlosti, čo na základe skúseností postačuje na zostrojenie  $T-v$  závislosti, ktorá je na obr. 14.

- to set two wear curves with cutting speeds which are much higher than  $v_1$ . The curves are used to determine  $VB_k$  (for both cutting speeds) and  $m$ .

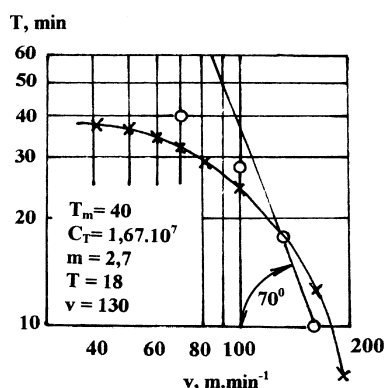
In Fig. 12 there is the  $T-v$  relation.

The following example presents a test which was carried out to verify the methodology with the use of three wear curves. In Fig. 13 there are wear curves at different cutting speeds 70, 100 and 130  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ . As a cutting material, research steel for bearing parts (NLO) was used. This steel has a higher strength and is approximately one class worse as regards workability by turning than the classical one (14209.3) - Fig. 9. From the point of view of the methodology of tests it follows that it was not necessary to observe the wear line over  $VB = 0.4$  mm. The tests with higher cutting speeds required relatively short time.

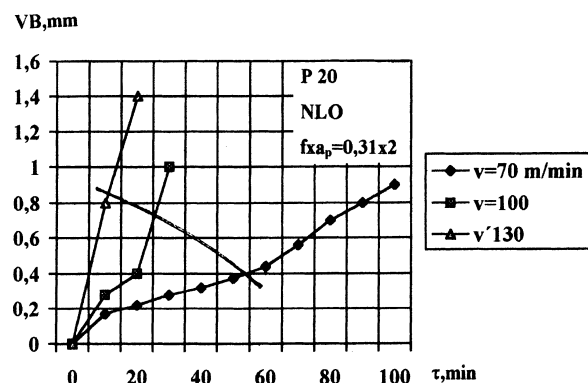
Curves for  $z = f(VB)$  were created only for two cutting speeds which is sufficient for creation of the  $T-v$  relation which is in Fig. 14.



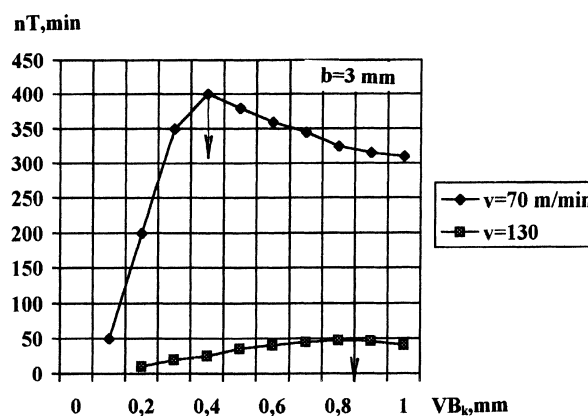
Obr. 12  $T-v$  závislosť  
Fig. 12  $T-v$  relation



Obr. 13 Experimentálna závislosť  $VB = f(\tau)$  a  $nT = f(VB)$   
Fig. 13 Experimental relation  $VB = f(\tau)$  and  $nT = f(VB)$



Obr. 14  $T-v$  závislosť  
Fig. 14  $T-v$  relation



#### 4. Záver

Naznačený postup na získanie  $T-v$  závislosti možno úspešne použiť miesto klasickej skúšky pri konštantnom kritérii opotrebenia. Pritom časové a materiálové nároky na jeho realizáciu zodpove-

#### 4. Conclusion

The outlined procedure of obtaining the  $T-v$  relation can be successfully used instead of a classical test with a constant criterion of blunting. At the same time, the material and the time require-

daju napr. známej skúške BEZPROZVANNÉHO, alebo skúške pri zmenšenom kritérii otupenia. Oproti nim sa však navrhnutý postup vyznačuje výrazne väčšou presnosťou.

Recenzenti: J. Zongor, J. Salaj

ments for its realization correspond with, for example, a well known test of BEZPROZVANNYJ, or a test with a lower criterion of blunting. Comparing to them, the suggested approach shows a considerably higher accuracy.

Reviewed by: J. Zongor, J. Salaj

## 5. Literatúra - References

- [1] BÉKÉS, J.: *Inžinierska technológia obrábania kovov*. Bratislava Alfa, 1981, 398 s.
- [2] BUDA, J., SOUČEK, J., VASILKO, K.: *Teória obrábania*. Bratislava Alfa, 1988, 391 s.
- [3] DMOCHVSKI, J.: *Podstawy obróbki skawaniem*. Warszawa. Państwowe wydawnictwo naukowe, 1987, 586 s.
- [4] GILMAN, A. M. et al.: *Optimizacija režimov obrabotki na metallorežuščich stankach*. Moskva: Mašinostrojenije, 1975, 304 s.
- [5] GRANOVSKIJ, G. I., GRANOVSKIJ, V. G.: *Rezanije metallov*. Moskva: Mašinostrojenije, 1975, 304 s.
- [6] KLUŠIN, M. I.: *Obobščennye zavisimosti dlja razčeta režima rezanija*. In: *Fizika rezanija metallov*. AN Armenskoj SSR, Jerevan, 1971
- [7] LARIN, M. N.: *Osnovy frezerovanija*. Moskva. Mašgiz, 1947
- [8] PODURAJEV, V. N.: *Avtomatičeskije regulirujemyje i kombinirovannyje processy rezanija*. Moskva: Mašinostrojenije, 1977, 302 s.
- [9] VASILKO, K., HRUBÝ, J., LIPTÁK, J.: *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava: Alfa, 1991, 494 s.
- [10] VASILKO, K., BOKUČAVA, G.: *Presnejšie vyjadrenie T-v závislosti*. Náradie 19, 1989, č. 4
- [11] ZOREV, N. N.: *Metod opredelenija optimalnogo iznosa i optimalnoj stojkosti po krivym iznosa*. Stanki i instrument, 1949, č. 8.