

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

Doc. Ing. Vojtěch Dráb

ANALÝZA PROCESU VRTÁNÍ ŠROUBOVITÝMI VRTÁKY

Kandidátská disertační práce

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146114478

Uvo se Hdr směnícemi MŠK pro státní
knihovny č. j. 31 727/62411/2 ze dne
22. 1. 1962. Věstník MŠK, knižní listy ze dne
22. 1. 1962, číslo 115/63. 20.

u 415

Liberec 1968

Obsah

	Str.
1) Úvod - zdůvodnění řešení úkolu	1
2) Geometrie břitu šroubovitých vrtáků	3
3) Mechanika tvoření třísky při vrtání	15
3.1 Historický přehled	15
3.2 Teorie tvoření třísky	17
3.3 Teoretické hodnoty β_1 , β_2 , k , ε_N	23
3.4 Návrh zkoušek	26
3.5 Postup zkoušek	29
3.6 Výsledky zkoušek a jejich hodnocení	31
4) Analýza řezných sil při vrtání	47
4.1 Teoretický rozbor a výpočet řezných sil	47
4.2 Experimentální zkoumání řezných sil	55
4.3 Výsledky zkoušek a jejich hodnocení	56
5) Teplota řezání při vrtání šroubovitými vrtáky	71
5.1 Historický přehled	71
5.2 Návrh zkoušek a popis použitých metod	74
5.3 Hodnocení výsledků zkoušek	81
6) Závěr	92
7) Literatura	95

Úvod - zdůvodnění řešeného úkolu

Rozvoj průmyslu zaznamenává nebývalé tempo nejenom kvantitativně, ale také kvalitativně. Změny výrobních technologií vynucené zvýšenou poptávkou a potřebami moderního života na jedné straně a souběžně s tím zvýšené požadavky na kvalitu vyžadují si také zvýšení efektivity výroby. To všechno vede k širokému uplatňování vědeckého bádání při zkoumání výrobních procesů.

V současné strojírenské výrobě má obrábění významné místo. Mechanické provozy na závodech představují téměř polovinu celkových produkčních zařízení. Přitom tyto provozy jsou nedílnou součástí nejenom strojírenských závodů, ale i v chemickém, textilním a jiném průmyslu. A právě v mechanických provezech obrábění je jednou z hlavních výrobních metod. Široký rozsah této výrobní metody si nutně vyžaduje věnovat mimořádnou pozornost jednotlivým způsobům obrábění, propracovávat a zkoumat je na vědeckém základě.

Základními otázkami při takovém zkoumání se jeví

- 1) zákonitosti tvoření třísky včetně otázek mechaniky procesu obrábění
- 2) zákonitosti procesu opotřebení nástrojů.

K objasnění naznačených otázek může přispět jenom důkladná teoretická studie, doprovázená experimentálním sledováním těchto problémů.

Většina výzkumů se zabývala v minulosti problematikou volného řezání a aplikovala výsledky na jednotlivé způsoby obrábění. V poslední době se pozornost zaměřuje na specifické problémy jednotlivých způsobů obrábění. Přitom byla však jenom nepatrná část věnována problematice vrtání. Uvážíme-li, že vrtání je jedním z nejužívanějších způsobů obrábění ve strojírenské výrobě a na závodech tvoří vrtací stroje 20 - 25 % celkového strojního parku vidíme, že tato problematika заслужuje více pozornosti.

Na Vysoké škole strojní a textilní v Liberci byla proto zaměřena pozornost také tímto směrem a problematika

vrtání byla zařazena do plánu výzkumu na katedrách obrábění a obráběcích strojů.

Předložená kandidátská práce vychází z těchto výzkumů a je zaměřena na analýzu procesu vrtání šroubovitými vrtáky. Zabývá se geometrií nástroje, mechanikou tvoření třísky při vrtání, analýzou řezných sil a teploty řezání.

Otázky opotřebení nástroje jsou předmětem dalšího výzkumu a nejsou zahrnuty do předkládané práce.

Některé části této práce byly použity pro přednášky, jež autor přednesl na vědeckých konferencích, anebo byly uveřejněny ve sborníku vědeckých prací VŠST.

Je milou povinností autora srdečně poděkovat při této příležitosti především prof. Ing. F. Křístkovi, který za svého působení na VŠST jako vedoucí katedry přispěl svou radou a vedením k usměrnění a zvládnutí problematiky tohoto náročného úkolu.

Autor dále děkuje zejména prof. Draskému a doc. Šálkovi za nevšední ochotu při konzultacích řešení problematiky.

Za přátelskou výpomoc při provádění zkoušek na VŠST patří upřímný dík všem kolegům, řemeslníkům a laborantce na katedře obrábění a organizace a katedře obráběcích strojů.

Geometrie břitu šroubovitých vrtáků

Šroubovitý vrták je nástroj značně složitý a přitom pracuje ve ztížených podmínkách, zejména pokud jde o tvoření a odvod třísky, silové a tepelné podmínky. Pro správnou analýzu procesu vrtání šroubovitým vrtákem musíme si především ujasnit geometrii nástroje. Budeme vycházet z předpokladu, že libovolný řezný nástroj i sebesložitější, je vlastně komplexem určitého množství elementárních nástrojů ve formě klínu vnikajícího do obráběného materiálu. Na tomto elementárním řezném klínu budeme uvažovat:

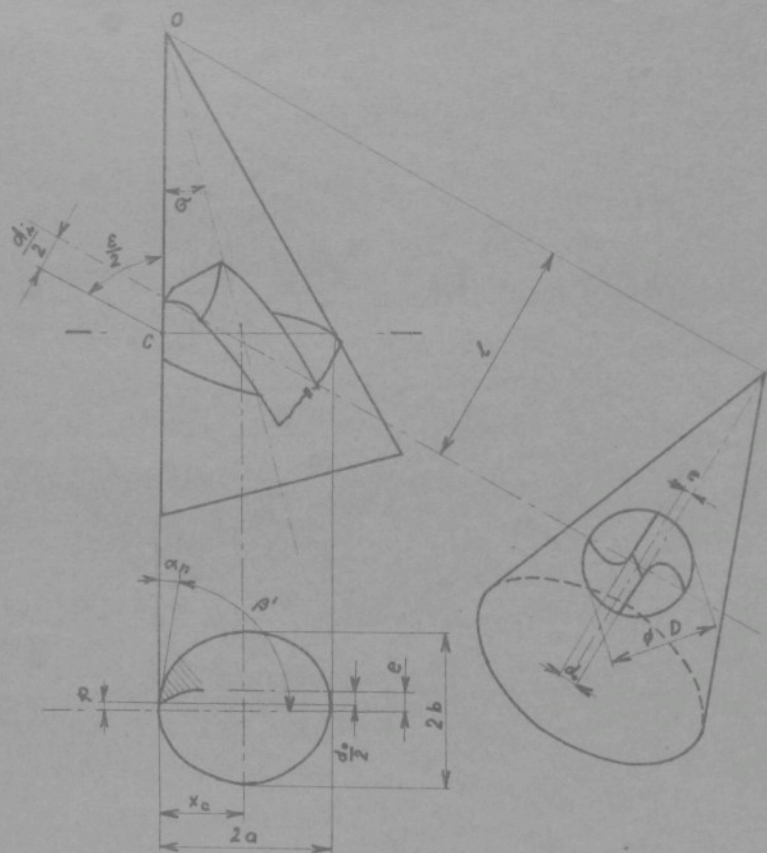
φ úhel čela - jako úhel, který svírá čelo nebo tečna k čelní ploše s rovinou základní tj. s rovinou kolmou na předpokládaný vektor řezné rychlosti.

α úhel hřbetu - jako úhel mezi hřbetní plochou, nebo její tečnou a řeznou rovinou tj. rovinou určenou vektorem řezné rychlosti a ostřím.

λ úhel sklonu břitu - jako úhel, který svírá ostří se základní rovinou.

Šroubovitě vrtáky mají čela hlavních břitů vytvořena plochou šroubovitě drážky. Tato drážka je otevřenou šroubovou plochou která vzniká rotací přímky (u vrtáku - hlavního ostří) kolem jádra a jejím posuvem ve směru osy. Hřbety hlavních břitů jsou vytvořeny různým způsobem. Nejznámější jsou:

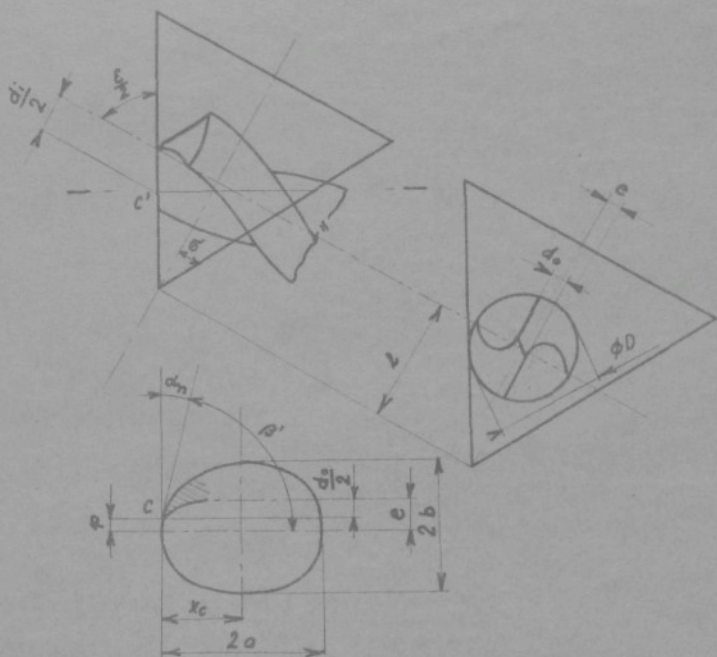
Washburnův způsob. Kužel s vrcholovým úhlem $\sim 26^\circ$ má osu skloněnou k ose vrtáku o 45° a vyosenou o $0,1 - 0,13 D$. Vrchol kužele je vzdálen od osy vrtáku $1,9 D$ (obr. 1)



Obr. 1

Weisskerův způsob. Kužel s vrcholovým úhlem $\sim 60^\circ$ má osu kolmou k ose vrtáku a vyosenou zpět o $0,1 - 0,13 D$. Vrchol kužele je vzdálen od osy vrtáku o $1,16 D$ (obr.2).

Oliverův způsob vytváří hřbet jako nepravidelnou šroubovou plochu. Tento způsob je u nás značně rozšířen proto, že na jeho principu pracují brusky BNV 75 a BNV 80.



Obr. 2

Provedme bližší analýzu geometrie břitů šroubovitého vrtáku jako geometrického tělesa, tj. předpokládáme směr řezné rychlosti jako tečnu ke kružnici proložené bodem ostří se středem v ose vrtáku (posuv uvažujeme = 0).

Při hřbetech vytvořených jako část pláště kužele bude úhel α_n dán tečnou k elipse již tvoří řezy kuželem rovinou kolmou k řezné hraně ve zkoumaném místě.

Elipsa má rovnici

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Bod C na ostří vrtáku je od symetrály břitů procházející osou vrtáku vzdálen o $\frac{d_0}{2}$.

Jestliže osa vrtáku a kužele jsou posunuty o hodnotu $e = p + \frac{d_0}{2}$ bude α_n úhel mezi tečnou k elipse v bodě C

a tečnou k dráze bodu C kolem osy vrtáku.

Z obrázku č.1 je patrné že:

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{dy}{dx}$$

a z rovnice elipsy

$$y^2 = \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) b^2 \quad (2)$$

$$y \, dy = \frac{b^2}{a^2} x \, dx \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b^2}{a^2} \frac{x}{y} \quad (4)$$

bod C má souřadnice:

$$x_c = a \sqrt{1 - \frac{p^2}{b^2}}$$

$$y_c = p$$

podle rovnice (4) po dosazení pro bod C platí

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{b^2 a \sqrt{1 - \frac{p^2}{b^2}}}{a^2 p} = \pm \frac{b \sqrt{b^2 - p^2}}{a p} \quad (5)$$

pak

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta'} = \frac{a}{b} \frac{p}{\sqrt{b^2 - p^2}} \quad (6)$$

dle obrázku můžeme hodnotu poloos elipsy vyjádřit

$$a = \frac{l + \frac{d_i}{2}}{2 \sin \varepsilon} \operatorname{tg} 2\sigma \quad (7)$$

$$b = \frac{l + \frac{d_i}{2}}{2 \sin \varepsilon} \operatorname{tg} 2\sigma \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \sigma} \quad (8)$$

dosazením do rovnice (6) dostaneme

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{p}{\sqrt{\left(1 - \operatorname{tg}^2 \sigma\right) \left[\left(\frac{l + \frac{d_i}{2}}{2 \sin \varepsilon} \operatorname{tg} 2\sigma \right)^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \sigma) - p^2 \right]}} \quad (9)$$

nyň si vyjádříme úhel α v závislosti na poměru $\frac{d_i}{D}$.
Pokud je vytvořena hřbetní plocha dle Weisskera, platí pro ni analogicky:

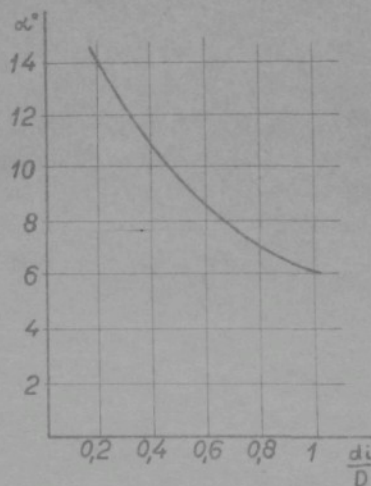
$$a = \frac{l - \frac{d_i}{2}}{2 \cos \sigma} \operatorname{tg} 2\sigma \quad (11)$$

$$b = a \sqrt{1 - \operatorname{tg}^4 \sigma} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{a}{b} \frac{p}{\sqrt{b^2 - p^2}} \quad (13)$$

po dosazení

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{p}{\sqrt{(1 - \operatorname{tg}^4 \sigma) \left[\left(\frac{l - \frac{d_i}{2}}{2 \cos \sigma} \operatorname{tg} 2\sigma \right)^2 (1 - \operatorname{tg}^4 \sigma) - p^2 \right]}} \quad (14)$$



Obr. 3

Při ostření na strojích BNW (Oliverův způsob) je průběh hodnot úhlu hřbetu α_v naznačen na obrázku 3.

Úhel čela γ je závislý na stoupání šroubové plochy, která tvoří čelo břitu. Je to otevřená kosoúhlá šroubová plocha s jádrem o poloměru $\frac{d_0}{2}$ a stoupáním s_s takovým, aby úhel sklonu šroubovice na obvodě odpovídal předepsané normě (obr. 4). Pak v libovolném bodě břitu bude úhel γ_v měřený na válcovém řezu o průměru d_i

$$\operatorname{tg} \gamma_{Vi} = \frac{\pi d_i}{s_g} \quad (15)$$

Jestliže norma udává úhel stoupání šroubovice ω pak na obvodě bude

$$\operatorname{tg} \gamma_{VD} = \frac{\pi D}{s_g}$$

z toho

$$\operatorname{tg} \gamma_{Vi} = \operatorname{tg} \omega \frac{d_i}{D} \quad (16)$$

Skutečné úhly γ_n však nutno stanovit v rovině kolmé na průmět hlavního ostří do základní roviny. Dle obr. 5 na základě vztahů, které lze odvodit z břitového diagramu platí

$$\operatorname{tg} \gamma_v = \operatorname{tg} \gamma_n \sin \alpha - \operatorname{tg} \lambda \cos \alpha \quad (17)$$

V této rovnici se vyskytují hodnoty úhlu nastavení α a úhlu sklonu ostří λ . Z obr. 5 úhel nastavení α , který svírá průmět ostří do základní roviny s osou vrtáku (směr posuvu) můžeme vyjádřit dle úvahy:

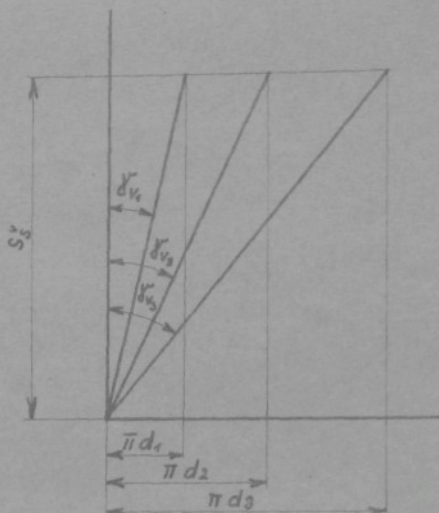
$$\sin \varphi = \frac{d}{D}$$

$$\cos \varphi = \frac{a}{\frac{D}{2}}$$

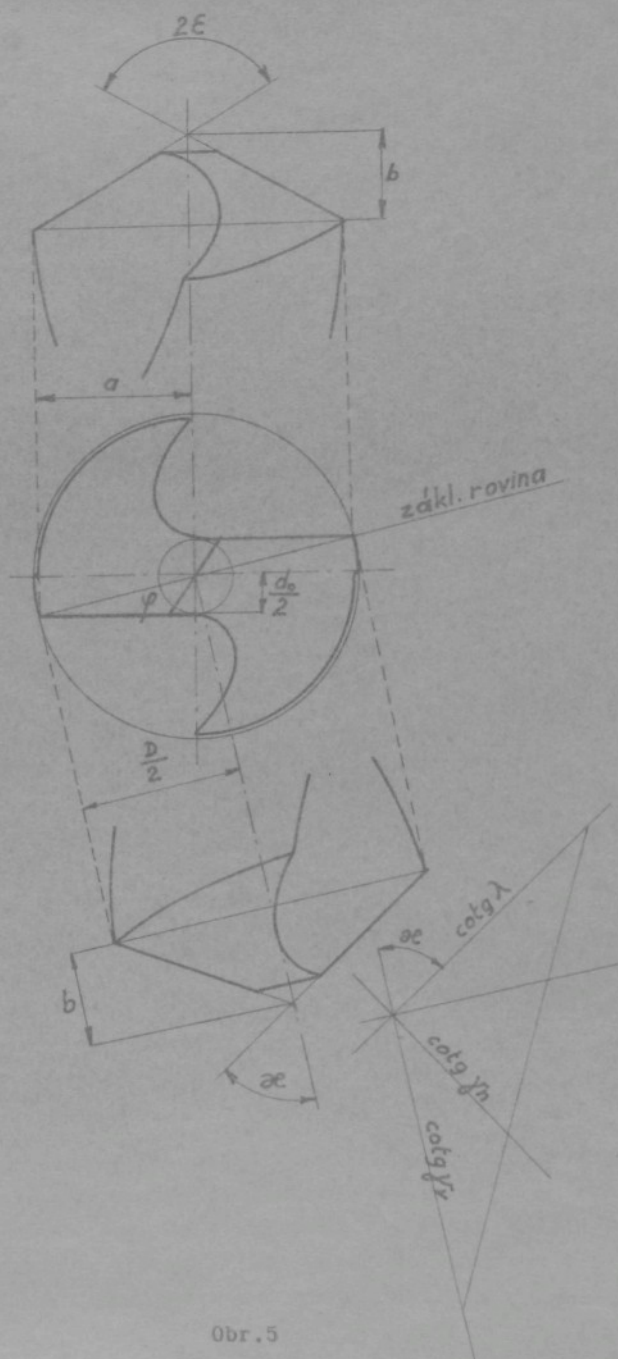
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{D}{2}}{b}$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{a}{b}$$

$$b = a \frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon}$$



Obr. 4



Obr. 5

do středu koule, protíná úsečka CE povrch koule v bodě D, úsečka CB v bodě G a úsečka CA v bodě F (obr. 7). Nakreslíme 5 bodů na kružnici a připišeme k nim nahoře přeponu C, pak úhly α , β a naproti nim doplňky stran ve stupních. Pro takovéto schéma platí dvě věty:

- 1) Kosinus libovolného prvku = součinu sinů protějších dvou prvků
- 2) kosinus libovolného prvku = součinu kotangent dvou sousedních prvků

tedy např.

$$\begin{aligned}\cos (90 - b) &= \sin c \sin \beta \\ \cos (90 - b) &= \cotg \alpha \cotg (90 - a)\end{aligned}$$

po úpravě

$$\begin{aligned}\sin b &= \sin c \sin \beta \\ \sin b &= \cotg \alpha \cotg a\end{aligned}$$

V našem případě tvoří body D G F sférický trojúhelník, v kterém proti straně $(90 - \lambda)$ je pravý úhel, tedy $(90 - \lambda)$ je přepona. Dle Neperova pravidla můžeme psát

$$\begin{aligned}\cos (90 - \lambda) &= \sin [90 - (90 - \alpha)] \cdot \sin [90^\circ - (90 - \varphi)] \\ \sin \lambda &= \sin \alpha \sin \varphi\end{aligned}\tag{19}$$

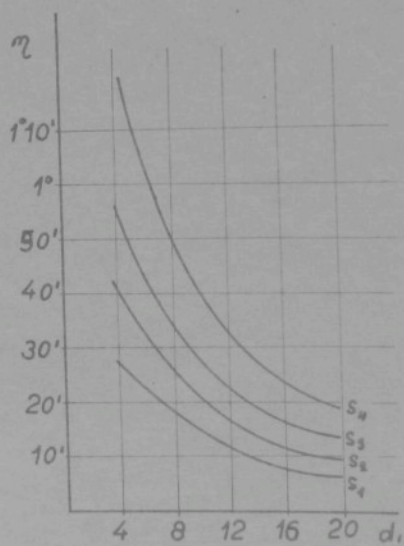
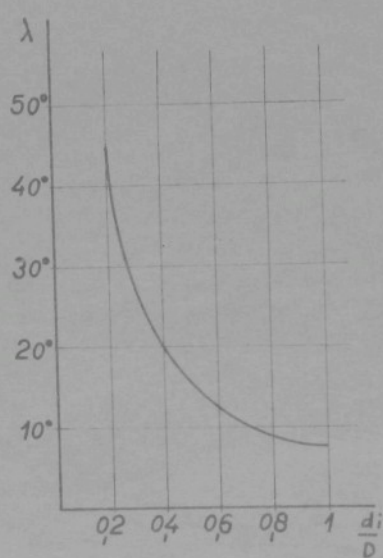
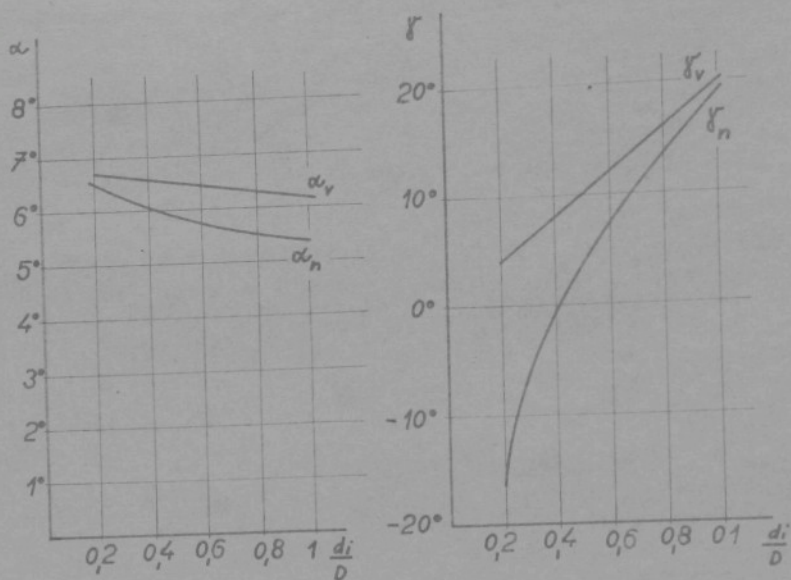
V praxi máme dán úhel stoupání šroubovice ω a tedy známe úhly γ_{vi} , nebo si je zjistíme měřením. Pak výpočet úhlů γ_{ni} provedeme dle vztahu

$$\operatorname{tg} \gamma_{ni} = \frac{\operatorname{tg} \gamma_{vi} + \operatorname{tg} \lambda \cos \alpha}{\sin \alpha}\tag{20}$$

Obdobně také úhel α měříme při kontrole vrtáku na povrchkách válcových řezů - tedy α_{vi} . Z břitového diagramu můžeme odvodit vztah:

$$\cotg \alpha_{ni} = \frac{\cotg \alpha_{vi} + \operatorname{tg} \lambda \cos \alpha}{\sin \alpha}\tag{21}$$

Dosud odvozené vztahy nám umožňují určit průběh velikosti úhlů podél hlavního břitu (obr. 8).



Обр. 8

Při práci šroubovitými vrtáky je rovina řezu odkloněna od roviny kolmé k ose vrtáku o úhel η .

$$\operatorname{tg} \eta_i = \frac{s}{\pi d_i} \quad (22)$$

s - posuv za ot.

d_i - průměr v bodě ve kterém hledáme úhel stoupání řezné plochy

Budou tedy úhly hřbetu α o tento úhel η menší a úhly čela γ o úhel η větší.

Mechanika tvoření třísky při vrtání

Správná volba a zjištění charakteristik procesu obrábění si vyžaduje znalost konkrétních zákonitostí při tom kterém druhu obrábění. Jde především o problémy mechaniky tvorby třísky. Řešení této otázky se zdá v současné době klíčovým problémem pro teoretické rozpracování a zvládnutí procesu řezání. Objasnění fyzikální podstaty tohoto procesu má význam pro poznávání dalších jevů při obrábění jako např. řezných sil, teplotních jevů apod.

První vědecké práce o této problematice jsou z poloviny minulého století - to je období, kdy vznikají také nástroje v dnešním pojetí.

Uveďme alespoň stručný historický přehled výzkumu v oboru mechaniky obrábění.

První výzkumy pro stanovení řezných sil v závislosti na řezných podmínkách při vrtání prováděl M. Cocquilhat r. 1851.

H. Wiebe odvodil r. 1858 vztahy pro výpočet práce při obrábění. .

V r. 1864 zkoumal Joessel síly při soustružení a vrtání v závislosti na posuvu, hloubce řezu a úhlu čela.

E. Hartig vydal v r. 1873 tabulky materiálových konstant pro výpočet práce při obrábění.

První práce o teorii tvorby třísky pochází z r. 1870 od Timeho.

V té době také uveřejnil své práce Tresca (1873), který uvažoval proces tvoření třísky jako pýchování a stříhání v rovině rovnoběžné s povrchem obrobku.

Time dále rozpracoval teorii tvorby třísky v r. 1877 a vyslovil tézi o jedné střížné rovině, která se stala základem všech dalších teoretických prací i když tato teorie uvažuje nespojitý průběh rychlostí a nespojitý gradient napětí.

Metalografické zkoumání pro ujasnění procesu tvoření třísky použil r. 1881 Mallock, který podobně jako Time došel k závěru, že materiál se odděluje v podobě destiček ve

střížné rovině. Mallock již uvažoval ve svých závěrech také tření třísky po čele nástroje.

Měřeníma řezných sil pomocí dynamometru se zabýval r.1892 Hausner, který také první upozornil, že řezná síla musí překonávat nejenom odpor proti stříhu, aby se utvořila tříška, ale že existují další síly, které nedovolí volné ustříhnutí elementu - ale způsobují normální napětí.

Dalším krokem ve výzkumu procesu obrábění byly práce Zvorykinovy r.1893, který z podmínky, že řezná síla musí mít ve směru řezné rychlosti minimum odvodil rovnici pro střížný úhel, která se plně shoduje se závěry odvozenými o 50 let později Ernstem a Merchantem.

Zpřesněním Timeho teorie jsou práce Briksovy z r.1896. Předpokládal, že plastické deformace vznikají současně v určité oblasti na vějířovitých rovinách procházejících ostřím. Smykové napětí v dané rovině je konstantní a odpovídá mezi průtažností materiálu ve smyku, které v důsledku zpevnění v dané rovině vznikne.

Na počátek našeho století spadají i první výzkumy při kterých byl proces tvoření třísky sledován na síti nanesené na obrobek.

Nové nástrojové materiály - rychlořezná ocel a později slituté karbidy si nutně vyžádaly pro jejich plné využití nejenom uplatnění praktických zkušeností do konstrukce nástrojů, ale také hluboký vědecký rozbor procesu obrábění. Proto ve všech průmyslových zemích se věnuje značná pozornost výzkumu obrábění. Období posledních 50 let je vyplněno intenzivní prací nejenom jednotlivců, ale celých kolektivů.

Uvedme aspoň některé z nich.

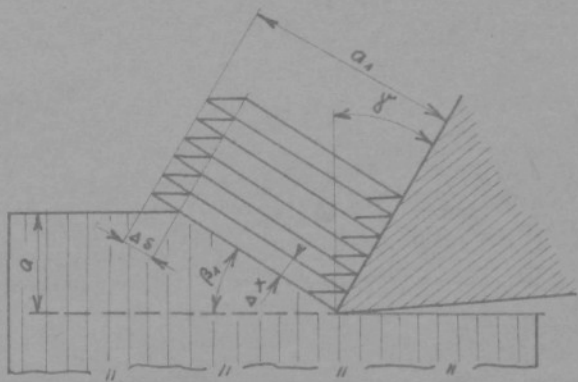
Rusové: J.S.Usačev, V.A.Krivouchov, I.M.Bezprozvannyj, N.J.Reznikov, M.I.Klušin, V.D.Kuzněcov, A.M.Rozenberg, N.N.Zorev, A.M.Vulf, T.I.Granovskij, T.N.Loladze.

Němci: A.Wallisch, M.Körrein, H.Klopstock, J.Krystof, G.Schlesinger, H.Schallbroch, M.Kronenberg, O.Kinzle, H.Hucks.

Američané: O.W.Boston, E.G.Coker, N.Zlatin, H.G.Schaw, H.Ernst, M.E.Merchant, B.W.Schaffer, E.H.Lee, P.Albrecht, P.L.Oxley.

Japonci: M.Okoschima, H.Hitomi.

Všechny výzkumné práce vycházejí při teoretickém výkladu tvoření třísky z ortogonálního řezání u kterého se při malém poměru tloušťky třísky k její šířce stav napjatosti a deformací považuje za rovinný případ. Modely, které jsou základem jednotlivých teorií se vzájemně dosti liší. Uvedeme nejcharakterističtější.



Obr. 9

Schema na obr. 9 předpokládá, že se tříska odděluje ve formě elementárních částic-lamel ve střižné rovině, která svírá s rovinou řezu úhel β_1 . Z tohoto schematu vychází práce Timého, Ernsta, Merchanta a dalších.

Z minima relativního posunutí $\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x}$ můžeme stanovit úhel β_1

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} \quad (23)$$

Pro toto schema můžeme určit úhel stříhu β_1 také z minima hlavní složky řezné síly, nebo z úvahy, že rovina skluzu při tvoření třísky zaujímá takovou polohu, že smyková napětí, která na ni působí mají maximální hodnotu

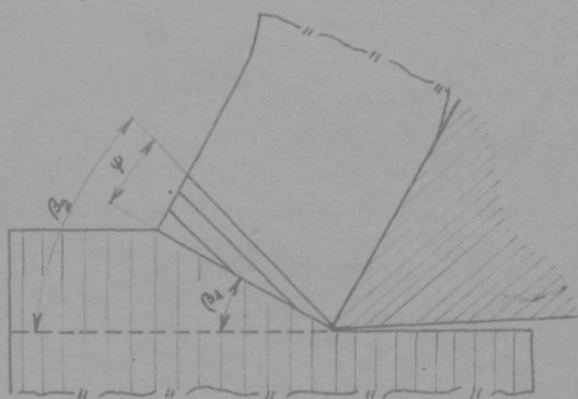
$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2} \quad (24)$$

μ je třecí úhel mezi třískou a čelem nástroje.

Uvažujeme-li také "vnitřní tření" ve střižné rovině pak pro úhel β_1 můžeme odvodit vztah:

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\mu}{2} - \frac{\mu_1}{2} \quad (25)$$

kde μ_1 je třecí úhel ve střižné rovině.



Obr. 10

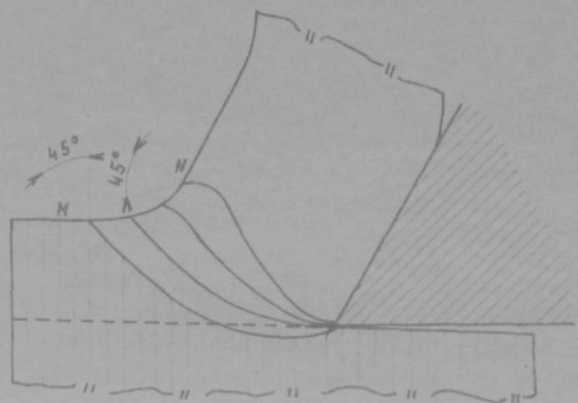
prvně vytvořeno Usačevem a Rosenbergem. Úhel textury můžeme stanovit ze vztahů dle [49]

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\cos (\beta_1 - \gamma)}{k \cdot \cos \beta_1 + \sin (\beta_1 - \gamma)} \quad (26)$$

nebo dle [66]

$$\operatorname{cotg} \psi = 1 + \operatorname{cotg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma) \quad (27)$$

Skutečným podmínkám, tak jak jsou patrné z výbrusů kořenů

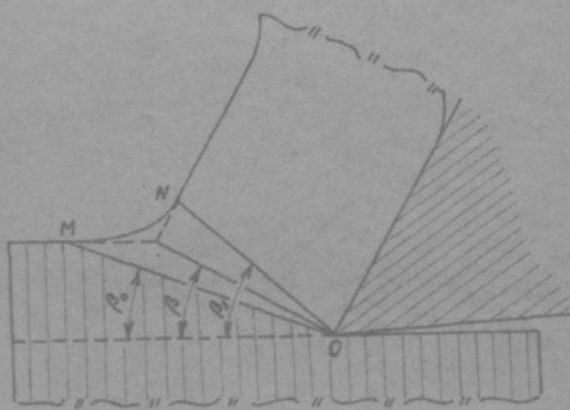


Obr. 11

Na obr. 10 je schema, které mimo střižní roviny znázorňuje texturu třísky, tj. směr deformace zrn materiálu třísky, který je směrem maximálních smykových napětí. Toto schema bylo

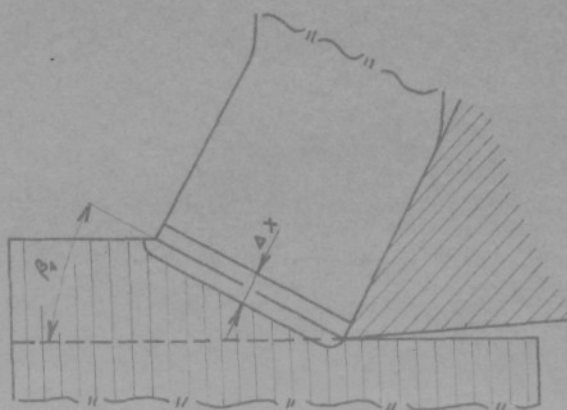
třísek, nejlépe vyhovuje schema [68], kde je oblast tvoření třísky ohraničena kluznými čarami - obr. 11. Aby bylo možno popsat stav napjatosti deformace, což dle schématu na obr. 11 není

možné, bylo provedeno zjednodušení tohoto modelu. Počáteční a konečná hranice jsou nahrazeny rovinami a kluzné čá-



Obr. 12

stanovil Zorev [68] vztahy pro určení počáteční a konečné hranice oblastí plastických deformací, pro určení vnější hranice této oblasti a rovnice smykových a normálních napětí. Řešení



Obr. 13

čení elementárních částic materiálu a navrhl model tvoření třísky ve kterém oblast plastických deformací je ohraničena dvěma rovnoběžnými rovinami - obr. 13.

Toto schema umožňuje stanovit mimo stavu napjatosti

ry II. řádu zanedbáme (obr. 12). Dále nutno předpokládat, že mechanické vlastnosti kovu se během deformace v oblasti tvoření třísky OBN nemění a zanedbáme vliv teploty a deformací rychlosti. Na základě tohoto schématu

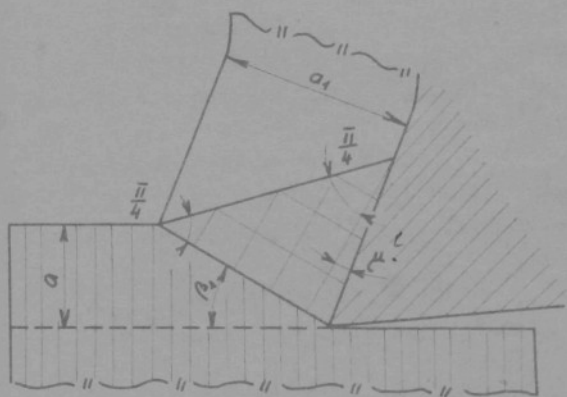
problematiky tvoření třísky dle tohoto schématu obsahují také práce Okushima a Hashiho [44].

Oxley [45] filmováním procesu obrábění leštěného a nagleptaného obrobku stanovil trajektorie te-

a deformací i deformační rychlost částic kovu v oblasti tvoření třísky.

Jiný přísně podle teorie plasticity odvozený model

navrhli Schaffer a Lee. Pro dokonale plastické materiály vychází z teorie kluzných čar, které v souladu s hraničními podmínkami napětí musí protínat čelo nástroje pod úhlem daným koeficientem tření.

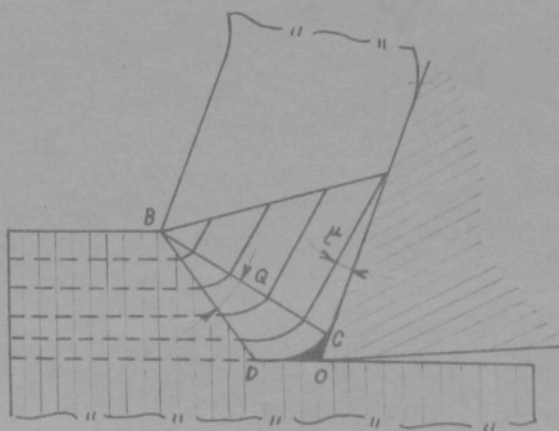


Obr. 14

Dle tohoto schema

$$\beta_1 = 45^\circ + \gamma - \mu \quad (28)$$

$$\frac{a}{a_1} = \frac{\sin \beta_1}{\cos (\beta_1 - \gamma)} \quad (29)$$



Obr. 15

pro malé γ a velké tření však hodnota $\frac{a}{a_1}$ se blíží nekonečnu. Proto autoři přepočítávali schema dle obr. 15. Zachovali podmínku rovinnosti skluzu a konstantnosti koeficientu tření. Předpokládají však výskyt vř-
řivité zóny

kluzných čar, s vrcholem v bodě B o úhlu θ a výskyt zabrzděné oblasti, nebo nárůstku na čele OCD [40].

Dle tohoto schématu pak

$$\beta_1 = 45^\circ + \gamma - \mu + \theta \quad (30)$$

Průběh a intenzitu plastické deformace v oblasti tvoření třísky můžeme hodnotit mimo velikosti úhlu β_1 také relativním posunutím ε tj. poměrem posunutí elementární vrstvy materiálu ve směru kluzných čar k tloušťce elementární vrstvy (viz obr.9).

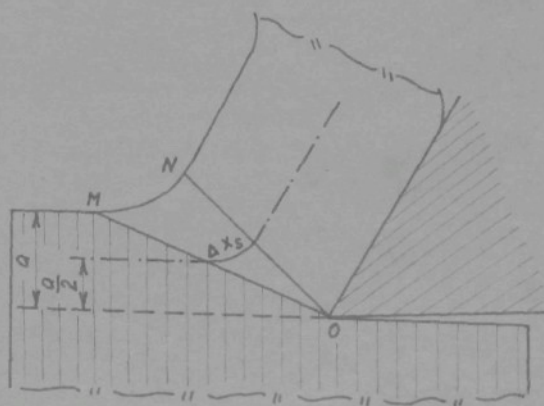
Z limity pro $\Delta x \rightarrow 0$ můžeme napsat vztah pro relativní posunutí na konečné hranici plastické deformace [49]

$$\varepsilon_N = \cotg \beta_1 \sim \cotg (\beta_1 + \sigma) \quad (31)$$

Deformační rychlost lze vyjádřit vztahem [49]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_N \cdot v}{k \cdot \Delta x_s} \quad (32)$$

ve kterém Δx_s je střední šířka deformační oblasti
 k je součinitel přechování.



Obr.16

Všechny uvedené teoretické závěry nám dostatečně charakterizují proces plastické deformace ovšem pro řadu zjednodušujících předpokladů. Proto je-
 nom získání přesného obrazu kořene třísky může dát

reálný obraz oblasti plastických deformací.

Podívejme se na základě těchto závěrů na proces vrtání šroubovitým vrtákem.

Geometrie břitu šroubovitého vrtáku byla ujasněna v předcházející kapitole. Vidíme, že úhel čela v rovině

kolmé na ostří se mění od maxima na obvodě do záporných hodnot na přechodu hlavního břitu do břitu příčného. Uvažujme konkrétní případ vrtání šroubovitým vrtákem $\varnothing 20$ mm při otáčkách $n_1 = 180$ ot/min; $n_2 = 250$ ot/min; $n_3 = 355$ ot/min; $n_4 = 500$ ot/min a posuvem $s_1 = 0,125$ mm/ot; $s_2 = 0,18$ mm/ot; $s_3 = 0,25$ mm/ot; $s_4 = 0,355$ mm/ot. Pro zjednodušení budeme zkoumat proces tvorby třísky na příčném břitu a v místech hlavního břitu na poloměrech $r_1 = 3$ mm; $r_2 = 6$ mm; $r_3 = 9$ mm. Těmto poloměrům odpovídají následující hodnoty uvedené v tabulce č. 1.

	$r = 3$ mm	$r = 6$ mm	$r = 9$ mm
α	16°	9°	6°
α_n	$13^\circ 30'$	$7^\circ 55'$	$5^\circ 20'$
β	$6^\circ 30'$	$17^\circ 20'$	$21^\circ 40'$
β_n	$-9^\circ 10'$	$12^\circ 10'$	$20^\circ 10'$
δ	$83^\circ 30'$	$72^\circ 40'$	$68^\circ 20'$
δ_n	$99^\circ 10'$	$77^\circ 50'$	$69^\circ 50'$
λ	30°	14°	$9^\circ 15'$
v_1 pro $n = 180$	3,39	6,78	10,17
v_2 pro $n = 250$	4,71	9,42	14,13
v_3 pro $n = 355$	6,68	13,37	20,06
v_4 pro $n = 500$	9,42	18,84	28,26

Tab.č.1

Zvoleným posuvům odpovídají následující tloušťky třísky pro:

$$s_1 = 0,125 \text{ mm/ot} \dots a_1 = 0,053 \text{ mm}$$

$$s_2 = 0,18 \text{ mm/ot} \dots a_2 = 0,77 \text{ mm}$$

$$s_3 = 0,25 \text{ mm/ot} \dots a_3 = 0,107 \text{ mm}$$

$$s_4 = 0,355 \text{ mm/ot} \dots a_4 = 0,153 \text{ mm}$$

a úhly stoupání řezné plochy (na poloměru $r_1 = 3$, $r_2 = 6$, $r_3 = 9$ mm).

s mm/ot	γ		
	r = 3 mm	r = 6 mm	r = 9 mm
0,125	0°22'30"	0°11'25"	0°7'10"
0,18	0°32'50"	0°16'25"	0°10'5"
0,250	0°45'30"	0°22'50"	0°14'25"
0,355	1°4'30"	0°32'30"	0°20'30"

Tab.č.2

Použijeme-li hodnot pro koeficient tření na čele dle literatury [42] [68] a pro vnitřní tření ve střižné rovině hodnotu třecího úhlu [36] $\mu_1 = 10^\circ$ dostaneme dle vztahu (25) následující hodnoty úhlu střižné roviny:

n	S	β_1		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	14°	20°	24°
	0,18	15°	21°	25°
	0,250	16°	22°	25°30'
	0,355	17°	23°	26°
250	0,125	15°	21°	25°
	0,18	16°	22°	26°
	0,25	17°	23°	26°30'
	0,355	18°	24°	27°
355	0,125	16°	22°	26°
	0,18	17°	23°	26°30'
	0,25	18°	24°	27°
	0,355	18°30'	25°	27°30'
500	0,125	17°	23°	26°30'
	0,18	18°	24°	27°
	0,25	18°30'	24°30'	27°
	0,355	19°	25°	27°

Tab.č.3

Úhel textury můžeme stanovit dle vztahu (27)

$$\cotg \gamma = 1 + \cotg \beta_i + \tg (\beta_i - \gamma)$$

n	s	γ		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	10°25'	14°25'	16°45'
	0,18	10°55'	14°45'	17°15'
	0,25	11°25'	15°20'	17°26'
	0,355	11°55'	15°45'	17°35'
250	0,125	10°55'	14°45'	17°15'
	0,18	11°25'	15°20'	17°35'
	0,25	11°35'	15°45'	17°45'
	0,355	12°15'	16°15'	17°55'
355	0,125	11°25'	15°20'	17°35'
	0,18	11°55'	15°45'	17°45'
	0,25	12°15'	16°15'	17°55'
	0,355	12°30'	16°30'	18°10'
500	0,125	11°55'	15°45'	17°45'
	0,18	12°15'	16°15'	17°55'
	0,25	12°30'	16°25'	17°55'
	0,355	12°45'	16°30'	17°55'

Tab.č.4

Z teoreticky vypočtených hodnot β_i můžeme stanovit koeficient přechování k [68]

$$k = \frac{\cos (\beta_i - \gamma)}{\sin \beta_i} \quad (33)$$

n	s	k		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	3,78	2,88	2,45
	0,18	3,54	2,75	2,37
	0,25	3,26	2,63	2,30
	0,355	3,05	2,50	2,27

Tab.č.5 - pokrač. na str. 25

$$\cotg \gamma = 1 + \cotg \beta_1 + \tg (\beta_1 - \gamma)$$

n	s	γ		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	10°25'	14°25'	16°45'
	0,18	10°55'	14°45'	17°15'
	0,25	11°25'	15°20'	17°26'
	0,355	11°55'	15°45'	17°35'
250	0,125	10°55'	14°45'	17°15'
	0,18	11°25'	15°20'	17°35'
	0,25	11°35'	15°45'	17°45'
	0,355	12°15'	16°15'	17°55'
355	0,125	11°25'	15°20'	17°35'
	0,18	11°55'	15°45'	17°45'
	0,25	12°15'	16°15'	17°55'
	0,355	12°30'	16°30'	18°10'
500	0,125	11°55'	15°45'	17°45'
	0,18	12°15'	16°15'	17°55'
	0,25	12°30'	16°25'	17°55'
	0,355	12°45'	16°30'	17°55'

Tab.č.4

Z teoreticky vypočtených hodnot β_1 můžeme stanovit koeficient přechování k [68]

$$k = \frac{\cos (\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} \quad (33)$$

n	s	k		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	3,78	2,88	2,45
	0,18	3,54	2,75	2,37
	0,25	3,26	2,63	2,30
	0,355	3,05	2,50	2,27

Tab.č.5 - pokrač. na str. 25

n	s	k		
		r = 3	r = 6	r = 9
250	0,125	3,54	2,75	2,37
	0,18	3,26	2,63	2,30
	0,25	3,05	2,50	2,22
	0,355	2,79	2,41	2,18
355	0,125	3,26	2,63	2,30
	0,18	3,05	2,50	2,22
	0,25	2,79	2,41	2,18
	0,355	2,70	2,32	2,14
500	0,125	3,05	2,50	2,22
	0,18	2,79	2,41	2,18
	0,25	2,78	2,36	2,18
	0,355	2,70	2,32	2,18

Tab.č.5

Relativní posunutí ε_N stanovíme dle vztahu (31)

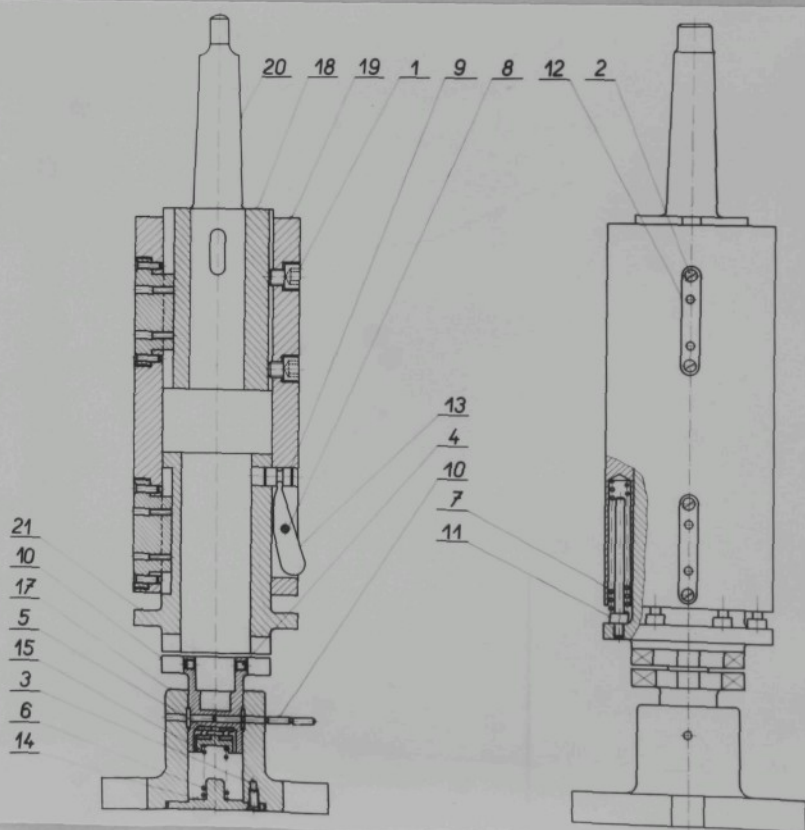
$$\varepsilon_N = \cotg \beta_1 - \cotg (\beta_1 + \delta)$$

n	s	ε_N		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	4,438	2,885	2,313
	0,18	4,180	2,760	2,229
	0,25	3,957	2,648	2,189
	0,355	3,762	2,547	2,152
250	0,125	4,180	2,760	2,229
	0,18	3,957	2,648	2,152
	0,25	3,762	2,547	2,116
	0,355	3,587	2,455	2,082
355	0,125	3,957	2,648	2,152
	0,18	3,762	2,547	2,116
	0,25	3,587	2,455	2,082
	0,355	3,512	2,372	2,049
500	0,125	3,762	2,547	2,126
	0,18	3,587	2,455	2,081
	0,25	3,512	2,412	2,081
	0,355	3,439	2,372	2,081

Tab.č.6

Všechny uvedené modely tvorby třísky vychází z předpokladu volného řezání a předpokládají nástroj jako klín s konstantním úhlem čela a hřbetu při úhlu sklonu ostří. Šroubovitý vrták nejenom že pracuje v nesrovnatelně složitějších podmínkách při kterých dochází k odebirání materiálu v podstatě spojitým i když lomeným břitem v otvoru, ale mění se jak geometrie, tak také řezná rychlost v závislosti na vzdálenosti od osy vrtáku.

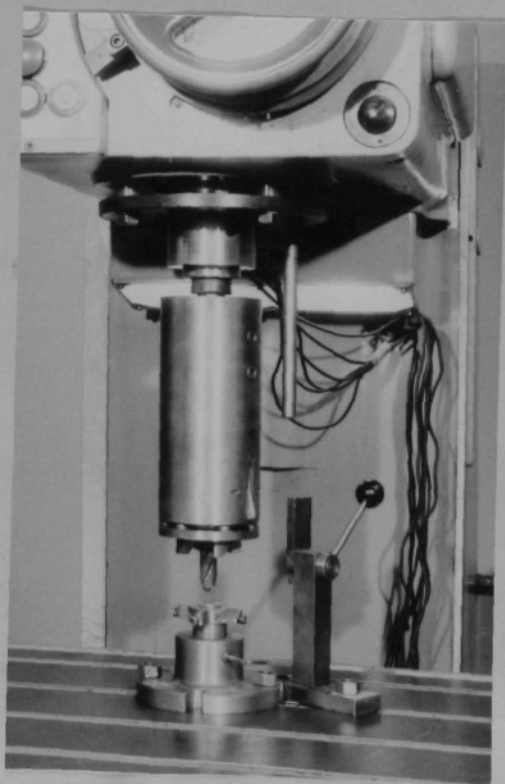
Je proto nezbytné pro zkoumání procesu tvoření třísky při vrtání vycházet z experimentálně získaných závěrů, z kofene třísky. Kofen třísky dostaneme přerušením práce vrtáku v určitém okamžiku tak, aby se zachovala tříska ve spojení se základním materiálem, tedy i celá oblast tvoření třísky v takovém stavu, jaký je při skutečné práci. To předpokládá okamžité zastavení vrtáku, nebo okamžité udělení takové



Obr. 17

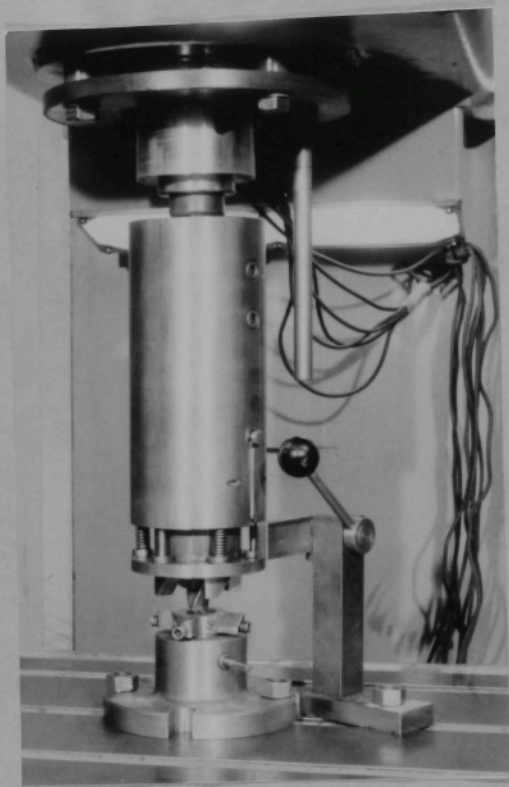
rychlosti vrtanému materiálu, aby nástroj i obrobek byly vůči sobě v relativním klidu. Musíme tedy v co nejkratším časovém rozmezí dosáhnout spojení vrtáku i obrobku v jeden celek, pohybující se společně. Hlavní potíž je v tom, že není možno dostatečně zmenšit hmotu té části, kterou chceme uvést při přerušení řezu do pohybu, aby setrvačné síly byly co nejmenší.

Pro naše zkoumání jsme navrhli konstrukci přerušovače, která je patrna z obr.č.17. Přerušovač se skládá ze dvou částí, jedna se upevní do vřetena vrtačky a druhá část slouží k upnutí vzorku, u kterého chceme zkoumat tvoření třísky. První část je provedena tak, aby ji bylo možno nastavit ve směru osy vřetena podle délky vrtáku. V této části je suvně uložen díl, který je vytlačován pomocí pružin. Tento díl je unášen pérem a v horní poloze se zajišťuje kolíkem, ovládaným spouští. Spodní strana tohoto dílu je opatřena zubovou



obr.18

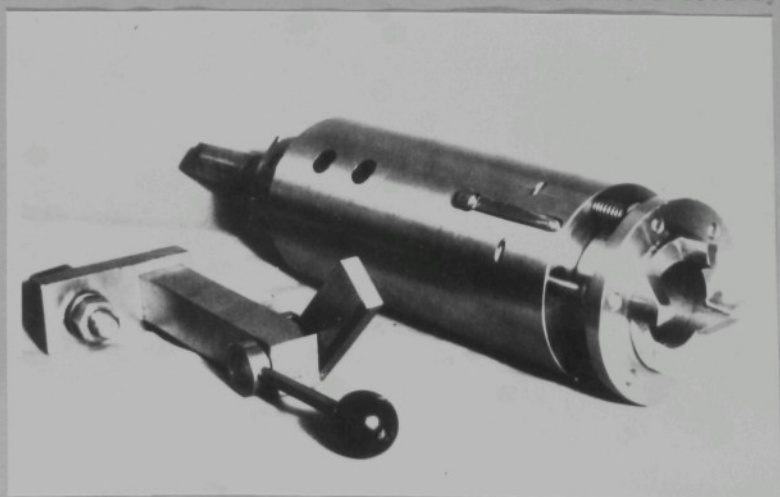
spojkou. Druhá část přerušovače se upne na stůl vrtačky. Vnitřní otočný díl této části - držák vzorku - je na horní straně opatřen zubovou spojkou a s vnějším dílem je proti otáčení zajištěn střižným kolíkem. K přerušovači patří ještě spouštěcí zařízení pomocí kterého můžeme ovládat spoušť v libovolném okamžiku. Stlačením spouště se uvolní vnitřní díl horní části, pružiny jej vysunou a zubová spojka tohoto dílu přijde do záběru se spojkou držáku vzorku



Obr. 19

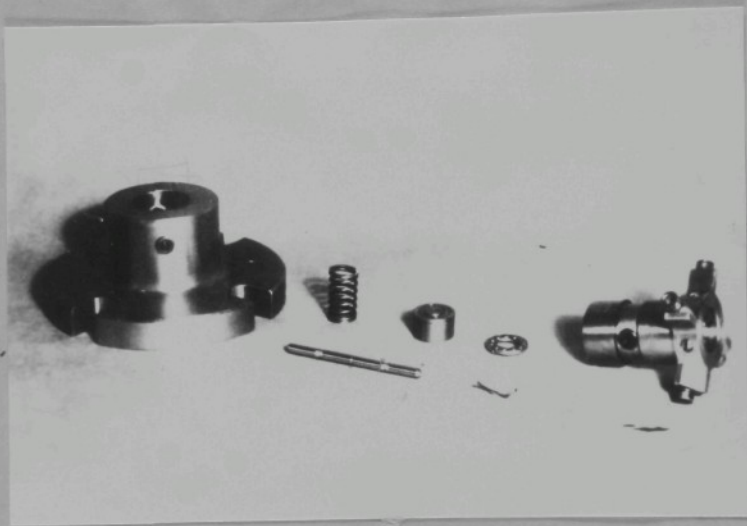
začne jej unášet
a přestřihne kolík.

Těleso i držák
spodní části přeruš-
vače mají na svých
kluzných částech osa-
zení umístěno tak,
aby zlomené části ko-
líku nebránily v po-
hybu držáku v tělese.
Držák vzorku je ze-
spodu opřen přes axiál-
ní ložisko odpruženou
vložkou. Toto zaříze-
ní přidržuje vzorek
po přestřihnutí kolíku
v záběru s vrtákem
a zároveň umožňuje po-
hyb ve směru osy vrtá-
ku dokud se nevypne
automatický posuv a
a stroj nezastaví. Cel-
kový pohled na zařízení
je na fotografii obr.
18 a 19 a detaily



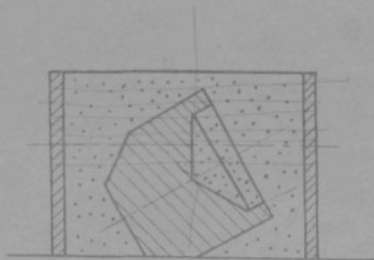
Obr. 20

jsou patrný na fotografii obr.č.20 a č. 21. Po přerušení řezu se vrták opatrně vyjme z místa řezu. Vzorek se zaleje



Obr.21

do dentakrylu a zpracuje normálním metalografickým způsobem na výbrus v příslušném řezu. Abychom mohli provést řez kořenu třísky kolmo na řeznou hranu, jsou vzorky upraveny



Obr.22

do tvaru, který je patrný na obr. č.22. To umožní získat řezy kolmé na řeznou hranu rovnoběžně se základnou zalitého vzorku. Vzorek před zpracováním je na obr.č.23.

Postup zkoušek

Vzorky z oceli 12060 byly vrtány vrtákem ČSN 22 1140 z rychlořezné oceli $\varnothing$ 20 na vrtačce BK 63. Vrták byl ostřen na brusce na vrtáky BNV 80. Jeho geometrie byla dle tabulky

čís. 1. Převýšení hlavních břitů bylo max. 0,01 mm, obvodové házení po upnutí do vřetene vrtačky max. 0,01 mm na konci vrtáku.



Obr. 23

Zkoušky byly prováděny při otáčkách $n_1 = 180$ ot/min, $n_2 = 250$ ot/min, $n_3 = 355$ ot/min, $n_4 = 500$ ot/min. a posuvch $s_1 = 0,125$ mm/ot, $s_2 = 0,18$ mm/ot, $s_3 = 0,25$ mm/ot, $s_4 = 0,355$ mm/ot. bez použití řezné kapaliny. Zároveň byl měřen koeficient přechování třísky tak, že byly odebrány vzorky z třísek odcházejících z obou hlavních břitů a tyto měřeny jednak číselníkovým úchylkoměrem s upraveným dotykiem, jednak po úpravě váženy.

Každý vzorek byl měřen a vážen na analytických vahách. Koeficient přechování byl počítán ze vztahů při měření

$$k = \frac{a_1}{a}$$

kde a_1 je naměřená tloušťka vzorku jako průměr z 10 měření. Při vážení

$$k = \frac{G}{\gamma \cdot a \cdot b \cdot l}$$

kde G je váha třísky v mg, a = tloušťka odebírané vrstvy v mm, b = šířka vzorku v mm, l = délka vzorku v mm. Z hodnot získaných vážením i měřením byly počítány průměrné

hodnoty, které jsou uvedeny v následující tabulce.

n ot/min	s mm/ot	k		
		r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	4,2	3,6	3,1
	0,180	3,82	3,35	2,95
	0,250	3,6	3,15	2,80
	0,355	3,45	3,0	2,70
250	0,125	3,9	3,3	2,9
	0,180	3,65	3,15	2,8
	0,250	3,5	3,0	2,65
	0,355	3,35	2,9	2,58
355	0,125	3,75	3,20	2,88
	0,180	3,55	3,10	2,75
	0,250	3,4	2,95	2,65
	0,355	3,25	2,85	2,55
500	0,125	3,55	3,3	2,9
	0,180	3,4	3,1	2,8
	0,250	3,25	2,95	2,7
	0,355	3,15	2,85	2,55

Tab.č.7

Dle vztahů

$$\cotg \beta_1 = \frac{k - \cos \sigma}{\sin \sigma} \quad (32)$$

$$\cotg \psi = 1 + \cotg \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma) \quad (27)$$

můžeme stanovit úhly β_1 a ψ .

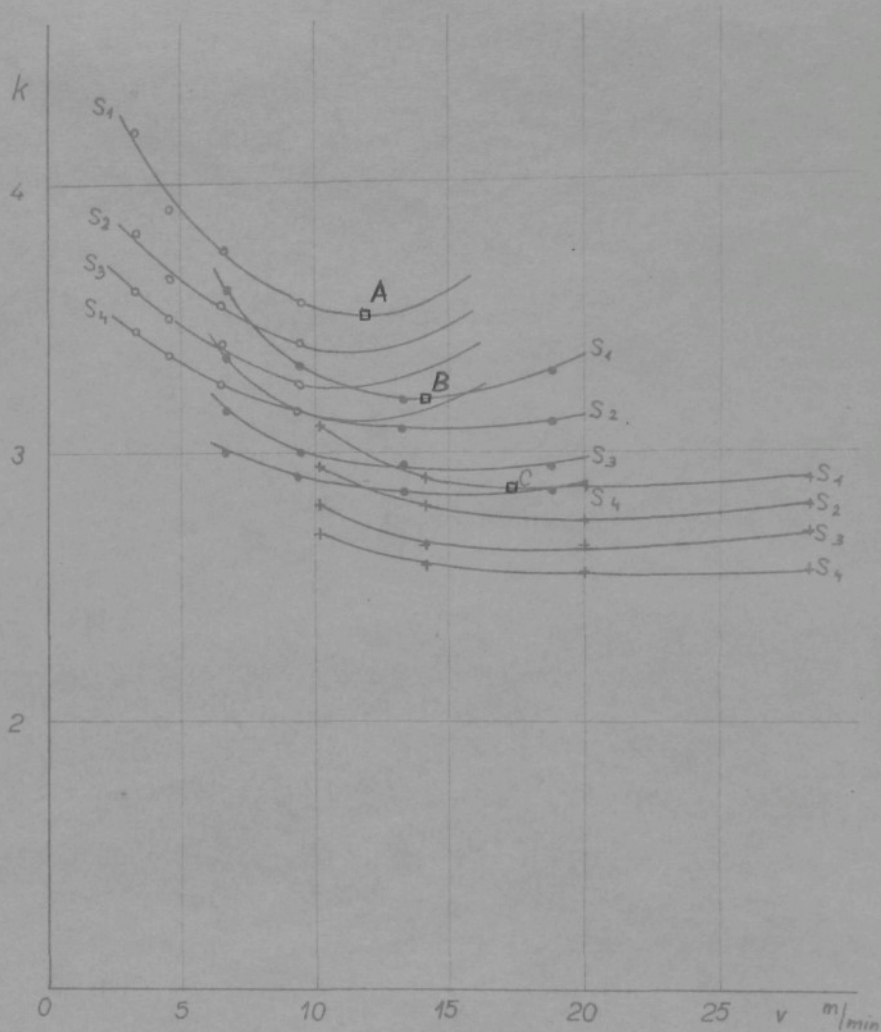
Jejich hodnoty jsou v tabulce č. 8.

n ot/min	s mm/ot	β_1			γ		
		r = 3	r = 6	r = 9	r = 3	r = 6	r = 9
180	0,125	12°45'	16°5'	18°50'	9°45'	12°25'	14°25'
	0,180	13°50'	17°15'	19°50'	10°25'	13°5'	14°55'
	0,250	14°42'	18°25'	20°55'	10°45'	13°40'	15°25'
	0,355	15°20'	19°20'	21°40'	11°5'	14°5'	15°
250	0,125	13°38'	17°35'	20°10'	10°12'	13°15'	15°5'
	0,180	14°40'	18°25'	20°55'	10°45'	13°40'	15°25'
	0,250	15°0'	19°20'	22°05'	11°	14°5'	15°55'
	0,355	15°45'	19°55'	22°45'	11°15'	14°25'	16°15'
355	0,125	14°15'	18°25'	20°15'	10°30'	13°40'	15°5'
	0,180	14°55'	18°45'	21°20'	10°55'	13°50'	15°35'
	0,250	15°35'	19°40'	22°5'	11°10'	14°15'	16°
	0,355	16°10'	20°20'	23°	11°30'	14°35'	16°25'
500	0,125	14°55'	17°35'	20°10'	10°55'	13°15'	15°5'
	0,180	15°35'	18°45'	20°55'	11°10'	13°50'	15°25'
	0,250	16°10'	19°40'	21°40'	11°30'	14°15'	15°35'
	0,355	17°25'	20°20'	23°	12°10'	14°30'	16°25'

Tab.č.8

Zjištěné hodnoty koeficientu péchování k jsou vyneseny do grafů (obr.č.24, 25 a 26).

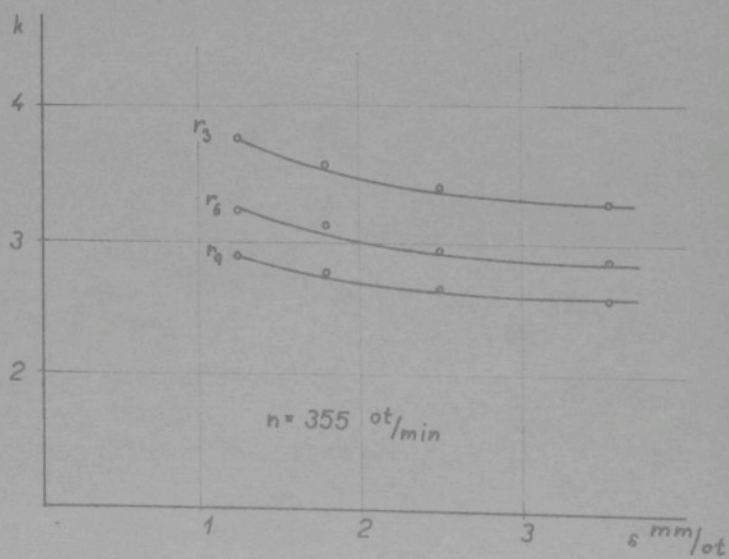
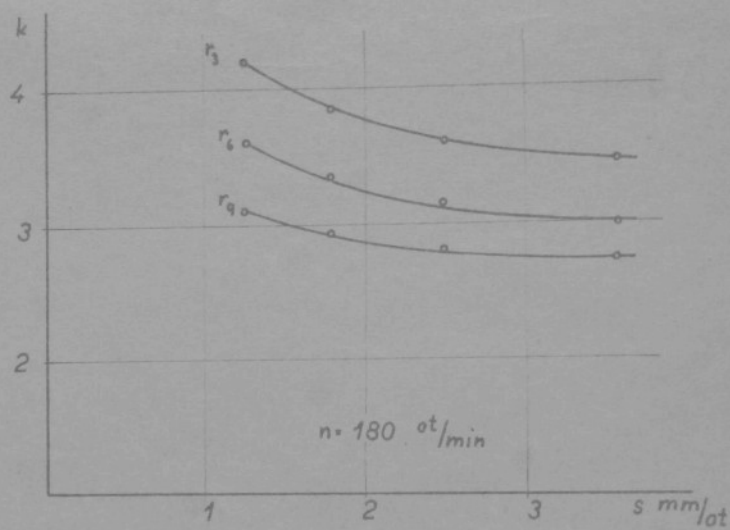
Jak vidět z grafu na obr.č.24 koeficient péchování třísky při zvyšování řezné rychlosti nejdříve na všech místech břitů klesá. Po dosažení určité řezné rychlosti začíná hodnota koeficientu k opět stoupat. Přitom minimum hodnoty k se dosáhne na poloměru $r=3$ mm při nižší řezné rychlosti než na poloměru $r=6$ mm a minimum na poloměru $r=9$ mm je při ještě vyšší řezné rychlosti (viz body A,B,C). Je to dáno především geometrií břitu. Směrem k ose vrtáku stoupá úhel řezu ϕ a můžeme předpokládat, že již při nižších řezných rychlostech dosáhneme



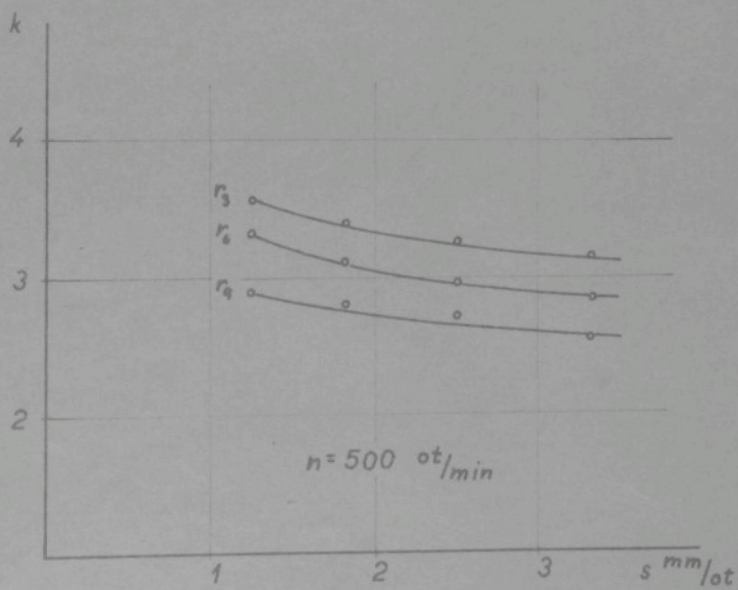
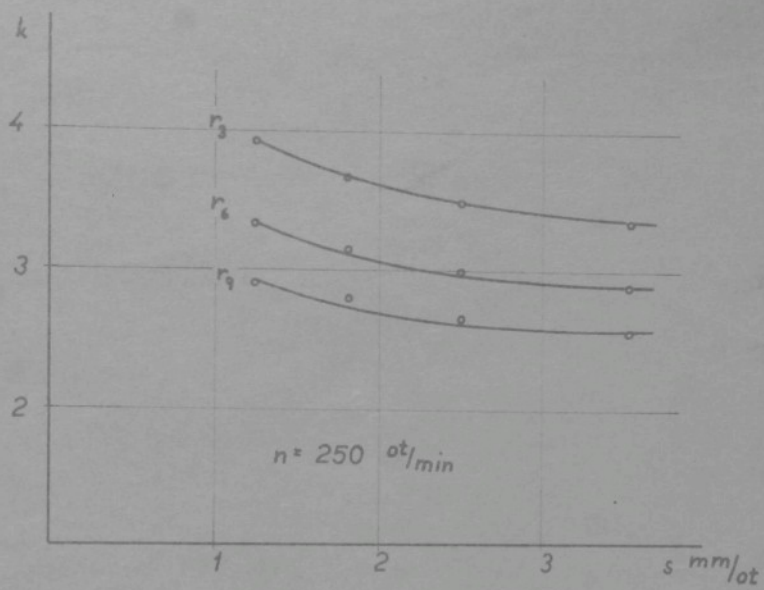
Obr.24 Závislost koeficientu pětování na řezné rychlosti

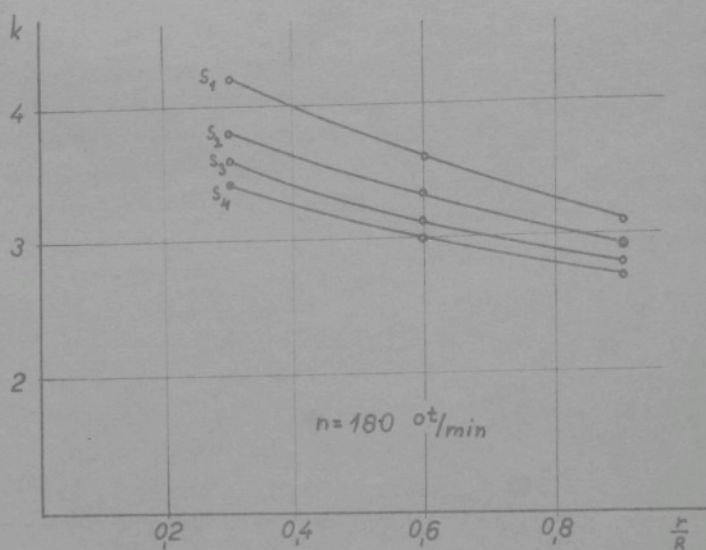
$s_1 = 0,125 \text{ mm/ot}$; $s_2 = 0,16 \text{ mm/ot}$

$s_3 = 0,25 \text{ mm/ot}$; $s_4 = 0,355 \text{ mm/ot}$

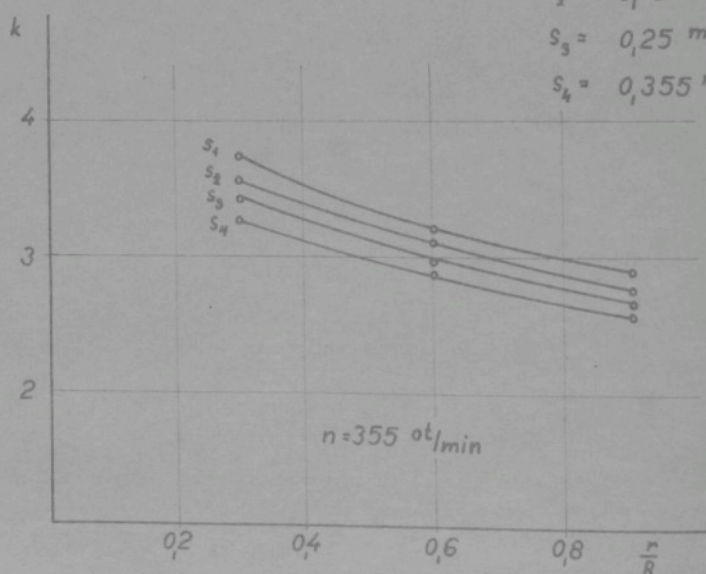


Obr.25 Závislost koeficientu přechování na posuvu.

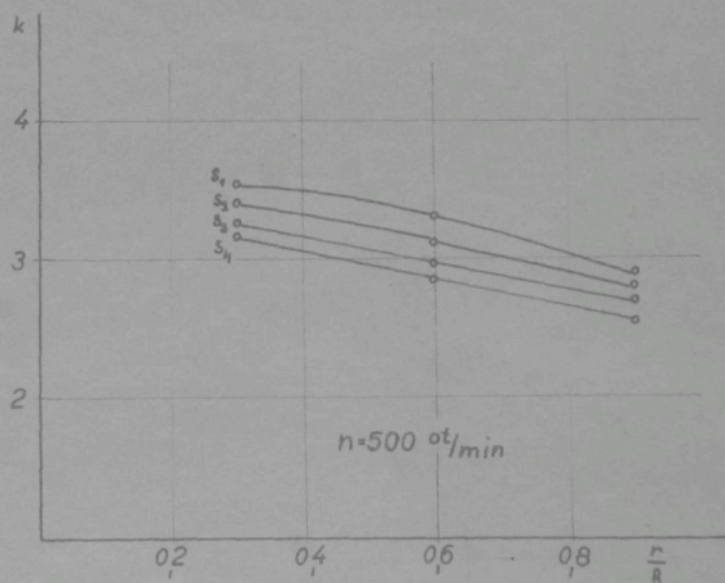
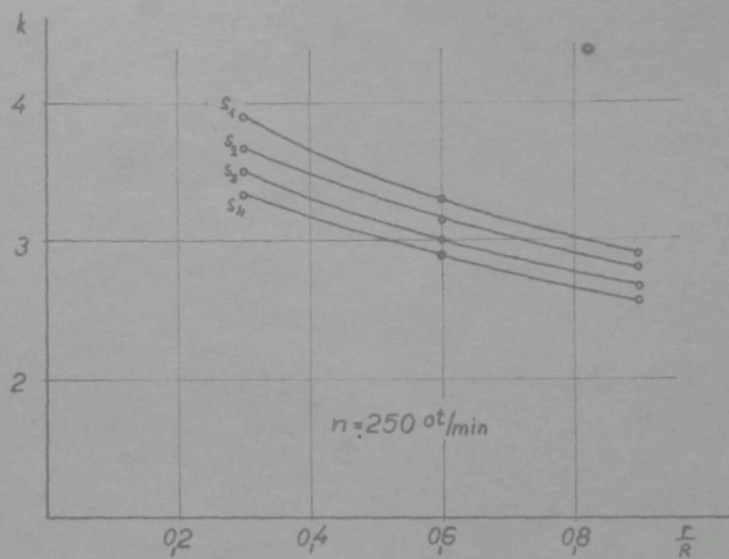




$$\begin{aligned} s_1 &= 0,125 \text{ mm/ot} \\ s_2 &= 0,18 \text{ mm/ot} \\ s_3 &= 0,25 \text{ mm/ot} \\ s_4 &= 0,355 \text{ mm/ot} \end{aligned}$$



Obr. 26 Průběh velikosti koeficientu přechování podél břítu



takových podmínek především teploty, při kterých bude mít materiál nejmenší deformační schopnost.

Další zvyšování řezné rychlosti nad hodnoty odpovídající bodům A na poloměru $r=3$ mm, B na poloměru $r=6$ mm a C na poloměru $r=9$ mm ovlivní také teplotu řezání a tím i deformační schopnost materiálu a tvorbu nárůstku.

Tvorba nárůstku ovlivňuje skutečnou geometrii břitu a bude podstatnou měrou působit na koeficient pýchování.

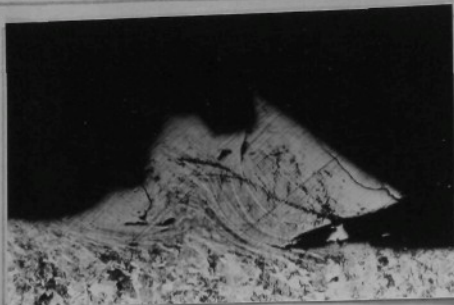
Vliv posuvu je patrný z grafu na obr.č.25. Vidíme, že zvětšením posuvu, tj. tloušťky odřezávané vrstvy hodnota koeficientu pýchování klesá s ohledem na menší průměrnou deformaci odebíraného materiálu jako následek nerovnoměrnosti plastické deformace v celém průřezu třísky. Přitom pokles je zpočátku prudší, pak se zmenšuje a lze předpokládat ustálení na určité optimální hodnotě k .

Na obr.č.26 jsou vyneseny průběhy koeficientu pýchování podél hlavního ostří v závislosti na vzdálenosti od osy vrtáku. Vidíme, že směrem k obvodu hodnoty k klesají téměř lineárně. Při nižších řezných rychlostech je pokles prudší, než u vyšších.

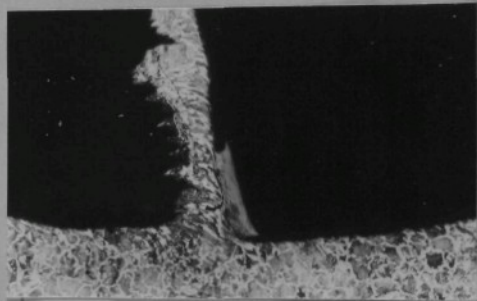
Na fotografiích obr. 27, 28, 29 a 30 jsou kořeny třísek získané přerušením řezu při řezných podmínkách, které byly dříve popsány. Jednotlivé snímky odpovídají řezům:

- A - na příčném břitu,
- B - na poloměru 3 mm,
- C - na poloměru 6 mm,
- D - na poloměru 9 mm.

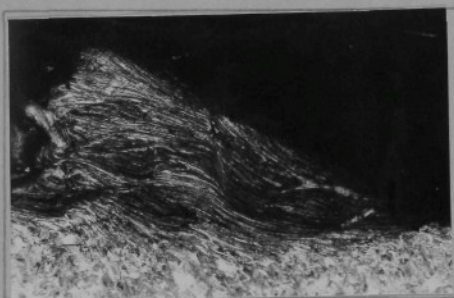
Je vidět, že proces tvoření třísky při vrtání šroubovitými vrtáky je velmi složitý. Charakteristickým znakem je především tvorba nárůstku, který podstatnou měrou ovlivňuje geometrii břitu. Intensita tvorby nárůstku a jeho velikost se zmenšuje směrem k obvodu vrtáku. Na základě získaných snímků lze vyslovit tézi, že zejména na příčném břitu je tvorba nárůstku rozhodujícím činitelem při vnikání tohoto břitu do materiálu. Nárůstek zde vytváří skutečný úhel čela, který se výrazně neliší od úhlu čela na hlavním břitu v těsné blízkosti břitu příčného. Skutečný úhel řezu se tím z původních 149° mění na 95° až 115° . Ale také na hlavním břitu, kde nárůstek sice nedosahuje takových hodnot,



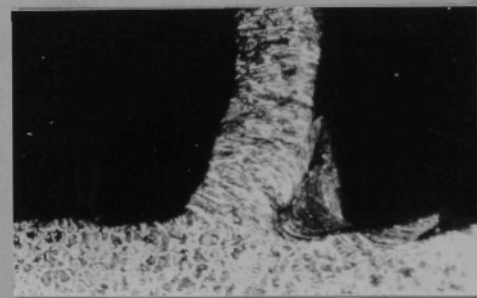
$n=180$ $s=0,125$ A



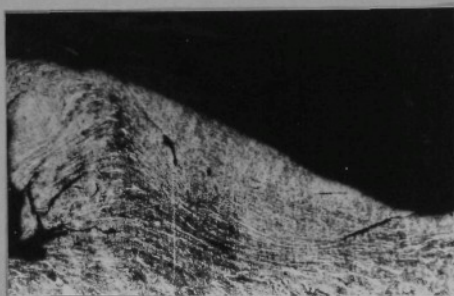
B



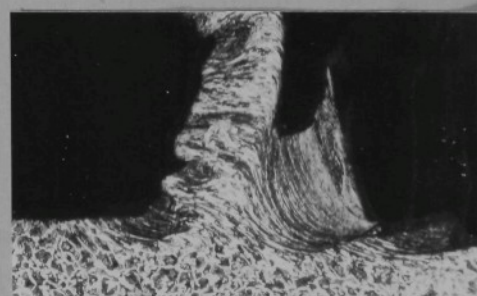
$n=180$ $s=0,18$ A



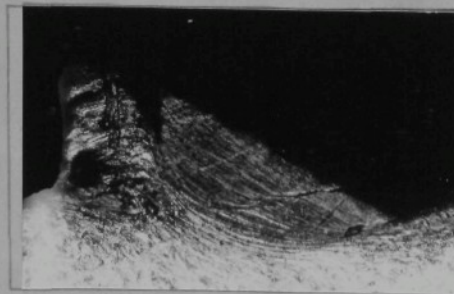
B



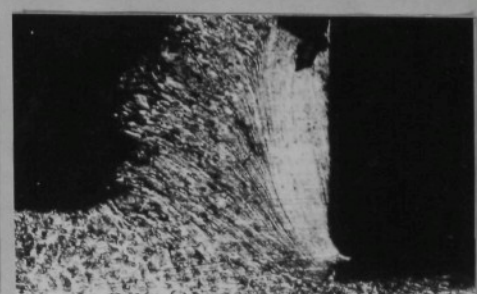
$n=180$ $s=0,25$ A



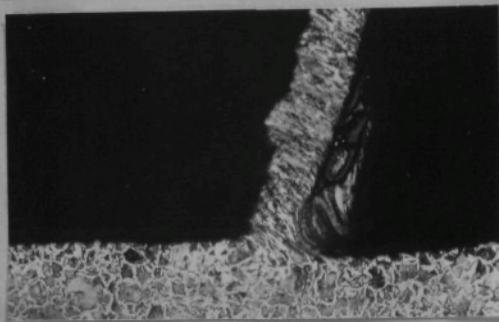
B



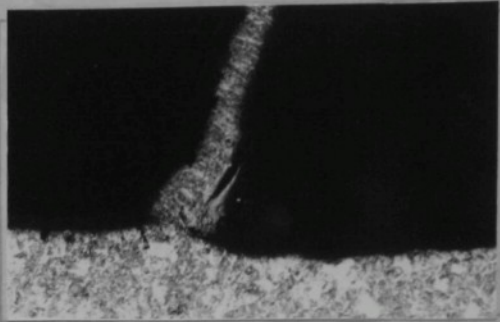
$n=180$ $s=0,355$ A



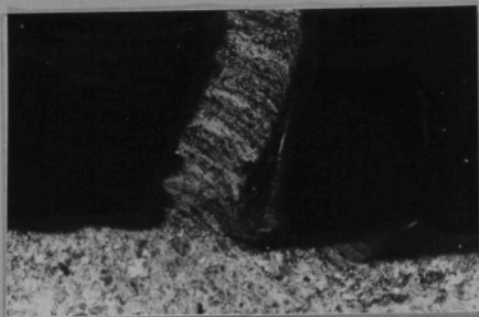
B



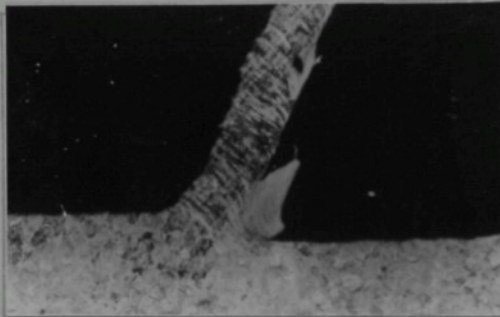
C



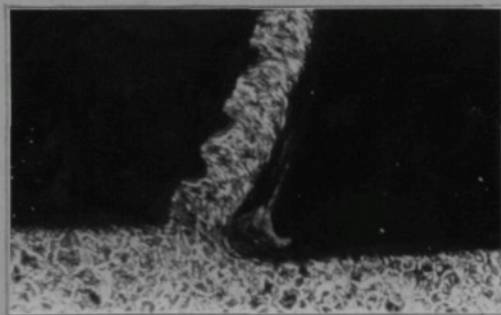
D



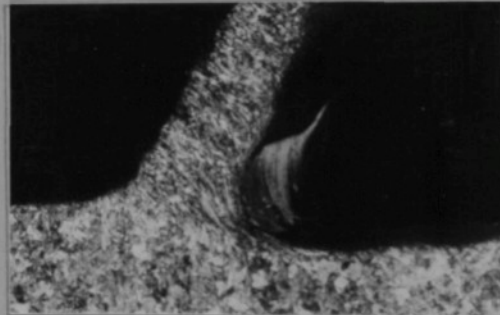
C



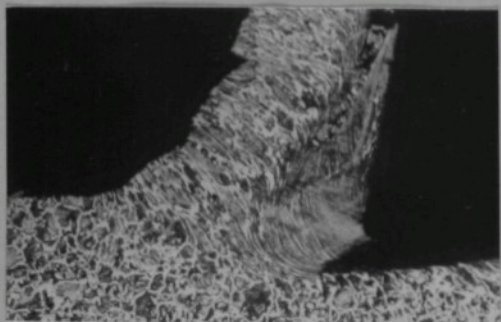
D



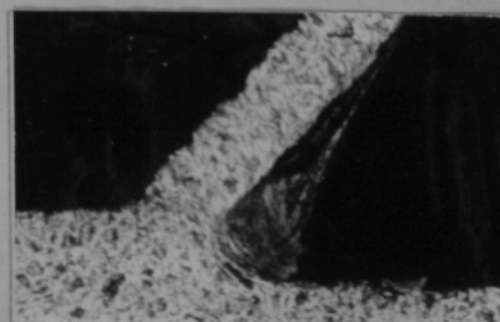
C



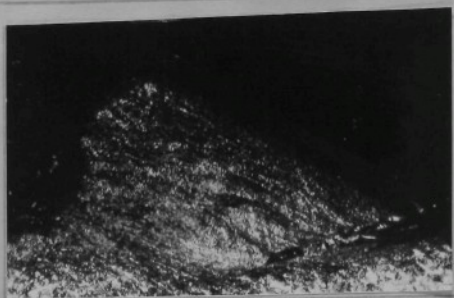
D



C



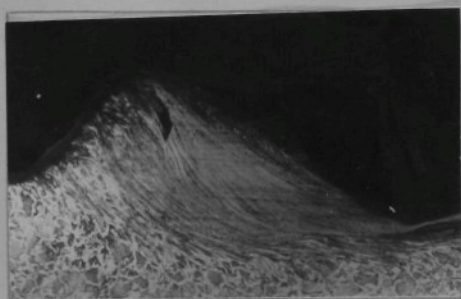
D



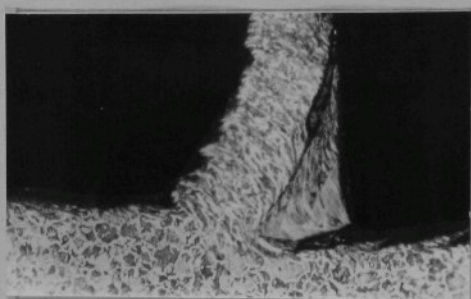
$n = 250$ $s = 0,125$ A



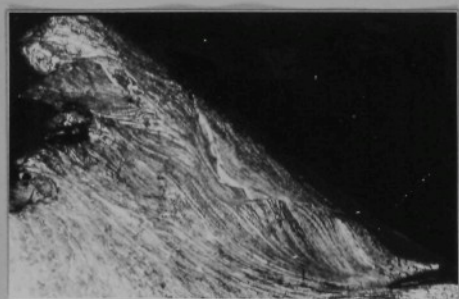
B



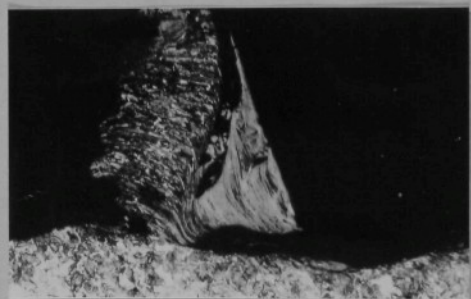
$n = 250$ $s = 0,18$ A



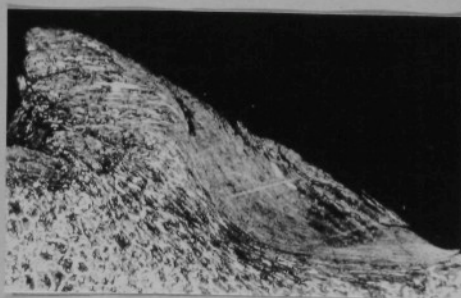
B



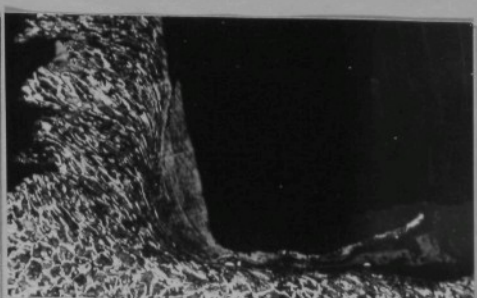
$n = 250$ $s = 0,25$ A



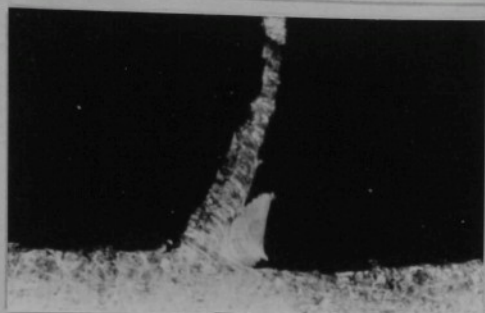
B



$n = 250$ $s = 0,355$ A



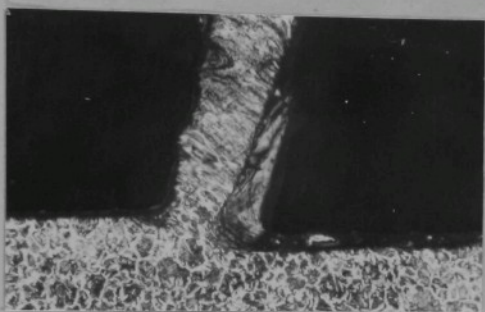
B



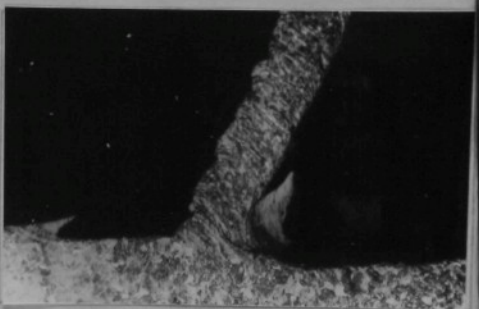
C



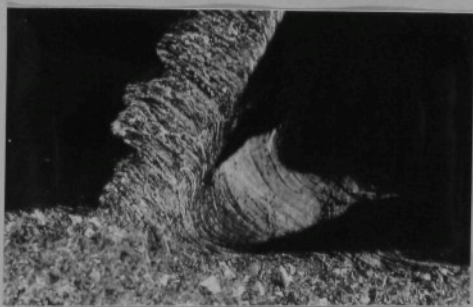
D



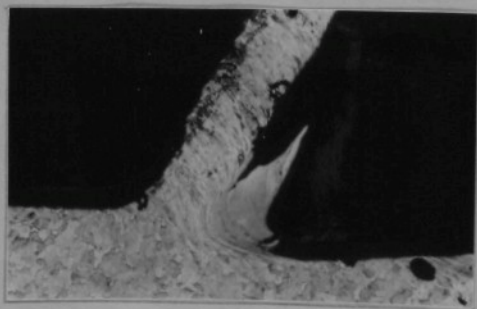
C



D



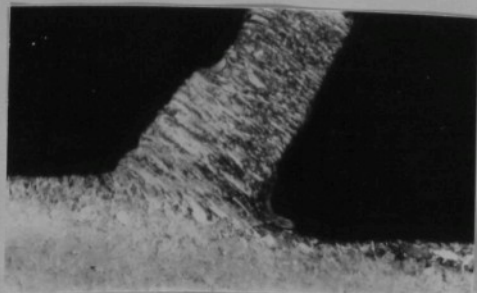
C



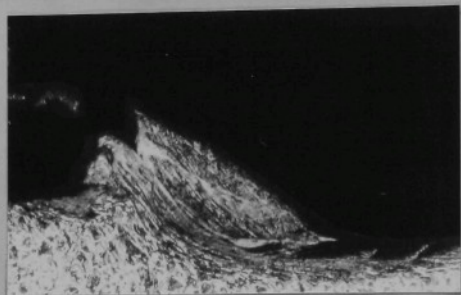
D



C



D



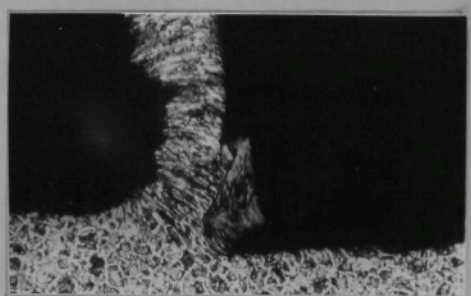
$n = 355$ $s = 0,125$ A



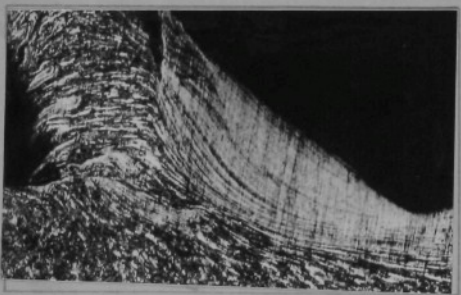
B



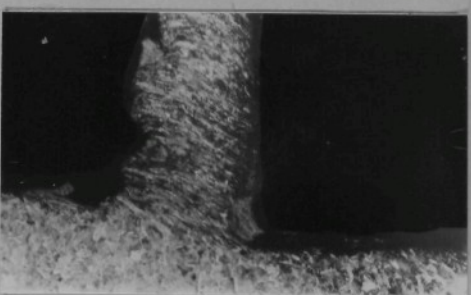
$n = 355$ $s = 0,18$ A



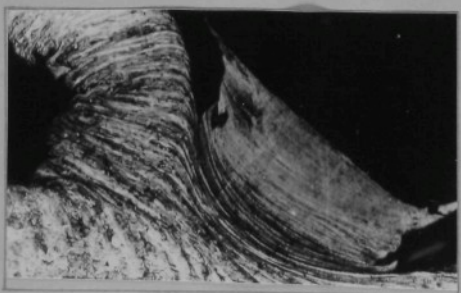
B



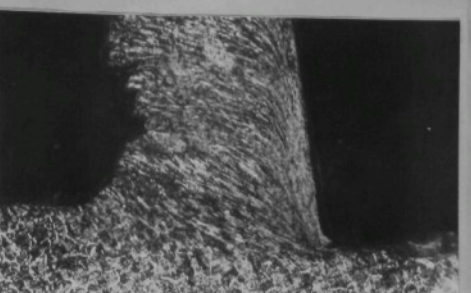
$n = 355$ $s = 0,25$ A



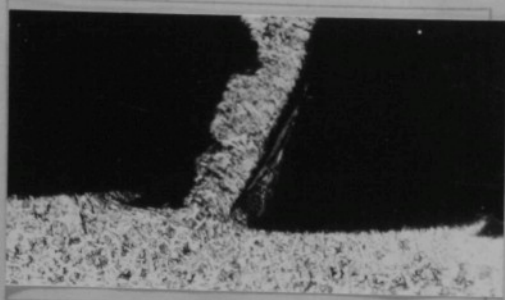
B



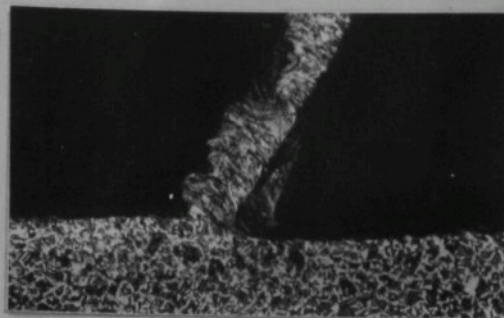
$n = 355$ $s = 0,355$ A



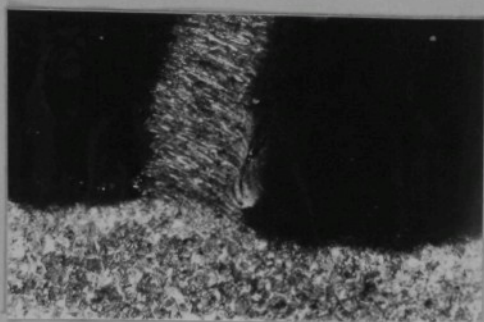
B



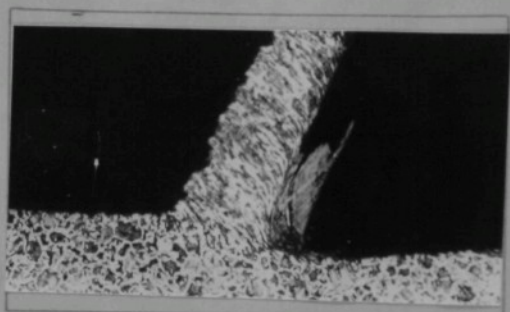
C



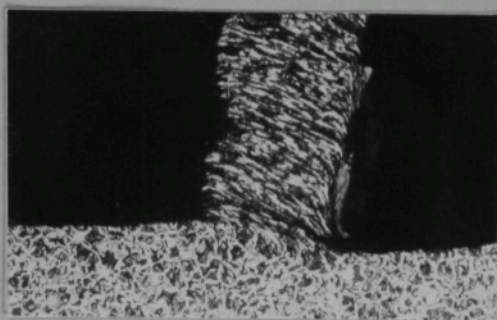
D



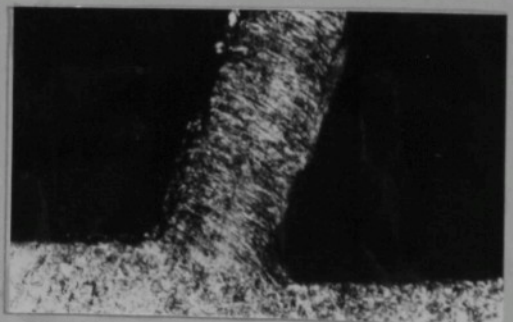
C



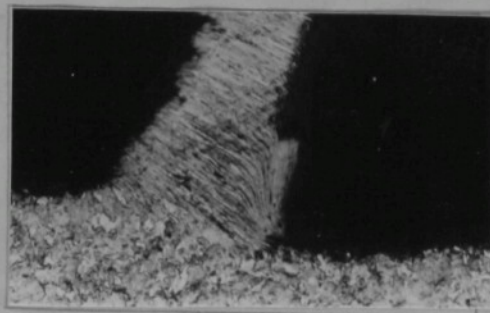
D



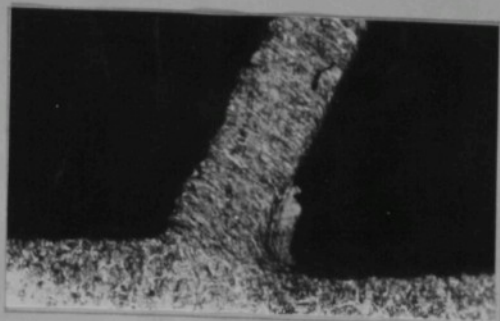
C



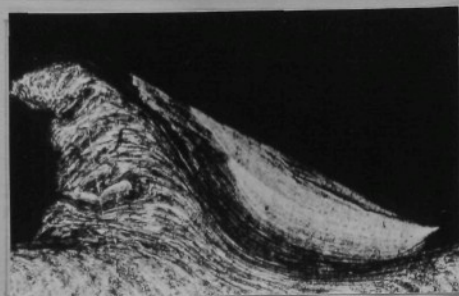
D



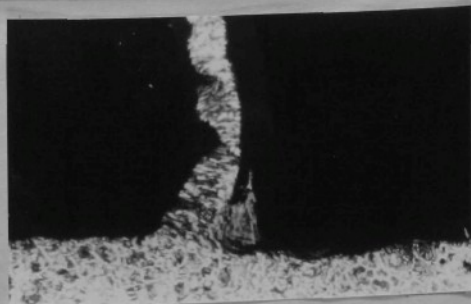
C



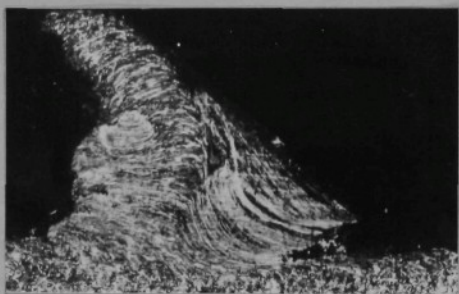
D



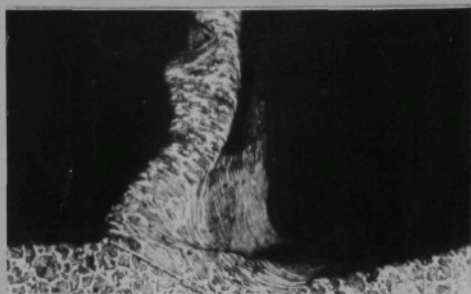
$n = 500$ $s = 0,125$ A



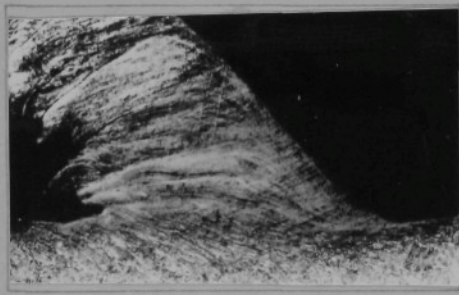
B



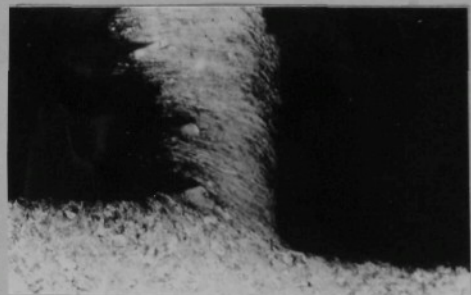
$n = 500$ $s = 0,18$ A



B



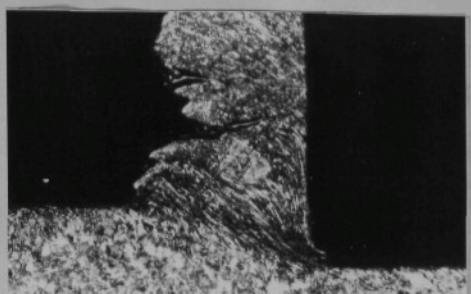
$n = 500$ $s = 0,25$ A



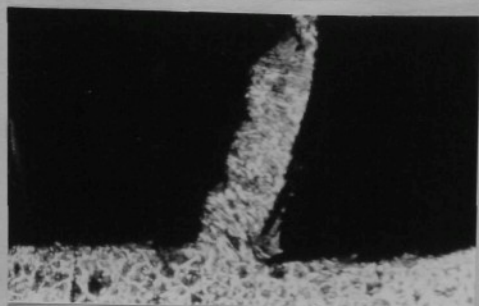
B



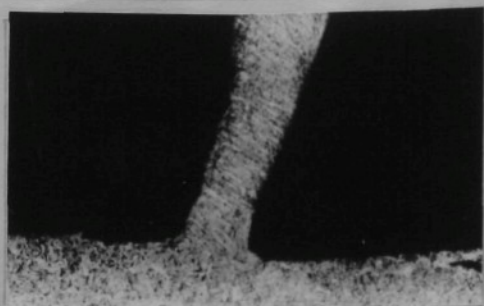
$n = 500$ $s = 0,355$ A



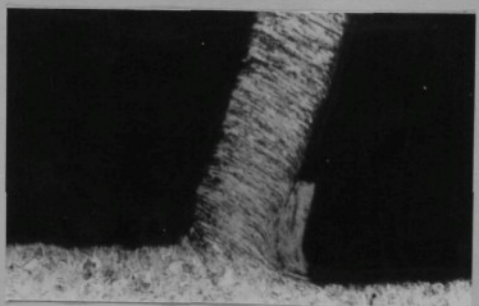
B



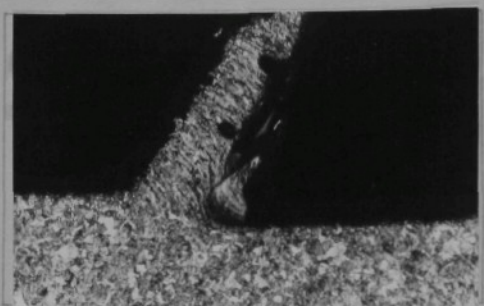
C



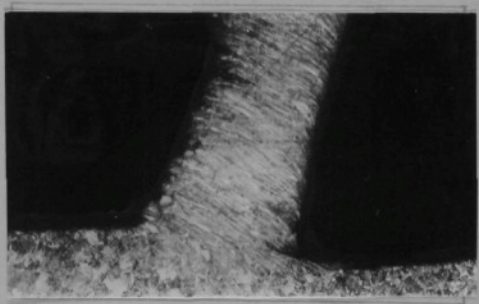
D



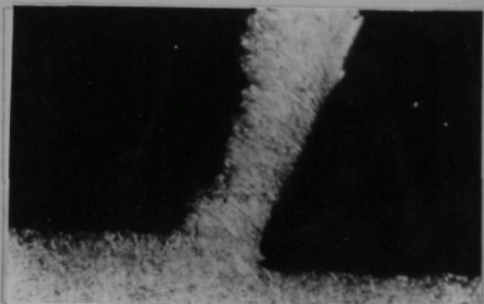
C



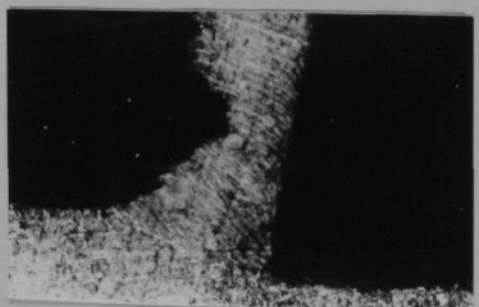
D



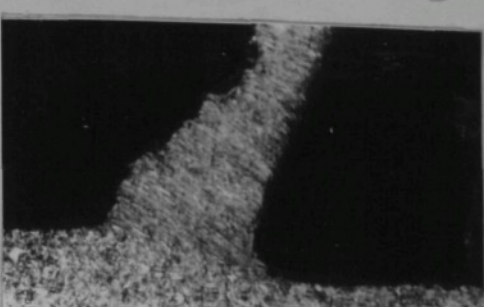
C



D



C



D

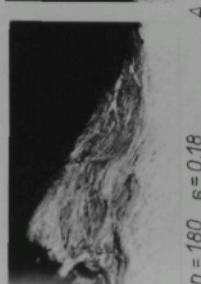
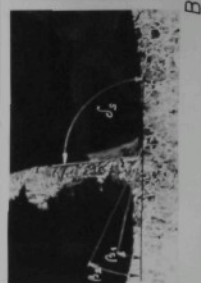
mění geometrii břitu zejména úhel řezu dosti značně. Tvorba nárůstku však ovlivňuje i úhel břitu, protože nárůstek obaluje celé ostří, "prodlužuje" břit a vytváří radius na řezné části, který jak vidět z fotografií kořenů třísky dosahuje značných hodnot. To vede k tomu, že při porušení nárůstku a při jeho odchodu z břitu nám skutečný břit bude zabírat menší hloubku řezu neodpovídající polovině posuvu. Vidíme to na obrázku kořenů třísek 180/0,18 B, 180/0,18 C, 180/0,25 B, 180/0,355 C, 250/0,125 D a dalších. Důsledek toho bude nerovnoměrné odebrání materiálu a tím také nerovnoměrné zatížení břitu, tedy kolísání řezných sil, jak síly osové tak krouticího momentu. Tato nerovnoměrnost může při vhodné frekvenci vyvolat velmi intenzivní torsní chvění nástroje, které vede k jeho poškození. Mimo tento vliv tvorba tak velikých nárůstků působí nepříznivě na rovnoměrné zatížení obou břitů. Ukázalo se, že zatím co na jednom břitu v určitém místě nárůstek dosahuje maxima, na druhém břitu v místě souměrném se právě začíná tvořit. Tato nerovnoměrnost protilehlých míst břitů se v souhrnu, když uvažujeme břit jako celek, částečně vyrovnává tím, že se nárůstek netvoří na celé délce břitu rovnoměrně. Jak vidíme porovnáním kořenů třísek B, C, D, u některých dosahuje nárůstek maxima na poloměru $r=6$ mm (obr.C), jinde na poloměru $r=3$ (obr.B) nebo někdy i na poloměru $r=9$ (obr.D).

Srovnáme-li skutečné hodnoty úhlů řezu jak jsou patrné z obrázků č. 31, 32, 33 a 34 kde jsou zmenšené snímky kořenů třísek s vyznačenými úhly β_1 , β_2 a skutečnými úhly řezu α_f vidíme, že tyto hodnoty v některých případech neodpovídají hodnotám vypočteným. Odchyłky jsou zaviněny právě nestejnou tvorbou nárůstku, který na získaném kořenu třísky neodpovídá průměrné hodnotě. Přitom koeficient pěchování byl měřen na více místech třísky a jeho hodnotu lze s daleko větší jistotou považovat za skutečnou průměrnou hodnotu odpovídající daným reálným podmínkám, než údaje získané z přerušného řezu. Opakovat tyto zkoušky vícekrát je časově velmi náročné. Uvážíme-li že bylo při zkouškách celkem získáno přes 250 kořenů třísek, můžeme získané údaje považovat za dobře reprodukovatelné skutečné poměry ^{tvoreni} třísky při vrtání šroubovitými vrtáky.

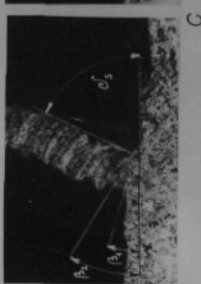
Srovnáme-li hodnoty jak vypočtené ze vztahů č. (27) a (32) tak získané experimentálně s hodnotami, které jsme určili čistě teoreticky na základě literárních údajů koeficientů tření vidíme, že hodnoty jež platí pro volné řezání jsou v celku srovnatelné s hodnotami získanými experimentálně. Nižší hodnoty úhlů β_1 a větší koeficient přechování u teoreticky získaných hodnot lze odůvodnit tím, že skutečný úhel řezu α_s bude v důsledku nárůstku menší a také se bude měnit koeficient tření. Také předpoklad konstantního koeficientu vnitřního tření není plně odpovídající skutečnosti. Lze však předpokládat, že hodnota třecího úhlu $\mu_1 = 10^\circ$ je hodnotou spíše minimální, než střední. Některé prameny udávají hodnoty vyšší. Zvětšením μ_1 by se však úhel β_1 dále snížil a zvětšil by se koeficient přechování. Vliv nárůstku na tvorbu třísky by se uplatnil ve formě ještě větších rozdílů mezi hodnotami vypočtenými a získanými experimentálně.



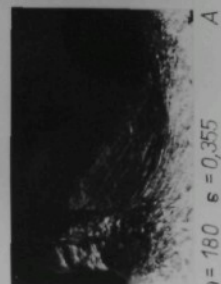
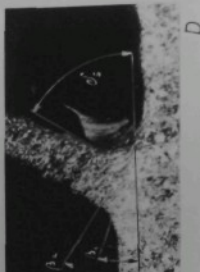
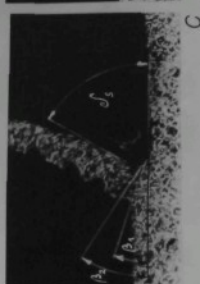
$n = 180 \quad s = 0,125$



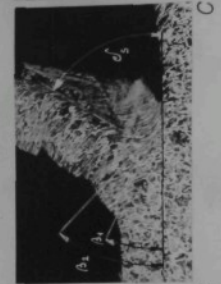
$n = 180 \quad s = 0,18$



$n = 180 \quad s = 0,25$



$n = 180 \quad s = 0,355$

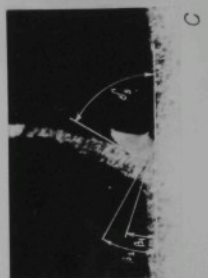




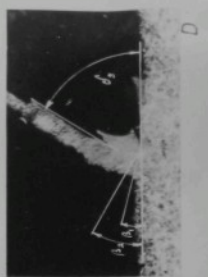
$n = 250 \quad s = 0,125$



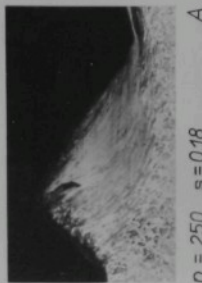
B



C



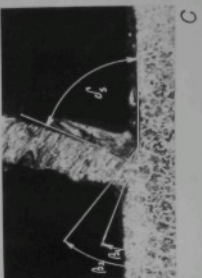
D



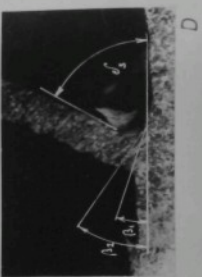
$n = 250 \quad s = 0,18$



B



C



D



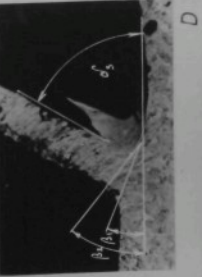
$n = 250 \quad s = 0,25$



B



C



D



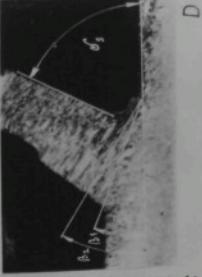
$n = 250 \quad s = 0,355$



B



C



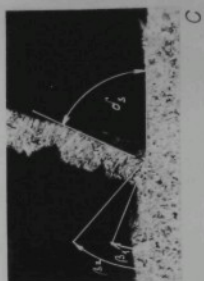
D



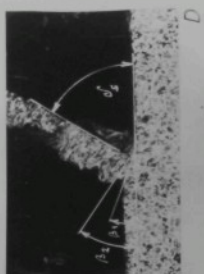
$\eta = 355 \quad s = 0,125$



B



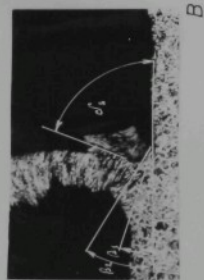
C



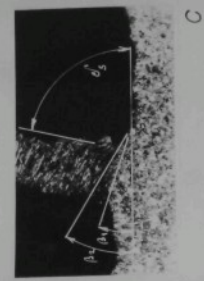
D



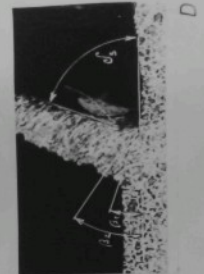
$\eta = 355 \quad s = 0,18$



B



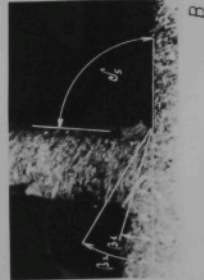
C



D



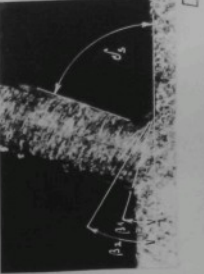
$\eta = 355 \quad s = 0,25$



B



C



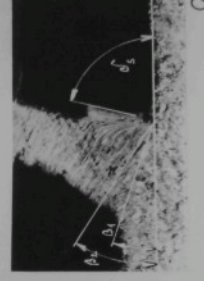
D



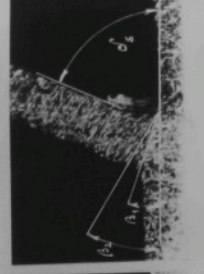
$\eta = 355 \quad s = 0,355$



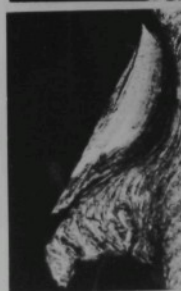
B



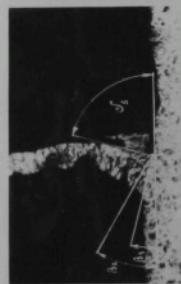
C



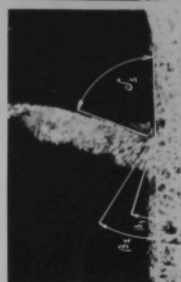
D



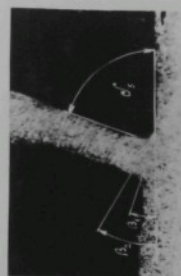
$n=500 \quad s=0,125$



B



C



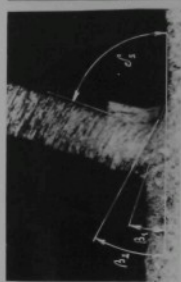
D



$n=500 \quad s=0,18$



B



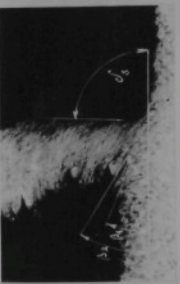
C



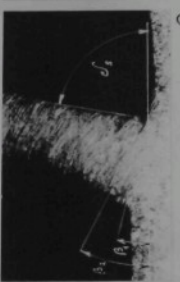
D



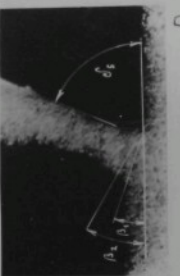
$n=500 \quad s=0,25$



B



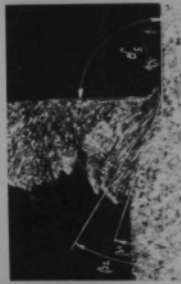
C



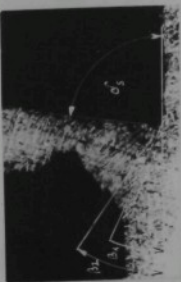
D



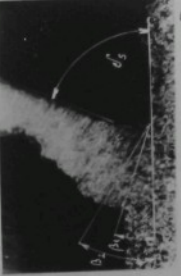
$n=500 \quad s=0,355$



B



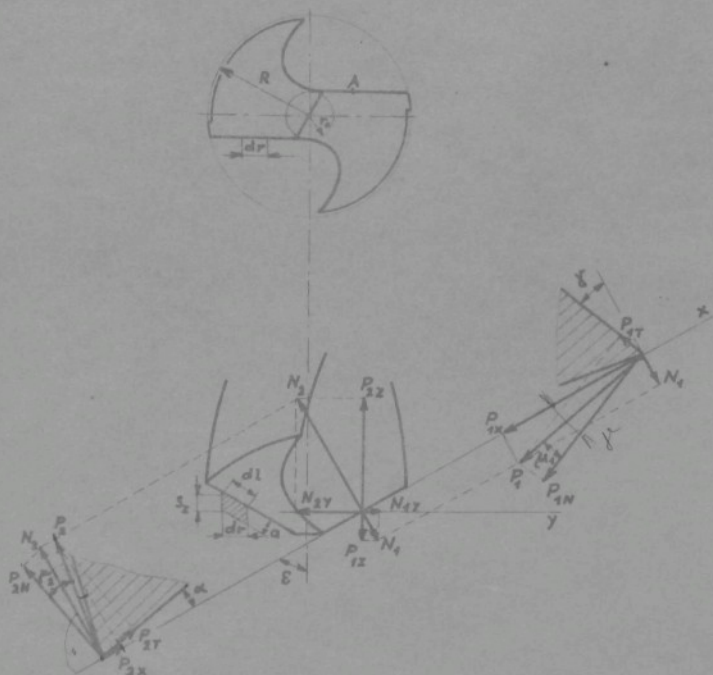
C



D

Analýza řezných sil při vrtání

Výsledná síla, kterou musíme působit na šroubovitý vrták, abychom oddělili odřezávanou vrstvu materiálu, je závislá na velikosti síly působící na hlavní břity, síly působící na příčném břitu a síly potřebné k překonání tření fazetky vrtáku ve vrtaném otvoru.



Obr. 35

Na hlavním břitu uvažujeme sílu působící na element břitu v délce dl , v místě A na poloměru r . Síly působící na čelo označme indexem 1 a síly působící na hřbet indexem 2. Na čelo působí normální síla P_{1N} a na hřbet normální síla P_{2N} . Jak vyplývá z obrázku 35 působením síly P_{1N} na čelo vzniká jako výslednice tečných napětí na stykové ploše třísky s čelem, případně od smykových napětí ve

váznoucí vstřívě na čela, síla tření P_{1T} . Výslednici sil P_{1N} a P_{1T} můžeme rozložit do směru osy x na složku P_{1x} a na složku N_1 k ní kolmou.

Obdobně na hřbetě působením normální síly P_{2N} vzniká síla tření P_{2T} . Výslednici obou těchto sil můžeme opět rozložit do směru osy x na složku P_{2x} a na složku N_2 .

Součet sil P_{1x} a P_{2x} je vlastně hlavní řezná síla a bude určovat velikost krouticího momentu M_k . Síly N_1 a N_2 můžeme rozložit do směru osy y na složky N_{1y} a N_{2y} a do směru osy z na složky P_{1z} a P_{2z} . Součet sil P_{1z} a P_{2z} bude určovat osové síly. Síly ve směru osy y jsou při správném naostření vrtáku v rovnováze.

Dle obrázku 35 můžeme psát

$$P_1 = \frac{P_{1N}}{\cos \mu_1} \quad (33)$$

$$P_{1x} = P_1 \cos (\gamma - \mu_1) = P_{1N} \frac{\cos (\gamma - \mu_1)}{\cos \mu_1} \quad (34)$$

$$P_2 = \frac{P_{2N}}{\cos \mu_2} \quad (35)$$

$$P_{2x} = P_2 \sin (\mu_2 - \alpha) = P_{2N} \frac{\sin (\gamma - \mu_1)}{\cos \mu_2} \quad (36)$$

$$N_1 = P_1 \sin (\gamma - \mu_1) = P_{1N} \frac{\sin (\gamma - \mu_1)}{\cos \mu_1} \quad (37)$$

$$P_{1z} = N_1 \sin \varepsilon = P_{1N} \frac{\sin (\gamma - \mu_1) \sin \varepsilon}{\cos \mu_1} \quad (38)$$

$$N_2 = P_2 \cos (\mu_2 - \alpha) = P_{2N} \frac{\cos (\mu_2 - \alpha)}{\cos \mu_2} \quad (39)$$

$$P_{2z} = N_2 \sin \varepsilon = P_{2N} \frac{\cos (\mu_2 - \alpha) \sin \varepsilon}{\cos \mu_2} \quad (40)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že velikost síly P_{1x} , N_1 a P_{1z} , které jsou závislé na úhlu γ , se bude podél bříty měnit. Síla N_1 a P_{1z} bude mít v určitém bodě, ve kterém $\mu_1 = \gamma$, nulovou hodnotu a pak směrem k ose vrtáku bude nabývat záporných hodnot. Obdobně se budou měnit v závislosti na úhlu α , který se mění dle způsobu ostření,

velikosti sil P_{2x} , N_2 a P_{2z} . Ze vztahů odvozených pro síly působící na element břitu můžeme stanovit celkový krouticí moment a osovou sílu.

$$M_k = 2 \sum_{r_0}^R (P_{1x} + P_{2z}) r + M_{kp} + 2M_{kf} \quad (41)$$

po dosazení

$$M_k = 2 \sum_{r_0}^R \left[\frac{P_{1N} \cos(\gamma - \mu_1)}{\cos \mu_1} + \frac{P_{2N} \sin(\mu_2 - \alpha)}{\cos \mu_2} \right] r + M_{kp} + M_{kf} \quad (42)$$

M_{kp} = moment na příčném břitu

M_{kf} = moment od tření lásky ve vrtaném otvoru

r_0 = poloměr počátku hlavního břitu ($r_0 = 0,5$ délky příčného břitu)

analogicky osová síla P_z

$$P_z = 2 \sum_{r_0}^R (P_{2z} - P_{1z}) + P_P + 2P_F \quad (43)$$

$$P_z = 2 \sin \varepsilon P_{2N} \frac{\cos(\mu_2 - \alpha) P_{1N} \sin(\gamma - \mu_1)}{\cos \mu_2 \cos \mu_1} + P_P + 2P_F \quad (44)$$

V rovnicích (42) a (44) jsou neznámé P_{1N} , P_{2N} , μ_1 , μ_2 . Celkovou tangenciální sílu můžeme však uvažovat dle vztahu

$$dP_x = P_1 \cdot a \cdot dl \quad (45)$$

P_1 = specifický řezný odpor, jehož hodnoty jsou stanoveny pro průřez třísky 1 mm^2 ($a=1$, $b=1$) a úhel $\sigma = 60^\circ$.

Obecně musíme tedy uvažovat v závislosti na tloušťce třísky

$$p_a = \frac{P_1}{a^x}$$

a v závislosti na úhlu σ

$$p_s = \frac{P_1}{60^\circ}$$

Můžeme tedy napsat

$$dP_x = \frac{P_1 \cdot \sigma \cdot a \cdot dl}{a^x \cdot 60^\circ} \quad (46)$$

dle obrázku 35

$$a = s_z \sin \varepsilon$$

$$dl = \frac{dr}{\sin \varepsilon}$$

pak

$$dP_x = p_1 \frac{s_z^{1-x}}{60^\circ \sin^x \varepsilon} dr \quad (47)$$

pro poloměr r stanovíme úhel řezu δ ze vztahu

$$\cotg \delta_r = \frac{\frac{r}{R}}{\cotg \delta_o} \quad (48)$$

kde R je poloměr vrtáku a δ_o je úhel řezu na obvodě závislý na stoupání šroubovice drážky. Obě tyto hodnoty jsou pro daný vrták konstantní, proto můžeme psát

$$\delta_r = \operatorname{arccotg} \frac{r}{K}, \quad K = \frac{R}{\cotg \delta_o}$$

pak

$$dP_x = \frac{p_1 s_z^{1-x}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^x \varepsilon} \cdot \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} dr \quad (49)$$

z toho moment na poloměru r

$$dM_k = 2dP_x r = \frac{p_1 s_z^{1-x} r \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} dr}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^x \varepsilon} \quad (50)$$

$$M_k = \frac{2p_1 s_z^{1-x}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^x \varepsilon} \int_{r_o}^R r \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} dr \quad (51)$$

$$M_k = \frac{2p_1 s_z^{1-x}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^x \varepsilon} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \left[\left(R^2 + \frac{R^2}{\cotg^2 \delta_o} \right) \operatorname{arc} \delta_o + \frac{R^2}{\cotg \delta_o} \right] - \left[\left(r^2 + \frac{R^2}{\cotg^2 \delta_o} \right) \operatorname{arc} \delta_r + \frac{r \cdot R}{\cotg \delta_o} \right] \right\} \quad (52)$$

Integrační meze uvažujeme od r = poloměru na počátku hlavního břitu do R = poloměr vrtáku. Představuje tedy M_k jenom hodnotu momentu od síly vznikající na hlavních břitech.

Moment na příčném břitu budeme uvažovat obdobně (obr.36).

Síla

$$dP_x = \frac{P_1 \cdot \delta}{a^x 60^\circ} \cdot a \cdot dl \quad (53)$$

pro příčný břit $a = s_z$, $dl = dr$

a σ se mění podél příčného řezu celkem zanedbatelně. Můžeme proto psát:

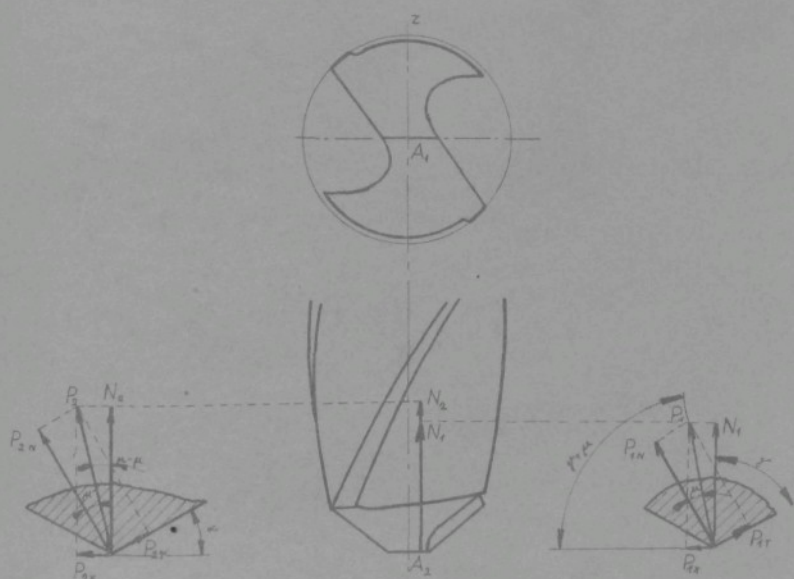
$$dP_{xP} = \frac{\sigma}{60^\circ} p_1 s_z^{1-x} dr \quad (54)$$

$$dM_{kP} = 2dP_x r dr \quad (55)$$

$$M_{kP} = 2 \int_0^r dP_x r dr \quad (56)$$

$$M_{kP} = 2p_1 \frac{\sigma}{60^\circ} s_z^{1-x} r dr \quad (57)$$

$$M_{kP} = p_1 \frac{\sigma}{60^\circ} s_z^{1-x} r^2 \quad (58)$$



Obr. 36

Pro osovou sílu můžeme provést také úvahu dle vztahu

$$dP_z = p_z a dl \quad (59)$$

hodnota p_z bude opět závislá na tloušťce třísky

$$p_{za} = \frac{p_z}{a}$$

a v závislosti na úhlu

$$p_z \delta = p_z \frac{\delta}{60^\circ}$$

tento vztah je analogický vztah (45). Proto můžeme psát dle rovnice (49)

$$dP_z = \frac{p_z s_z^{1-z} \operatorname{arccotg} \frac{r}{K}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^z \varepsilon} \quad (60)$$

z toho síla P_z na jednom hlavním břitu, tj. od poloměru r do R

$$P_z = \frac{p_z s_z^{1-z}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^z \varepsilon} \int_r^R \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} dr \quad (61)$$

$$P_z = \frac{p_z s_z^{1-z}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^z \varepsilon} \left\{ \left[R \operatorname{arccotg} \frac{R}{K} + \frac{K}{2} \ln (K^2 + R^2) \right] - \right. \\ \left. - \left[r \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} + \frac{K}{2} \ln (K^2 + r^2) \right] \right\}$$

po dosazení za $K = \frac{K}{\cotg \delta_o}$

$$P_z = \frac{p_z s_z^{1-z}}{\operatorname{arc} 60^\circ \sin^z \varepsilon} \left\{ \left[R \operatorname{arc} \delta_o + \frac{R}{2 \cotg \delta_o} \ln \left(\frac{R^2}{\cotg^2 \delta_o} + R^2 \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[r \operatorname{arc} \delta_o + \frac{R}{2 \cotg \delta_o} \ln \left(\frac{R^2}{\cotg^2 \delta_o} + r^2 \right) \right] \right\} \quad (62)$$

osová síla na polovině příčného břitu analogicky s rovnicí (54)

$$dP_{zP} = p_z \frac{\delta}{60^\circ} s_z^{1-z} dr \quad (63)$$

$$P_{zP} = p_z \frac{\delta}{60^\circ} s_z^{1-z} r \quad (64)$$

Osovou sílu můžeme dle obr.35 vyjádřit na hlavním břitu také ze vztahu

$$P_z = P_{1z} - P_{2z} \quad (65)$$

Dle vztahu (38) a (40)

$$P_{1z} = N_1 \sin \varepsilon$$

$$N_{2z} = N_2 \sin \varepsilon$$

Síly N_1 a N_2 můžeme vyjádřit v závislosti na velikosti síly P_x

$$N_1 = P_{1x} \operatorname{tg} (\gamma - \mu_1) \quad (66)$$

$$N_2 = P_{2x} \frac{1}{\operatorname{tg} (\mu_2 - \alpha)} \quad (67)$$

Úhel γ na poloměru r stanovíme ze vztahu:

$$\gamma_r = \operatorname{arctg} \frac{r}{R} \operatorname{tg} \gamma_0 \quad (68)$$

kde R je poloměr vrtáku a γ_0 je úhel čela na obvodě vrtáku, závislý na stoupání šroubovice drážky.

Označme

$$\frac{R}{\operatorname{tg} \gamma_0} = K_1$$

pak:

$$N_1 = P_{1x} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{r}{K_1} - \mu_1 \right) = P_{1x} \frac{\operatorname{tg} \operatorname{arctg} \frac{r}{K_1} - \operatorname{tg} \mu_1}{1 + \operatorname{tg} \mu_1 \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{r}{K_1} \right)} \quad (69)$$

$$N_1 = P_{1x} \frac{\frac{r}{K_1} - \operatorname{tg} \mu_1}{1 + \frac{r}{K_1} \operatorname{tg} \mu_1} = \frac{r - K_1 \operatorname{tg} \mu_1}{K_1 + r \operatorname{tg} \mu_1} P_{1x} \quad (70)$$

$$dP_{1z} = dN_1 \sin \varepsilon = dP_{1x} \sin \varepsilon \frac{r - K_1 \operatorname{tg} \mu_1}{K_1 + r \operatorname{tg} \mu_1} \quad (71)$$

Síla P_{1x} je částí síly P_x , jak byla vyjádřena vztahem (47).

Můžeme proto psát:

$$dP_{1x} = A dP_x$$

$$dP_{1z} = A P_1 \frac{dr}{60^\circ} s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varepsilon \frac{r - K_1 \operatorname{tg} \mu_1}{K_1 + r \operatorname{tg} \mu_1} dr$$

jak již bylo odvozeno - $\varphi_r = \operatorname{arccotg} \frac{r}{K}$

pak:

$$dP_{1z} = A \frac{P_1}{\operatorname{arc} 60^\circ} s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varepsilon \operatorname{arccotg} \frac{r(r - K_1 \operatorname{tg} \mu_1)}{K(K_1 + r \operatorname{tg} \mu_1)} dr \quad (72)$$

$$P_{1z} = A \frac{P_1}{\operatorname{arc} 60^\circ} s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varepsilon \int_r^R \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} \frac{r - K_1 \operatorname{tg} \mu_1}{K_1 + r \operatorname{tg} \mu_1} dr \quad (73)$$

obdobně

$$dP_{2z} = \frac{dP_{2x} \sin \varepsilon}{\operatorname{tg} (\mu_1 - \alpha)} \quad (74)$$

pro zjednodušení uvažujeme α jako konstantní.

Síla P_{2x} je částí síly dP_x .

$$dP_{2x} = B dP_x$$

pak:

$$dP_{2z} = B \frac{P_1}{\operatorname{arc} 60^\circ} s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varepsilon \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} \frac{1}{\operatorname{tg} (\mu_1 - \alpha)} dr \quad (75)$$

$$N_{2z} = B \frac{P_1}{\operatorname{arc} 60^\circ} s_z^{1-x} \sin^{1-x} \varepsilon \frac{1}{\operatorname{tg} (\mu_1 - \alpha)} \int_r^R \operatorname{arccotg} \frac{r}{K} dr \quad (76)$$

Osovou sílu na příčném břitu můžeme vyjádřit dle obr. 36 následovně. Úhel ε na příčném břitu budeme uvažovat nulový. Předpokládejme, že γ a α se podél příčného břitu nemění.

Pak:

$$P_{1zP} = N_{1P}, \quad P_{2zP} = N_{2P}$$

$$P_{zP} = N_{1P} + N_{2P}$$

$$N_{1P} = P_{1xP} \operatorname{tg} (\gamma + \mu_1) \quad (77)$$

$$N_{2P} = P_{2xP} \frac{1}{\operatorname{tg}(\mu_2 - \alpha)} \quad (78)$$

Síla P_{1xP} a P_{2xP} je částí síly P_x , můžeme tedy napsat:

$$P_{1xP} = A P_{xP}$$

$$P_{2xP} = B P_{xP}$$

$$dP_{1zP} = dP_{1xP} \operatorname{tg}(\gamma + \mu_1) \quad (79)$$

$$dP_{1zP} = A p_1 \frac{d\rho}{60^\circ} s_z^{1-x} \operatorname{tg}(\gamma + \mu_1) dr \quad (80)$$

$$P_{1zP} = A p_1 \frac{d\rho}{60^\circ} s_z^{1-x} \operatorname{tg}(\gamma + \mu_1) \int_0^r dr \quad (81)$$

$$P_{1zP} = A p_1 \frac{d\rho}{60^\circ} s_z^{1-x} \operatorname{tg}(\gamma + \mu_1) r \quad (82)$$

obdobně:

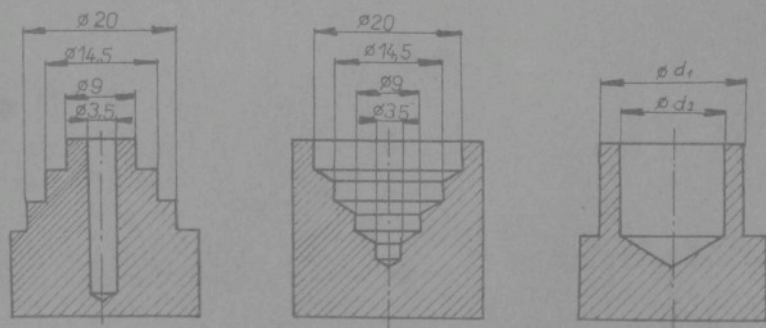
$$dP_{2xP} = \frac{dP_{2xP}}{\operatorname{tg}(\mu_2 - \alpha)} \quad (83)$$

$$dP_{2zP} = B p_1 \frac{d\rho s_z^{1-x}}{60^\circ \operatorname{tg}(\mu_2 - \alpha)} \int_0^r dr \quad (84)$$

$$P_{2zP} = B p_1 \frac{d\rho s_z^{1-x}}{60^\circ \operatorname{tg}(\mu_2 - \alpha)} r \quad (85)$$

Experimentální zkoumání řezných sil bylo prováděno na vrtačce BK 63. Byly použity vrtáky Ø 20 ČSN 22 1121 z rychlořezné oceli ostřené na vrtačce BNV 80. Vzorky z oceli 12060 měly tvar dle obr. 37. Osová síla a krouticí moment byly měřeny dynamometrem se snímači s odporovými tenzometry. Všechny vzorky byly vrtány při posuvu 0,125 mm/ot., 0,18 mm/ot., 0,25 mm/ot. a 0,355 mm/ot. a při otáčkách $n = 180, 250, 355, 500$ otáček za minutu. Výsledky měření jsou uvedeny v tabul-

kách č. 9, 10, 11, 12. Na obr. 38 vidíme závislost M_k na řezné rychlosti pro jednotlivé elementy tj. fázku, element mezi $d_1 = 20$ mm a $d_2 = 14,5$ mm, element mezi $d_1 = 14,5$ mm a $d_2 = 9$ mm, element mezi $d_1 = 9$ mm a $d_2 = 3,5$ mm.

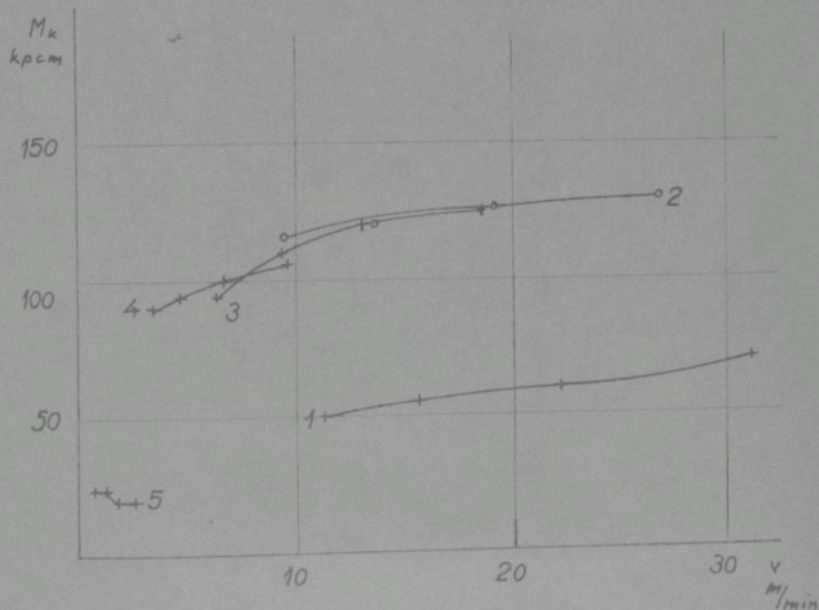
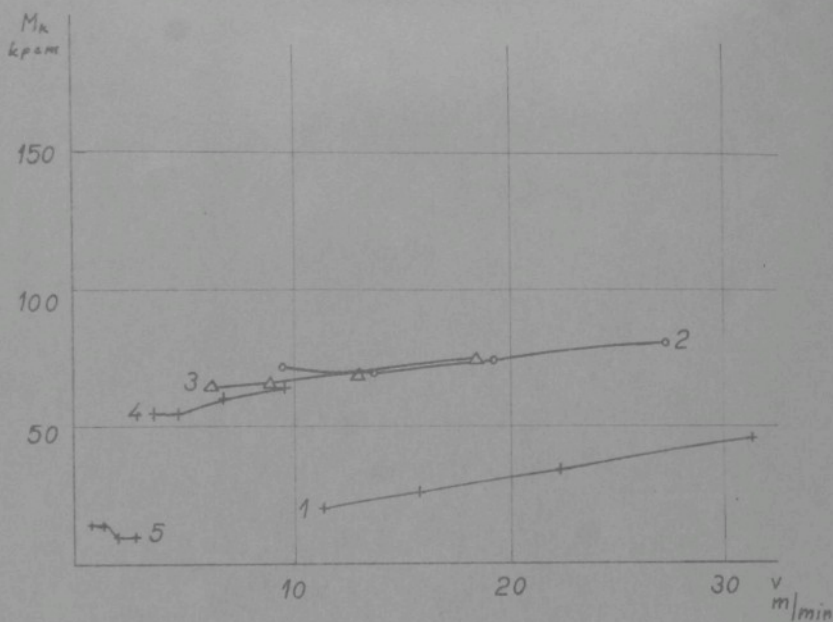


Obr. 37

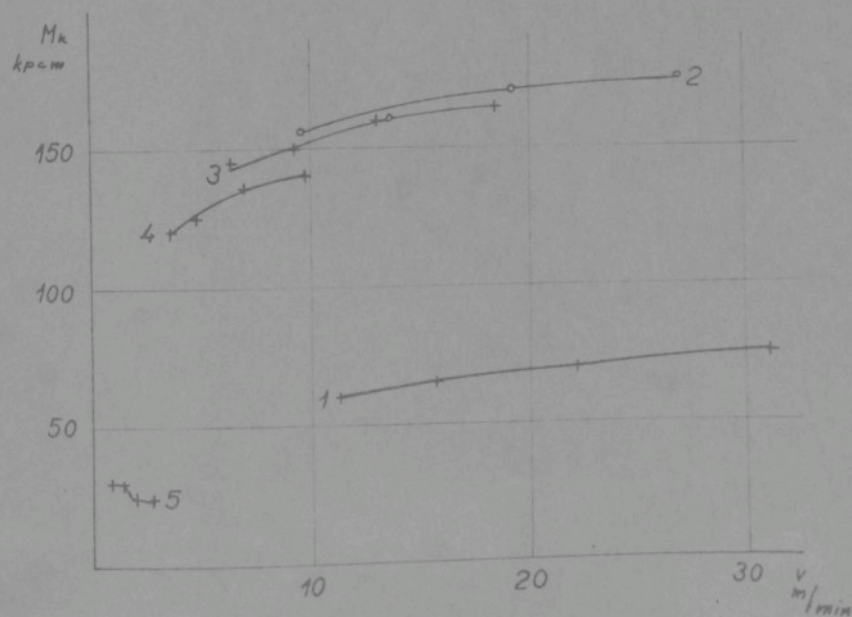
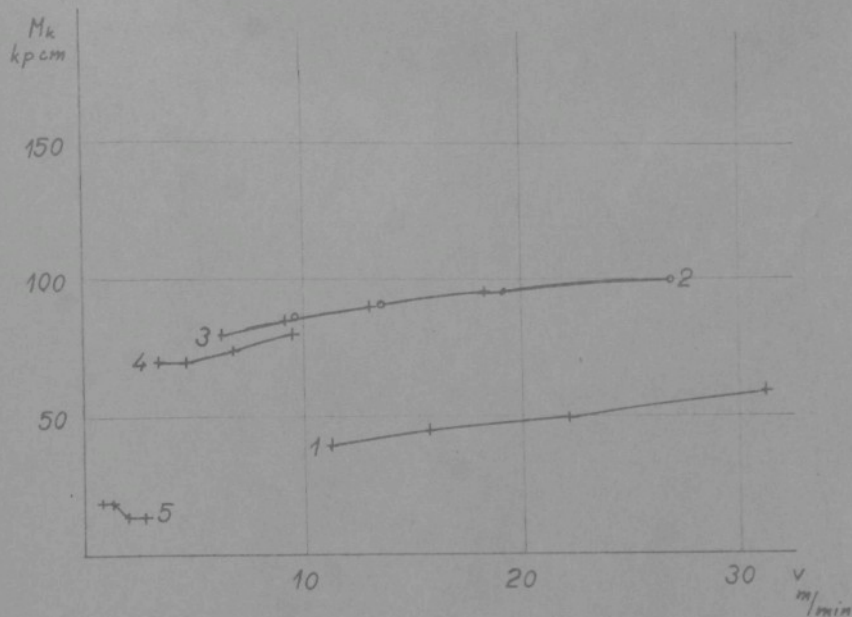
Krouticí moment se mění poměrně málo a stoupá téměř lineárně. Rozdíl mezi M_k při $n = 180$ ot/min a $n = 500$ ot/min je asi 10 % při posuvu 0,125 mm/ot. a asi 15 % při posuvu 0,355 mm/ot. Vzrůst M_k na jednotlivých elementech není stejný, zvyšuje se směrem k ose nástroje. Změna M_k v závislosti na posuvu je však daleko výraznější, jak vidíme na obr. 39. Průběh závislosti je opět téměř lineární a vzrůst na jednotlivých elementech má opačný charakter, tj. směrem k ose nástroje se snižuje.

Osová síla, dle obr. 40 se také s řeznou rychlostí mění velmi nepatrně, a to na všech místech břitu. Velikost osově síly, jak je vidět z grafů na obr. 41 se však podstatně mění v závislosti na posuvu. Změna osově síly na různých místech břitu není stejná. Vzrůstá směrem ke středu nástroje. To odpovídá vztahu (38), dle kterého síla P_{1z} se mění v závislosti na γ od kladných hodnot přes 0° do hodnot záporných. Největší vliv posuvu na osovou sílu pozorujeme na příčném břitu.

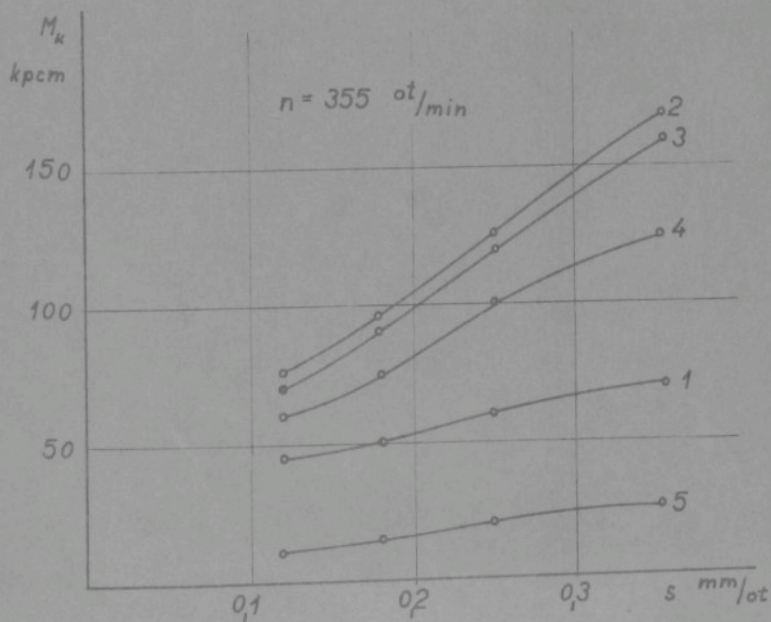
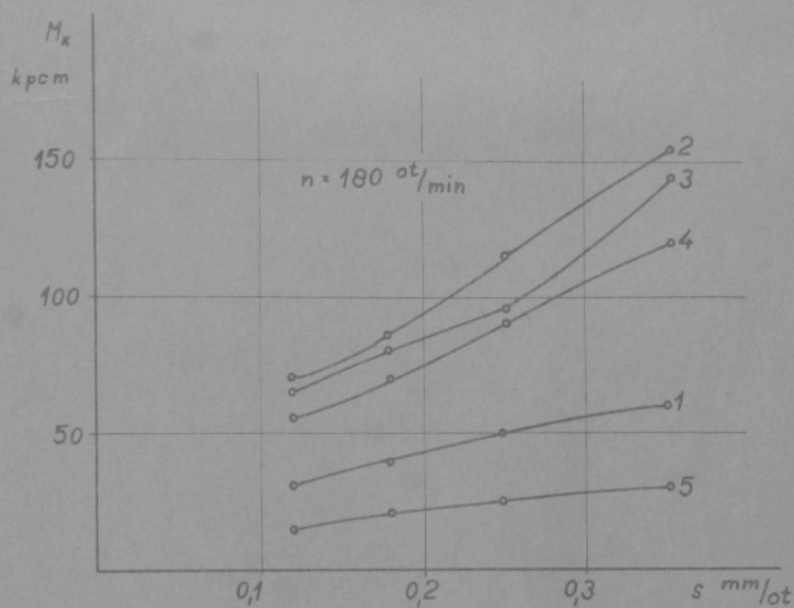
Tyto výsledky ukazují na složitost a proměnnost poměrů na jednotlivých místech břitu a potvrzují správnost záměru podrobit analýze silové poměry na vrtáku. Při zkoumání celkové osově síly a krouticího momentu nám tato slo-



Obr.38 Závislost krouticího momentu na řezné rychlosti
1) fasetka, 2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) eleme

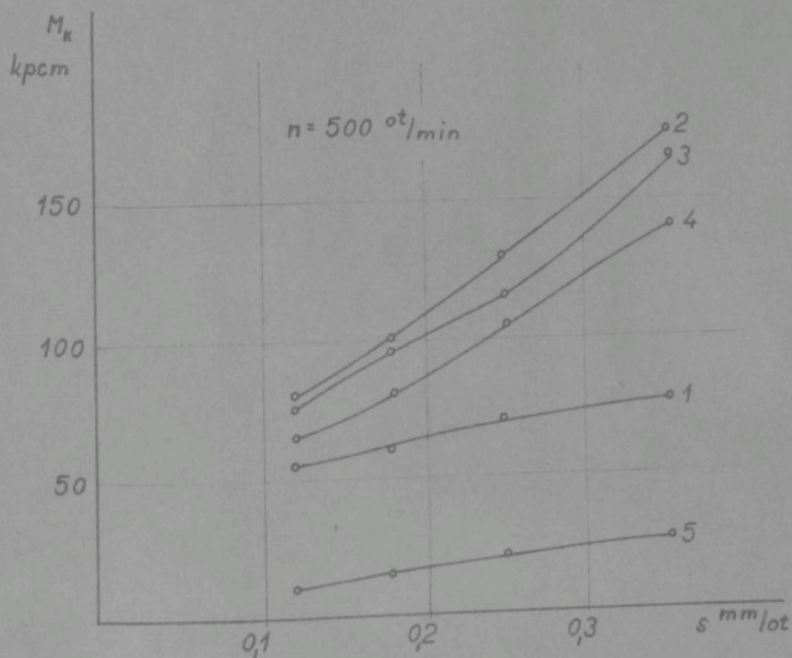
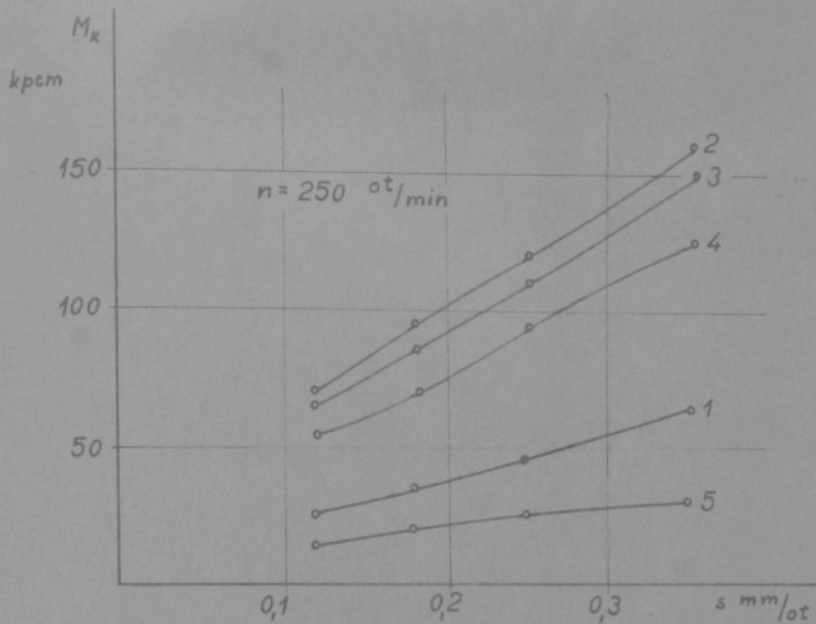


ti
3) element $d_1=9$ až $14,5$ mm, 4) element $d_1=3,5$ až $d_2=9$ mm, 5) příd.bř.

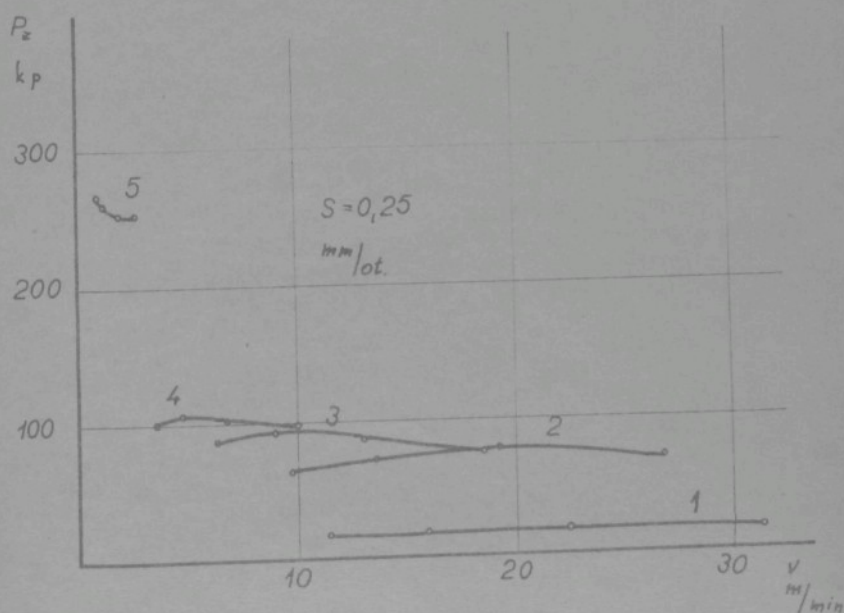
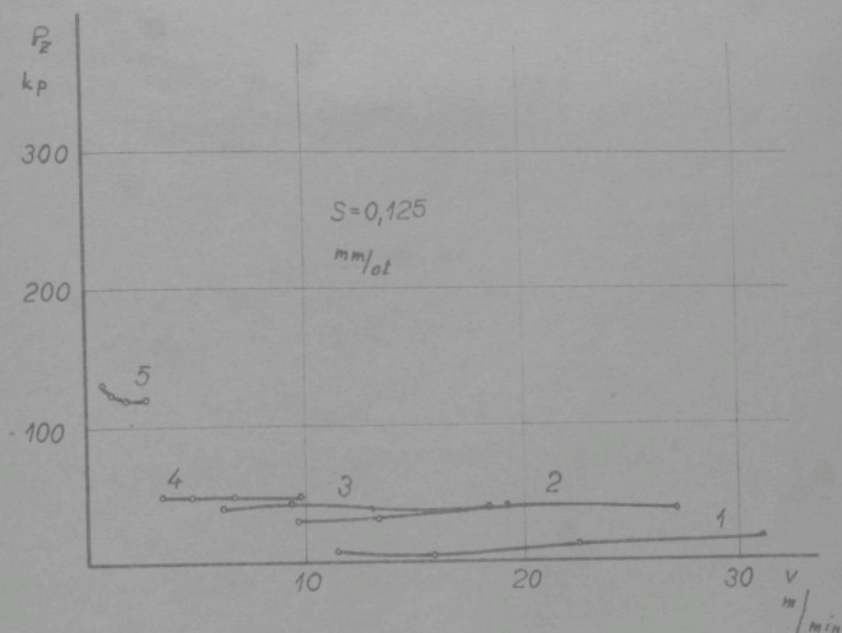


obr.39 Závislost krouticího momentu na posuvu.

1) fasetka, 2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) element $d_1 = 9$

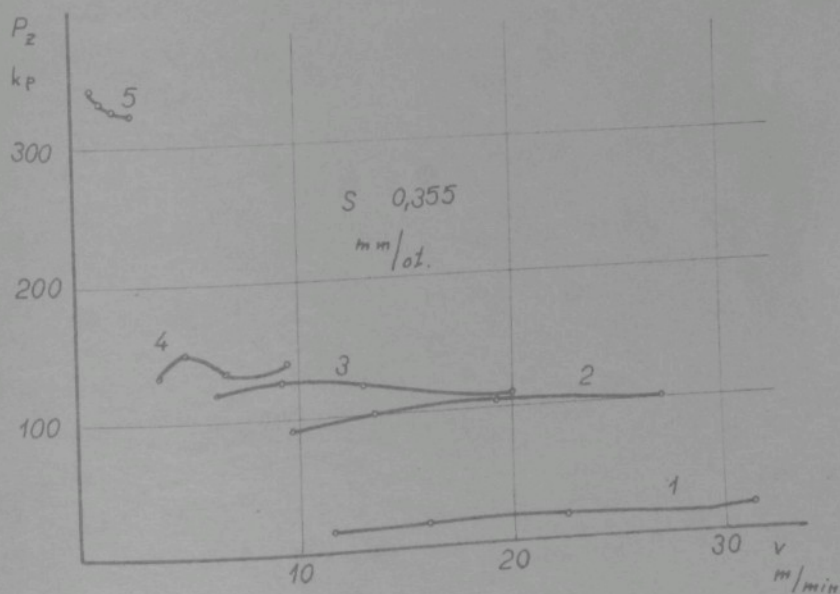
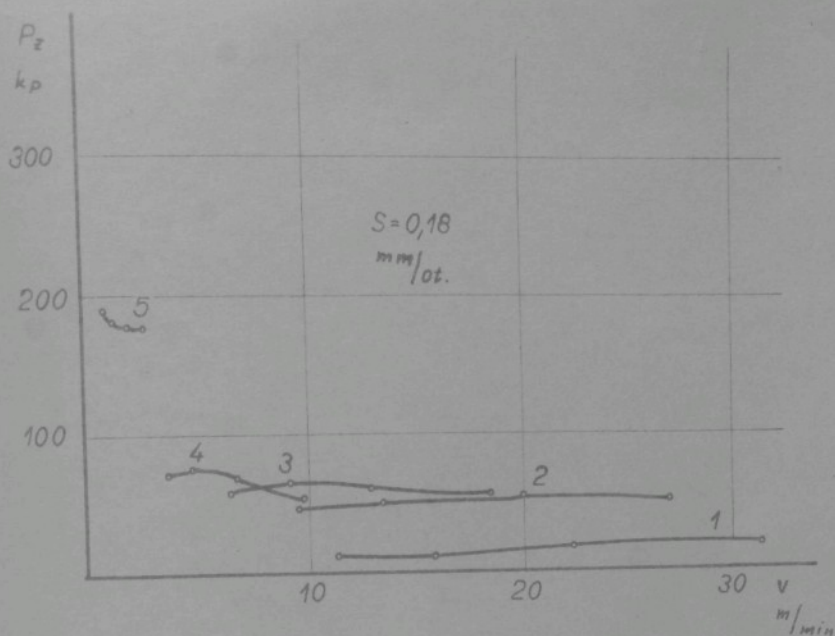


ent $d_1 = 9$ až $14,5$ mm, 4) element $d_1 = 3,5$ až $d_2 = 9$ mm, 5) příčný břit

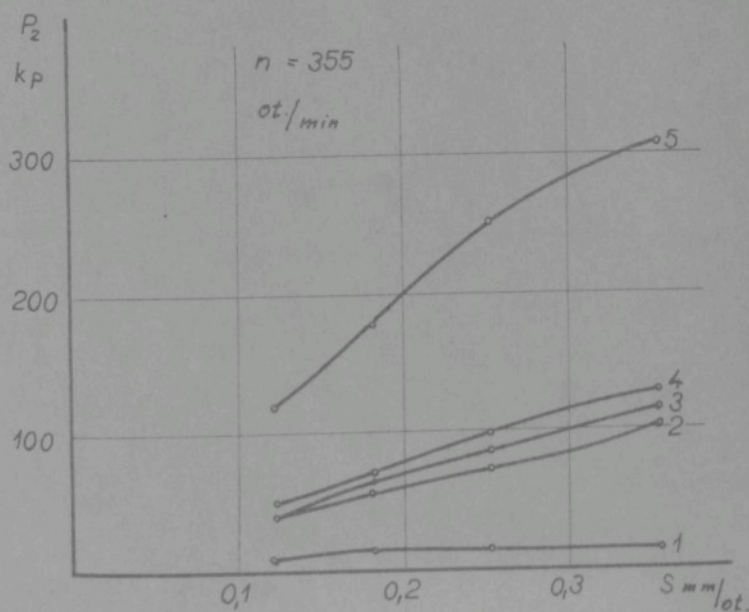
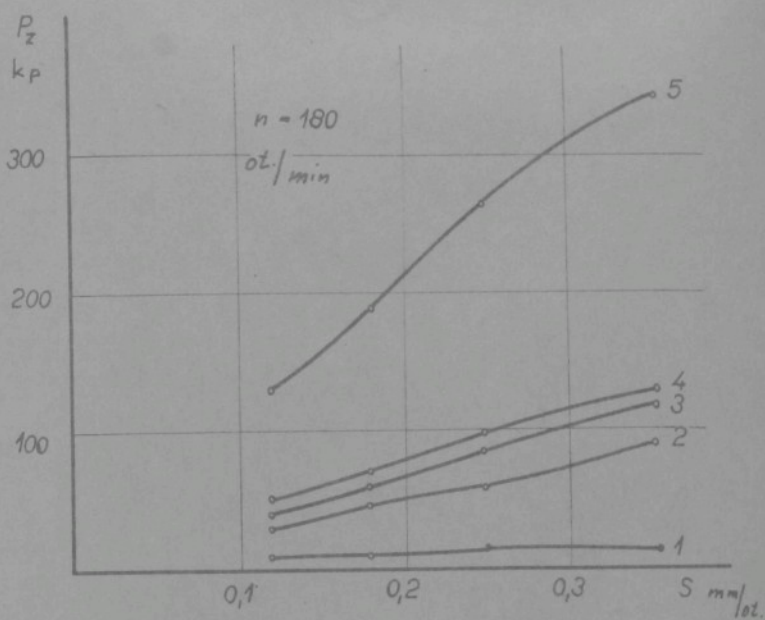


Obr.40 Závislost osové síly na řezné rychlosti

1) fasetka, 2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) element d.

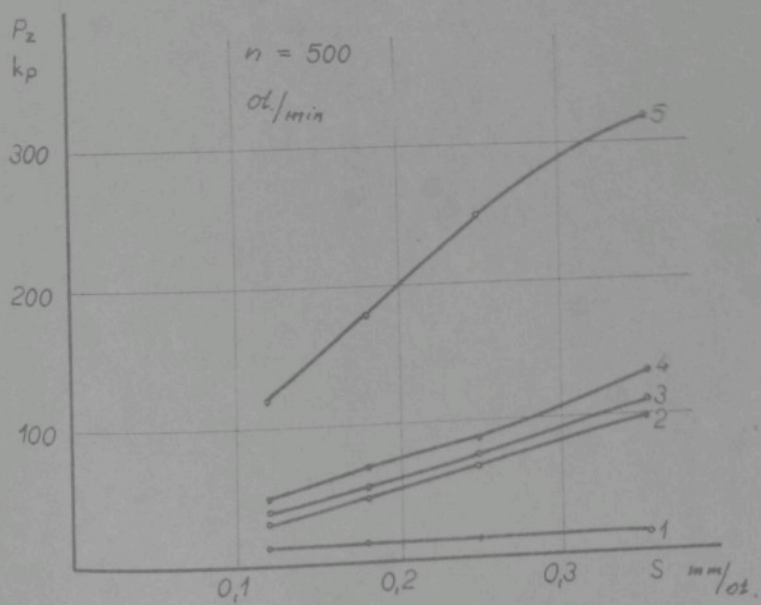
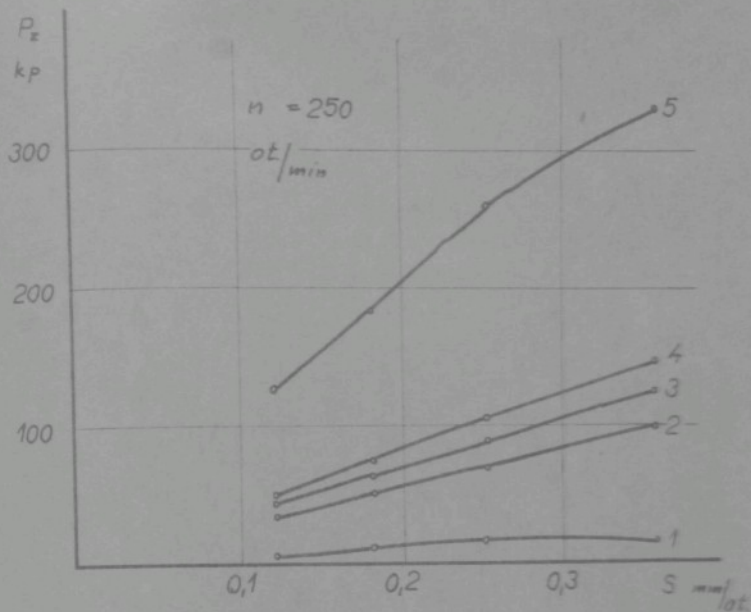


element $d_1 = 9$ až $14,5$ mm, 4) element $d_1 = 3,5$ až $d_2 = 9$ mm, 5) příčný břit



Obr. 41 Závislost osové síly na posuvu

1) fasetka, 2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) element d_1



element $d_1 = 9$ až $14,5$ mm, 4) element $d_1 = 3,5$ až $d_2 = 9$ mm, 5) příčný břit

n ot/min	s mm/ot	Kroucí moment (kpcm)					
		fázka	element $d_1 = 20$ $d_2 = 145$	element $d_1 = 145$ $d_2 = 9$	element $d_1 = 9$ $d_2 = 35$	příčný břit	celk. moment
			1	2	3	4	5
180	0,125	30	70	65	55	15	235
	0,18	40	85	80	70	20	295
	0,25	50	115	95	90	25	375
	0,355	60	155	145	120	30	510
250	0,125	35	70	65	55	15	240
	0,18	45	90	85	70	20	310
	0,25	55	120	110	95	25	405
	0,355	65	160	150	125	30	530
355	0,125	45	75	70	60	10	260
	0,18	50	95	90	75	15	325
	0,25	60	125	120	100	20	425
	0,355	70	170	160	135	25	560
500	0,125	55	80	75	65	10	285
	0,18	60	100	95	80	15	350
	0,25	70	130	125	105	20	445
	0,355	75	175	165	140	25	580

Tab.č.9

n ot/min	s mm/ot	Osová síla Pz (kp)					
		fázka	element d ₁ = 20 d ₂ =145	element d ₁ =145 d ₂ = 9	element d ₁ = 9 d ₂ =35	příčný břít	celk. osová síla
		1	2	3	4	5	6
180	0,125	10	30	40	50	130	260
	0,18	10	45	60	70	190	375
	0,25	15	60	85	100	265	525
	0,355	15	90	120	130	340	695
250	0,125	5	35	45	50	125	260
	0,18	10	50	65	75	185	385
	0,25	15	70	90	105	260	540
	0,355	15	100	125	145	330	715
355	0,125	10	40	40	50	120	260
	0,18	15	55	60	70	180	380
	0,25	15	75	85	100	250	525
	0,355	15	105	120	130	325	695
500	0,125	15	35	40	50	120	260
	0,18	15	50	55	70	180	370
	0,25	15	70	75	90	250	505
	0,355	15	100	110	135	320	680

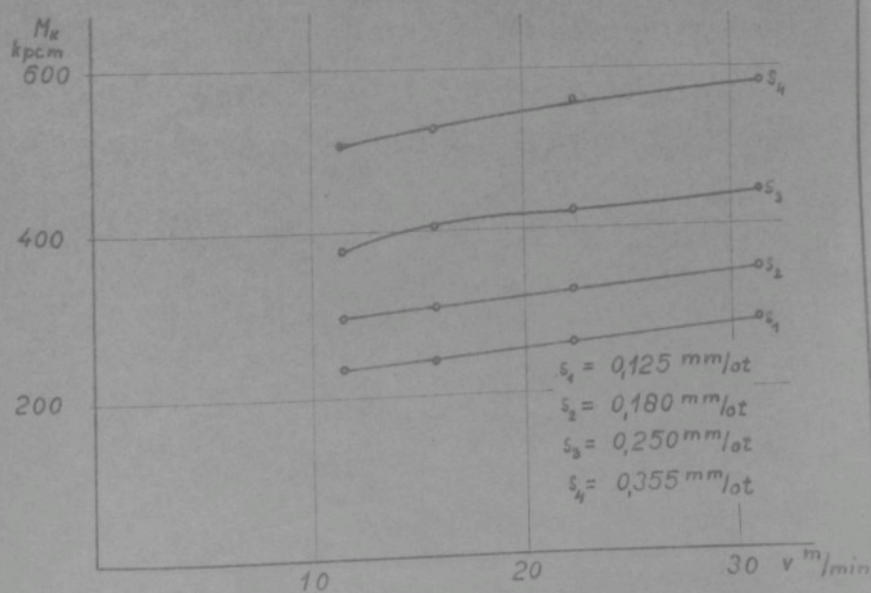
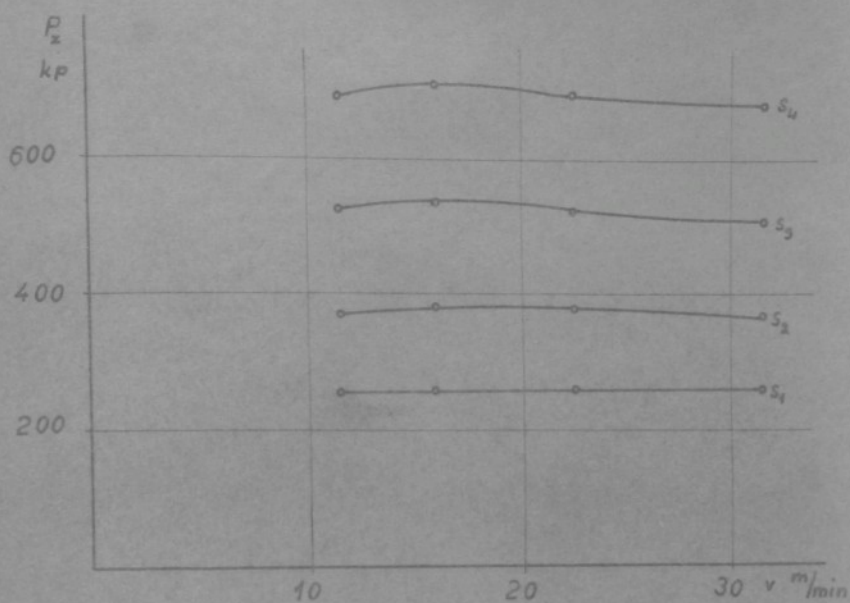
Tab.č.10

n ot/min	s mm/ot	Řezná síla Px (kp)				
		fázka	element d ₁ = 20 d ₂ = 145	element d ₁ = 145 d ₂ = 9	element d ₁ = 9 d ₂ = 35	příř. břit
			1	2	3	4
180	0,125	30	81	111	176	172
	0,18	40	99	136	224	228
	0,25	50	133	162	288	286
	0,355	60	180	246	384	343
250	0,125	35	81	117	176	172
	0,18	45	104	145	224	228
	0,25	55	139	187	304	286
	0,355	65	186	255	400	343
355	0,125	45	87	119	192	135
	0,18	50	110	153	240	172
	0,25	60	145	204	320	228
	0,355	70	197	272	432	286
500	0,125	55	93	128	208	135
	0,18	60	116	162	256	172
	0,25	70	151	213	336	228
	0,355	75	202	281	448	286

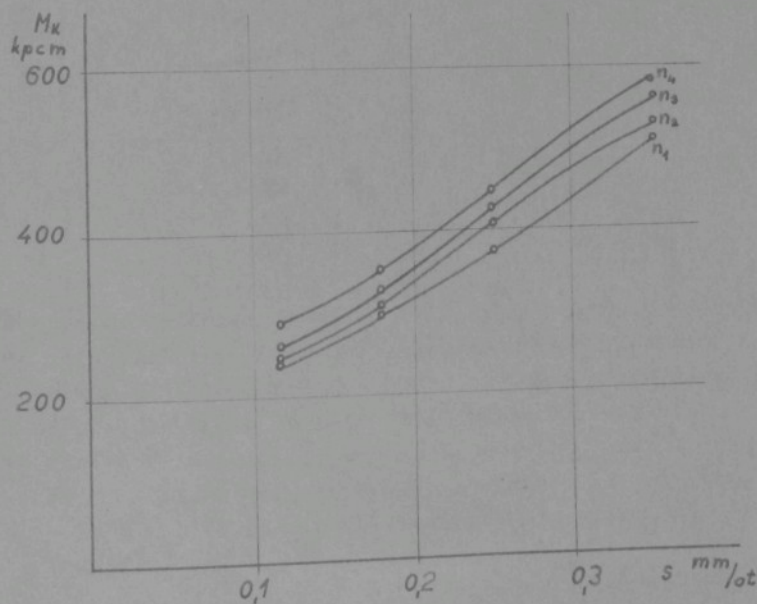
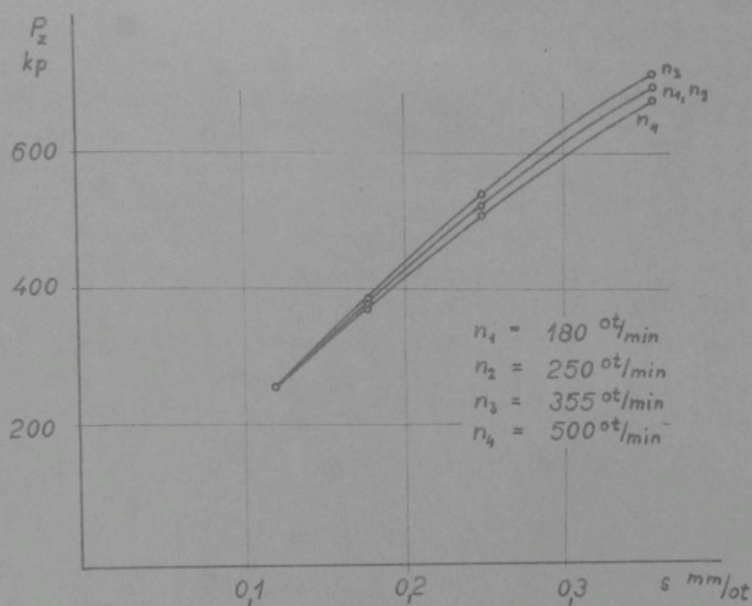
Tab.č.11

n ot/min	s mm/ot	Spec. řezný odpor (kp/mm ²)			
		element d ₁ = 20 d ₂ =145	element d ₁ =145 d ₂ = 9	element d ₁ = 9 d ₂ =35	příčný břit
		2	3	4	5
180	0,125	236	320	512	786
	0,18	200	275	452	725
	0,25	194	236	418	654
	0,355	136	252	393	585
250	0,125	236	340	512	786
	0,18	210	293	453	725
	0,25	202	272	442	654
	0,355	190	261	410	585
355	0,125	253	346	558	620
	0,18	222	309	485	547
	0,25	211	297	466	522
	0,355	202	279	442	488
500	0,125	270	372	605	620
	0,18	234	327	517	547
	0,25	219	310	489	522
	0,355	207	286	459	488

Tab.č.12

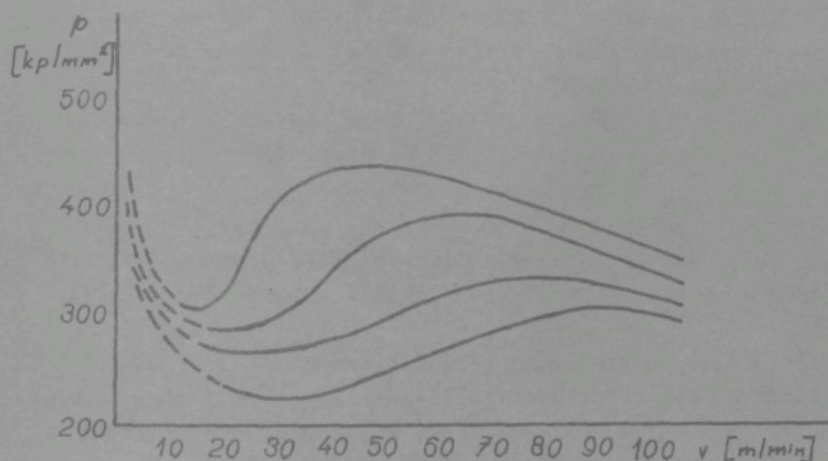


Obr.42 Závislost celkové osové síly a kreutického momentu na řezné rychlosti



Obr. 43 Závislost celkové osové síly a krouticího momentu na posuvu

žitost uniká, jak je vidět z grafů na obr. 42 a 43. Potvrzuje se sice zohrnaně, že řezná rychlost ovlivňuje jak krouticí moment, tak osovou sílu zanedbatelně. Posuv však má zásadní vliv na velikost, jak krouticího momentu, tak osové síly. Pro vysvětlení těchto vlivů jsme zkoumali závislost specifického řezného odporu na posuvu a řezné rychlosti v jednotlivých místech břitu. Vzhledem k tomu, že se pohybujeme v oblasti malých řezných rychlostí (do 30 m za minutu na obvodě vrtáku) je závislost na řezné rychlosti složitá. Dle různých autorů, např. [49] je průběh následující (plně vytažené čáry):



Obr. 44

Pro velmi malé rychlosti a velké řezné úhly, jak je tomu na příčném břitu, tato problematika není zpracována. Naše zkoumání ukázalo obdobný průběh v oblasti hlavního břitu a na příčném břitu se však jeví průběh specifického řezného odporu v závislosti na řezné rychlosti, jako klesající. To by svědčilo o tom, že křivky uvedené v literatuře mají v oblasti malých rychlostí vzestupný charakter, na obrázku čárkované.

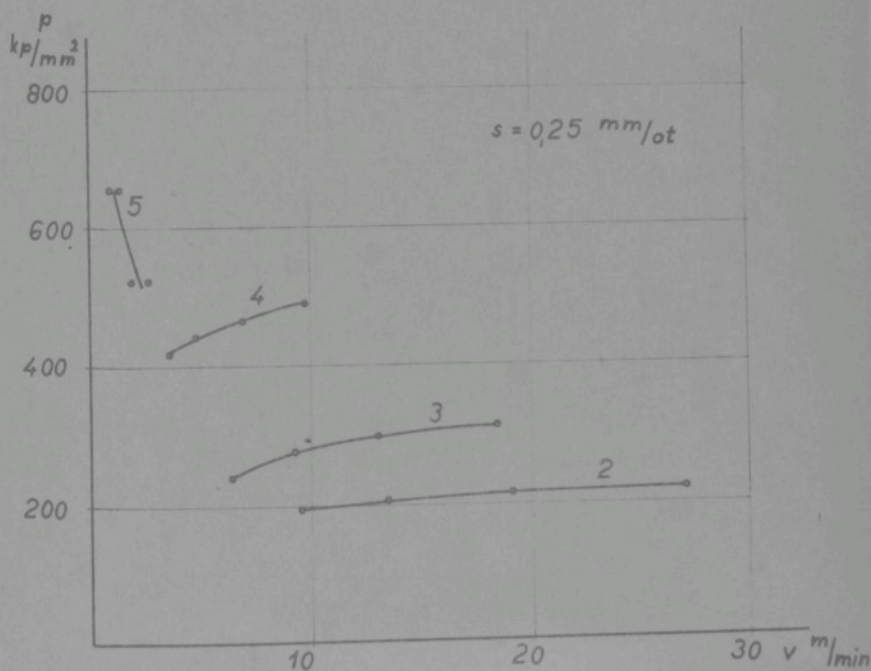
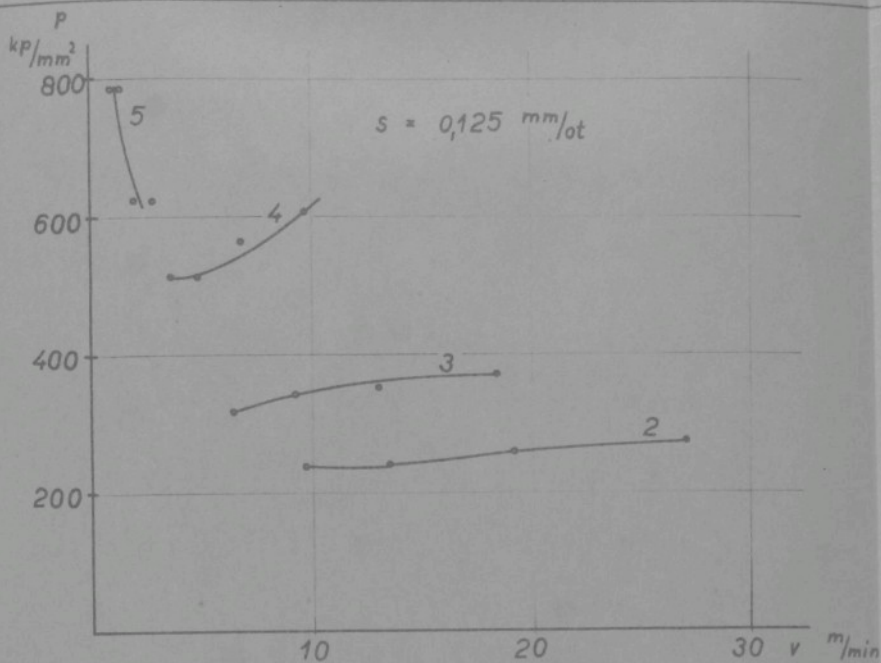
Na obr. 45 vidíme grafické znázornění našich výsledků. Směrem k ose vrtáku je na hlavním břitu patrný vzrůst rychlosti stoupání specifického řezného odporu na řezné

rychlosti. Uplatňuje se zde zejména působení úhlu ϕ , který směrem k ose vrtáku prudce vzrůstá. Velký úhel ϕ působí zvýšení plastických deformací. Zvýšení řezné rychlosti vyvoluje zvýšení rychlosti deformace a způsobuje zvýšení odporu proti plastické deformaci, což má za následek zvýšení specifického řezného odporu. Značný vliv má také tvoření nárůstka, který se zvýšenou řeznou rychlostí, jež způsobuje zvýšení teploty na břitě, tvoří ve větším rozsahu a opět zvyšuje specifický řezný odpor.

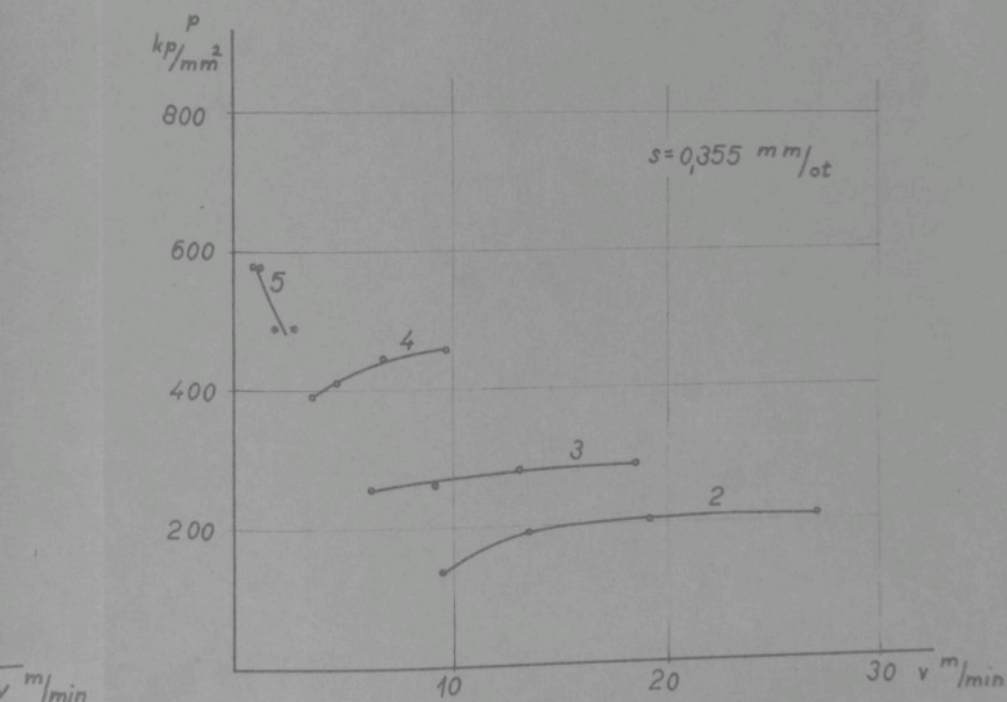
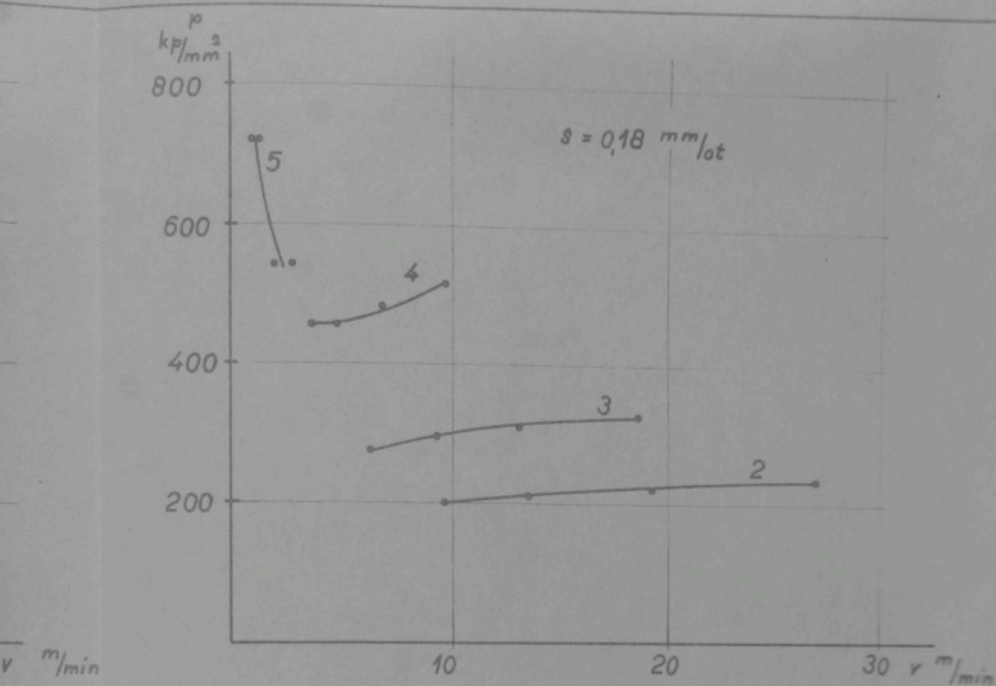
Na příčném břitu specifický řezný odpor se vzrůstem řezné rychlosti klesá. Zde totiž dochází k tomu, že zvýšení řezné rychlosti zvýší tvoření nárůstka, který "koriguje" nepříznivou geometrii příčného břitu, zejména úhel ϕ a zlepšuje podmínky tvoření třísky, tj. i zmenšení plastické deformace. Jak je vidět na obr. 28. Vliv posuvu na specifický řezný odpor je na obr. 46. Vidíme zde jasně snížení specifického řezného odporu při vyšších posuvech. Tento příznivý vliv je patrnější u nižších řezných rychlostí, než u rychlostí vyšších. Se zvětšením ϕ tj. ke středu vrtáku pokles specifického řezného odporu se stoupajícím posuvem je větší. Také u nižších řezných rychlostí je pokles prudší, než u vyšších.

Jak je vidět maximální vliv má geometrie břitu, proto jsme vynesli závislost specifického řezného odporu podél břitu do grafu na obr. 47 a 48. Směrem k obvodům se velikost specifického řezného odporu zmenšuje vlivem menších plastických deformací.

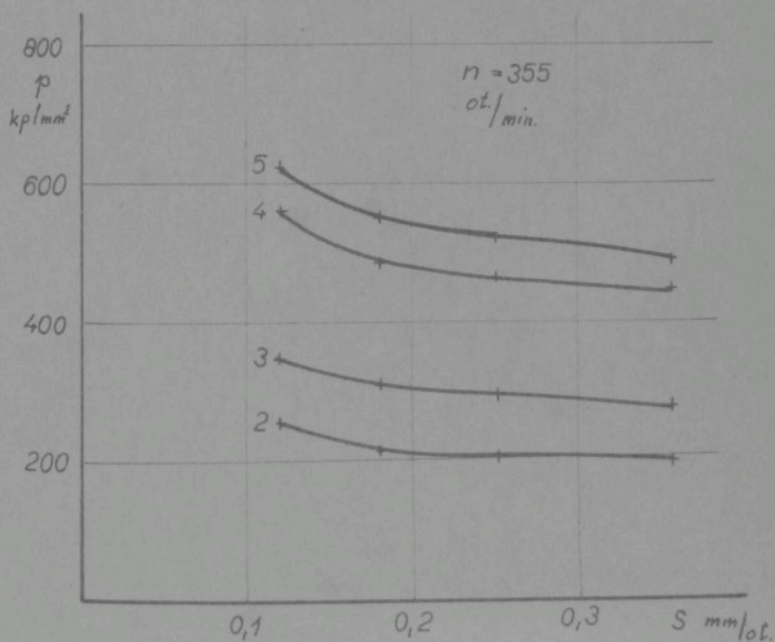
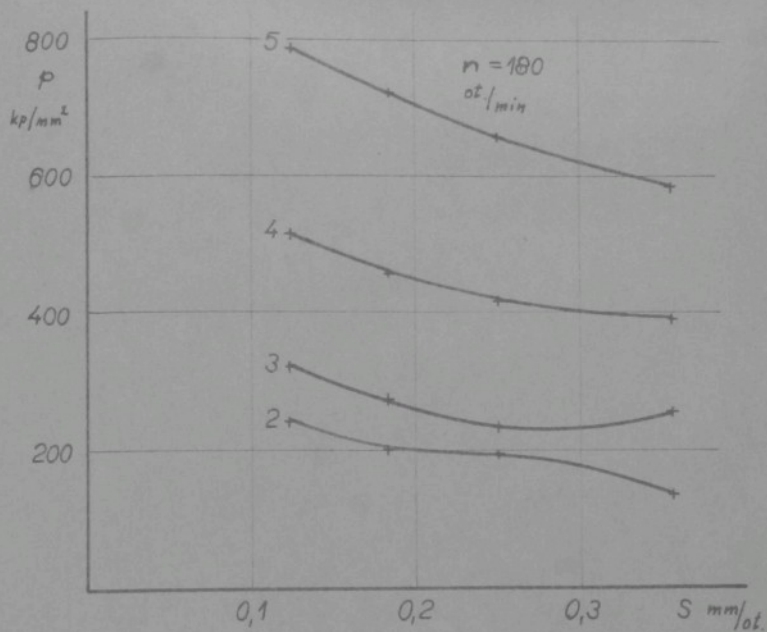
Výsledky výzkumu ukazují, že specifický řezný odpor, který je pro soustružení v literatuře uváděn 238 - 274 kp/mm² při rozmezí úhlu čela $+5^\circ$ až $+20^\circ$ neodpovídá specifickému řeznému odporu při vrtání, kde tento dosahuje hodnot od 150 do 600 kp/mm² při rozmezí úhlu čela -10° až $+20^\circ$. Změna specifického řezného odporu na změně úhlu čela je u vrtání daleko výraznější, než při soustružení. Při soustružení změně úhlu čela o 1° odpovídá asi 1 % změny specifického řezného odporu, kdežto u vrtání změně úhlu čela o 1° odpovídá změna specifického řezného odporu asi o 5 %.



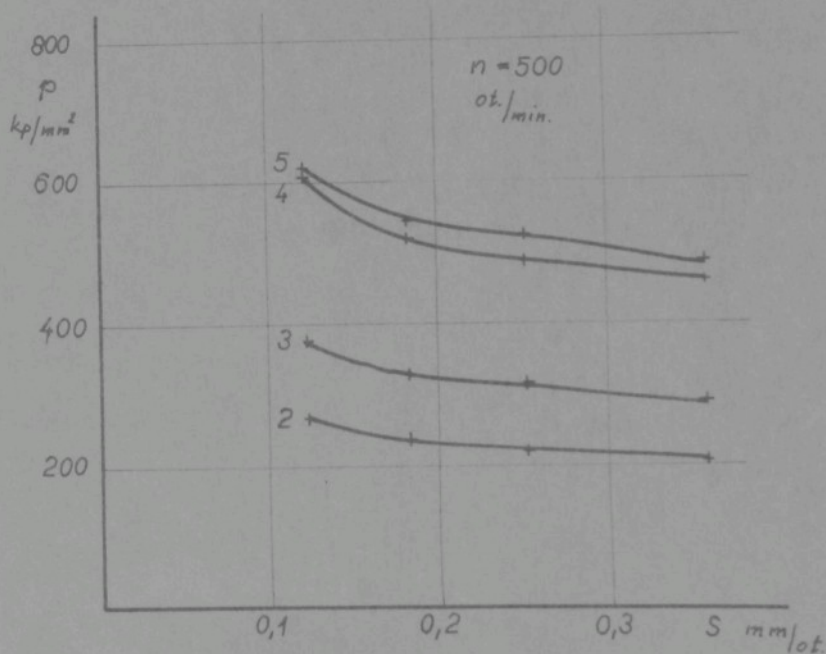
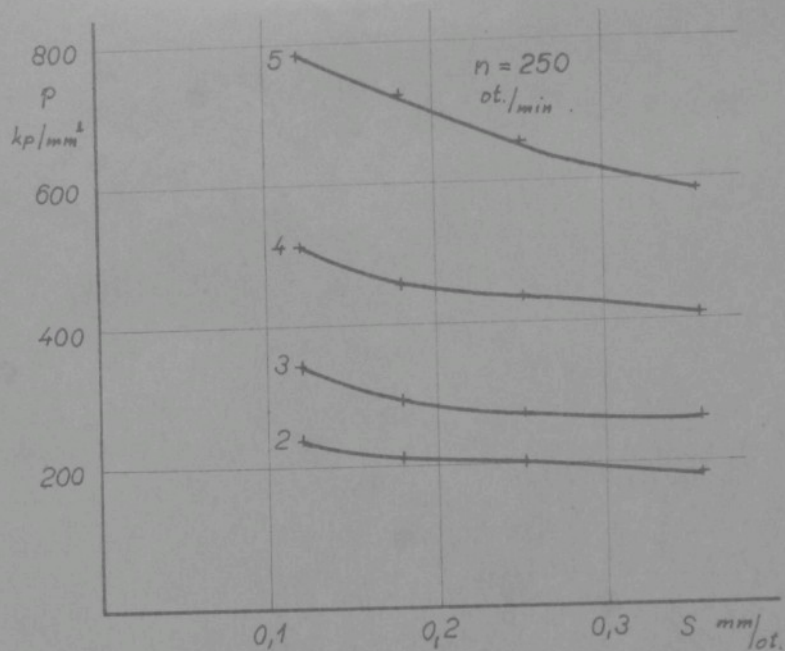
Obr.45 Závislost specifického řezného odporu na řezné rychlosti
2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) element $d_1 = 9$ až $d_2 = 14,5$ mm



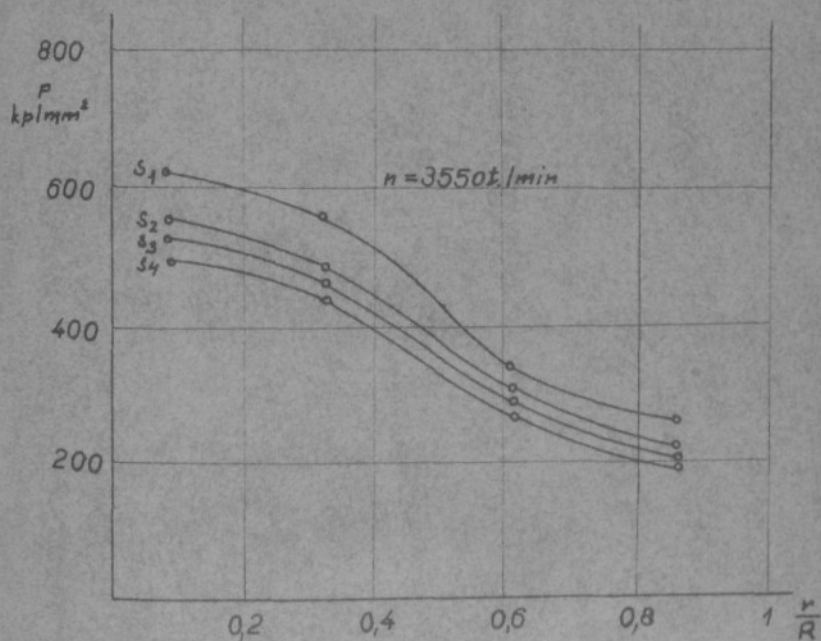
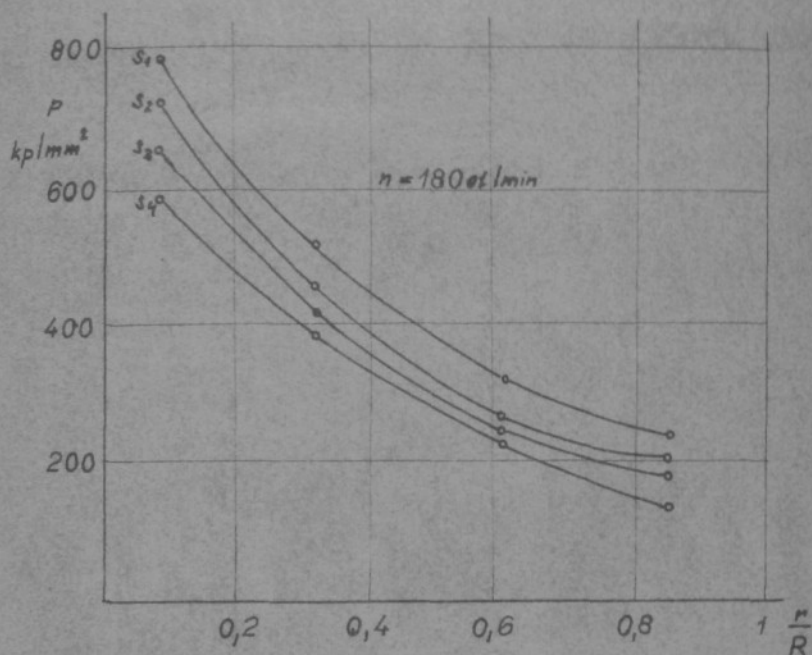
rychlosti
 = 9 až $d_2 = 14,5 \text{ mm}$, 4) element $d_1 = 3,5$ až $d_2 = 9 \text{ mm}$, 5) příčný břit



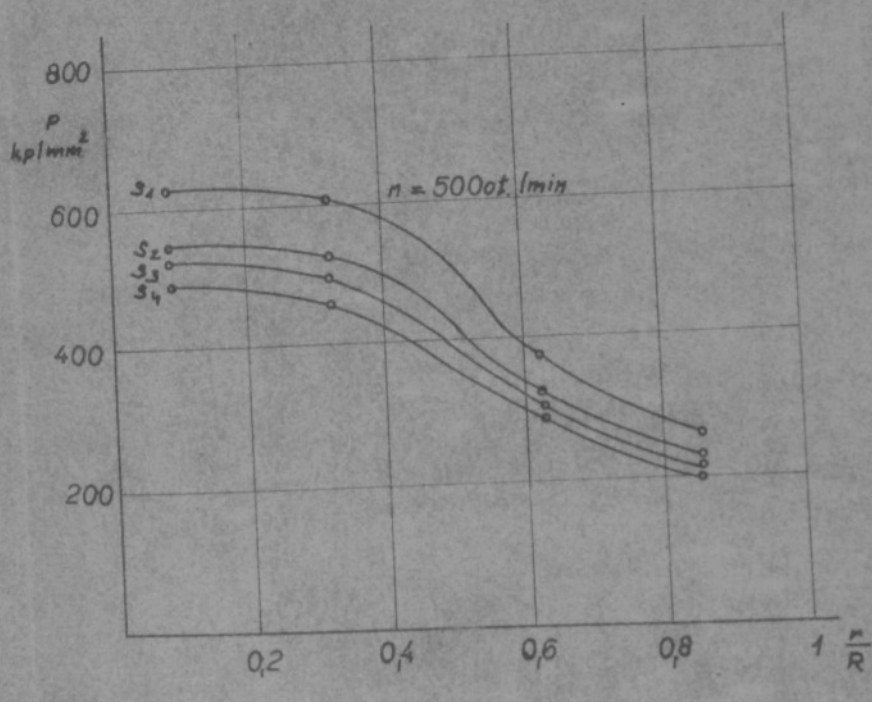
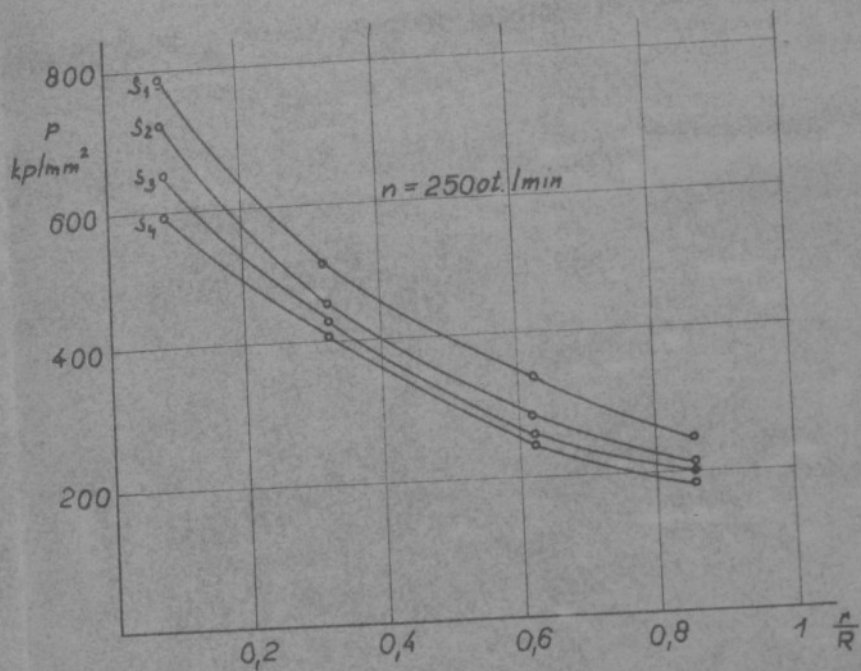
Obr. 46 Závislost specifického řezného odporu na posuvu
2) element $d_1 = 14,5$ až $d_2 = 20$ mm, 3) element $d_1 =$

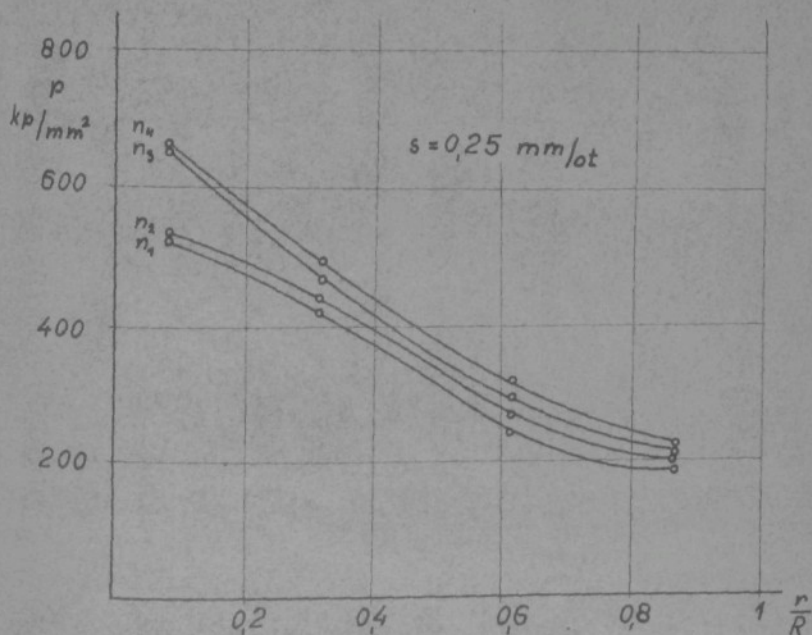
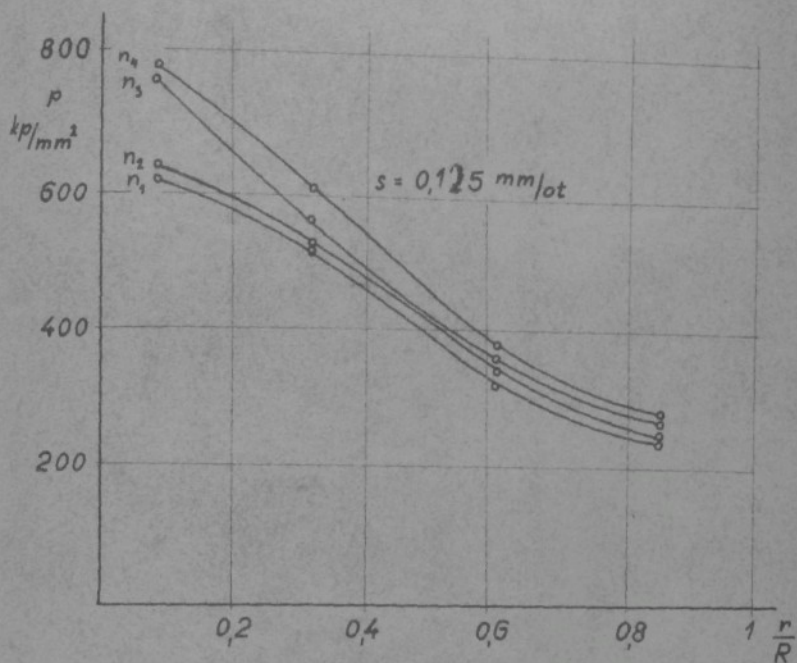


posuv
 element $d_1 = 9$ až $d_2 = 14,5$ mm, 4) element $d_1 = 3,5$ až $d_2 = 9$ mm, 5) příčný břit

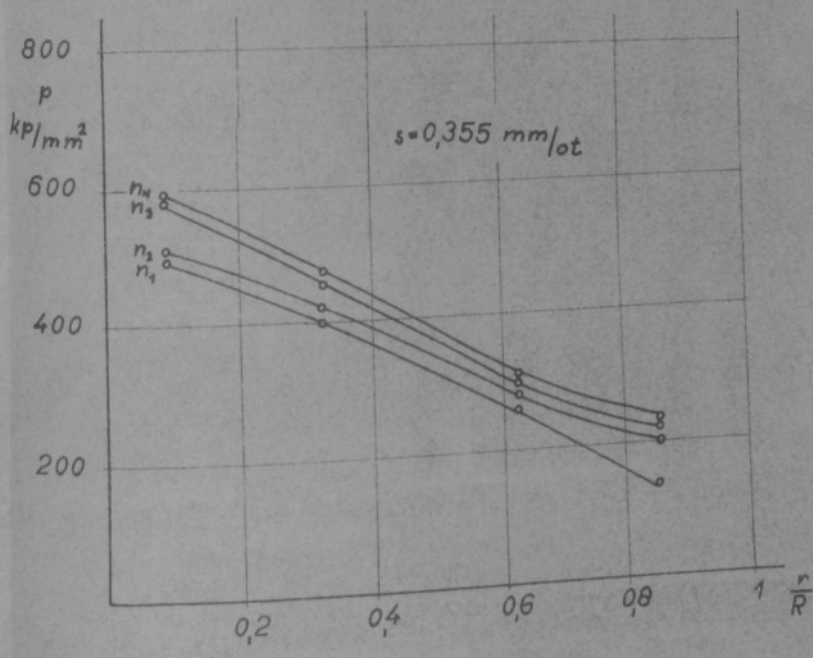
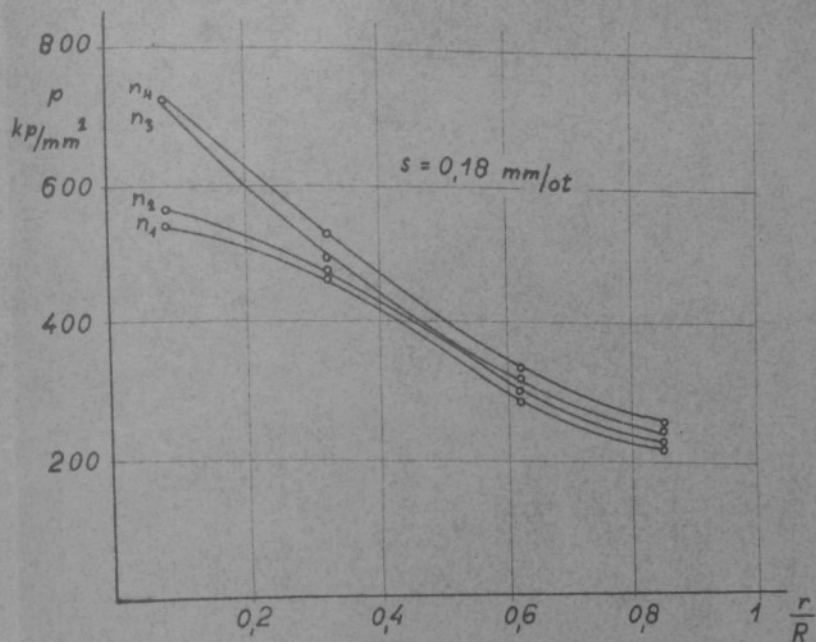


Obr. 47 Průběh specifického řešení odporu podél břitu





obr. 48 Průběh specifického řezného odporu podél břitu



Teplota řezání při vrtání šroubovitými vrtáky

Při obrábění vzniká změnou mechanické energie vynaložené na vznik třísky a překonání tření na čele a břitu nástroje určité množství tepla. Výzkumy ukázaly [49], že téměř celá mechanická energie se mění na teplo. Jenom asi 0,5% až 1% této energie se na teplo nemění. Můžeme tedy uvažovat celkové množství tepla vyvinuté při obrábění z rovnice

$$Q = \frac{P_z \cdot v}{427} \quad \text{kcal/min} \quad (86)$$

Je důležité znát jaké množství tepla přechází z celkového tepla do třísky, nástroje a obrobku. Poznání zákonitosti rozdělení tepla umožňuje pak zkoumat rozložení teplot v tříске, nástroji a obrobku. Teplotní pole je však v procesu řezání nestacionální a proto pro takové pole platí:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (87)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad - \text{koeficient teplotní vodivosti.}$$

Tuto rovnici můžeme řešit jenom když známe okrajové podmínky a přibližné rozložení teplot. Použití třírozměrné teorie tepla, vyžaduje tedy řadu zjednodušujících předpokladů, jejichž nepřesnost by ovlivnila značně i přesnost výsledku. Používáme proto pro vyjádření teplotního pole jednorozměrové teorie. I v tomto případě však nutno vycházet z předpokladů, které se mohou jenom blížit skutečným podmínkám. Z těchto důvodů se většina prací na ujasnění problémů tepelných jevů při obrábění zaměřila na experimentální metody zkoumání.

Základy tohoto výzkumu můžeme najít v pracích N.N. Sawina a J.G. Usačeva. Kalometrickými metodami stanovili celkové množství tepla vznikajícího při obrábění, jeho rozdělení do obrobku, nástroje a třísky a ujasnili vliv jednotlivých parametrů řezných podmínek na výši teploty. Další etapu tvoří výzkumy teplotních jevů zejména měření pomocí

termočlanků. Mezi známé u nás dostupné prameny patří práce J.N.Reznikova, M.F.Semka, A.A.Avakova, D.T.Vasiljeva a A.M.Danijeljana, který stanovil vztah pro teplotu řezání ve známém tvaru:

$$\theta = \frac{C_e \cdot v^x \cdot s^y \cdot t^z}{r^p \cdot f^q} \quad (88)$$

Na západě se problémům výzkumu tepelných jevů věnovali: H.Schalbroch, H.Friedrich, F.Schwerd, K.Gottweien, známý použitím metody přirozeného termočlanku s jedním nožem, E.G.Herbert, W.Reichel, který spolu s Gottweinem rozpracovali metodu použití dvou nožů jako termočlanků - známou pod označením "termoduo", G.S.Reichenbach, G.Vieregge, B.J.Chao a V.J.Trigger.

Teoretickému výzkumu teplotních jevů jsou věnovány práce M.P.Levického, ve kterých se zabýval zejména teoretickým stanovením teploty ve stykové ploše třísky - nástroj. Vycházejíce ze závěrů tohoto autora propracovali dále teorii pro výpočet teploty řezání T.N.Loladze, M.J.Klušin a další. Klušin odvodil vztah pro stanovení teploty tření třísky o nástroj, E.A.Pankin a D.T.Vasiljev vypracovali metodu měření pomocí "složeného nože" pro zjištění napětí a teplot na čele. Podobným zařízením Loladze a V.V.Cocchadze určili zákonitosti rozložení teploty na stykové ploše čela s třískou.

Rozložení teplot v tříске a oblasti plastických deformací jsou věnovány práce Reznikova, který na základě vlastních výzkumů i literárních pramenů vypracoval schéma teplotního pole (obr.č.49).

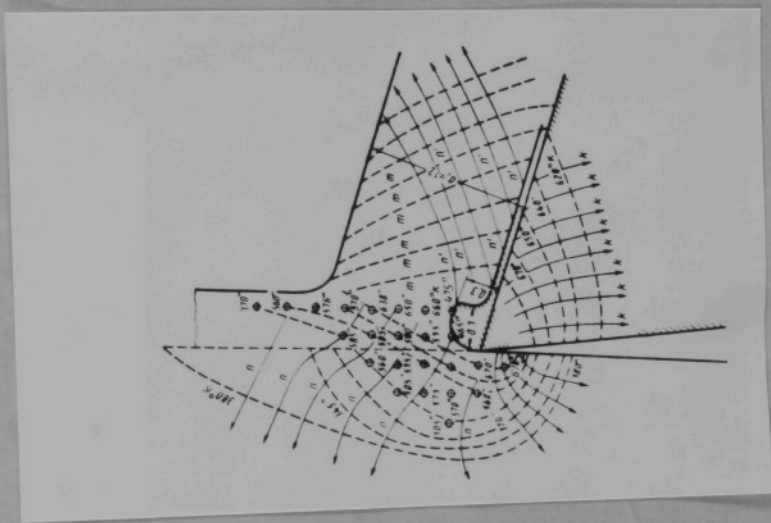
V.A.Krivouchov měřením teploty na vnitřní straně odcházející třísky zjistil, že tato teplota je mnohem vyšší než teplota v oblasti plastických deformací.

Zpřesňování výzkumu tepelných jevů při obrábění vedlo souběžně s propracováváním teorie ke zdokonalování a zlepšování experimentálních metod s cílem stanovit nejenom střední teploty, ale přesně zjistit lokální teploty v oblasti plastických deformací, na povrchu bříty nástroje a v tříске i obráběném materiálu, zejména na obrobené ploše.

Výzkum přecházel od obecných otázek k problematice

jednotlivých způsobů obrábění např. frézování apod.

Velmi malá část prací je však věnována problematice vrtání. Přitom rozsah vrtacích operací v průmyslové strojírenské výrobě je velmi značný a náklady na nástroje představují rozhodující položku. Uvážíme-li, že výše teploty



Obr. 49

na břitu nástroje podstatnou měrou ovlivňuje jeho trvanlivost a tedy je rozhodujícím kritériem pro stanovení řezných podmínek, jeví se problematika tohoto výzkumu jako zvláště naléhavá.

Jak jsme uvedli, určení teplotního pole třísky, obrobku a nástroje je sice teoreticky možné, ale při celé řadě zjednodušujících předpokladů, které se mohou jenom částečně přiblížit skutečnosti. Čím složitější bude vlastní proces obrábění, tím obtížněji bude možno stanovit předpoklady odpovídající skutečnosti.

Jak jsme ukázali v předcházejících kapitolách - vrtání šroubovitým vrtákem je proces značně složitý. Nástroj sám má složitou geometrii, která ovlivňuje proces obrábění. Geometrie břitu se mění od středu vrtáku k obvodu a mění se i řezná rychlost od nuly v ose vrtáku do maxima na obvodě. To vše ovlivňuje proces tvoření třísky, jak je

vidět z fotografií kořenů na obr. č. 27, 28, 29, 30. Lze tedy aplikovat vztahy, které byly odvozeny obecně a experimentálně ověřené pro soustružení, také na proces vrtání?

Naším cílem proto bylo experimentální sledování teploty na břitech šroubovitého vrtáku.

Vliv řezných podmínek na teplotu řezání oceli lze vyjádřit následujícími vztahy [49]

$$\theta = C_1 v^x \quad \text{kde } x = 0,5 \text{ pro } v = 15 \text{ až } 45 \text{ m/min} \quad (89)$$

$$\theta = C_2 s^y \quad y = 0,3 \quad (90)$$

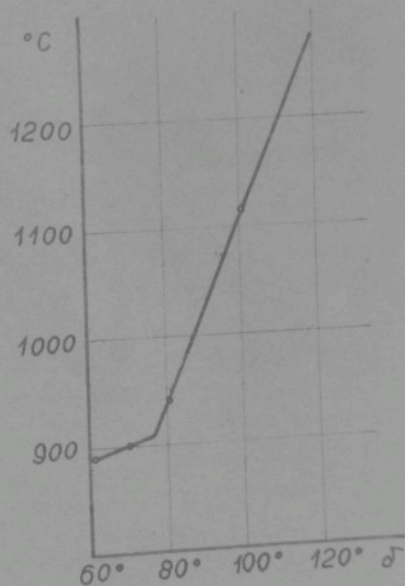
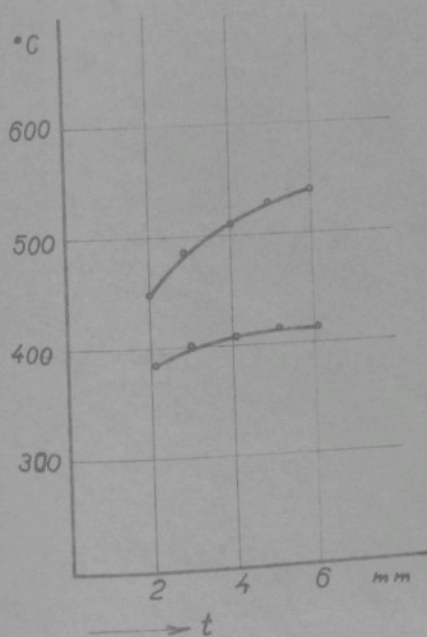
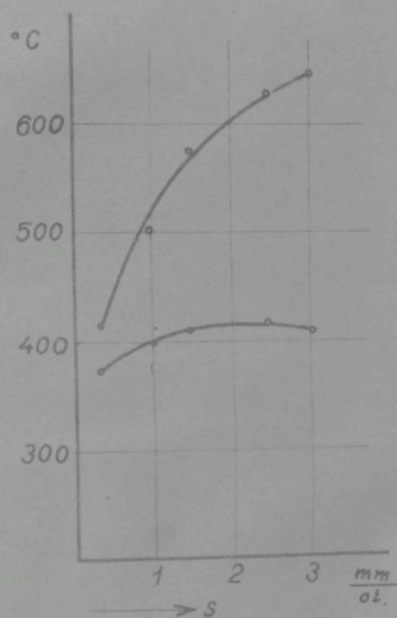
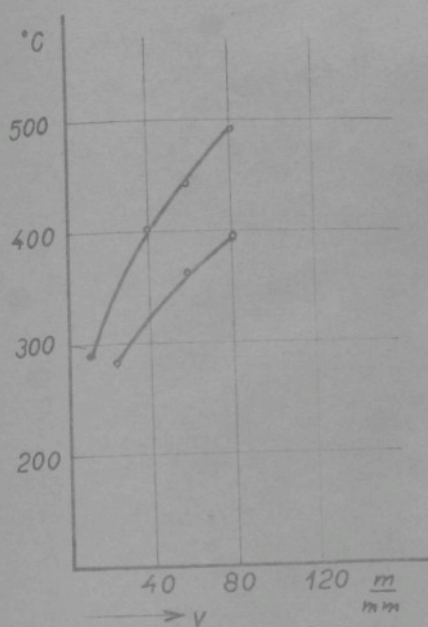
$$\theta = C_3 t^z \quad z = 0,04 \text{ až } 0,14 \quad (91)$$

S růstem úhlu řezu ϕ roste teplota téměř lineárně. Grafické vyjádření těchto závislostí na základě měření při soustružení je následující [48], [49], obr. č. 50. Z uvedeného vztahu $\theta = K \cdot v^x \cdot s^y$ vychází, že teplota na břitech šroubových vrtáků bude vzrůstat od středu k obvodu a dosáhne maxima na přechodu hlavního ostří do fasetky. Tomu by také nasvědčovalo to, že šroubovitý vrták se nejčastěji maximálně otupí na přechodové části na obvodě. Většina měření teploty při vrtání byla pravděpodobně z těchto příčin prováděna také na maximálním průměru hlavního ostří [23].

Měření teploty řezání u vrtání je úkol nesnadný vzhledem k tomu, že nástroj se otáčí, má složitý šroubovitý tvar a pracovní část je obklopena materiálem obrobku. Zavést sondy teplého spoje termočlásku do vrtáku, umístit je do břitu nástroje tak, abychom zjistili průběh teploty podél ostří, nebo celé teplotní pole břitu, je úkol prakticky těžko proveditelný. Prověřili jsme proto možnosti měření teploty řezání pomocí termočlásků zabudovaných do obrobku. Bude tedy měřena teplota stykových míst na čele a hřbetě, která bude v důsledku nižší teploty na hřbetě nižší, než skutečná teplota řezání (teplotou řezání nazýváme maximální teplotu stykového místa čela břitu s třískou).

Měření bylo prováděno trojím způsobem:

- termočláskem, který tvořila hliníková nebo niklová folie a vrták
- termočláskem, který tvořil kantarový drátek a vrták

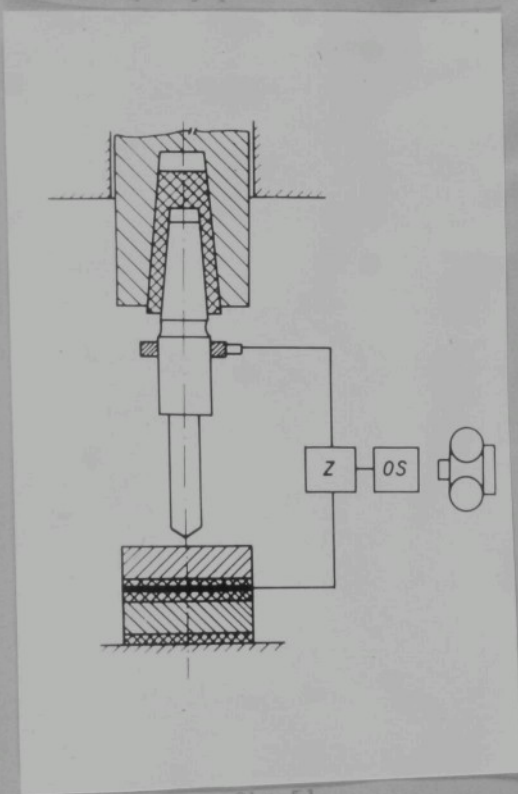


Obr.50 Závislost teploty řezání na řezné rychlosti, posuvu, hloubce řezu a úhlu řezu

c) termočlánkem z drátků železo-konstantan.

Popis použitých metod

a) K vyzkoušení této metody měření pomocí folie vedla práce Kasahara a Kinosita [31], kteří použili tento způsob měření teploty při vrtání umělých hmot. Celkové uspořádání

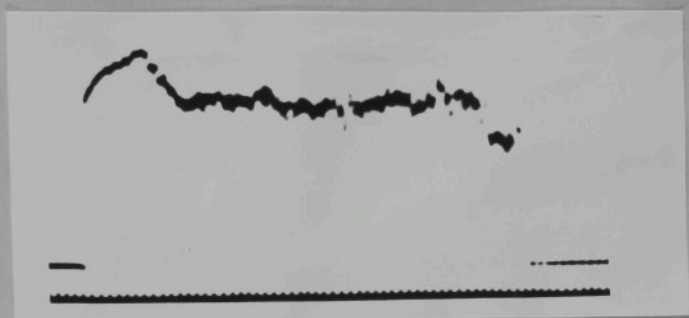


Obr. 51

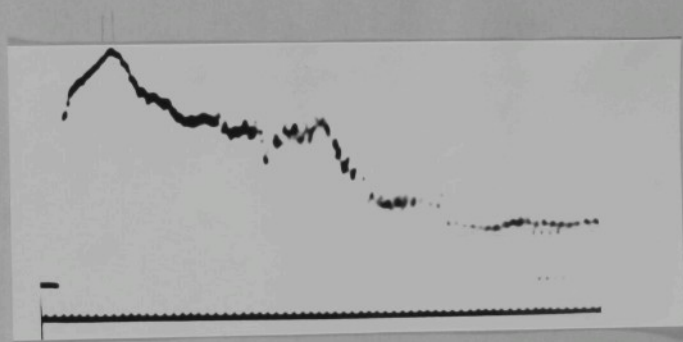
je zřejmé z obrázku č. 51. Vzorky z materiálu 12 060 byly umístěny ve zvláštním upínacím přípravku, který umožňoval upnout vzorek izolovaně a zajistit pevné sevření. Hliníková nebo niklová folie byla přilepena mezi horní a spodní část vzorku epoxydovou pryskyřicí. Vrták byl odisolován od vřetena redukčním pouzdem z umělého materiálu a elektrické spojení s rotujícím vrtákem bylo přes kartáč a kroužek vyrobené ze

stejněho materiálu. Toto zapojení vyhovuje proto, že použitý zesilovač má vysoký vstupní odpor a je opatřen katodovým sledovačem, který byl mezi mřížkou a katodou vstupu doplněn takovým odporem, aby případné změny odporu mezi kroužkem a kartáčem neměly vliv na měřenou veličinu [51]. Pro sledování otáček byl na vřeteno umístěn snímač, jehož signál byl vyveden na druhý paprsek osciloskopu. Obrázek byl snímán filmovou kamerou s plynulým chodem filmu. Záznam měření s niklovou folií je na snímku obr.č.52 a s hliníkovou folií na obr.č. 53.

Jak vidět ze záznamu měření při použití hliníkové nebo niklové folie je záznam čitelný v první fázi, kdy začíná hrot vrtáku tvořit s folií termočláněk se stykem na poměrně



Obr. 52

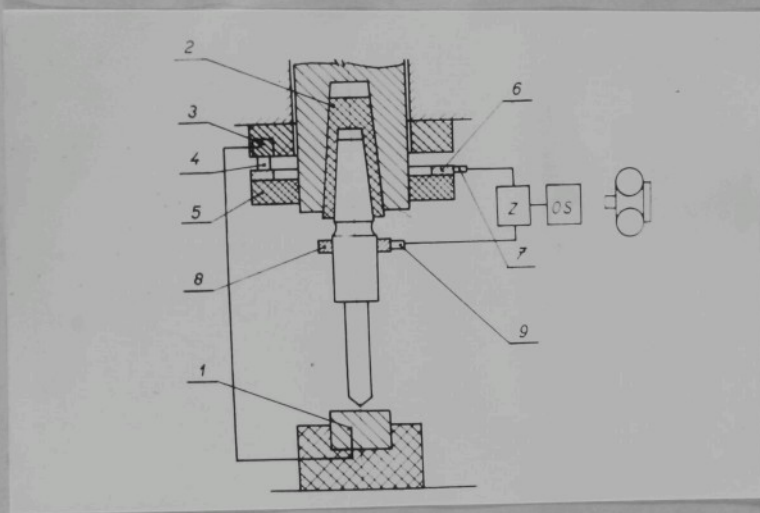


Obr. 53

malé ploše. V další fázi, kdy současně rozřezávají folii obě hlavní ostří je záznam méně jasný a méně čitelný. U větších posuvů a řezných rychlostí se projevilo porušení isolační vrstvy pryskyřice mezi vzorkem a folií, signál byl přerušovaný a záznam nečitelný. Zesílení vrstvy izolace, nebo použití izolace z papíru, případně z jiného pevného isolačního materiálu, zlepšilo sice čitelnost záznamu, ale neodstranilo plně spojování folie se vzorkem. Silnější izolace přitom jistě ovlivní teplotu v místě řezu a získané hodnoty nebudou odpovídat poměrům, které jsou na ostří vrtáku při normální práci. Ze záznamu je však patrné, že teplota směrem od osy vrtáku stoupá do určitého maxima a pak bude směrem k obvodu klesat, nebo má ustálený průběh.

Ani při jednom měření nebyl zaznamenán vzestup teploty až do maxima na obvodě.

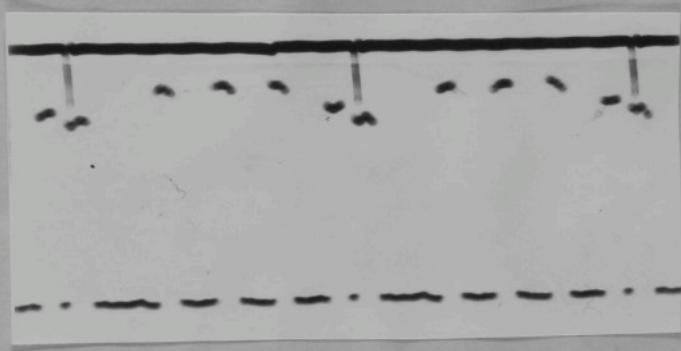
- b) Pro měření pomocí termočlánků, které tvořil kantalový drátek a vrták byly použity vzorky z ocele 12 060, do kterých byly izolovaně vloženy kantalové drátky a zality epoxydovou pryskyřicí. Uspořádání je zřejmé z obr. 54. V každém vzorku bylo 5 drátků umístěných na poloměru $r_1 = 3$ mm, $r_2 = 4,5$ mm, $r_3 = 6$ mm, $r_4 = 7,5$ mm, $r_5 = 9$ mm.



Obr. 54

Jednotlivé drátky byly připojeny na lamely kolektoru 3 tak, že kartáč 4 spojil příslušnou lamelu na vývod k zesilovači Z tehdy, když byl příslušný drátek rozřezáván jedním břitem vrtáku. Záznam měření je na obrázku č. 55 - $n=180$ ot/min, $s = 0,25$ mm/ot. Jak je vidět ze záznamu i zde se jasně projevuje vzrůst teploty směrem k obvodu do určitého maxima, které však není na obvodě, ale asi na poloměru 4,5 až 6 mm. Při měření teploty pomocí termočlánků, které tvořil vrták a drátek z kantalu vznikají potíže zejména v tom, aby přes kolektor byl spojen s měřicí aparaturou ten drátek, který je právě rozřezáván. Při vyšších řezných rychlostech u drátků na větších poloměrech doba potřebná k rozřezání je velmi krátká (při $n = 500$ ot/min na poloměru $r = 9$ mm a prů-

měru drátku 1 mm, je doba potřebná k rozřezání 0,004 vteřiny) a tedy i signál, který musíme registrovat. Použití drátků o větším průměru tuto dobu sice prodlouží, ale bude

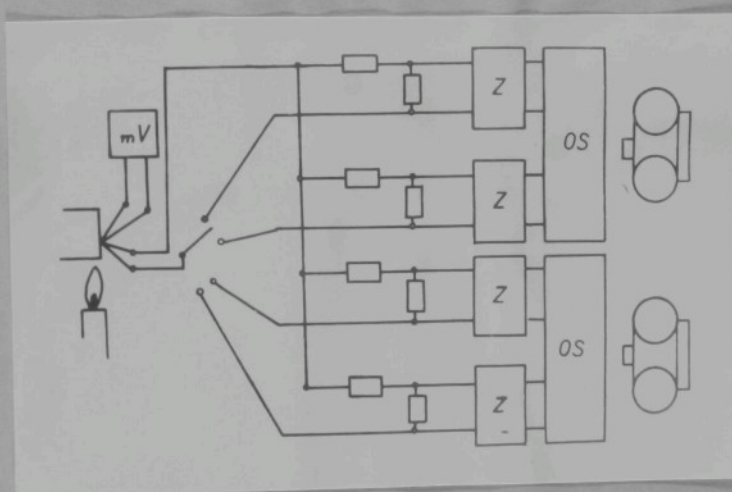


Obr.55

zkreslovat výsledek, který i tak není plně odpovídající podmínkám při normálním vrtání. Měříme totiž teplotu při řezání drátku, který je z jiného materiálu než vzorek a nikoli při řezání vzorku. Další nevýhodou je, že drátek musí být odisolován od materiálu vzorku. Při rozřezání drátku však vzniká v řezné rovině na drátku otřep, který spojí drátek vodivě se vzorkem a vyřadí jej z činnosti.

- c) Uvedené důvody vedly k tomu, že byla propracována třetí metoda s termočlánsky železo-konstantan, které byly přivařeny do vzorku. Tyto termočlánsky registrovaly teplotu trvale až do doby, kdy byly jejich spoje rozřezány. Na záznamu se sice objevily signály i po rozřezání spoje termočlánsku proto, že břit při řezání drátky vždy vodivě spojí, ale signál takto získaný pravděpodobně neodpovídá skutečné teplotě v místě řezu a proto jako směrodatný pro odečtení výše teploty byl brán vždy první a druhý signál. Lze předpokládat, že teplý spoj termočlánsku má ve sváru takový rozměr, že i při posuvu 0,355 mm/ot tj. 0,1775 mm/ot

připadající na jeden břit nedojde odřezáním této vrstvy k porušení teplého spoje a tento bude registrovat teplotu při práci obou břitů v místě sváru. Pro měření byly opět použity vzorky z oceli 12 060, do kterých byly ve čtyřech otvorech na poloměru $r_1 = 0$, $r_2 = 3$ mm, $r_3 = 6$ mm a $r_4 = 9$ mm přivařeny výbojovou svářečkou termočlánky železo-konstantan. Každý z termočlánků byl přes zesilovač vyveden na jeden paprsek osciloskopu. Aby bylo docíleno stejné zesílení všech signálů, bylo provedeno cejchování při zapojení dle schematu obr. 56.



Obr. 56

Na tělísko z materiálu 12 060 ohřívané bunsenovým kahanem byly vedle sebe navařeny termočlánek Hoskinsův chromel-alumel, zapojený na milivoltmetr cejchovaný ve stupních Celsia a termočlánek železo-konstantan, stejný jako termočlánky zabudované do vrtaného vzorku. Tento termočlánek byl zapojován přes čtyřpolohový přepínač na jednotlivé zesilovače. Záznam měření z termočlánku na poloměru $r = 9$ mm je na snímku obr. 57 ($n = 355$ ot/min; $s = 0,25$ mm/ot). Všechna měření byla provedena při posuvech

$$\begin{aligned} s_1 &= 0,125 \text{ mm/ot} \\ s_2 &= 0,18 \text{ mm/ot} \\ s_3 &= 0,25 \text{ mm/ot} \\ s_4 &= 0,355 \text{ mm/ot} \end{aligned}$$

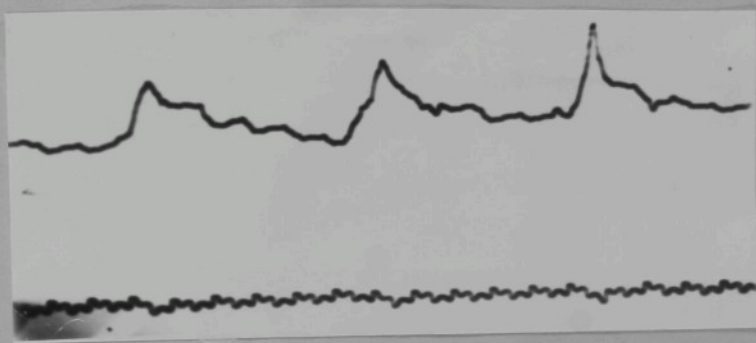
a řezných rychlostech odpovídajících otáčkám

$n_1 = 180 \text{ ot/min}$

$n_2 = 250 \text{ ot/min}$

$n_3 = 355 \text{ ot/min}$

$n_4 = 500 \text{ ot/min}$

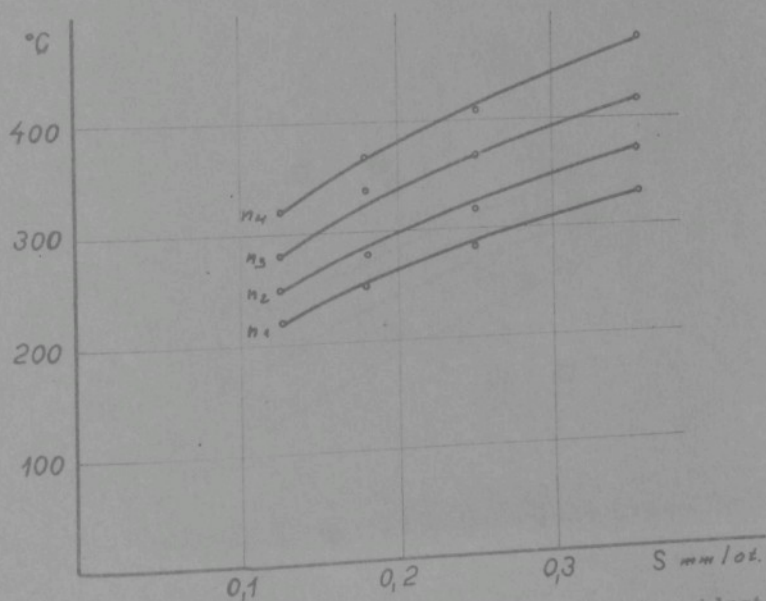
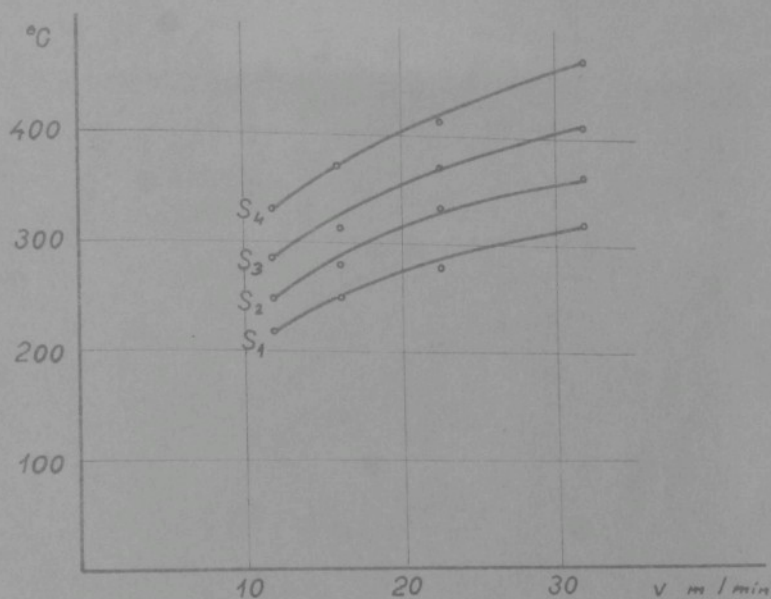


Obr. 57

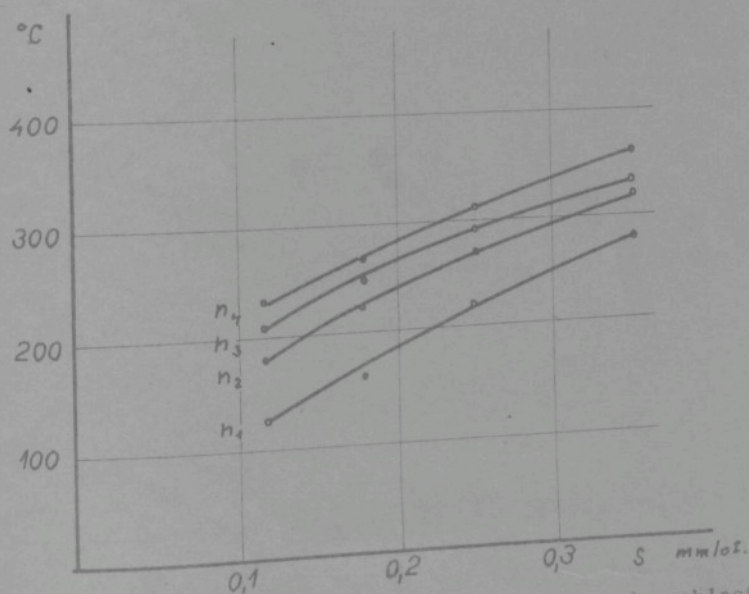
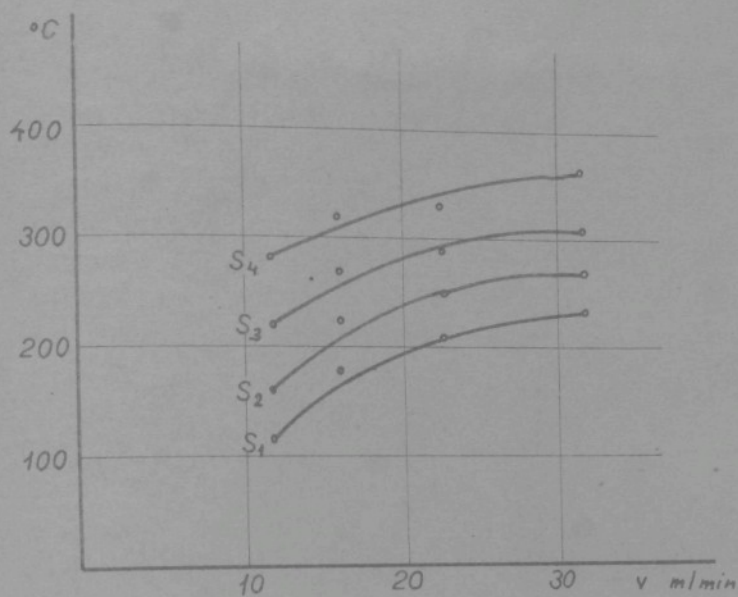
Pro každou zkoušku byl použit nově ostřený vrták bez chlazení. Vzorek měl předvrtání středícím vrtákem ČSN 22 1110 Ø 10. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 13 a vyneseny do grafů na obr. č. 58, 59, 60 a 61.

n ot/min	s mm/ot	teplota řezání °C			
		příčný břit	hlavní břit		
			r=3mm	r=6mm	r=9mm
180	0,125	125	250	250	220
	0,18	160	280	285	250
	0,25	220	320	320	285
	0,355	280	360	360	330
250	0,125	180	300	305	250
	0,18	225	325	340	280
	0,25	270	375	380	315
	0,355	320	420	425	370
355	0,125	210	325	320	280
	0,18	250	380	370	335
	0,25	290	425	425	370
	0,355	330	480	475	415
500	0,125	230	330	330	320
	0,18	270	390	380	365
	0,25	310	460	440	410
	0,355	365	520	500	475

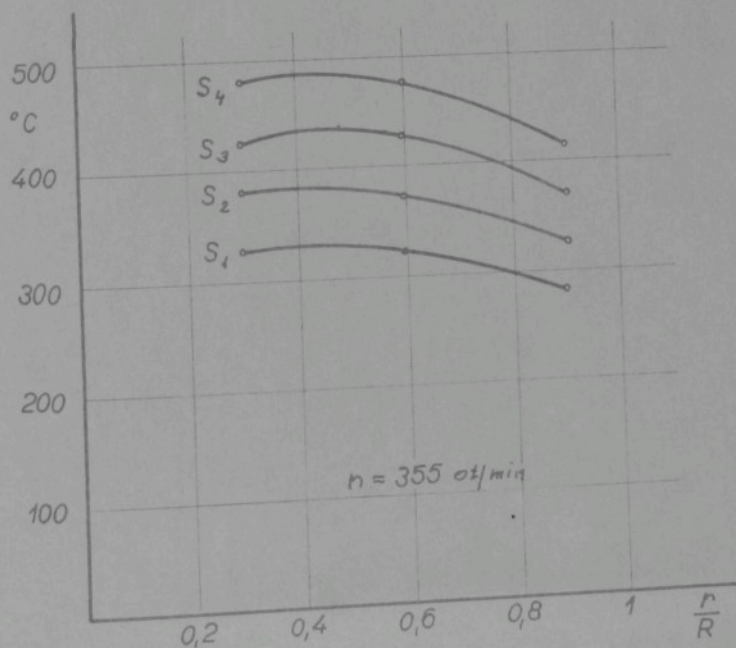
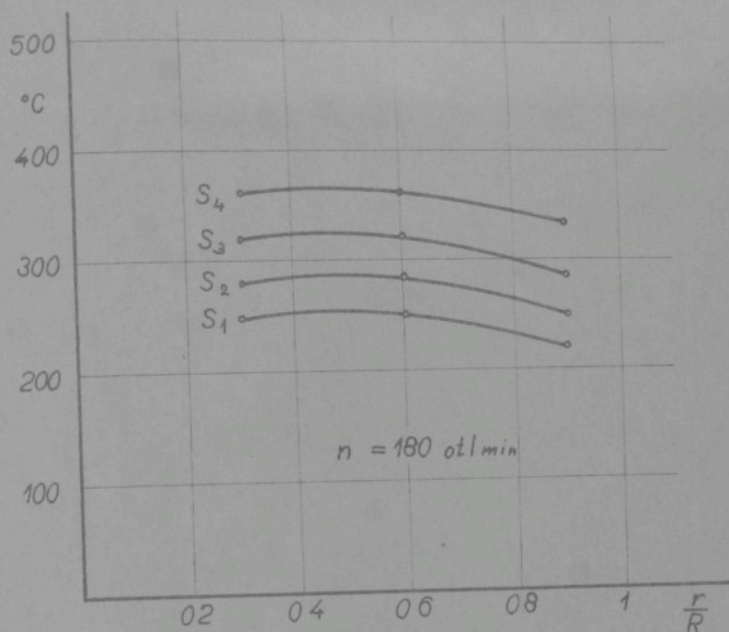
Tab.č.13



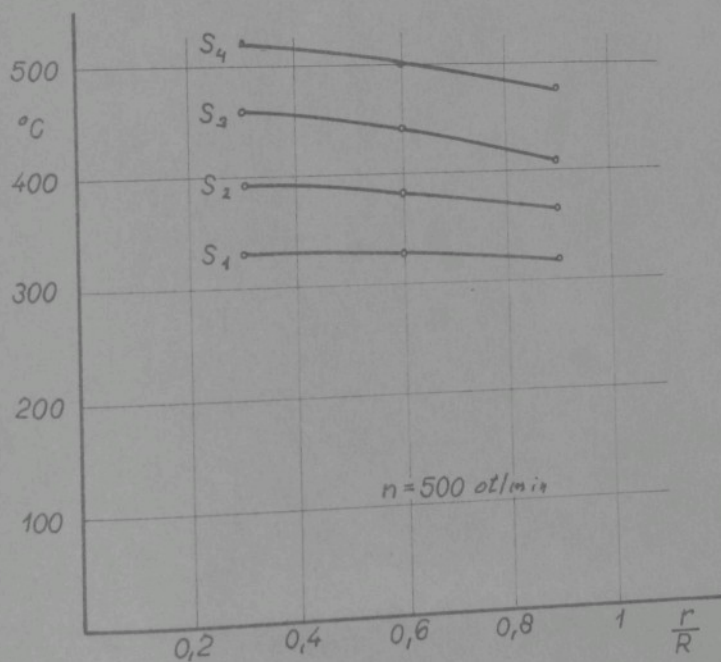
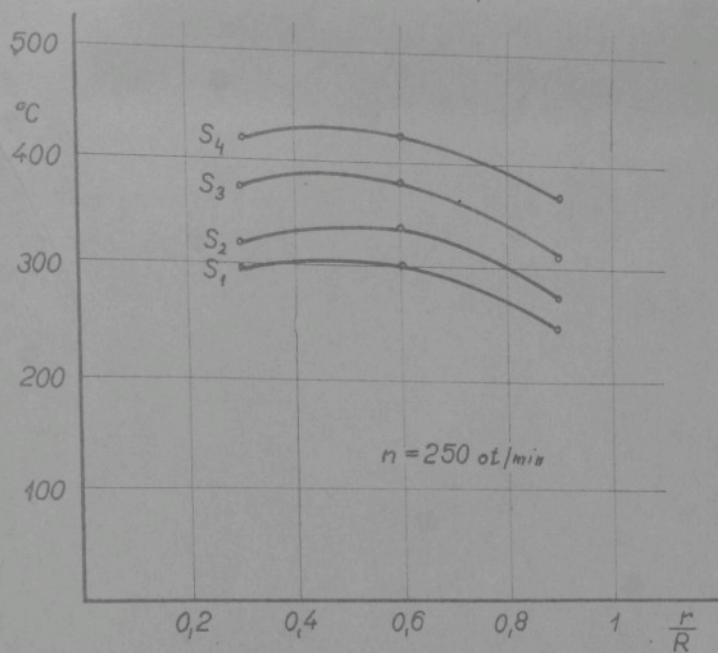
Obr. 58 Závislost teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu na maximálním průměru hlavního břitu

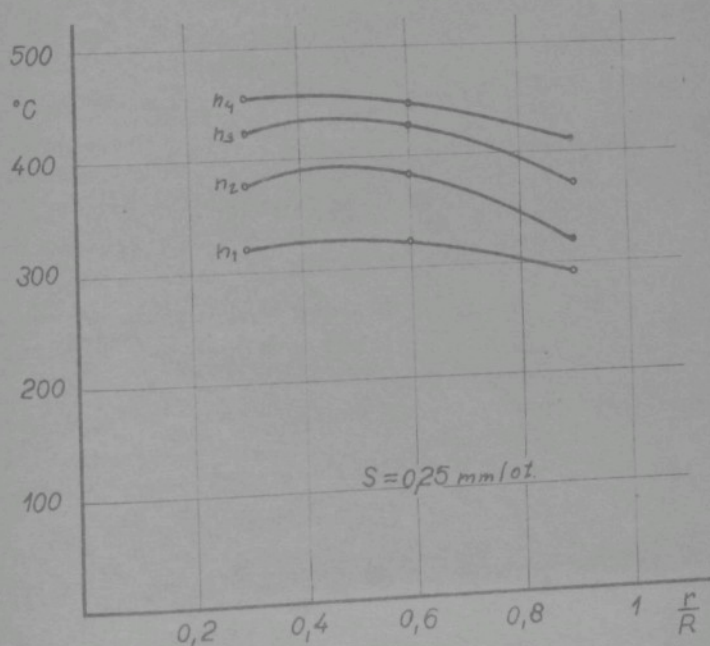
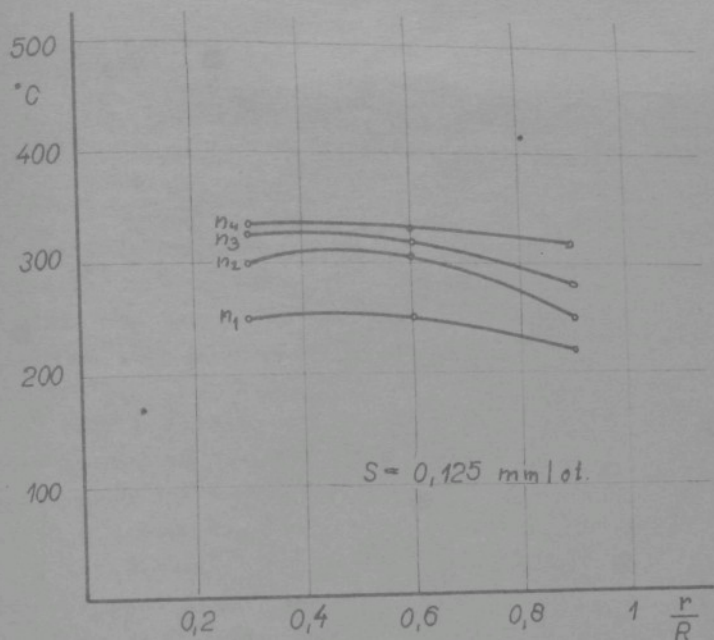


Obr.59 Závislost teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu na příčném břitu

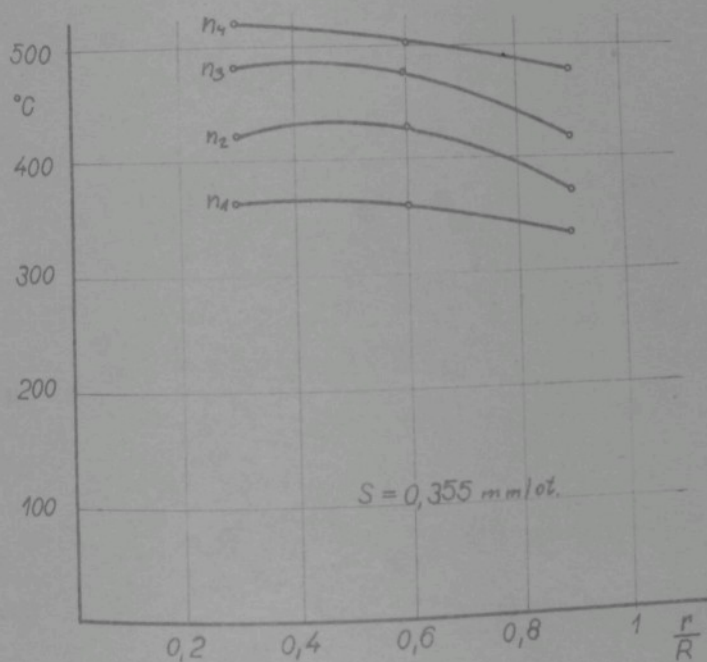
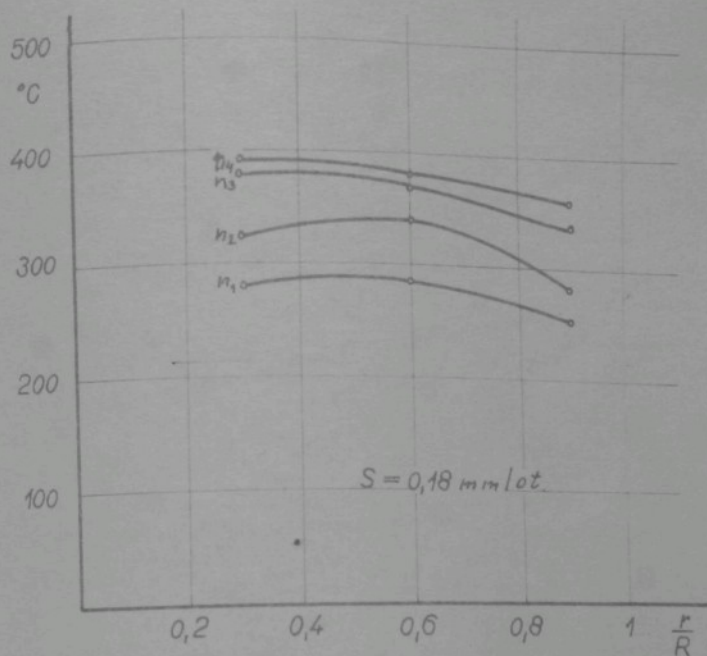


Obr. 60 Průběh teploty řezání podél hlavního břitu





Obr.61 Průběh teploty řezání podél hlavního břitu



Hodnocení výsledků

Závislost teploty na řezné rychlosti a posuvu možno dle výsledků měření vyneset do grafů vyjádřit vztahem

$$\theta = k \cdot v^x \cdot s^y$$

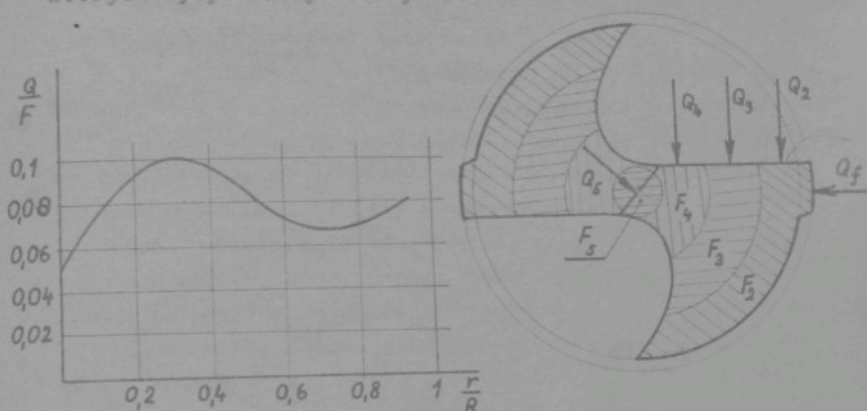
V oblasti zkoumaných běžně používaných řezných podmínek, zvýšení řezné rychlosti a posuvu vede ke zvýšení teploty. Řezání. Na hlavním břitu řezná rychlost ve srovnání s posuvem má však větší vliv na teplotu, analogicky jako při soustružení (obr.č.58). Přitom teplota stoupá s řeznou rychlostí u větších posuvů rychleji než u posuvů malých. Vliv posuvu na teplotu se projevuje u nižších řezných rychlostí méně než u vyšších (exponent $x = 0,4$ až $0,6$ a $y = 0,3$ až $0,4$).

Teplota na příčném břitu je ovlivňována řeznou rychlostí o něco méně než posuvem, kde vzrůst teploty se zvětšením posuvu je prudší ($x = 0,4$ až $0,5$ a $y = 0,45 - 0,6$, obr.č.59).

Výsledky měření ukázaly, že maximální teplota není na maximálním poloměru hlavního ostří. Jak je vidět z grafického vyjádření průběhu teploty podél hlavního ostří na obr. č. 60 a 61, klesá teplota od středu k obvodu. Tento pokles je nejdříve pomalejší asi do $0,5$ až $0,6 \frac{r}{R}$ (r = vzdálenost místa, kde měříme, od osy vrtáku; R = poloměr vrtáku), pak je výraznější. Vliv řezné rychlosti a posuvu na průběh teploty podél břitu je celkem málo výrazný. Pokles teploty od středu k obvodu lze zdůvodnit tím, že směrem k ose vrtáku se sice snižuje řezná rychlost, ale přitom značně prudce stoupá úhel řezu ϕ . Úhel řezu, jak je to vidět i na obr.č.29, měřený v rovině kolmé na ostří stoupá ze 70° na obvodě až na 110° na přechodu hlavního ostří do příčného. Je tedy zřejmé, že na teplotu má při vrtání rozhodující vliv úhel řezu. Teplota na příčném břitu, jak ukázala měření, je nižší než teplota na hlavních břitech i když řezné podmínky jsou zde nejméně příznivé (malá, až nulová řezná rychlost, negativní úhel čela). Když však zkoumáme průřezy těla vrtáku, kterými je z místa řezu odváděno vzniklé teplo, vidíme, že nejpříznivější jsou podmínky právě v ose vrtáku a nejnepříznivější ve vzdále-

nosti asi do $0,4 \frac{r}{R}$.

Na tepelné zatížení břitu můžeme uvažovat také z práce potřebné pro odřezání materiálu při dané řezné rychlosti a posuvu. Při měření řezných sil jsme provedli zkoušky, při kterých byly vrtány vzorky dle obr.č.37.



Obr.52

Z naměřených krouticích momentů můžeme stanovit výkon potřebný pro odřezání daného elementu a stanovit celkové vzniklé teplo. Výsledky jsou v tabulce č. 14 a 15.

Vidíme, že množství tepla sice stoupá směrem k obvodu, ale vzrůst není značný. Uvažujeme-li průřezy těla vrtáku přilehlé k ostří odpovídajícímu jednotlivým elementům vidíme, že průřez, kterým se vzniklé teplo odvádí značně roste směrem k obvodu. Lze tedy připustit, že směrem k obvodu může teplota klesat souhlasně s naměřenými hodnotami.

Další důležitou roli hraje zřejmý nárůstek. Z výbrusů kořenů třísek získaných přerušením řezu jak jsou uvedeny v kapitole "Mechanika tvoření třísky" vidíme, že v procesu řezání při vrtání šroubovitým vrtákem se tvoří velmi intenzivně nárůstek téměř v celém rozsahu běžně používaných řezných rychlostí a posuvů. Tvoření nárůstku se zmenšuje od středu vrtáku k obvodu. Nárůstek nám sice celkově "koriguje" negativní úhel čela směrem k ose nástroje, ale zároveň nám zvětšuje poloměr zaoblení břitu. V důsledku toho se v blízkosti ostří, kde právě při použité metodě registrujeme teplotu, zhoršuje geometrie. Lze tedy před-

pokládat, že naměřené hodnoty reprodukuji skutečné poměry při běžném provozu v praxi. Tvorba nárůstku tak jak je patrna z kořenů třísek dává předpoklady také pro vysvětlení proč dochází k intenzivnímu opotřebení na přechodu hlavního ostří do fázky. Nárůstek vlastně prodlužuje břit a mění tím teplotní pole ve vlastním břitu nástroje.

Můžeme tedy vyslovit domněnku, že na vlastním ostří nástroje bude za určitých podmínek maximální teplota v určité vzdálenosti od obvodu, ale vlivem tření fasetky o vrtačný otvor, zejména se stoupající hloubkou vrtání bude se přesouvat maximum teploty k obvodu.

Také opotřebení, které se u vrtáků projevuje především na hřbetě, bude působit velmi nepříznivě zvětšením tření na teplotu na ostří nástroje.

Bude proto účelné zaměřit další výzkum na ujasnění všech těchto vlivů, které nemohly být pro svůj rozsah zahrnuty do programu této práce.

n ot/min	s mm/ot	Výkon (kpm/min)					
		fázka	element d ₁ = 20 d ₂ = 14 ₅	element d ₁ = 14 ₅ d ₂ = 9	element d ₁ = 9 d ₂ = 3 ₅	příčný břit	celkový výkon
			1	2	3		
180	0,125	349	788	708	622	169	2626
	0,18	452	964	867	790	224	3297
	0,25	565	1295	1033	1015	280	4188
	0,355	678	1295	1570	1355	336	5234
250	0,125	550	1100	1080	862	236	3828
	0,18	706	1410	1340	1100	312	4868
	0,25	864	1880	1720	1490	392	6346
	0,355	1020	2520	2350	1960	470	8320
355	0,125	1005	1670	1555	1340	222	5792
	0,18	1115	2110	2000	1670	335	7230
	0,25	1340	2780	2670	2230	445	9465
	0,355	1560	3780	3560	3000	557	12457
500	0,125	1730	2520	2360	2040	312	8962
	0,18	1885	3140	2990	2510	471	10996
	0,25	2200	4080	3930	3300	625	14135
	0,355	2360	5470	5180	4400	785	18195

Tab.č.14

n ot/min	s mm/ot	Vznikající teplo (cal/min)					
		fázka	element $d_1 = 20$ $d_2 = 145$	element $d_1 = 145$ $d_2 = 9$	element $d_1 = 9$ $d_2 = 35$	příčný břit	celkové
		1	2	3	4	5	6
180	0,125	793	1845	1660	1460	396	6149
	0,18	995	2250	2030	1850	525	7650
	0,25	1320	3030	2420	2370	655	9795
	0,355	1590	3030	3680	3170	785	12255
250	0,125	1290	2575	2530	2020	552	8950
	0,18	1650	3300	3140	2580	730	11400
	0,25	2020	4400	4030	3490	917	14850
	0,355	2380	5900	5500	4590	1100	19500
355	0,125	2350	3910	3640	3140	520	13550
	0,18	2610	4940	4680	3910	1100	16900
	0,25	3140	6500	6250	5220	1040	22150
	0,355	3650	8850	8340	7020	1305	29200
500	0,125	4050	5900	5520	4770	730	21000
	0,18	4410	7350	7000	5870	1100	25700
	0,25	5150	9550	9200	7720	1460	33100
	0,355	5520	12800	12150	10300	1840	42500

Tab.č.15

Z á v ě r

Vrtání šroubovitými vrtáky je proces značně složitý vzhledem k tomu, že nástroj má komplikovanou geometrii břitů a pracuje za ztížených podmínek obklopen materiálem obrobku.

Rozbor geometrie ukazuje, že úhel čela na hlavních břitech v rovině kolmé na ostří se mění od kladného maxima na obvodě, závislého na stoupání šroubovitě drážky, směrem k ose až do záporných hodnot -10° . Odvozené vztahy umožňují určit úhly čela a hřbetu v rovině normály s ohledem na vrcholový úhel ε a úhel sklonu hlavního ostří λ .

Analýza procesu tvoření třísky ukázala, že charakteristickým znakem při vrtání šroubovitým vrtákem je intenzivní tvorba nárůstku. Nárůstek se tvoří na všech částech břitů a podstatnou měrou mění geometrii břítu při práci. Zejména na příčném břítu má nárůstek mimořádný význam. Zde dochází ke změně skutečného úhlu řezu σ ze 149° až na 95° . To za určitých podmínek, jak ukázaly zkoušky, umožní dokonce tvorbu plynulé třísky i na příčném břítu. Nerovnoměrná a nepravidelná tvorba nárůstku podél břítu způsobuje současně nerovnoměrné - nesymetrické zatížení břitů, vznik radiálních sil a kolísání hlavní řezné síly. Toto kolísání je podporováno také tím, že při porušení nárůstku, který částečně obaluje břit i na hřbetě se zmenší okamžitá tloušťka odřezávané vrstvy. Kolísání hlavní řezné síly může vést k tak velikému rozkmitání nástroje, že se nejenom sníží jeho trvanlivost, ale může dojít i ke zlomení.

Změna skutečné geometrie břítu v procesu vrtání se projevuje také na velikosti plastické deformace odřezávané vrstvy materiálu. Koeficient přechování třísky se podél hlavního ostří směrem k obvodu zmenšuje. Tento pokles je nejvýraznější u nižších řezných rychlostí.

Analýza ukazuje, že s ohledem na proces tvoření třísky je výhodnější pracovat s většími posuvy jednak s ohledem

na menší plastické deformace, ale také proto, že i při nerovnoměrnosti způsobené periodicky se tvořícím nárůstkem je relativní zmenšení tloušťky odřezávané vrstvy menší a snižuje se sklon k torsnímu chvění.

Řezné síly, které působí na břit šroubovitého vrtáku jsou běžně zkoumány jako celkový krouticí moment a celková osová síla. Proměnnost geometrie podél břitu a proměnnost řezné rychlosti však přímo žádají provést podrobnější rozbor. Proto byly odvozeny vztahy které uvažují uvedené vlivy. Výsledky vypočtených hodnot dle těchto vztahů a výsledky praktických měření se dobře shodují. Přitom měření byla prováděna tak, že bylo možno stanovit průběh krouticího momentu, osově síly a specifického řezného odporu podél břitu. Směrem k obvodu se specifický řezný odpor zmenšuje, ale zatím co na hlavním břitu se zvětšováním řezné rychlosti specifický řezný odpor mírně stoupá, na příčném břitu má klesající charakter. Je to důsledek intenzivní tvorby nárůstku a tím změny skutečné geometrie břitu.

Zvětšování posuvu způsobuje na obou břitech pokles specifického řezného odporu. Výsledky ukázaly, že změna úhlu čela o 1° vyvolá změnu specifického řezného odporu až o 5%, což je pětinašobek změny která nastává při soustružení.

Složitost celého procesu vrtání se projevuje i v rozložení teploty řezání podél břitu. Běžně používané vztahy pro stanovení výše teploty v závislosti na řezné rychlosti a posuvu platí pro průměrné hodnoty nebo uvažujeme-li teplotu v určitém místě břitu, ale neplatí pro průběh podél břitu. Zde se ukázalo, že maximum teploty není na obvodě, i když je zde maximální rychlost, ale blíže ke středu vrtáku. Přitom při menších rychlostech je pokles teploty směrem k obvodu větší, než u rychlostí vyšších. Vliv posuvu se na průběh teploty podél břitu téměř neprojevuje.

Analýza složité problematiky vrtání provedená v před-

ložené práci umožňuje v určitých případech nové pohledy na chování některých veličin v literatuře dosud málo objasněných.

I když některé provedené závěry lze přímo prakticky využít, zůstávají ještě problémy zasluhující dalšího podrobného výzkumu.

L i t e r a t u r a

- [1] Albrecht, P.: New developement in the theory of the metal-cutting process. Part I. The ploughing process in metal cutting.
Transaction of the ASME 1960. Ser.B č.4.
Str.348-358.
- [2] Albrecht, P.: New developement in the theory of the metal-cutting process. Part II. The theory of chip formation.
Transaction of the ASME 1961. Ser.B č.4.
Str. 557-571.
- [3] Aleksejev: Issledovanije někatorych voprosov processa sverlenija.
Izvestija VUZOV No.11, 1964.
- [4] Aršinov, V.A.: Rezanija metallov.
Mašgiz 1959.
- [5] Bickel, E.: Die Problematik der Messung von wechselnden Kräften an der Werkzeugschneide.
Microtechnic Vol.XIV.No 5, 254-260.
- [6] Bobrov, V.F.: Issledovanije zony deformacii pri rezanii metallov metodom delitelnoj sėtki.
Vest.Mašinostrojenija č.3, 1958, str.116-122.
- [7] Bokučava, G.V.: Temperatura rezanija pri šlifovanii.
Vest.Mašinostrojenija č.11, 1963, str.62-66.
- [8] Bredendick, F.: Die Massenkräfte beim Zerspanvorgang.
Werkstatt u.Betrieb. No 10, 1959, str.739-742.
- [9] Buda, A.-Békéš, J.: Teoretické základy obrábění kovov.
SVTL 1967.
- [10] Cocchadze, V.V.: Izmerenije temperatur pri rezanii metallov.
Vest.Mašinostrojenija č.11, 1963. Str.66-69.
- [11] Dohmen, H.G.: Zusammenfassung und Vergleich der Zerspanungsmechanischen Theorien.
Industrie-Anzeiger 1965, č.51, str.1023-1032.

- [12] Donald, W.J.: The Deformation Process in Metal-Cutting. Transaction ASME, č. 8, 1960, str. 253-258.
- [13] Dorsselaer, J.E.M. van: De spaanvorming aande dwarsnijkant van de spiraalboor. Metaalbewerking, č. 3, 1967, str. 377-374.
- [14] Dráb, Vojtěch: Sledování tvoření třísky při vrtání. Sborník VŠST 1960.
- [15] Dráb, Vojtěch: Vliv geometrie břitu vrtáku na velikost krouticího momentu a osové síly. Výzkum. zpráva VŠST. RP 3/58/59.
- [16] Dráb, Vojtěch: Vliv geometrie břitu a řezných podmínek na tvoření třísky. Výzkum. zpráva VŠST. RP 2/58/59.
- [17] Dukušin, B.I. a kol.: Trenije i iznos pri rezanii metallov. Mašgiz 1955.
- [18] Etin, A.O.: Kinematičeskij analiz metodov obrabotki metallov rezanijem. Izd. Mašinostrojenija 1964.
- [19] Filomenko, Ch.: Rezanije metallov. Mašgiz 1963.
- [20] Fokin, O.V.: Opredelenije temperatury na poverchnost'jach kontakta rezca so stružkoj i izdelijem. Vest. Mašinostrojenija č. 11, 1963. Str. 56-59.
- [21] Friedrich, H.: Über die Wärmevergänge beim Spanschneiden und die vorteilhaften Schnittgeschwindigkeiten. VDI 58, str. 379, 417 a 454.
- [22] Gottwein, K.: Die Messungen der Schneidetemperatur beim Abdrehen von Flusseisen. Maschinenbau 4, str. 1129 a 5, str. 414.
- [23] Granovskij, G.I. a kol.: Rezanije metallov. Mašgiz 1954.
- [24] Gricajenko, Ju. A.: Těploobrazovanije na iznaščivajennych poverchnost'jach rezuščich instrumentov. Vest. Mašinostrojenija č. 11, 1963, str. 59-62.

- [25] Hornung, A.: Forgácsolás-elmélet és forgácsoló szerszámok.
Budapest 1953.
- [26] Herbert, E.S.: Cutting Temperatures.
Proc.Inst.Mech.Engrs.26, str.289 a 329.
- [27] Chao, B.J.-Triggar, K.J.: Temperature Distribution at the Tool-Chip Interface in Metal-Cutting.
Trans.of the ASME 1955. No.10. No.7.
- [28] Isajev, A.I.-Gorbunova, V.N.: Issledovaniye processa plastičeskich deformacij v zone stružko-obrazovanija pri pomošči kinosjovki.
Vest.Mašinostrojenija 1960, č.5, str.57-59.
- [29] Isajev, A.I. a kol.: Issledovaniya v oblasti technologii obrabotki metallov rezanijem.
Mašgiz 1957.
- [30] Isajev, A.I.: Process obrazovanija poverchnostnogo sloja pri obrabotke metallov rezanijem.
Mašgiz 1950.
- [31] Kasahara-Kinosita: Rikagubu kenjkjusjo chokoku.
Rept.Inst.Phys.and Chem.Res. 1961, 37.
- [32] Kececioglu, D.: Shear-strain rate in metal cutting and its effects on shear flow stress.
Transaction of the ASME 1958, č.1, str.158 až 168.
- [33] Kececioglu, D.: Shear-Zone size, compressive stress and shear strain in metal cutting and their effects on mean shear flow stress.
Transaction of the ASME 1960, č.1, str.79-86.
- [34] Klušin, M.I.: Rezaniye metallov.
Mašgiz 1953.
- [35] Klušin, M.I.: Rezaniye metallov.
Mašgiz 1958.
- [36] Klušin, M.I.: Tvoření třísky při obrábění kovů.
Technické-vědecké vydav. 1952.

- [37] Krivouchov, V.A.: Issledovaniye raboty deformacii pri rezanii metallov.
Vest.Maşinostrojenija 1958, str.94-104.
- [38] Krivouchov, V.A. a kol.: Obrabotka metallov rezaniem.
Oborongiz 1958.
- [39] Kronenberg, M.: Grundzüge der Zerspanungslehre I a II.
Berlin, Springer 1954.
- [40] Lee, E.H.-Shaffer, B.W.: The theory of plasticity applied to a problem of machining.
Journal of Applied Mechanics 1951, č.4 str.405-413.
- [41] Loladze, T.H.: Iznos rezuščego instrumenta.
Mašgiz 1958.
- [42] Loladze, T.H.: Stružkoobrazovanie pri rezanii metallov.
Mašgiz 1952.
- [43] Löschner, V.: Berechnung von Drehmoment und Vorschubkraft beim Bohren mit Spiralbohrern.
Maschinenbautechnik II, 1962, č.4, str.223-229.
- [44] Okushima, K.-Hitoni, K.: Transitional phenomenon in metal cutting.
Bulletin of JSME 1961, č.14, str.357-365.
- [45] Oxley, P.L.B.: Rate of strain effect in metal cutting.
Transaction of the ASME 1963, č.4, Sr.B str.20-24.
- [46] Pahlitzsch, G.: Entstehung und Wirkung von Radialkräften beim Bohren mit Spiralbohrern.
Werkstattstechnik No.6, 1959, str.302-308.
- [48] Pankin, A.V.: Obrabotka metallov rezaniem.
Mašgiz 1961.
- [49] Pfikryl, Z.: Teorie obrábění.
SNTL 1966.
- [50] Pfikryl, Z.: Technologie obrábění.
SNTL 1967.
- [51] Příručka měřicí techniky.
SNTL 1965.

- [52] Reichel, W.: Standzeitgeschwindigkeits-Ermittlung von Werkzeugen und Bearbeitbarkeitsprüfung von Werkstoffen.
Maschinenbau 15, str. 187.
- [53] Reichenbach, G.S.: Experimental Measurement of Metal-Cutting Temperature Distributions.
Trans. of the ASME 1958, vol.80, No.3.
- [54] Reznikov, A.N.: Modelirovanije stacionárnyh teplovych polej v klině s učetom zavisimosti teploprovodnosti ot temperatury.
Vest.Maşinostrojenija č.11, 1963, str.35-38.
- [55] Reznikov, A.N.: Primenenije metoda električeskogo modelirovanija k ocenke temperaturnogo pol'ja rezca.
Vest.Maşinostrojenija č.11, 1963, str.43-46.
- [56] Reznikov, A.N.: Teplofizičeskije rasčety i eksperimenty pri rezanii metallov i plastmass.
Vest.Maşinostrojenija č.11, 1963, str.29-34.
- [57] Reznikov, A.N.: Teploobmen pri rezaniji i ochlaždenije instrumentov.
Mašgiz 1963.
- [58] Reznikov, A.N.: Učeniye o rezaniji metallov.
Mašgiz 1947.
- [59] Rikalin, N.N.: Rasčet i modelirovanije temperaturnogo polja v izdelii pri šlifovaniji i frezerovaniji.
Vest.Maşinostrojenija, č.11, 1963, str.74-80.
- [60] Schalbroch, H.: Kurzprüfverfahren der Zerspanbarkeit.
Leipzig, Teubner Verlag 1950.
- [61] Schwerd, F.: Über die Bestimmung des Temperaturfeldes beim Spanablauf.
VDI 77
- [62] Spur, G.: Ergebnisse von Schnittkraftmessungen beim Bohren mit Spiralbohrern.
Maschinenmarkt No.36, 1963, str.23-31.

- [63] Usui, E.-Takeyama, H.: A photoelastic analysis of machining stress.
Transaction of the ASME 1960, Ser.B,
č.4, str.303-308.
- [64] Vieregge, G.: Die Energieverteilung und die Temperatur bei Zerspannung.
Werkstatt und Betrieb 1953, No.11.
- [65] Vlach, B.-Kozel, J.: Filmování kořene třísky při řezání kovů.
Strojírenství 1961, č.1, str.47-49.
- [66] Vulf, A.M.: Řezání metallov.
Mašgiz 1963.
- [67] Zorev, N.N. a kol.: Razvitije nauki o rezaniji metallov.
Izd. Mašinostrojenije 1967.
- [68] Zorev, N.N.: Voprosy mehaniki processa rezanija metallov.
Mašgiz 1966.

u 41 S