

**TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE

**VÝZNAM ČASOVÉHO PRŮBĚHU ŘEZNÉ SÍLY
PŘI BROUŠENÍ VÁLCOVÝCH PLOCH**

DISERTAČNÍ PRÁCE

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071356

Vypracoval : Ing. František Holešovský

Školitel : Doc.Ing. Vladimír Gabriel, CSc.

Vedoucí katedry : Doc.Ing. Vladimír Gabriel, CSc.

Ústí nad Labem leden 1997

KOM 124s, 5.1.98
obr. g. Gabriel, Lab.

11.2.97

14.1.98

ANOTACE

Zpracoval : Ing.František Holešovský

MDT : 621. 923

Význam časového průběhu řezné síly při broušení válcových ploch

Práce vychází ze shrnutí dosavadních znalostí o závislostech jednotlivých veličin procesu broušení. Současná etapa v technologii obrábění a ve výrobních procesech všeobecně směřuje ke snižování podílu lidské práce, zvyšování stupně automatizace za přispění robotizace.

Práce je proto zaměřena na zjištění závislostí průběhu vyjiskřovací fáze broušení (vyjiskřovací křivky) a výstupní charakteristiky povrchu dané drsností povrchu R_a . Je vytvořena matematická závislost mezi vyjiskřovací křivkou a touto drsností povrchu, stejně tak matematický popis strmosti vyjiskřovací křivky.

Počet stran : 124

Počet příloh : 5

Počet obrázků : 75

Počet tabulek : 24

Obsah.	
Anotace	2
Obsah	3
Seznam použitých symbolů.....	5
Úvod	10
1.0 Historie obrábění	12
2.0 Problematika broušení	15
2.1 Současný stav	15
2.2 Vlivy na proces broušení	18
2.3 Charakteristika procesu broušení	20
2.3.1 Podstata a zvláštnosti procesu broušení	20
2.3.2 Charakteristické veličiny procesu broušení	22
2.3.2.1 Vstupní veličiny	23
2.3.2.2 Veličiny průběhu procesu	28
2.3.2.3 Přímé výstupní veličiny	41
2.3.2.4 Složené veličiny nepřímé	48
2.4 Shrnutí	49
3.0 Experimentální část	53
3.1 Formulace problému	53
3.2 Expertní systémy	55
3.3 Matematické modelování	57
3.4 Podmínky experimentu	60
3.4.1 Experiment	60
3.4.1.1 Plánování experimentů	61
3.4.2 Materiální zajištění experimentu	62
3.4.2.1 Vybavení pracoviště	62
3.4.2.2 Brousící materiál	65
3.4.2.3 Materiál obrobku	65
3.4.2.4 Řezná kapalina	66
3.5 Metodika měření	67
3.5.1 Uchovávání dat	70
3.5.2 Plánování experimentu	71
3.5.3 Nosné veličiny	72
3.5.3.1 Časová závislost řezné síly	72

3.5.4 Provedení experimentu	77
4.0 Vyhodnocení experimentu	78
4.1 Vztah drsnosti povrchu a vyjiskřovací fáze	78
4.1.1 Jednoduchá závislost	78
4.1.2 Vícenásobná závislost	82
4.2 Závislost strmosti vyjiskřovací křivky	93
4.2.1 Jednoduché závislosti	93
4.2.2 Vícenásobná závislost	96
4.2.3 Jiné závislosti	97
4.3 Aplikace a využití nových poznatků	114
5.0 Závěr	117
Literatura	119

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ :

a	mm	celková hloubka odebíraného materiálu obrobku
a_d	μm	orovnávací záběr
a_z	mm	tloušťka třísky odebraná jedním zrnem
a_{zstr}	mm	střední tloušťka třísky odebíraná jedním zrnem
a_e	mm	pracovní záběr
A		kriterium počátečního impulsu
A'		koeficient
A, A_1, A_2		koeficienty
b_l	mm	šířka třísky odebíraná jedním zrnem
b_d	mm	šířka broušené plochy
B_s	mm	šířka brousícího kotouče
B_d	mm	délka kontaktní oblasti orovnače
c	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrné teplo
C		konstanta vyjiskřovací křivky
$c_k, c_{wg}, c_{gw}, c_p, c_{Ra}$		koeficienty
c_a, c_w, c_g		koeficienty
d_{eq}		ekvivalentní průměr
d_s	mm	průměr brousícího kotouče
d_w	mm	průměr obrobku
D	mm	průměr brousícího kotouče
d	mm	průměr obrobku
e_c	J.mm^{-3}	měrná energie broušení
$e, e_1 \dots e_8$		exponenty
E	kN.mm^{-2}	modul pružnosti v tahu
f		exponent diagramu broušení
f_a	mm/ot.	rychlost podélného posuvu vztažená na 1 otáčku obrobku
f_r	mm/ot.	rychlost příčného posuvu vztažená na 1 otáčku obrobku
f_d	mm/ot.	rychlost posuvu orovnače vztažená na 1 otáčku brousícího kotouče
F_{CL}	N	velikost upínací síly hrotů
F_n	N	normálová složka řezné síly

F'_n	$N.mm^{-1}$	normálová složka řezné síly vztažena na šířku 1 mm broušené plochy
F_t	N	tangenciální složka řezné síly
F'_t	$N.mm^{-1}$	tangenciální složka řezné síly vztažena na šířku 1 mm broušené plochy
F_a	N	axiální složka řezné síly
F'_{n1}	$N.mm^{-1}$	normálová složka řezné síly při $h_{eq}=1\mu m$
F'_{t1}	$N.mm^{-1}$	tangenciální složka řezné síly při $h_{eq}=1\mu m$
F'_s	$N.mm^{-1}$	měrná prahová síla
G		poměrný objemový ohrus
G_1		poměrný objemový ohrus při $h_{eq}=1\mu m$
h	mm	hloubka vtisku
h_{eq}	μm	ekvivalentní tloušťka třísky
HV_m		mikrotvrdost Vickers
h_v	μm	vzdálenost od povrchu
k_Q	$mm^3.s^{-1}.N^{-1}$	řezná schopnost, koeficient řezivosti (Lurje, Maslov)
k_r	$mm^3.N^{-1}.s^{-1}$	součinitel řezivosti nástroje
$k, k_1...k_{12}$		koeficienty
k_s	$N.mm^{-1}$	tuhost soustavy
k_y	$m.s^{-1}.N^{-1}$	řezivost (Majkus)
l_k	mm	kinematická délka stykového oblouku
l_s	mm	střední vzdálenost mezi zrny brusiva
l_w	mm	délka broušené plochy
l	μm	délka hodnoceného úseku drsnosti
L	mm	kinematická délka stykového oblouku
L_{pl}	mm	kinem.délka styk oblouku pro rovinné brouš. obvodem broušícího kotouče
L_n	mm	kinem. délka styk.oblouku pro vnější válcové broušení
M_h		modelové hodnoty
m		exponent
n_s	min^{-1}	frekvence otáčení broušícího kotouče
$n_{z\epsilon}$	ks	počet činných zrn brusiva na $1mm^2$ nástroje

n_w	min^{-1}	frekvence otáčení obrobku
p_f	MPa	tlak řezné kapaliny
p	MPa	měrný řezný odpor
P	kW	výkon
p, z, q, w, μ, n		exponenty vztahu výpočtu drsnosti R_a (Maslov)
q	-	rychlostní poměr
Q_f	$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$	množství řezné kapaliny
Q_s	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost opotřebení brousícího kotouče
Q'_s	$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost opotřebení na jednotku aktivní šířky brousícího kotouče
Q_w	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	objemový výkon
Q'_w	$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	objemový výkon na jednotku aktivní šířky kotouče
R_a	μm	střední aritmetická úchylka profilu
R_z	μm	střední výška nerovností profilu měřená na pěti základních úsecích
R_m	μm	maximální výška nerovností profilu stanovená na pěti základních úsecích
R_t	μm	největší hloubka nerovností profilu uvnitř vyhodnocovaného úseku
R_y	μm	největší výška nerovností profilu (DIN)
R_a^d	μm	drsnost povrchu po vyjiskřování
R_{a1}	μm	střední aritmetická úchylka profilu při $h_{eq}=1\mu\text{m}$
R_p	MPa	mez kluzu materiálu
R_{tsoth}	μm	teoretická výchozí drsnost povrchu
Δr_s	mm	radiální opotřebení brous. kotouče
r		exponent diagramu broušení
r_z	mm	střední poloměr zrna
S_h		skutečné hodnoty
S	mm^2	velikost plochy
S_{ts}	mm^2	střední průřez třísky odebíraný 1 zrnem
S_n	mm^2	činná plocha nástroje
$\text{tg}\beta$		strmost vyjiskřovací křivky
t	min	čas

T, T_1		časová konstanta
T_n	min	trvanlivost ostří
u_d	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost orovnávaní
U	mm^{-2}	kriterium strmosti práce
v_c	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	řezná rychlost
v_s	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	pracovní rychlost brousicího kotouče
v_{fr}	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost radiálního přísuvu brousicího kotouče
v_{fa}	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	rychlost axiálního posuvu brousicího kotouče (obrobku)
V_s	mm^3	objemové opotřebení brousicího kotouče
V'_s	$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$	objemové opotřebení brousicího kotouče na jednotku jeho aktivní šířky
V_w	mm^3	množství odebraného materiálu
V'_w	$\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$	množství odebraného materiálu na jednotku aktivní šířky brous. kotouče
v_w	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	obvodová rychlost obrobku
ΔV	μm	odchylka geom. tvaru
w		exponent diagramu broušení
x, y, z		souřadnice os; neznámé veličiny
x		střední hodnota
Δx		rozdíl $x - x$
y		střední hodnota
Δy		rozdíl $y - y$
y_{def}	mm	velikost deformace
y_{pmax}	μm	maximální výška nerovnosti profilu
y_{vmax}	μm	maximální hloubka nerovnosti profilu
z		střední hodnota
Δz		rozdíl $z - z$
z_s	$\text{kusů} \cdot \text{mm}^{-3}$	měrná hustota zrn v brousicím kotouči
α	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
α_p	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	měrná teplotní vodivost
α		úhel vyjiskřovací křivky
α_o		ortogonální úhel hřbetu
β		úhel vyjiskřovací křivky

γ		úhel čela
γ_o		ortogonální úhel čela
σ	MPa	napětí
τ	s	čas
ω		úhel tření
Θ	J	množství tepla
Θ_z	°C	kontaktní teplota
Θ_o	°C	okamžitá teplota
Θ_k	°C	styková teplota
Θ_s	°C	střední teplota
λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	měrná tepelná vodivost
ψ		koeficient broušení (+1 - brouš. vnějších válc.ploch, -1 - brouš.vnitřních válc.ploch, 0 - brouš.rovinných ploch)
ρ	kg.m ⁻³	měrná hmotnost materiálu
μ		koeficient broušení
λ_{KE}	mm	efektivní vzdálenost mezi zrný brusiva

Úvod.

Současné období je charakterizováno bouřlivým rozvojem nových technologií, což je vyvoláno požadavkem nových netradičních konstrukcí strojů a zařízení, rozvojem v oblasti nových materiálů a jejich použití při konstrukcích zejména z hlediska požadavků na pevnost, hmotnost a životnost. Výroba je úzce spojena s ekonomickou sférou a musí tedy daleko pružněji řešit zavádění dalších inovací, současně však dochází ke zkracování period těchto inovačních cyklů. Zaplňování trhu konkurenčními produkty vyvolává požadavek na snižování nákladovosti výroby, zvyšování výsledného efektu ať ve formě zisku či nepřímo formou zvyšování kvality, úspory zdrojů a podobně.

Tyto skutečnosti jsou úzce svázány s rozvojem technologií, kdy technologie výroby musí zajišťovat výše uvedené požadavky. Jedná se mimo jiné o technologie zvyšující kvalitu výrobků, kam patří i metody dokončování povrchu součástí. Mezi dokončovací metody technologií obrábění patří již tradičně broušení, honování, lapování, superfiniš a dále modernější metody jako broušení kmitající páskou, plastické broušení a další.

Skutečně efektivní využití všech technologií však závisí ještě na dalším činiteli. Tímto činitelem je podíl lidské práce na výrobní technologii. Z toho vyplývá, že požadavkem nových technologií a technologií moderních je možnost jejich maximálního využití v automatickém cyklu. U běžných tradičních technologií obrábění je tento problém v podstatě vyřešen (soustružení, frézování atd.). Komplikace vznikají u technologií, kde nelze jednoznačně stanovit výsledek procesu při určitých vstupních podmínkách. To znamená, že vliv vstupních a pracovních podmínek je komplexním jevem, kde jednotliví činitelé se vzájemně ovlivňují při současné změně dalších parametrů režného procesu. Mezi takto pojaté technologie patří obrábění mnohobřítými nástroji s obtížně definovatelnou geometrií břitů, jejímž představitelem je především broušení. Broušící nástroj je tvořen množstvím

jednotlivých zrn s různou geometrií řezné části, kdy se velikost řezných úhlů pohybuje v poměrně širokém rozmezí.

Řezné podmínky pro broušení jsou stanovovány informativně s tím, že definitivní podmínky určí kvalifikovaná obsluha stroje v závislosti na dosažených výsledcích.

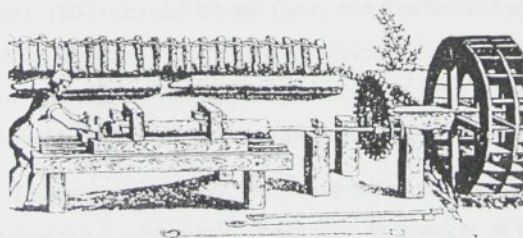
Řada výzkumných prací řeší více či méně úspěšně otázku jednoznačného stanovení závislosti výsledku broušení vzhledem ke vstupním a pracovním podmínkám. Předložená práce uvedené poznatky shrnuje a metodou experimentu hledá nejvhodnější model pro použití při automatickém řízení výrobního stroje - brusky, současně se snaží dokázat souvislost mezi závěrečnou fází časového průběhu řezné síly a kvalitou povrchu broušené součásti.

1.0 HISTORIE OBRÁBĚNÍ

V období 600 let př.Křtem jsou zaznamenány pokusy o broušení drahokamů, kdy tato technologie byla kolem roku 532 zdokonalena matematikem, vynálezcem a technikem Theodorosem. První zmínkou o broušení kovů je období kolem 200 let př.Křtem, kdy v Řecku a Římské říši začali běžně používat železné pilníky pro uhlazování železa. Uhlazování železa je vlastně ruční obrábění kovu, nyní snad lapování, kdy k úběru materiálu dochází mnohobřitým nástrojem. Železné nástroje se vyráběly kováním, posléze byly broušeny brusnými kameny a v závěru pilovány. Brusné kameny tvořily přírodní materiály z Kréty a Lakedonie.

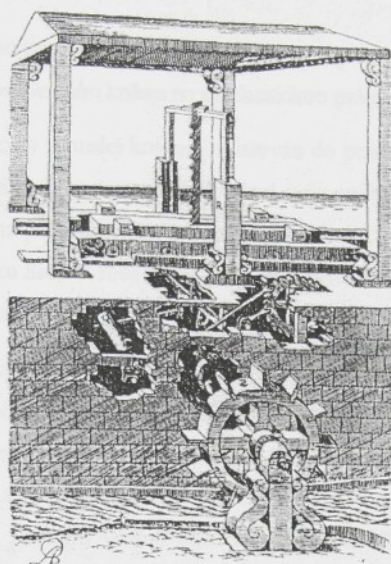
První obráběcí stroje - zařízení nahrazující a ulehčující ruční práci, se objevují v 16.století (obr.1.1, obr.1.2). Jedním z prvních strojů byla závitnice Francouze Jacquese Bessona (1568). Stroje byly vyrobeny ze dřeva, výrobky nebyly tedy zvláště přesné. Koncem 17. a počátkem 18. století se začínají používat vrtačky na kovy a stroje na obrábění ozubených kol. Na základě již existujících soustruhů na dřevo vznikají soustruhy pro opracování kovů.

Velký rozmach ve výrobě obráběcích strojů a technologií obrábění zaznamenala v 18.stol. Anglie, kdy tento rozmach byl vyvolán zejména rychlým rozvojem textilního průmyslu.



Vodním kolem poháněný stroj na provrtání kmene stromu po délce (pro vodovodní potrubí), zobrazený francouzským inženýrem Salomonem de Caus v díle: Les raisons de forces mouvantes, 1615.

obr.1.1



Zobrazení rámové pily v díle Klenotnice mechanického umění francouzského královského inženýra Augustina de Ramelli z roku 1620. V popisku pod obrázkem se uvádí: „Jak je možné pilovat velké kusy dřeva pomocí vodního proudu a z nich řezat desky nebo prkna...“; vodní kolo nepohání jen vlastní pilu, ale působí i při posouvání opracovávaného dřeva. Pily byly budovány v blízkosti vodních toků i v českých zemích

obr.1.2

Bylo nutno stále více se od dřeva orientovat na kovové materiály. Současně bylo nutné zvýšit přesnost výrobků. Průkopníky ve stavbě obráběcích strojů byli konstruktéři Henry Mandslay, Richard Roberts, Joseph Whitworth a James Nasmyth. Pravděpodobně jeden z prvních železných soustruhů s křížovým suportem vyrobeným z mosazi zkonstruoval Francouz Jacques de Vancanson.

Roku 1804 německý inženýr Georg von Reichenbach vynalezl stroj na hoblování kovů. Tento stroj zmechanizoval do této doby pracný způsob pilování kovů. Speciální soustruh z roku 1797 Angličana Henryho Mandslaye má již rysy současných moderních soustruhů.

Technologie broušení patří k nejstarším způsobům obrábění. Z archeologických nálezů bylo prokázáno, že broušení se používalo již před 40 tis. lety pro ostření nástrojů, zbraní a podobně. Brousicí nástroje byly vyrobeny z přírodních materiálů - pískovce, křemene, smírku a dalších. Není prokázána doba počátku použití brousicího kamene - kotouče, ale byly nalezeny návrhy stroje na vybrušování válců od Leonarda da Vinci přibližně z roku 1500. Později

se k pohonu brousicích strojů začalo využívat vodní energie při její přeměně vodním kolem na mechanickou práci.

Umělý brousicí kotouč je datován do poloviny 19.stol., kdy o něco později byla sestrojena také první universální bruska (1860). V roce 1891 se podařilo provést syntézu uhlíku a křemíku za vzniku karbidu křemíku SiC. V roce 1893 byl tento produkt vyroben v Benátkách nad Jizerou.

Americký vynálezce Benjamin Chew Tilghman vyvinul roku 1871 technologický postup pískování k opracování povrchů. Vzduchem, stlačeným pod vysokým tlakem, byl vymršťován křemenný písek z trysky na opracovávanou plochu. Tento postup se začal užívat i pro čištění povrchu včetně odstraňování produktů koroze, zdrsňování a zpevňování povrchu atd. Vedle křemenného písku se začal používat i " ocelový písek ".

V oblasti materiálů pro obrábění vytvořili němečtí metalurgové v roce 1914 karbidy wolframu (WC a W₂C). Materiál byl použit k plátování rezných nástrojů pro obrábění velmi tvrdých materiálů a také se používal jako brusný a leštící materiál.

Velký rozvoj v oblasti materiálů pro obrábění a tedy i broušení nastal po 2.sv.válce. V této době se začaly využívat nové druhy velmi tvrdých keramických materiálů odolných proti opotřebení. Mezi ně patří:

oxid hliníku (Al₂O₃) - dnes umělý korund

oxid zirkonu (Zr O₂)

oxid berylia (Be O)

oxid hořčíku (Mg O)

Roku 1955 byly ve Spojených státech poprvé synteticky vyrobeny průmyslové diamanty velikosti 0.01 až 1.2 mm.

2.0 PROBLEMATIKA BROUŠENÍ

2.1 Současný stav

Broušení, jako dokončovací technologie, se v posledních letech objevuje i jako technologie pro hrubovací i dokončovací fázi obrábění. Je to právě díky kvalitě celého systému broušení, který je tvořen výrobním systémem bruska - brousící kotouč - přípravek - výrobní lokalita. Zejména vzhledem k růstu kvalitativních parametrů brusek a brousících kotoučů se začalo broušení používat pro menší konstrukční prvky jako technologie výrobní, t.j. broušení probíhá do plného materiálu při získání konečného tvaru v jedné nebo dvou etapách broušení.

Z klasického broušení se postupně vytvořila řada aplikovaných metod, které mají totožný princip:

- honování
- lapování
- superfiniš
- broušení kmitající páskou
- plastické broušení
- leštění

Mezi nekonvenční abrazivní metody bychom zařadili:

- obrábění vodním paprskem s abrazivem
- obrábění ultrazvukem
- elektrochemické broušení
- elektrochemické honování

Broušení jako principiální systém prochází také svým vlastním vývojem. Ten se ubírá několika směry :

1. Vznik a využití nových brousících materiálů (CBN, B₄C, DIA), konstrukce nástrojů

2. Vývoj nových technologií :

- a) hloubkové broušení
- b) integrální broušení
- c) broušení tangenciálním přísuvem
- d) broušení bodové

3. Vývoj v konstrukci strojů, případně integrovaný vývoj :

- a) rychlostní broušení
- b) NC, CNC řízení
- c) adaptivní řízení
- d) nové komponenty strojů a použité konstrukční materiály

4. Výzkum v oblasti technologie a teorie broušení :

- a) zpřesnění známých matematických závislostí
- b) vytváření databanky směřující k vytvoření expertního systému pro podporu řízení brousících strojů
- c) sledování dalších vlivů na brousící proces (řezné kapaliny, tuhost stroje a celého systému a pod.)

Současný význam technologie broušení je vysoký. Trh je bohatý na různé druhy materiálů brousících kotoučů od různých renomovaných i méně známých výrobců. Problém použití technologie broušení by se dalo říci je jen jeden, ale zásadní. Ani v současné době nedokážeme stanovit jednoznačné řezné podmínky tak, abychom získali určité požadované výstupní vlastnosti povrchu součásti, o něž nám jde především :

- a) **geometrický tvar** - předpokládaný tvar součásti
 - vlnitost povrchu
- b) **přesnost povrchu** - rozměrová
 - vztažena k jiným konstrukčním prvkům

c) jakost povrchu - drsnost

- tvrdost a soudržnost povrchové vrstvy
- průběh povrchového napětí
- struktura povrchu

První dva požadavky se při různé vlastní tuhosti strojů a kvality soustavy S - N - O - P daří plnit a tím se broušení řadí k přesným technologiím. Kvalita povrchu je většinou hodnocena drsností R_a (vyjíměčně R_z , R_t , R_m). Ostatní vlastnosti obrobeného povrchu se vzhledem k obtížnosti zjišťují pouze vyjíměčně např. při poruchách součástí. Ve výrobě však kvalitu povrchu nedokážeme předem dostatečně přesně stanovit a většinou se ponechává na zkušenostech brusiče dosažení požadovaných výstupních kvalitativních hodnot. Tento nedostatek je možno odstranit následujícími možnými způsoby řešení :

- a) databáze s modelováním výstupních vlastností na základě banky dat řady údajů získaných experimentálně a údajů získaných z výroby
- b) expertní systém - kombinace matematického nebo matematických modelů a banky dat
- c) přímé řízení procesu broušení se vstupem okamžitých hodnot a jejich porovnání s uloženými daty a matematickým modelem, kdy na základě zpětné vazby dojde ke změně řezných podmínek

Dalo by se říci, že se jedná o jeden způsob řešení se třemi vývojovými etapami, kde nejvyšším stupněm je plně automatické řízení procesu broušení.

2.2 Vlivy na proces broušení.

V průběhu procesu broušení působí charakteristické vlivy dané vlivem jednotlivých členů soustavy : stroj - nástroj - obrobek - přípravek (S-N-O-P). Charakteristika vlivu jednotlivých členů je následující :

Stroj

- Tuhost stroje je dána jeho konstrukcí, velikostí, uložením, polohou (vliv chvění, teplotních podmínek) a jeho fyzickým opotřebením. V případě broušení je tuhost možno pro jednotlivé případy určit ze sklonu vyjiskřovací křivky nebo z frekvenční analýzy chvění v průběhu pracovního cyklu stroje.

Nástroj

- Velikost nástroje je dána průměrem brousícího kotouče d_s a šířkou kotouče B_s

- Druh nástroje je dán technickou charakteristikou brousícího kotouče, t.j. druhem brusiva a jeho velikostí, druhem pojiva a jeho pevností, pórovitostí. S technickou charakteristikou nástroje souvisí i použitelná obvodová rychlost kotouče.

- Velikost a jakost orovnění určuje hloubka a počet orovnávacích cyklů, typ a druh orovnače, jeho stav, rychlost posuvu orovnávacího nástroje při orovnávání, tuhost orovnače. Určitý vliv má také množství, tlak a druh použité chladicí kapaliny.

Komplexní schopnost brousícího kotouče odebrat materiál v určitém reálném případě nazýváme *řezivost*.

Obrobek

- Velikost obrobku je dána průměrem obrobku d_w a délkou broušené plochy l_w .

- Jakost obrobku je dána chemickým složením materiálu, strukturou materiálu a tvrdostí a stavem povrchové vrstvy.

- Konstrukce je dána tvarem a použitými konstrukčními prvky, ovlivňuje chvění soustavy S-N-O-P svojí tuhostí a možností upnutí.

Komplexní souhrn vlastností materiálu obrobku a jeho schopnost vytvářet třísku a řezáním (broušením) novou plochu v reálném případě nazýváme *obrobitelnost*.

Přípravek

- Tuhost je dána konstrukcí a upevněním přípravku na stroji. Tuhost přípravku ovlivňuje tuhost celé soustavy, tato tuhost může být proměnlivá, jestliže lze měnit například velikost upínací síly.

Řezný proces

- Řezná rychlost brousícího kotouče závisí na otáčkách brousícího vřetene n_s a na průměru d_s brousícího kotouče. Je to tangenciální rychlost na obvodě brousícího kotouče v_s [m.s^{-1}].
- Obvodová rychlost obrobku v_w závisí na otáčkách pracovního vřetene n_w a průměru broušené plochy d_w . Udává se v [m.min^{-1}].
- Tloušťka odebraného materiálu a [mm] je dána rozdílem poloměrů obrobku před a po vykonání brousícího cyklu.
- Velikost přísuvu je určena hodnotou přísuvové rychlosti brousícího kotouče v_{fr} [mm.min^{-1}].
- Rychlost podélného posuvu, kdy touto rychlostí rozumíme rychlost podélného posuvu nástroje nebo obrobku v_{fa} [mm.min^{-1}].
- Opotřebení brousícího kotouče je hloubka opotřebení pracovní plochy brousícího kotouče Δr_s [mm].
- Řezné kapalina - ovlivňuje velikost řezných sil, opotřebení kotouče a kvalitu povrchové vrstvy obrobku. Je charakterizována druhem (složením), tlakem - p_f [MPa] a množstvím dodávaným do místa broušení Q_f [l.min^{-1}].

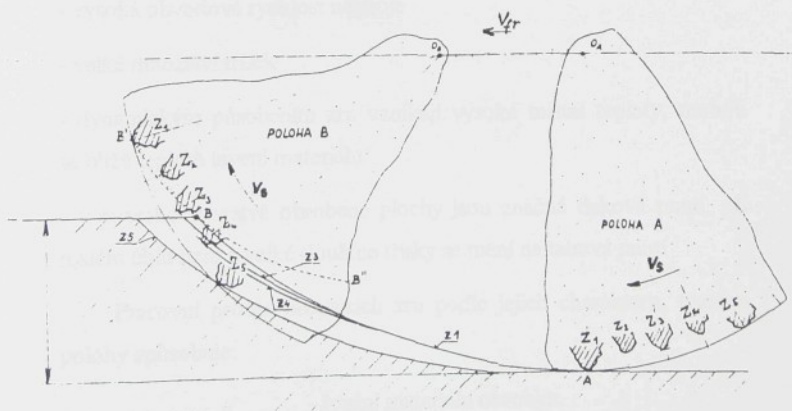
2.3 Charakteristika procesu broušení

Broušení je výrobní metoda, která je charakterizována mnohačetným rychlostním mikrořezáním a rytím povrchové vrstvy obrobku zrna pevně umístěnými v brousicím kotouči. Proces broušení probíhá při vyšších řezných rychlostech než ostatní druhy obrábění, čehož důsledkem je malý průřez třísky a úzká oblast styku nástroje a obrobku. Broušení vyžaduje dostatečné ochlazování, i když jsou známy práce o výzkumu broušení bez použití chladících médií. Broušení charakterizuje :

- vysoká produktivita
- rozměrová a geometrická přesnost
- kvalita povrchu daná jeho drsností
- jakost povrchové vrstvy s minimálním stavem napjatosti
- možnost obrábět velmi tvrdé materiály
- ekonomická přijatelnost vzhledem k dosaženým efektům.

2.3.1 Podstata a zvláštnosti procesu broušení

Broušením rozumíme odebírání a vysokorychlostní deformaci materiálu velkým množstvím zrn, nepravidelně rozmístěnými po obvodu, případně čele nástroje. Většina zrn má dle [22] negativní úhel



obr. 2.1

čela $\gamma_0 = -30^\circ$ a více, úhel hřbetu $\alpha_0 = 20^\circ$ až 30° . Zrna mají určitou nepravidelnost povrchu a drsnost. Vlivem nepravidelnosti zrn je proces charakterizován svojí proměnlivostí v čase. Dochází ke změně průřezu třísky odebírané 1 zrnem broušicího kotouče. V souvislosti s tím dochází ke změně posuvu, hloubky řezu a tloušťky vrstvy odebírané jedním broušicím zrnem.

Proces broušení se liší řadou dalších jevů od běžného obrábění definovaným ostřím nástroje. Jsou to zejména následující odlišnosti:

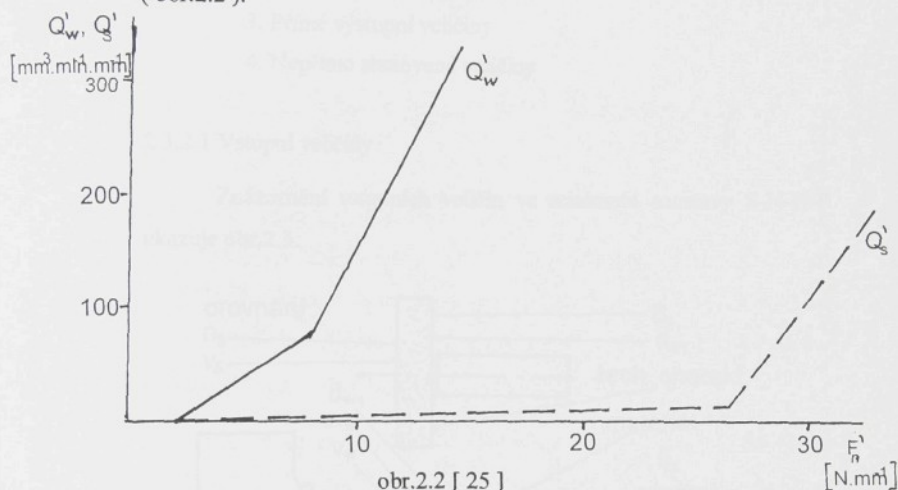
- nepravidelné rozmístění zrn a tím řezných hran
- nesouvislý břit
- různá výška zrn vyčnívajících z vazby kotouče a s tím související různá tloušťka odebírané třísky, tloušťka třísky bývá 0.6 až 10 μm [22]
- závislost mezi tloušťkou a šířkou vrstvy materiálu odebíraného jednotlivým zrnem
- nepravidelný tvar zrn, zaoblení jejich vrcholů
- průřez třísky $1 \cdot 10^{-4}$ až $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$
- vysoká tvrdost materiálu zrn, tepelná odolnost, materiál je křehký a po překročení limitního zatížení se štěpí
- vysoká obvodová rychlost nástroje
- velké množství třísek
- dynamickým působením zrn vznikají vysoké místní teploty, mohou se blížit teplotě tavení materiálu
- v povrchové vrstvě obrobené plochy jsou značná tlaková pnutí, při malém úhlu řezu a velké tloušťce třísky se mění na tahová pnutí

Pracovní proces broušicích zrn podle jejich charakteru, tvaru a polohy způsobuje:

- řezání materiálu obrobku
- rytí povrchu
- plastickou deformaci povrchu

- pružnou deformaci povrchu
- tření zrna o povrch obrobku

Charakteristika vzájemného vztahu brousícího kotouče a obrobku je dána závislostí normálové složky řezné síly a množství odebraného materiálu obrobku, případně úbytku materiálu brousícího kotouče (obr.2.2).



2.3.2 Charakteristické veličiny procesu broušení

Proces broušení je procesem komplexního působení jednotlivých činitelů na proces se podílejících. Vliv těchto činitelů při vzájemném působení může být potlačován nebo naopak narůstá - např. při zvýšení obvodové rychlosti brousícího kotouče může dojít ke zvýšení posuvu bez vlivu na hodnoty chvění. Tento příklad je však velkým zjednodušením, protože komplex parametrů působících při procesu broušení se ovlivňuje vzájemně i skupinově. Dalším atributem procesu je nahodilost některých jevů, např. samoostření kotouče, nahodilost lomu a vylamování zrn, vzdálenost zrn atd.

Vzhledem k objemu poznatků uvedené problematiky, vzhledem k tomu, že se jedná o první ucelenou práci v dané oblasti na mém pracovišti, jsem se rozhodl pro následující systém pohledu na veličiny působící při broušení. Dalším důvodem je určitý způsob jasné

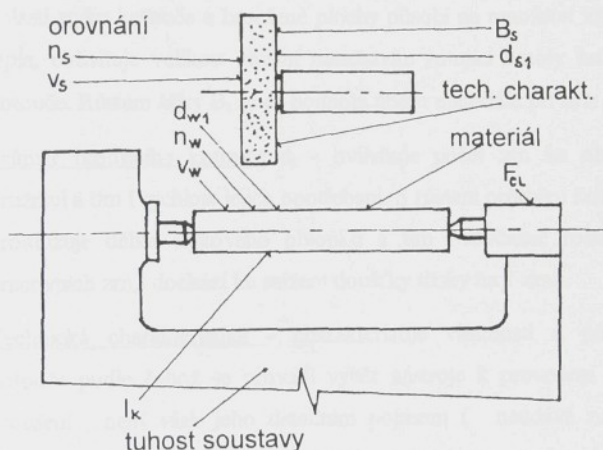
systematizace a také vztah všech vlivů působících při procesu broušení k experimentální části méj práce.

Veličiny působící při broušení můžeme tedy rozdělit do následujících skupin:

1. Vstupní veličiny
2. Veličiny průběhu procesu
3. Přímé výstupní veličiny
4. Nepřímo stanovené veličiny

2.3.2.1 Vstupní veličiny

Znázornění vstupních veličin ve schématu soustavy S-N-O-P ukazuje obr.2.3.



obr. 2.3

Mezi vstupní veličiny lze zahrnout:

a) *nástroj=brousicí kotouč*

Tento nástroj charakterizuje šířka brousícího kotouče B_s , technická charakteristika a otáčky brousícího kotouče n_s . Také musíme zahrnout vliv orovnění brousícího kotouče.

b) *obrobek=obráběný materiál*

Obrobek je charakterizován druhem materiálu a jeho vlastnostmi, velikostí a otáčkami n_w .

c) *přípravek*

Přípravek ovlivňuje proces broušení svojí tuhostí, která je dána jeho konstrukcí a velikostí upínací síly.

d) *stroj*

Vliv stroje se projevuje jeho tuhostí, konstrukcí a velikostí.

Brousící kotouč.

Šířka brousicího kotouče B_s - ovlivňuje počet zrn v záběru, má také vliv na velikost řezných sil a výkon při broušení. Ovlivněním velikosti oblasti styku kotouče a broušené plochy působí na množství vzniklého tepla, ovlivňuje velikost chvění množstvím rotující hmoty brousicího kotouče. Růstem šířky B_s roste hodnota úběru materiálu při $b_d \geq B_s$.

Průměr brousicího kotouče d_s - ovlivňuje počet zrn na obvodové kružnici a tím i rychlost jejich opotřebení. S růstem průměru kotouče se prodlužuje délka stykového oblouku a tím současně roste počet pracovních zrn, dochází ke snížení tloušťky třísky na 1 zrno.

Technická charakteristika - charakterizuje vlastnosti a provedení kotouče podle čehož se provádí výběr nástroje k provedení operací broušení, není však jeho detailním popisem (neudává například hodnotu modulu pružnosti kotouče, řeznou schopnost nástroje atd.). Každá charakteristika udává:

druh brusiva

zrnitost

tvrdost kotouče - odpor proti vylomení a lomu zrn

pórovitost - hutnost kotouče

druh pojiva

Součástí charakteristiky je i rozměr a tvar kotouče a maximální přípustná obvodová rychlost.

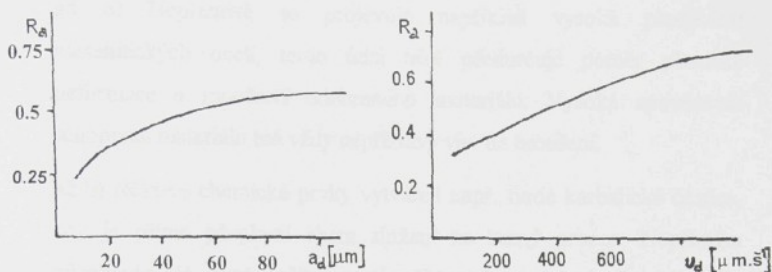
Příklady technických charakteristik :

Výrobce:	brusivo	zrnitost	tvrdost	pórovitost	pojivo
CARBORUNDUM ELECTRITE	A99	80	K	10	V
EFESIS Schleiftechnik (SRN)	30A	80	K	10	V
TYROLIT (SRN)	89A	80	K	5	AV

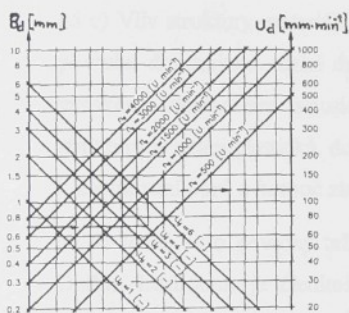
Otáčky brousícího kotouče n_s určují obvodovou rychlost, t.j. řeznou rychlost brousícího kotouče. Běžně se používá tato rychlost do 50 m.s^{-1} , vyšší rychlosti vyžadují vyšší tuhost soustavy S-N-O-P a týkají se tzv. rychlostního broušení, v současné době v USA probíhají výzkumy s obvodovou rychlostí brousícího kotouče přes 200 m.s^{-1} . Možnost volby počtu otáček pracovního vřetene určuje šíři užití brusky.

Orovnání brousícího kotouče je důležitým parametrem přípravy brousícího kotouče. Výchozí profil kotouče závisí na druhu nástroje pro orovnění [7], [29] a způsobu orovnění [43]. Orovnání je proces obnovy řezivosti nástroje, kdy dochází k odstranění porušených zrn, vytvoření nových ostří a případně odstranění narušených částí zrn. Orovnáním dochází také k odstranění vrstvy pojiva, což je pro obnovu řezivosti nástroje velmi důležité. Vliv na drsnost povrchu po orovnění má hloubka orovnění i rychlost posuvu [29], což ukazují grafy na obr.2.4. Vliv rychlosti orovnávacího diamantu [100] na drsnost povrchu kotouče ukazuje obr. 2.5. Pro výrobní praxi jsou důležité konkrétní hodnoty pro orovňávání. Tyto doporučené hodnoty jsou zpracovány některými výrobci brousících strojů [100] a jsou dány například grafem obr. 2.6. Je prokázáno, že hrubě orovnaný kotouč se v průběhu procesu zjemní a naopak jemně orovnaný kotouč hrubne. Kvalita orovnění závisí i na dalších vlivech mezi něž patří dle [38] také kombinace druhu orovnače a tvrdosti brousícího kotouče. Při

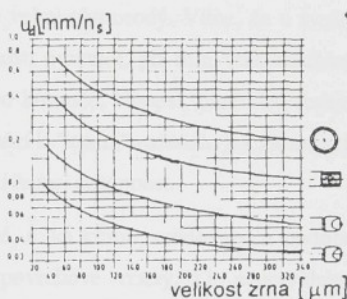
orovňávání není zanedbatelný vliv tuhosti stroje, což s sebou přináší působení chvění na přesnost a tvar orovňávané plochy kotouče.



obr.2.4 [29]



obr.2.5 [99]



obr.2.6 [99]

Obrobek.

Materiál obrobku je dán charakteristikou jeho vlastností :

- pevnost a plastičnost
- chemické složení
- struktura
- stav povrchové vrstvy
- tvrdost
- tepelná vodivost

Všechny tyto údaje obsahují materiálové listy jednotlivých druhů materiálů.

ad a) Nepříznivě se projevuje například vysoká plastičnost austenitických ocelí, tento údaj také předurčuje poměr plastické deformace a množství odebraného materiálu. Vysoká zpevňovací schopnost materiálu má vždy nepříznivý vliv na broušení.

ad b) Některé chemické prvky vytvářejí např. tvrdé karbidické částice, což je přímé působení chem. složení na řezný proces. Nepřímým působením je např. přítomností některých prvků (Cr, Ni) je stabilizován austenit za běžných teplot (oceli tř.17). Důsledkem je vysoká zpevňovací schopnost takového materiálu a jeho špatná brusitelnost.

ad c) Vliv struktury materiálu je velmi různorodý. Víme, že u tvrdého povrchu dosahujeme nízké drsnosti povrchu, při tom však dochází k vysokému zatížení zrn brousicích kotoučů. Naopak například feritická struktura je velmi plastická, dochází k "lepení" materiálu jak na zrna, tak k zaplňování pórů a kotouč ztrácí řezací schopnost.

ad d) Jedná se o povrchy tažené, s lící kůrou, oxidované a podobně. Dalším hlediskem je členitost povrchové vrstvy, t.j. nepravidelnost přídavku na broušení . Důležitý, ač v praxi neměřitelný, je průběh zbytkových napětí po předchozím obrábění.

ad e) Růst tvrdosti materiálu působí pozitivně na výstupní drsnost povrchu, problematický je při tom rozsah změn působením tepla, které při brousicím procesu vzniká. Vzhledem k množství tepla a průběhu teplotního pole může dojít k popuštění povrchu, případně i k popuštění podpovrchové vrstvy [39]. Tento nevhodný průběh tvrdosti povrchové vrstvy může vést k provozní poruše nebo havárii součásti.

ad f) Tepelná vodivost je důležitým údajem, který poskytuje informace o tvaru tepelného pole po broušení součásti. S tím potom souvisí průběh tvrdosti povrchové vrstvy a průběh pnutí v této vrstvě.

Otáčky obrobku n_w ovlivňují svým nastavitelným rozsahem na stroji a zvláště potom počtem nejnižších otáček možnost získání nízké drsnosti povrchu, případně řízení velikosti úběru materiálu.

Průměr obrobku d_w ovlivňuje délku stykového oblouku obrobku a brousicího kotouče společně s průměrem brousicího kotouče. Průměr je omezen velikostí použitelného oběžného průměru nad ložem stroje.

Přípravek.

Upínací síla ovlivňuje tuhost soustavy S-N-O-P, tím také časový průběh závislosti řezné síly F v průběhu řezného procesu a to zejména ve vyjiskřovací fázi.

Soustava S-N-O-P významně ovlivňuje průběh celého procesu broušení svým působením na kvalitu, geometrii a přesnost obráběné součásti. Ovlivňuje také možnost využití vyšších řezných rychlostí spolu s konstrukčním pojetím stroje. Svojí tuhostí předurčuje velikost chvění celé soustavy, tuhost je dána již umístěním stroje a kvalitou jeho základů, končí tuhostí jednotlivých komponentů a pevností upínacího mechanismu.

2.3.2.2 Veličiny průběhu procesu

Mezi tyto veličiny bývají zpravidla zahrnovány:

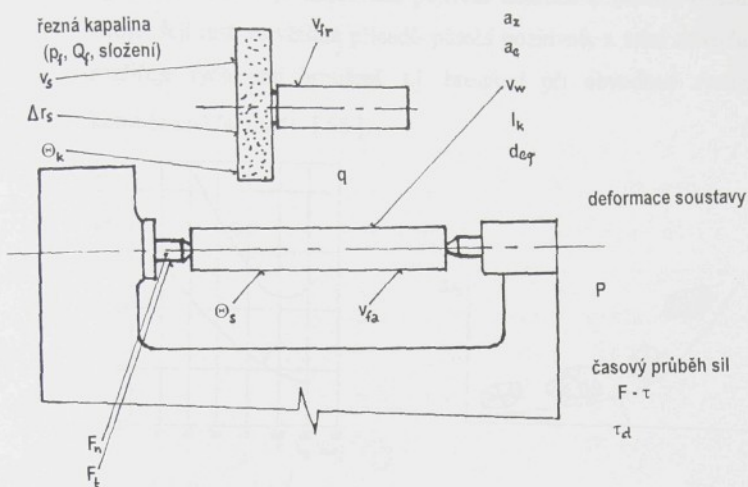
- obvodová rychlost brousicího kotouče
- tloušťka opotřeбенé vrstvy brousicího kotouče
- rychlost přísuvu brousicího kotouče, případně obrobku
- teplotní pole brousicího kotouče
- tloušťka odebírané vrstvy

Pro přehlednost jsou tyto veličiny znázorněny schématicky na obr.2.7.

Obvodová rychlost brousicího kotouče (viz také kap.2.3.2.1)

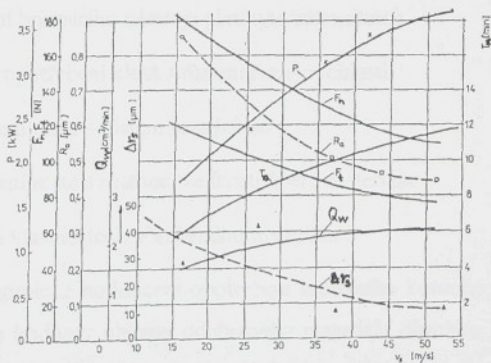
Obvodová rychlost brousicího kotouče je velmi důležitou veličinou procesu ovlivňující následující složky procesu :

- řeznou sílu F_n , F_t (obr. 2.8)
- velikost opotřeбенí kotouče Δr_s (obr. 2.9)



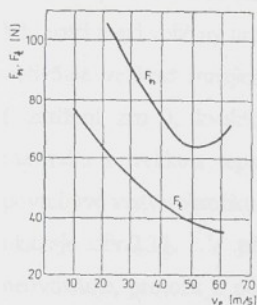
obr.2.7

- objemový úběr materiálu (obr.2.9)
- drsnost povrchu (obr. 2.9)
- příkon stroje (obr. 2.9)
- geometrickou přesnost součástí
- průřez třísky
- průběh teplotního pole
- kvalitu povrchu : tvrdost, průběh napětí, strukturu
- délku stykového oblouku

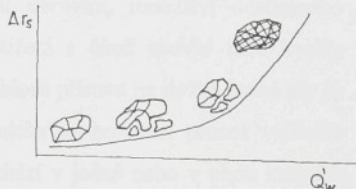


obr.2.9 [22]

Rychlost kotouče je limitována pojivem kotouče a tuhostí vřeteníku stroje. Její růst ve většině případů působí pozitivně, z toho důvodu se rozšiřuje rychlostní broušení, t.j. broušení při obvodové rychlosti kotouče nad 60 m.s^{-1} [68].



obr.2.8 [22]



obr. 2.10 [99]

Tloušťka opotřeбенé vrstvy brousicího kotouče.

V průběhu procesu dochází k otupování, štěpení a vylamování brusných zrn (obr.2.10). Tímto mechanismem se mění průměr brousicího kotouče, kdy však úbytek je zejména důležitý z hlediska ekonomiky řezného procesu. V pozitivním případě dochází ke vzniku další řezné vrstvy - tzv. **samoostření brousicího kotouče**, negativním důsledkem je však udržování výsledné tolerance obrobku při časové změně průměru kotouče. Kotouč je nutno po opotřeбенí orovnat. V oblasti opotřeбенí brousicího nástroje platí tyto zákonitosti:

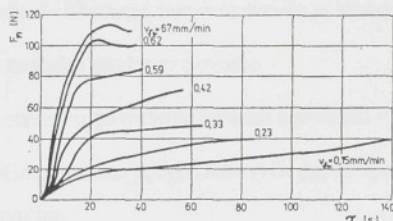
- velikost opotřeбенí klesá s růstem řezné rychlosti
- opotřeбенí roste s růstem řezných sil
- opotřeбенí roste s rostoucí velikostí úběru materiálu
- závisí na vlastnostech obráběného materiálu .

Ekonomické hodnocení opotřeбенí brousicího kotouče se provádí vztahením hodnoty objemu odebraného materiálu obrobku k velikosti objemového úbytku materiálu brousicího kotouče ve stejném čase. Tato

veličina je jednou ze známek řezivosti kotouče pro daný materiál. Hodnota se může pohybovat mezi 6 až 60.

Rychlost přísuvu řezného nástroje (obrobku).

Rychlost přísuvu je rozhodující veličinou při zapichovacím broušení, kdy patří mezi veličiny určující velikost průřezu třísky. Velikost přísuvu ovlivňuje velikost řezných sil, rychlost a způsob opotřebení kotouče (zatížení zrn), kvalitu povrchu obrobku, množství odebraného materiálu a velikost tepelného zatížení s čímž souvisí také kvalita povrchové vrstvy obrobku. Vliv rychlosti přísuvu na složku řezné síly F_n ukazuje obr.2.11. V případě podélného broušení proces viditelně neovlivňuje, protože k přísuvu dochází v jedné nebo v obou krajních polohách.



obr.2.11 [22]

Teplotní pole brousícího kotouče.

Teplotní pole při procesu broušení tvoří:

- oblast záběru jednotlivého zrna - kontaktní teplota (Θ_z)
- oblast místa záběru brusiva - okamžitá teplota (Θ_o), která se vyvíjí v místě záběru zrn brusiva, dosahuje vysokých hodnot po krátkou dobu
- oblast styku kotouče a obrobku v šířce kotouče - styková teplota (Θ_k), určená jako střední hodnota v pracovní šířce kotouče
- oblast povrchu obrobku - střední teplota (Θ_s), určená jako ustálená teplota na povrchu broušeného obrobku

Okamžitá teplota se blíží teplotě tavení materiálu, roste s hloubkou vniknutí zrna a s rychlostí brousícího kotouče, po dosažení určité rychlosti je již konstantní. Opotřebování a pevnost zrn závisí na hloubce

průniku tepla, při čemž vznik a rozdělení tepla souvisí se všemi podmínkami broušení. Z hlediska samotných brousících zrn jejich pevnost a opotřebení závisí na hloubce průniku tepla a průběhu teplotního pole v zrně. Z tohoto pohledu má nejvyšší tepelnou vodivost zrně diamantu, dále CBN a nejnižší umělý korund Al_2O_3 .

Teplotní pole obrobku.

Z hlediska obráběného materiálu je teplota povrchu ovlivněna zejména třením hřbetní plochy zrna (závisí na v_s a F_n). Nezanedbatelný je také vliv pojiva brusných zrn, kdy působí tření pojiva ve velikosti dané druhem pojiva (kovové, keramické atd.).

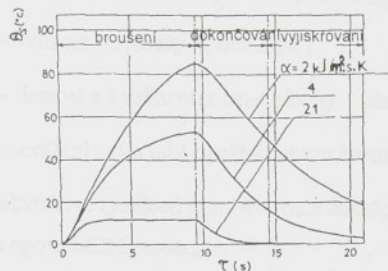
Tepelné jevy způsobují:

- teplem zasažená odebíraná vrstva materiálu je lépe obrobitelná
- dochází ke změnám struktury povrchu
- dochází ke změnám povrchové tvrdosti a průběhu v povrch. vrstvě
- teplo je příčinou vzniku podpovrchových napětí spolu s mechanickým zatížením povrchu
- se zvyšováním řezné rychlosti klesá tepelné zatížení zrna, nejvyšší dosahuje při 25-40 m.s^{-1} .

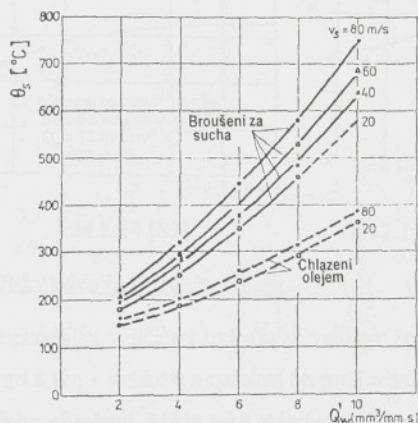
Průběh střední teploty Θ_s obrobku při zapichovacím broušení pro různé hodnoty součinitele přenosu tepla ukazuje obr.2.12. Obr.2.13 následně ukazuje závislost obvodové rychlosti brousícího kotouče v_s , výkonu obrábění Q_w a způsobu chlazení na této střední teplotě povrchové vrstvy obrobku.

Tloušťka odebírané vrstvy materiálu.

Velikost odebrané vrstvy povrchu obrobku ovlivňuje stupeň odstranění geometrických nepřesností po předchozím opracování. Má vliv na ekonomiku broušení jak svým vlivem na strojní časy, tak působením na opotřebení nástroje.



obr.2.12 [87]



obr.2.13 [22]

Hloubka záběru.

Při podélném broušení se pohybuje řádově v [mm] a určuje hloubku odebrané vrstvy obráběné plochy na jeden zdvih. Její velikost ovlivňuje zejména rychlost opotřebení brousícího kotouče a mechanické i tepelné zatížení povrchu obráběné plochy. Dále také průřez třísky odebíraný jedním zrnem, velikost řezných sil a délku stykového oblouku. S růstem hodnoty hloubky roste množství odebraného materiálu na jedno zrno.

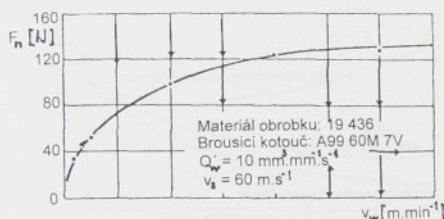
Obvodová rychlost obrobku.

Obvodová rychlost obrobku je dynamickou veličinou ovlivňující

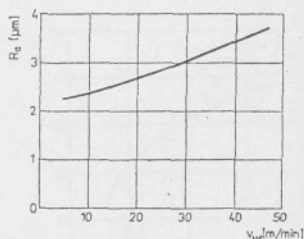
rychlost deformace a odběr třísky. Tato rychlost především ovlivňuje:

- velikost řezné síly (obr.2.14)
- drsnost a kvalitu obrobené plochy (obr.2.15)
- zatížení a tím také opotřebení zrn brousicího kotouče

S růstem obvodové rychlosti obrobku roste dosažená drsnost povrchu a zvyšuje se opotřebení kotouče.



obr.2.14 [82]



obr.2.15 [22]

Průřez třísky odebíraný jedním zrnem.

Je rozhodující veličinou ovlivňující velikost řezné síly působící na jedno zrno a tím i velikost a rychlost otupení zrna a okamžitou teplotu v místě jeho působení. Může také ovlivňovat drsnost a kvalitu povrchu obráběné plochy apod. [37]. Protože je velmi obtížné prakticky zjistit hodnotu tloušťky třísky, byla na základě experimentů vypracována řada metod. Tyto metody vycházejí ze sledování procesu při řezání jedním zrnem brousicího kotouče. Pro broušení vnějších válcových ploch to např. je :

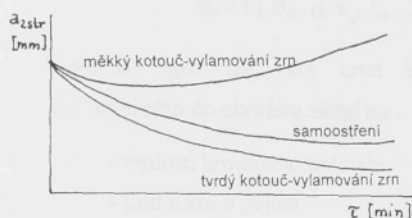
$$\text{J.N.Maslov [55]} : a_z = \frac{v_w}{60v_s \pm 2v_w} \cdot \sqrt{a_e} \cdot l_s \cdot \sqrt{\frac{1}{d_s} + \frac{\psi}{d_w} \cdot \frac{f_a}{B_s}} \quad (1)$$

$$\text{R.Příkryl, R.Musílková[65]:} \quad a_z = \frac{l_s}{L} \cdot a_e \cdot \frac{v_w}{60v_s} \quad (2)$$

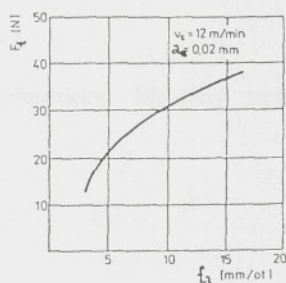
$$K.Preger [37]: \quad a_z = \frac{\lambda_{KE}}{q} \cdot \sqrt{a_e \cdot \left(\frac{1}{d_s} \pm \frac{1}{d_w} \right)} \quad (3)$$

$$\text{Š.Kissoczy [42]:} \quad a_z = k \cdot \frac{v_f^{e1} \cdot a_e^{e2}}{v_s^{e3} \cdot z_s^{e4} \cdot L^{e5} \cdot r_z^{e6}} \quad (4)$$

Střední hloubka třísky se mění v průběhu řezného procesu s opotřebením brousícího kotouče. Podle [42] mohou nastat tři případy změn (obr. 2.16).



obr.2.16 [42]



obr.2.17 [22]

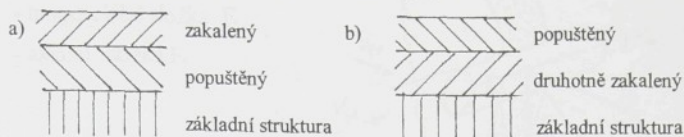
Rychlost podélného posuvu.

Rychlost podélného posuvu je dynamickou veličinou procesu, která ovlivňuje proces jak z ekonomického hlediska tak kvalitativně. Má vliv na velikost řezných sil (obr.2.17), opotřebením kotouče - způsob a rychlost, drsnost a kvalitu povrchu obrobenej plochy, tepelné zatížení, délku stykového oblouku a velikost úběru materiálu.

Teplotní pole obrobku.

Toto pole je ovlivněno teplem tření na hřbetní ploše zrna, kdy vlivem vysoké tepelné vodivosti materiálu obrobku oproti brusným zrnům přechází do obrobku více tepla. Teplota povrchu je však nižší než kontaktní teplota v místě styku zrna a materiálu, závisí zejména na v_s , F_n a řezném prostředí. Jak bylo uvedeno již v popisu teplotního pole brousícího kotouče má na teplotní pole obrobku značný vliv tření pojiva.

Podle druhu a struktury materiálu může být povrch :



Průběh tepelného ovlivnění lze stanovit měřením mikrotvrdosti povrchové vrstvy a pozorováním její mikrostruktury.

Množství tepla přecházející do obrobku závisí na [55] :

$$\theta_0 = f(B_s, \rho, v_w, L_n, \lambda, c)$$

Uvedené teplo lze také určit kalorimetricky. Množství tepla přecházejícího do obrobku závisí na :

- tvrdosti brousícího kotouče
- druhu zrn a pojiva
- řezné rychlosti
- řezné síle, rychlosti deformace
- obvodové rychlosti obrobku
- velikosti třísky
- druhu a způsobu chlazení
- délce stykového oblouku
- pracovní šířce brousícího kotouče

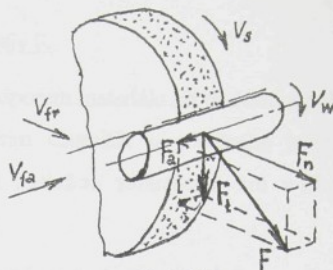
Množství tepla působí na :

- drsnost povrchu
- kvalitu povrchové vrstvy (průběh napětí a tvrdosti, strukturu povrchu materiálu obrobku)

Řezná síla.

Řezná síla vzniká jako výsledek působení brousícího kotouče na obrobek při základních kinematických podmínkách. Pro účely stanovení její velikosti se rozkládá do tří, vzájemně kolmých složek F_n , F_t , F_a (obr. 2.18) :

- normálová složka F_n
- tangenciální složka F_t
- axiální složka F_a



obr.2.18

Velikost jednotlivých složek je možno určit buď experimentálně nebo analyticky [55] :

a) na základě měrného řezného odporu

$$F_t = p \cdot a_e \cdot b_d \quad (5)$$

$$\text{dle [22]} \quad F_t = S_{ts} \cdot n_{z\dot{c}} \cdot S_n \cdot p \quad (6)$$

$$\text{dle [55]} \quad F_t = \frac{A'}{a_e^k} \cdot a_e \cdot b_d \quad (7)$$

b) experimentálně stanovenými vztahy např. [55]

$$F_t = c_p \cdot v_w^{e1} \cdot a_e^{e2} \cdot f_d^{e3} \cdot v_s \cdot B_s^{e4} \quad (8)$$

c) teoretické závislosti (Rosenberg, Eremin) [7]:

$$F_t = f(a_e, b_d, \text{ tvar třísky, } \gamma, \omega) \quad (9)$$

Normálová složka řezné síly F_n .

Oproti procesům obrábění s definovaným ostrím je složkou dominantní, je tedy vždy násobkem zbývajících složek řezné síly. Normálová složka působí v rovině styku brousícího kotouče a obrobku, ve směru procházejícím osami rotace obrobku a brousícího kotouče. Složka F_n působí deformačně ve dvojici nástroj-obrobek.

Tečná složka řezné síly F_t .

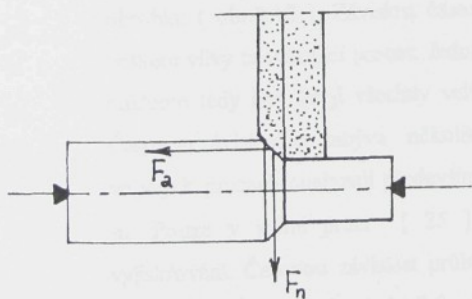
Tečná složka působí ve směru otáčení brousícího kotouče na tečně vedené k jeho obvodu. V závislosti na řezném procesu bývá poloviční až dvoutřetinové velikosti normálové složky řezné síly.

Podélná (axiální) složka řezné síly F_a .

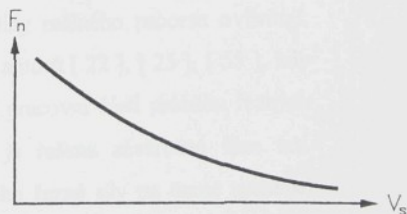
Podélná složka je vyvolána odporem materiálu při podélném pohybu kotouče vzhledem k obráběnému materiálu u podélného broušení. Velikost této složky klesne při rozložení zabírajících zrn v šikmém (kosém) orovnání (obr.2.19).

Složky řezné síly F mají v oblasti broušení následující vlastnosti:

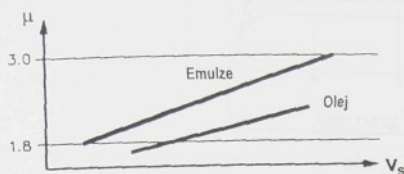
- s růstem obvodové rychlosti brousícího kotouče mají klesající tendenci v oblasti běžně používaných rychlostí (obr.2.20)
- s růstem rychlosti obrobku složky řezné síly rostou [68] - obr.2.22
- závisí na velikosti a druhu zrn brousícího kotouče a na počtu zrn, která jsou současně v záběru
- závisí na druhu a kvalitě řezného prostředí (tření, rozpad zrn atd.) - obr.2.21
- závisí na pracovním záběru a_e a materiálu obrobku (obr.2.23)
- závisí na radiálním opotřebení brousícího kotouče (obr.2.24)
- rostou zejména při zmenšení tloušťky třísky pod $a_z = 0.7\mu\text{m}$ [7]
- jsou ovlivněny komplexním vlivem rychlosti deformace s níž souvisí teplota povrchové vrstvy (dochází ke změně struktury), při broušení je rychlost deformace až 9x větší než u běžného obrábění
- klesají se snižováním tvrdosti materiálu a naopak se jejich hodnota zvyšuje při vysokých stykových teplotách, kdy dochází k rekrytalizaci materiálu



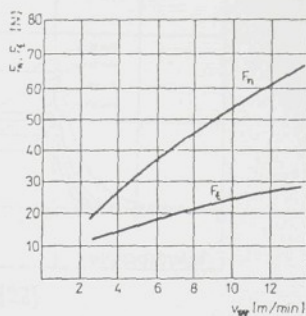
obr.2.19



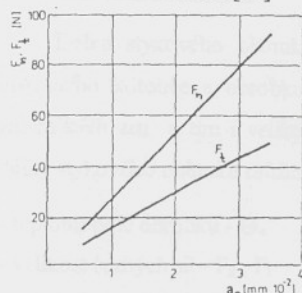
obr.2.20 [99]



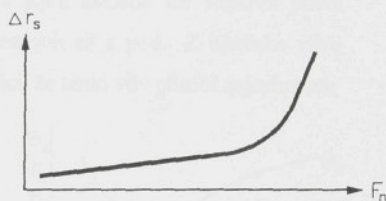
obr.2.21 [99]



obr.2.22 [22]



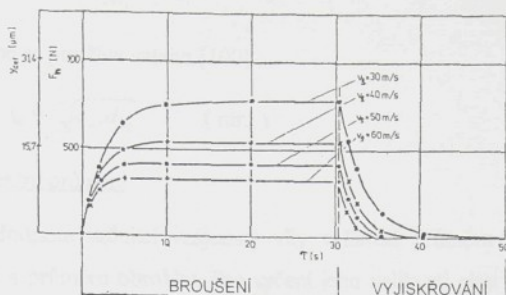
obr.2.23 [22]



obr.2.24 [99]

Časový průběh řezné síly při broušení.

Průběh řezné síly v závislosti na čase a zejména časový průběh jednotlivých složek řezné síly je důležitou informací o procesu broušení. Průběh je téměř analogický s křivkou časové závislosti teplotního pole obrobku (obr.2.12). Závislost časového průběhu řezných sil odráží veškeré vlivy provázející proces. Jedná se o veličinu dynamickou o níž můžeme tedy říci, že ji všechny veličiny reálného procesu ovlivňují. Časovou závislostí se zabývá několik autorů [22], [25], [55], kdy ve svých pracích analyzují především pracovní části průběhu řezných sil. Pouze v jedné práci [25] je řešena závěrečná fáze tzv. vyjiskřování. Časovou závislost průběhu řezné síly na řezné rychlosti ukazuje obr.2.25. V kapitole 3.0 je tato časová závislost hlouběji rozvedena, protože tvoří podstatu této práce.



obr.2.25 [22]

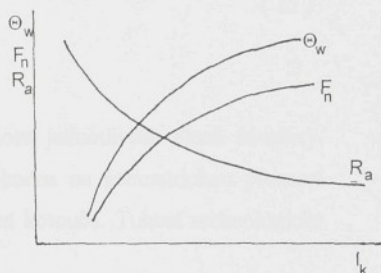
Délka stykového oblouku.

Délka stykového oblouku určuje předpokládanou délku styku brousícího kotouče a obrodku. Na jejím základě lze stanovit počet zabírajících zrn a tím i velikost řezných sil a pod.. Z hlediska vlivu délky stykového oblouku můžeme říci, že tento vliv působí zejména na:

- teplotní pole obrodku - Θ_w
- velikost řezných sil - F_n, F_t
- drsnost a vlastnosti povrchu - R_a
- opotřebení brousícího kotouče - Δr_s

Závislost některých z uvedených veličin je na obr.2.26.

Podle [55] se určí ze vztahu:



a) pro rovinné broušení obvodem kotouče

obr.2.26 [99]

$$L_{pl} = \left(1 \pm \frac{v_w}{60v_k} \right) \cdot \sqrt{d_s \cdot a_e} \quad (10)$$

b) pro broušení vnějších válcových ploch

$$L_n = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_w}{60v_s} \right)^2 + \left(\frac{v_f}{60v_s} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{d_s \cdot d_w \cdot a_e}{d_s + d_w}} \quad (11)$$

c) pro broušení vnitřních válcových ploch

$$L_n = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_w}{60v_s} \right)^2 + \left(\frac{v_f}{60v_s} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{d_s \cdot d_w \cdot a_e}{d_s - d_w}} \quad (12)$$

ve výrobě se používá vztahu [100] :

$$l_k = \sqrt{a_e \cdot d_{eq}} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

Ekvivalentní průměr.

Hodnota určující vzájemný vliv velikosti průměru brousicího kotouče a průměru obrobku. Pro určení jeho velikosti platí následující vztahy.

a) pro broušení vnějších rotačních ploch :

$$d_{eq} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w + d_s} \quad (14)$$

b) pro broušení vnitřních rotačních ploch :

$$d_{eq} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_s - d_w} \quad (15)$$

Tuhost soustavy S-N-O-P.

Tuhost soustavy je dána tuhostí jednotlivých členů soustavy. Ovlivňuje vznik chvění a působí zejména na geometrickou přesnost obrobku, jakost povrchu a opotřebení kotouče. Tuhost technologické soustavy je definována [55] :

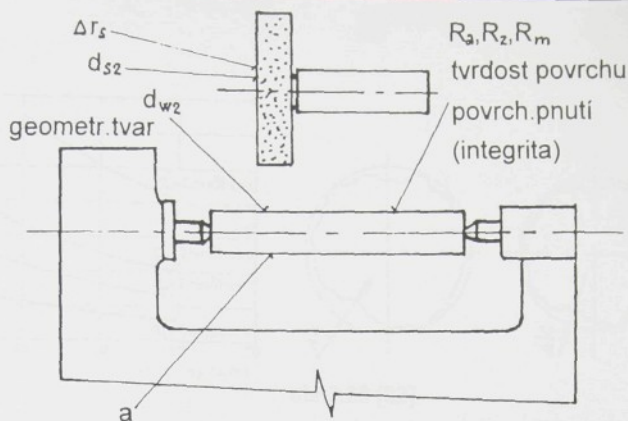
$$k_s = \frac{F_n}{y_{def}} \quad (16)$$

2.3.2.3 Přímé výstupní veličiny

Tyto veličiny jsou závislé na dostupnosti měřicího zařízení a metod měření. Mezi tyto veličiny řadíme zpravidla:

- stav brousicího kotouče daný hloubkou opotřebení Δr_s
- integritu povrchu broušené plochy danou hodnotami R_a, R_z, R_m , průběhu tvrdostí a povrchového pnutí

Pro přehlednost jsou znázorněny schématicky na obr.2.27.



obr.2.27

Hloubka opotřebení brousícího kotouče Δr_s .

Je dána rozdílem mezi vstupním poloměrem brousícího kotouče a jeho poloměrem po ukončení procesu. Tato hloubka je ovlivňována hlavně stavbou brousícího kotouče, materiálem obrobku a řeznými podmínkami.

Konečný průměr brousícího kotouče d_{s2} .

Konečným průměrem rozumíme průměr brousícího kotouče po ukončení brousícího cyklu.

Výstupní průměr obrobku d_{w2} .

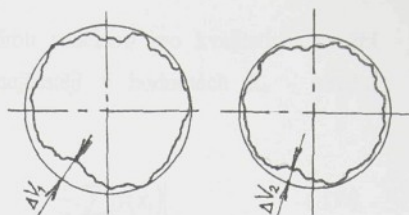
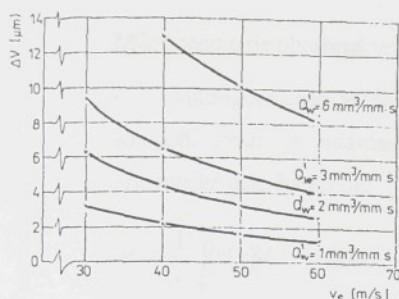
Jedná se o skutečný průměr obrobku po odebrání vrstvy určené k broušení.

Geometrický tvar obrobku.

Geometrický tvar je dán jeho rozměrovou a tvarovou přesností. Ovlivňuje jej zejména tuhost soustavy S-N-O-P, kvalita předchozího opracování, kvalita brousícího kotouče a řezné podmínky. Při broušení může být kopírováno předchozí zvlnění povrchu obrobku [57], [32] - obr. 2.28 vpravo, levý graf ukazuje vliv rychlosti v_s na hloubku zvlnění ΔV .

Integrita povrchu.

Pod pojmem integrita povrchu rozumíme soubor charakteristik povrchu a povrchové vrstvy, jež jsou vytvářeny a ovlivněny



obr.2.28 [22]

technologickými procesy a mají vliv na funkční vlastnosti součástí.

Jednotlivými charakteristikami jsou :

- mikrogeometrie obrobené vrstvy
- stupeň a hloubka zpevnění
- strukturní, fázové a chemické změny
- smysl, velikost a gradient zbytkových pnutí

Tabulka I. ukazuje jednotlivé hodnoty změn, k nimž dochází při broušení, tab. II. potom popisuje pravděpodobné druhy ovlivnění integrity povrchu při broušení [57].

TAB.I

PARAMETRY POVRCHOVÉ VRSTVY	HLOUBKA OVLIVNĚNÍ POVRCHU V mm
hospodárná přesnost IT	5 - 7
hospodárná drsnost R_a	0.4 - 1.6
plastická deformace	0.008 - 0.05
změna tvrdosti kolmo k povrchu	0.04 - 0.25
zbytkové pnutí rovnoběžné s povrchem	0.02 - 0.32
mikro nebo makrotrhliny	0.02 - 0.23
fázová transformace	0.02 - 0.32
sekundární zakalení, přetavení	0.02 - 0.15
nahodilé výstupky, prohlubně, naleptání	0.005 - 0.01

TAB.II

OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	OVLIVNĚNÍ INTEGRITY POVRCHU
nekalitelné oceli	plastická deformace, vytrhaný materiál
kalitelné oceli: konstrukční, nástrojové, korozivzdorné	plastická deformace, nepopuštěný martenzit a austenit, vysokopopuštěný martenzit, mikrotrhliny
austenitické korozivzdorné oceli	plastická deformace, vytrhaný materiál
martenziticky vytvrditelný materiál	plastická deformace, přeměna austenitu, přestárnutí
Ni a Co slitiny	plastická deformace, mikrotrhliny
Ti slitiny	plastická deformace, mikrotrhliny

Mikrogeometrie obrobené vrstvy.

Mikrogeometrie je důležitou veličinou pro kvalitativní využití součásti, zatím je udávána nejčastěji v hodnotách R_a - střední aritmetická úchylka profilu

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad (17)$$

dle nových norem (ISO 1302: 1992) a norem souvisejících je označování drsnosti povrchu na výkresech také v hodnotách R_z nebo R_y [19]:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{j=1}^5 |y_{pj}|}{5} \quad (18)$$

$$R_y = y_{pmax} + y_{vmax} \quad (19)$$

Při broušení se dosahuje hodnot drsnosti povrchu $R_a = 0.05$ až $0.8 \mu m$, $R_z = 0.6$ až $6.3 \mu m$, $R_y = 1$ až $10 \mu m$.

Protože je drsnost povrchu velmi obtížně determinovatelná veličina vzhledem k počtu působících činitelů, je její stanovení obtížné. Prvním známějším vztahem pro určení drsnosti povrchu R_a [55] je její závislost na řezných podmínkách ve tvaru :

$$R_a = \frac{c_{Ra} \cdot v_w^p \cdot a_e^z \cdot f_a^q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{v_s^w \cdot d_w^\mu \cdot B_s^n} \quad (20)$$

Většina údajů pro stanovení drsnosti povrchu je ve formě grafických závislostí (obr.2.29-2.35) [99], [100]. Dalším příspěvkem jsou tzv.diagramy broušení, kde je drsnost povrchu určena pro jednotlivé materiály a určité řezné podmínky v závislosti na ekvivalentní tloušťce třísky:

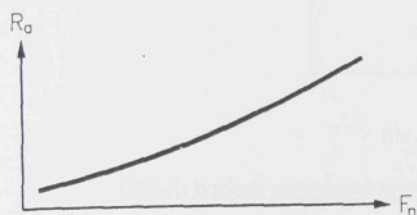
$$\text{před vyjiskřovací fází} \quad R_a = R_{a1} \cdot h_{eq}^r \quad (21)$$

$$\text{po vyjiskřovací fází} \quad R_a^d = R_{a1}^d \cdot h_{eq}^{rd} \quad (22)$$

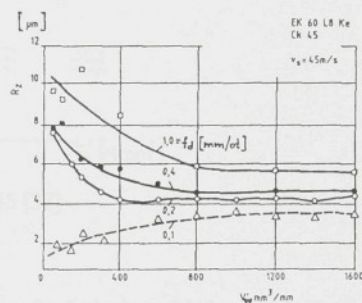
Podobné řešení publikuje např. S. Malkin [52]. Také jsou vytvořeny závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti obrobku a brousícího kotouče [8] :

$$R_a = f(v_w) \quad (23)$$

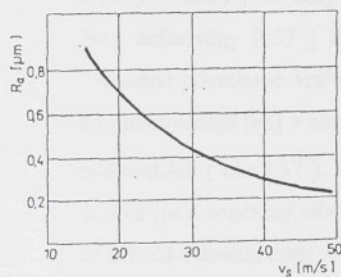
$$R_a = f(v_s) \quad (24)$$



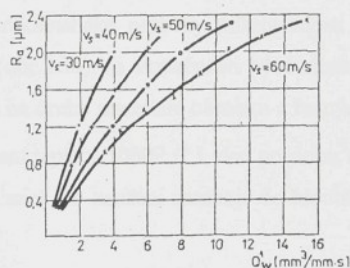
obr.2.29 [99]



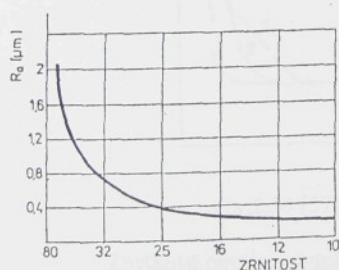
obr.2.30 [100]



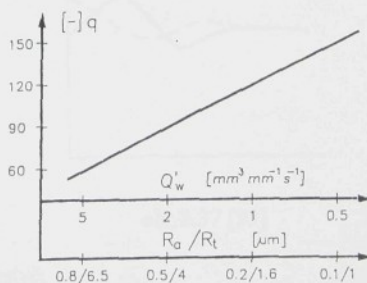
obr.2.31 [22]



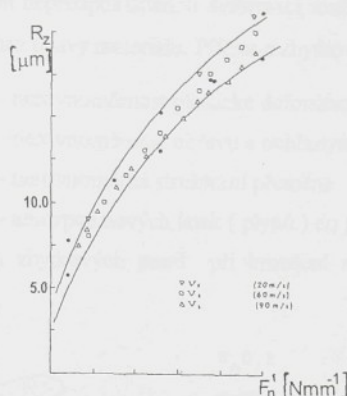
obr.2.32 [22]



obr.2.33 [22]



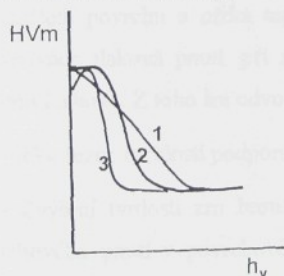
obr.2.34 [99]



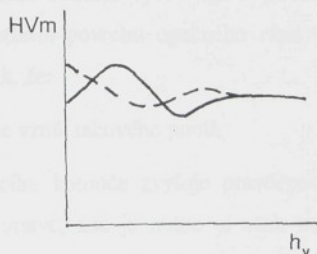
obr.2.35 [32]

Průběh tvrdosti povrchové vrstvy.

Tento průběh ukazuje kvalitu broušené plochy vzhledem k odolnosti vůči opotřebení a únavě, charakterizuje soudržnost vrstev materiálu. Změny tvrdosti jsou dány vysokým mechanicko-tepeelným zatížením. Jsou definovány [57] tři charakteristické průběhy mikrotvrdosti v ovlivněné povrchové vrstvě (obr.2.36). Ve skutečnosti bývá situace komplikovanější [93] v závislosti na druhu materiálu obrobní a řezných podmínkách (obr.2.37). Působení teploty 1000⁰ C i více po dobu až desítek ms a současný vliv mechanického zatížení zasahuje do hloubky až několika desetin mm.



obr.2.36 [57]



obr.2.37 [93]

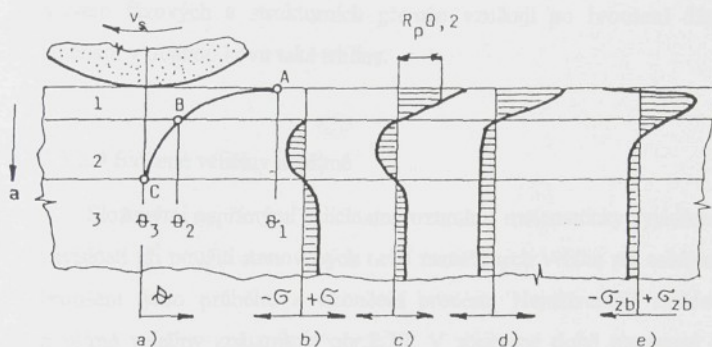
Zbytkové pnutí v povrchové vrstvě.

Průběh zbytkových pnutí v povrchové vrstvě obrobené plochy má vliv zejména na únavovou pevnost materiálu. Zbytková pnutí tahová

mohou způsobit nepředpokládanou deformaci součástí, naopak tlaková pnutí zvyšují mez únavy materiálu. Příčinou zbytkových pnutí je:

- nerovnoměrnost plastické deformace
- nerovnoměrnost ohřevu a ochlazování
- nerovnoměrná strukturní přeměna
- absorpce nových látek (plynů) do povrchové vrstvy

Průběh vzniku zbytkových pnutí při broušení např.[57] ukazuje obr.2.38.



obr.2.38 [57]

Zbytková pnutí zasahují do hloubky kolem 0.3 mm. Působení jednotlivých složek procesu broušení je poměrně složité a komplikované, všeobecně lze konstatovat, že vysoké mechanické zatížení povrchu a nízká tepelná zatížení vyvolávají v povrchových vrstvách tlaková pnutí, při zatížení povrchu opačného rázu vznikají pnutí tahová. Z toho lze odvodit, že:

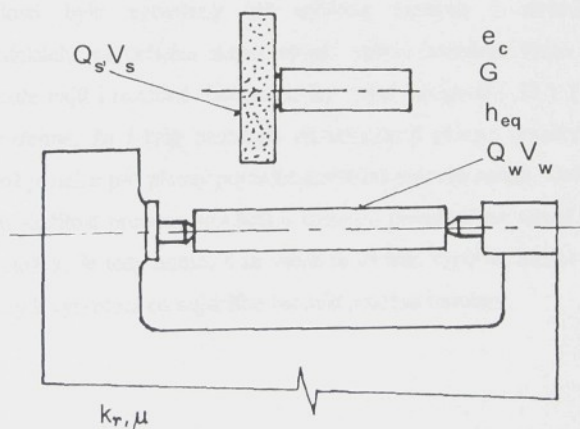
- Růst řezné rychlosti podporuje vznik tahového pnutí.
- Zvýšení tvrdosti zrn broušícího kotouče zvyšuje pravděpodobnost tahového pnutí v povrchové vrstvě, zde je nutno si však uvědomit komplexnost působících vlivů v reálném řezném procesu, kdy se tyto vlivy mohou zesilovat nebo naopak zeslabovat. Např. zvýšení řezné rychlosti při současném snížení velikosti brusných zrn, případně zvýšení rychlosti přísuvu při zapichovacím broušení bude mít za následek snížení tahové hladiny pnutí a pod.

Strukturální změny.

Ke strukturálním změnám dochází zejména vlivem tepelného zatížení povrchu. Jedná se v podstatě o mechanicko-tepelné opracování materiálu. Změny jsou závislé na druhu obráběného materiálu a jeho stavu. Při broušení dochází k rychlosti ohřevu materiálu $105-106^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, nejcitlivější chování přitom mají zušlechtněné martenzitické oceli. U některých slitin (např. Ti, Co...) může dojít ke změnám poměru strukturních složek fáze s vlivem na vlastnosti materiálu obrobku. Vlivem fázových a strukturních přeměn vznikají po broušení díky změnám v objemu kovu také trhliny.

2.3.2.4 Složené veličiny nepřímé

Složenými nepřímými veličinami rozumíme matematicky vyjádřené závislosti při použití stanovených nebo naměřených veličin při zahájení broušení, jeho průběhu a ukončení procesu. Nejužívanější složené nepřímé veličiny znázorňuje obr.2.39. V současné době uznávané a používané i další charakteristické veličiny udává tab.III.



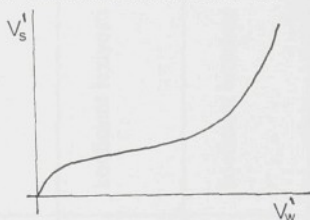
obr.2.39

Tyto údaje slouží k hodnocení již ukončeného řezného procesu. Jedná se o údaje technického a ekonomického charakteru. Popisují řezný proces a lze hledat vzájemné závislosti s cílem řízení řezného

procesu, jeho analýzy a případně vyhledání optimálních podmínek procesu. Na základě těchto údajů byl vytvořen i diagram broušení s nomogramem řezných podmínek.

Různí autoři se zabývali do současné doby tvorbou a využitím řady závislostí veličin broušicího procesu. Tyto závislosti lze rozdělit na vztahy k :

- a) výkonu obrábění (obr.2.40-2.43)
- b) ekvivalentní tloušťce třísky (obr.2.44)
- c) výkonovým parametrům (obr.2.45)
- d) časové závislosti
- e) nákladovým položkám



obr.2.43 [1]

2.4 Shrnutí

V kapitole jsou popsány jednotlivé vlivy působící jako vstupní, průběhové a výstupní veličiny procesu broušení. Jednotlivé odstavce shrnují do současné doby poznané spektrum závislostí jednotlivých veličin, které až na diagram broušení, jsou velmi separované. Tyto závislosti byly vytvořeny při určitých řezných i technických podmínkách, na určitém stupni vývoje oblasti broušení. Proto lze v literatuře najít i rozdílné charakteristiky stejné závislosti [32], [40]. Samozřejmě, že i tyto závislosti charakterizují proces broušení, ale obecně je nelze pro přesný popis konkrétního procesu použít. Dokazuje to jen složitost procesu broušení a časovou proměnlivost téměř všech jeho složek. Je tedy nutno, a ze všech prací toto vyplývá, hledat určité metody k vytvoření co nejširšího modelu procesu broušení.

TAB. III

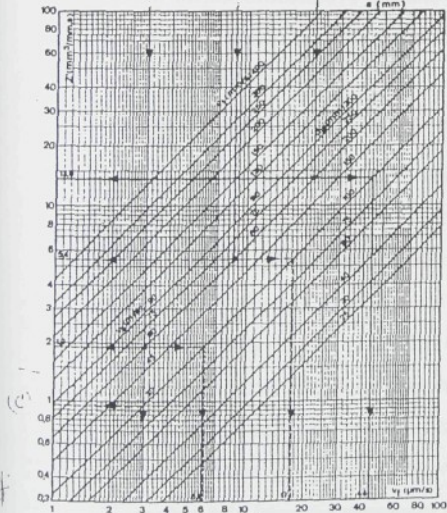
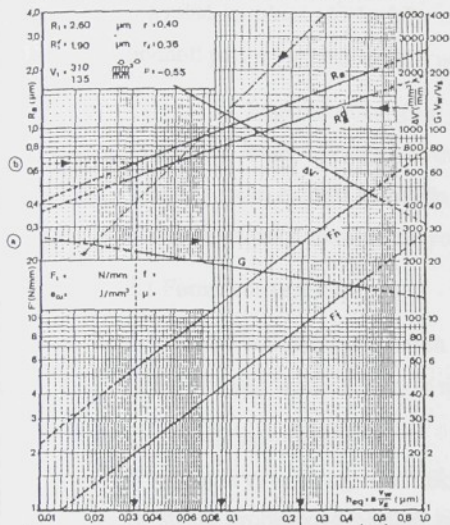
KRITERIA PRACOVNÍ SCHOPNOSTI BROUSICÍCH NÁSTROJŮ A OBROBITELNOSTI

ROK	AUTOR	VZTAH	ROZMĚR	NÁZEV KRITERIA	LIT.
		$Q_w = \frac{V_w}{\tau}$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	výkon broušení	
	Schlesinger	$G = \frac{V_w}{V_s}$	-	poměrný objemový obrus	[49]
1953	Majkus	$k_y = \frac{v_f}{F_n}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$	řezivost	[25]
1969	Lurje	$k_Q = \frac{Q_w}{F_n}$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$	řezná schopnost	[49]
1974	Maslov	$k_Q = \frac{Q_w}{F_n}$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$	koefficient řezivosti	[55]
1974	Maslov	$\mu = \frac{F_t}{F_n}$	-	koefficient broušení	[55]
1974	Snoeys, Peters, Decneut	$h_{eq} = a_e \cdot \frac{v_w}{v_s}$	μm	ekvivalentní tloušťka odebírané třísky	[76]

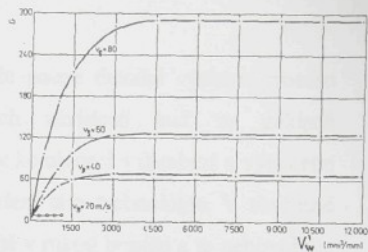
TAB.III - pokrač.

KRITERIA PRACOVNÍ SCHOPNOSTI BROUSICÍCH NÁSTROJŮ A OBROBITELNOSTI					
ROK	AUTOR	VZTAH	ROZMĚR	NÁZEV KRITERIA	LIT.
1974	Snocys, Peters, Deeneut	$R_a = R_{a1} \cdot h'_{eq}$	μm	diagram broušení	[76]
		$G = G_1 \cdot h''_{eq}$	-		
		$F'_1 = F'_{n1} \cdot h^f_{eq}$	N		
		$F'_n = \frac{F'_{n1}}{\mu} \cdot h^f_{eq}$	N		
	Marshall, Shaw	$e_c = \frac{F_t \cdot v_s}{Q_w}$	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	měrná energie broušení	[29]
1979	Gazda	$\text{tg} \beta = \frac{C}{T}$	-	kritérium strmosti	[25]
		$U = \frac{10^5 \cdot \text{tg} \beta}{S}$	mm^{-2}	kritérium strmosti práce vyjiskřování	

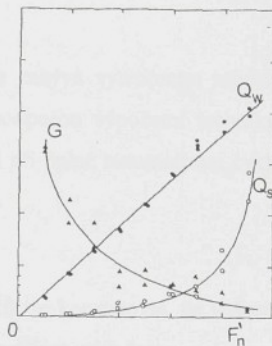
100C76 (XC-143Cr)	HRC=62-63	EK60L7VX	E.52.2 kN/mm ²
d_g (mm): 665-720	v_g (m/s): 30-45-60	S9-C 3%	μ_g (mm ² /s): 0.2
d_w (mm): 83-100	q (v_g/v_w): 20/10/120	Q_f (l/min.km): 2	μ_g (mm ² /s): 0.2
d_g (mm): 80	V_g (mm ³ /min): 500	P_f (atm): 2	μ_g (mm ² /s): 0.2
b (mm): 30	k_m (N/ μ m): 40	A (BF ₂): 0.023	C (BF): 38.5



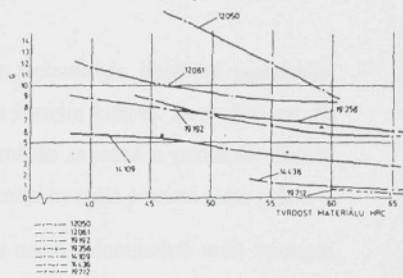
obr. 2.44 [76]



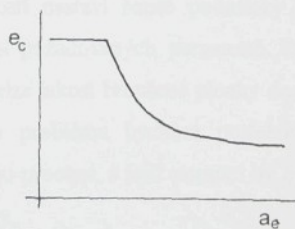
obr.2.40 [22]



obr.2.41 [31]



obr.2.42 [22]



obr.2.45 [3]

3.0 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Z druhé kapitoly vyplývá, že pouze detailní výzkum procesu broušení, vytvoření matematických závislostí buď na základě pravděpodobnosti a statistiky nebo v kombinaci s databází a výpočetní technikou, je směrem budoucího řešení této technologie. V současné době je výsledek procesu více či méně v rukou brusiče a to nehovoříme o kvalitě broušené plochy jako celku, kdy její jednotlivé složky praxe hodnotí pouze v případě vzniku poruch.

Experimentální část práce se zabývá vytvořením modelu výstupních hodnot drsnosti povrchu s podporou výpočetní techniky. Využití tohoto modelu by mohlo pomoci při úplné automatizaci cyklu broušení, na čemž autor nadále pokračuje.

3.1 Formulace problému

Na základě dříve uvedených poznatků lze konstatovat, že veškerá řešení v oblasti broušení kovů se nebudou nalézat vzhledem

a) ke složitosti procesu

b) ke stupni vývoje vědy a techniky

na stejné problémové hladině jako technologie obrábění používající nástroje s jednoznačně definovaným řezným klínem. Je možno použít směry řešení uvedené v kap. 2.1. Protože se jedná o poměrně obsáhlé okruhy, k jejich dalšímu vývoji a poznání by měla pomoci i tato práce.

Při současném stavu znalostí nelze jednoznačně určit výstupní parametry broušené plochy. Ve výrobní praxi je tento problém přenesen na úroveň pracovníka obsluhující brusku - brusiče. Ten na základě svých zkušeností, praxe a dovedností nastaví řezné podmínky a připraví celý systém tak, aby dosáhl požadovaných parametrů. Přes existenci různých řídicích systémů, nelze jakost broušené plochy dosud vytvořit řízeně. K vyřešení tohoto problému bychom potřebovali vyhledat takovou dynamickou veličinu procesu, s jejíž pomocí by bylo možno řídit konečné parametry plochy.

Práce si klade za cíl:

- a) ověření některých stávajících přístupů k technologii broušení
- b) vytvoření a ověření nového přístupu, zjištění oboru jeho platnosti a využitelnosti a porovnání se stávajícími přístupy

Práce bude zaměřena na zjištění významu časového průběhu složek řezných sil a to zvláště složky dominantní pro broušení - normálové složky řezné síly. Časový průběh tvoří tři oblasti broušicího cyklu - vřezání kotouče, pracovní fáze a závěrečná, vyjiskřovací fáze. Pro stanovení a dosažení určité jakosti povrchu by měla mít význam právě fáze vyjiskřování. Proto se v práci zaměřím na zjištění významu této oblasti z pohledu jakosti finálního povrchu. Jakost budeme hodnotit v hodnotách drsnosti povrchu, nejlépe R_a . Bude nás zajímat i to, zda existuje nějaká závislost vyjiskřovací fáze vzhledem k dalším veličinám průběhu procesu broušení.

Přínosem práce se stane i takové řešení, které zjistí, že daný směr není správný, je pro všeobecné řešení nepoužitelný a nelze jej tedy při řešení systému broušení aplikovat.

Přitom je nutno si uvědomit, že dané řešení bude vytvořeno při daném stupni přístrojového vybavení a stupni znalostí, kdy je možné, že ověření platnosti při vývoji technického zajištění zejména, se stane pozitivním i v případě současného zamítnutí postupu.

Řešení práce by mělo potvrdit, že pomocí některé charakteristické veličiny vyjiskřovací fáze, databanky údajů reálných procesů a vytvořeného matematického modelu je možné vytvořit takové řízení broušicího procesu, při němž budou dodrženy všechny předpokládané (požadované) výstupní veličiny. Podle kvality modelu a databáze zejména :

- drsnost povrchu
- ovlivnění povrchové vrstvy
- geometrická a rozměrová přesnost
- struktura povrchové vrstvy

Na kvalitě modelu a databáze bude závislá i velikost pole v němž se s danou přesností budou výstupní veličiny pohybovat.

3.2 Expertní systémy

Expertními systémy se zabývá ve spojitosti s broušením řada pracovišť [66], [85], [80], dále také Dr.Trmal na UWE v Bristolu, katedra KOM na TU v Liberci a další. Tyto systémy simulují rozhodovací proces při řešení a formulaci problému, mohou vést k optimalizaci činnosti. Expertní systémy pracují v několika rovinách

(obr. 3.1).

Vlastní konstrukce expertního systému [66] zahrnuje zdrojovou část a pracovní část. Vstupní data tvoří nejdůležitější část expertního systému. Obsahují údaje :

popis použité technologie

obrobek

specifikaci pro obrábění (drsnost,přesnost,integritu)

brousíci kotouč

podmínky broušení

orovnění

řezné prostředí

dodané údaje :

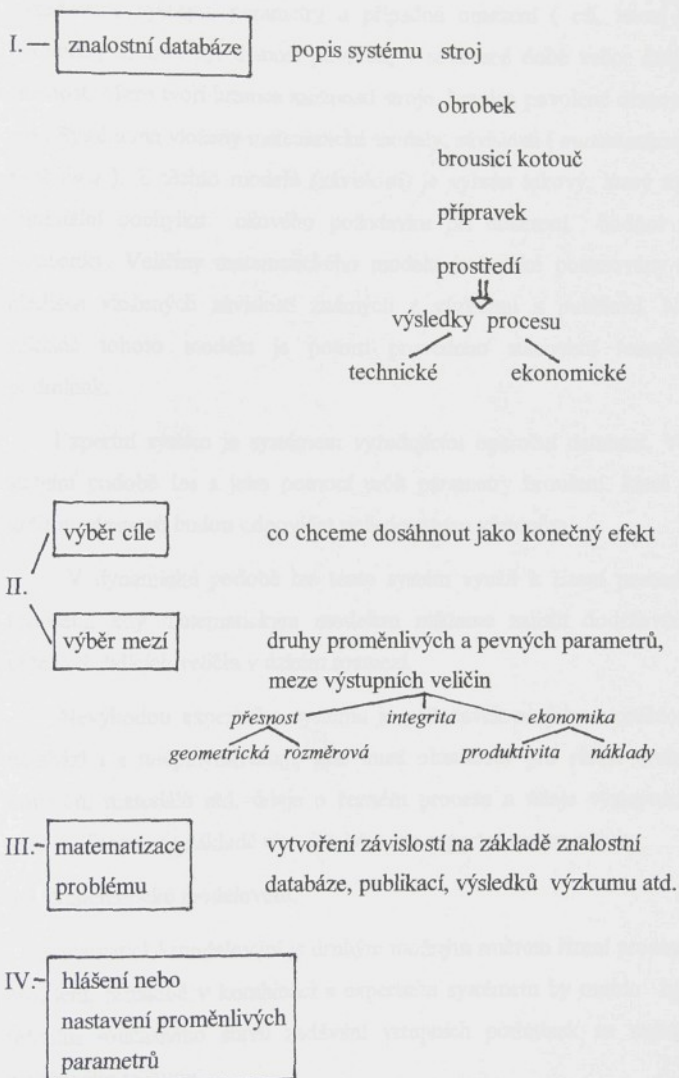
výpočet drsnosti, přesnosti, integrity

výpočet operačních hodnot (F, q atd.)

Jednotlivé údaje a výběr řezných podmínek je determinován pevnými postupy nebo výběrem z již uskutečněných experimentů v databázi. V poslední fázi dochází ke kombinaci volby jednotlivých možností řezných podmínek.

Vzhledem k možnostem výpočetní techniky, expertní systém může vycházet z tvorby vlastního matematického modelu na základě údajů uložených v bance dat. Expertní systém na obr.3.2 pracuje za

EXPERTNÍ SYSTÉM.



podpory banky dat (*znalostní databáze*). V této bance jsou uloženy údaje proběhlých brousicích cyklů ať už experimentálních, tak i neúplné údaje z výroby. Po zadání vstupních dat procesu je nutno zadat také požadované výstupní parametry a případná omezení (*cíl, meze*). Parametry mohou být drsnost povrchu, v současné době velice často přesnost. Meze tvoří hranice možností stroje, hranice povolené drsnosti atd.. Systém má vloženy matematické modely, závislosti (*matematizace problému*). Z těchto modelů (závislostí) je vybrán takový, který má minimální odchylku cílového požadavku při dosazení hodnot z databanky. Veličiny matematického modelu jsou také posuzovány z hlediska vložených závislostí známých z výzkumu a publikací. Na základě tohoto modelu je potom provedeno stanovení řezných podmínek.

Expertní systém je systémem vyžadujícím operační databázi. Ve stabilní podobě lze s jeho pomocí určit parametry broušení, které s určitou přesností budou odpovídat požadovaným výstupům.

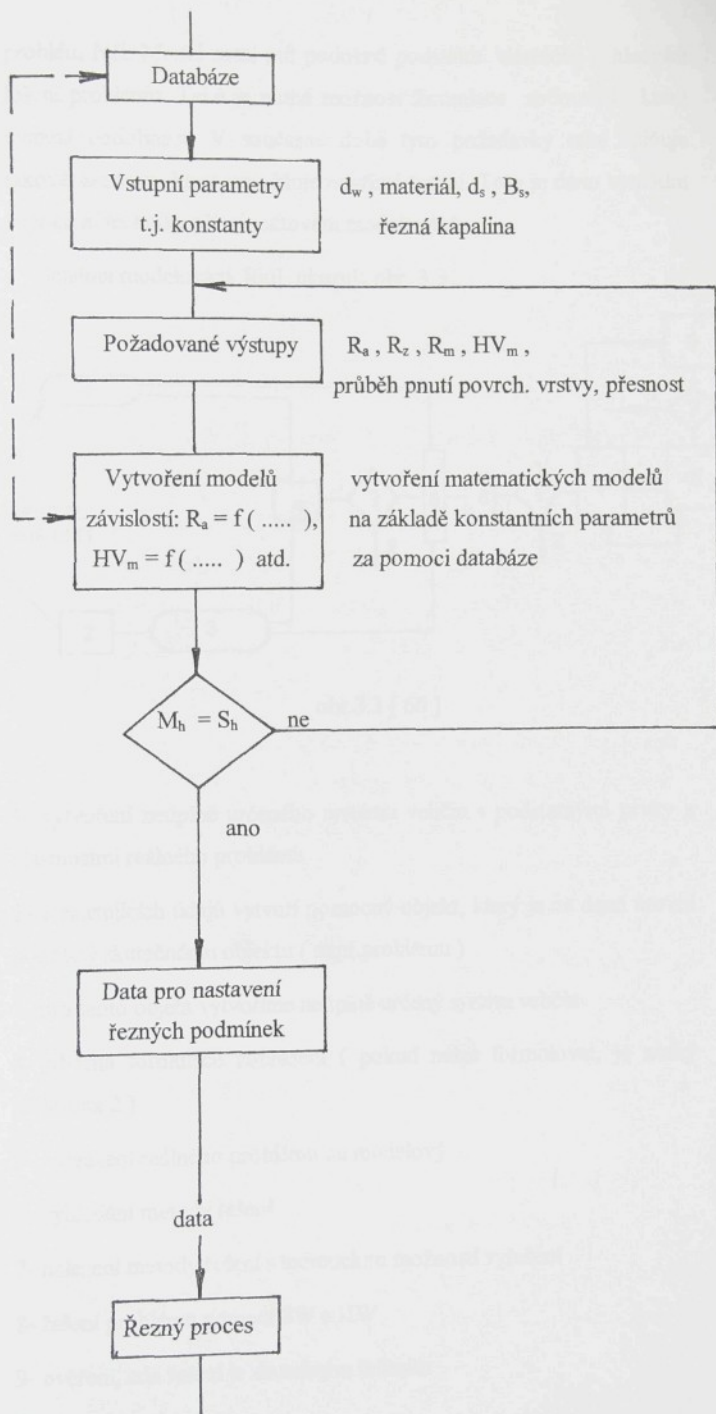
V dynamické podobě lze tento systém využít k řízení procesu broušení, kdy matematickým modelem můžeme zajistit dodržování určených řídících veličin v úzkém rozmezí.

Nevýhodou expertního systému je požadavek na jeho rozsáhlou databázi i s neúplnými údaji, kde musí obsahovat pro různé druhy kotoučů, materiálů atd. údaje o řezném procesu a údaje výstupních veličin. Teprve na základě této databáze lze expertní systém oživit.

3.3 Matematické modelování.

Matematické modelování je druhým možným směrem řízení procesu broušení, případně v kombinaci s expertním systémem by mohlo být řešením současného stavu zadávání vstupních podmínek za nejisté zaručeného výstupu.

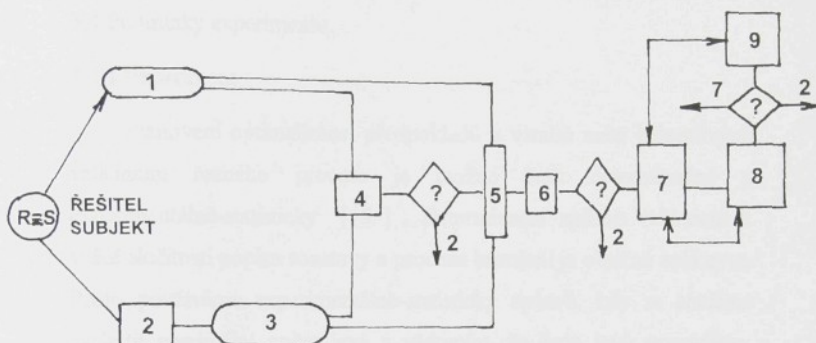
Matematické (výpočtové) modelování je založeno na principu vytvoření modelu skutečného problému [60] a na tomto modelu se



obr.3.2

problém řeší. Model musí mít podobné podstatné vlastnosti z hlediska řešení problému. Také je nutná možnost formulace zobrazení, které vymezi podobnost. V současné době tyto požadavky také splňuje taková soustava, která umožňuje nepřímé řešení. Toto je dáno využitím výpočetní techniky při výpočtovém modelování.

Schéma modelování [60] ukazuje obr. 3.3



obr.3.3 [60]

- 1- vytvoření neúplně určeného systému veličin s podstatnými prvky a vlastnostmi reálného problému
- 2- z existujících údajů vytvoří pomocný objekt, který je na dané úrovni podobný skutečnému objektu (např.problému)
- 3- pro tento objekt vytvoříme neúplně určený systém veličin
- 4- obecná formulace zobrazení (pokud nelze formulovat, je nutný návrat na 2)
- 5- zobrazení reálného problému na modelový
- 6- vyhledání metody řešení
- 7- nalezení metody řešení s teoretickou možností vyřešení
- 8- řešení problému pomocí SW a HW
- 9- ověření, zda řešení je skutečným řešením

Výpočtové modelování odlišuje od běžných výpočtů vztah k experimentu. Experiment patří neoddělitelně právě k výpočtovému modelování. Experiment vlastně nahrazuje model výpočtového modelování, kdy se experiment stává zdrojem dat odpovídajících reálnému procesu.

3.4 Podmínky experimentu.

3.4.1 Experiment

Stanovení optimalizace, předpokladů a vztahů mezi jednotlivými veličinami řezného procesu je možno řešit determinačně a experimentálně-statisticky [5] . Determinační způsob vzhledem k velké složitosti popisu soustavy a procesu broušení je obtížné aplikovat. Proto používáme experimentálně-statistický způsob, kdy se snažíme zachytit maximální počet jevů s vědomím, že řadu jevů opomíjíme, případně je pouze předpokládáme.

Při tomto způsobu řešení můžeme zvolit cestu klasického (úplného) výzkumu, kdy sledujeme reakci objektu při všech změnách vstupních veličin v jejich vzájemné kombinaci. Tento postup vyžaduje vysokou kapacitu danou vysokým počtem pokusů, pracností, vysokými náklady, přípravnými a experimentálními časy a podobně.

Při plánovaných pokusech (experimentech) se kombinuje pouze určitý počet charakteristických faktorů, kdy návrh a zpracování se provádí pomocí statistických metod. V tomto případě dojde ke zkrácení časů, náročnosti, prodloužení časů na kvalitní provedení experimentu, jeho hlubší analýzu a přesnější závěry.

Každý pokus musí mít stanovený cíl a určeny jednotlivé faktory experimentu. Z hlediska stanovených cílů používáme experiment [5] : Aktivní a pasivní, kdy vytvořením nových podmínek získáme výsledky o předmětu výzkumu, aktivní experiment se používá v laboratorních podmínkách, pasivní ve výrobních podmínkách.

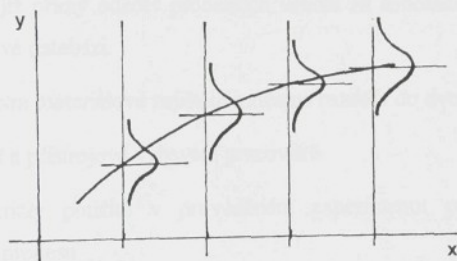
Laboratorní a výrobní jsou dány druhem prostředí probíhajícího experimentu, kdy laboratorní je přesnější v naměřených hodnotách, výrobní v kvalitě těchto hodnot vzhledem k realitě procesu.

Fyzikální a matematický rozlišují přístup k podstatě experimentu.

Popisný a optimalizační, kdy popisný použijeme k analýze, k výzkumu a popisu jevů optimalizační hledá a určuje optimální stav i přes ne zcela vyjasněnou podstatu procesu.

Experimentální výzkum je založen na náhodnosti jevů, kdy za základ hodnocení procesů v technické praxi je považováno normální rozdělení pravděpodobnosti jevů (Gaussovo) pro spojitě jevy.

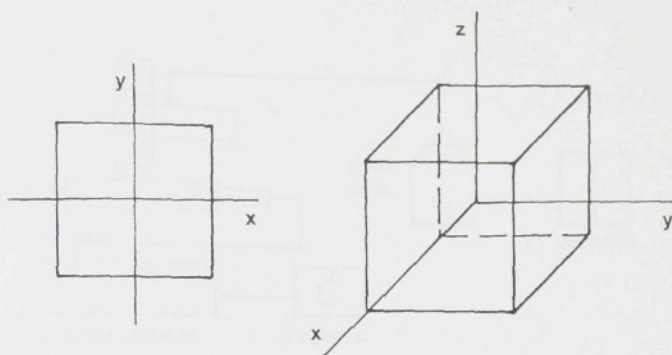
Zpracování výsledků experimentů, hledání závislostí umožňuje korelačně-regresní analýza, kdy regresní křivka s náhodným normálním rozdělením jevů je znázorněna na obr. 3.4. Protože tento matematický postup je pracný a časově náročný, je využíváno výpočetní techniky, případně softwareových produktů např. : Statgraphics, MATLAB atd.



obr.3.4

3.4.1.1 Plánování experimentu

Každý experiment obsahuje konečný počet pokusů, kdy kvalita experimentu je závislá na výběru prvků - tzn. úplný nebo částečný faktorový experiment [5]. Úplný faktorový experiment realizuje všechny možné kombinace hodnot faktorů bez opakování. Nejčastější jsou plány typu 2k a méně 3k (obr. 3.5) .



obr.3.5

Pro provedení experimentu se vytváří matice plánovaného experimentu s kombinací jednotlivých faktorů pro daný pokus.

3.4.2 Materiální zajištění experimentu

Materiálové zajištění experimentu souvisí úzce s jeho kvalitou, důvěryhodností a kvalitou získaných výsledků.

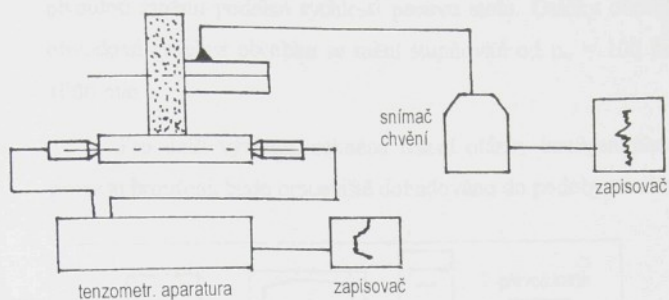
V průběhu řešení práce bylo pracoviště (obr. 3.6) doplněno a přetvořeno na kvalitativně nové pracoviště (obr.3.7), na kterém se provádí již přímý odečet procesních veličin za současného ukládání v počítačové databázi.

Vlastní materiálové zajištění můžeme rozdělit do dvou skupin:

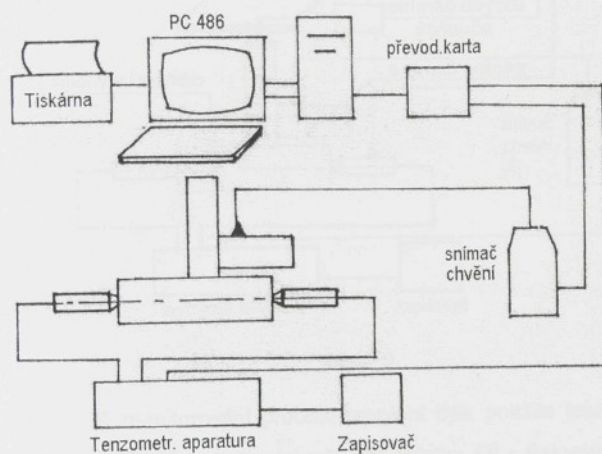
- a) strojní a přístrojové vybavení pracoviště
- b) materiály použité v prováděném experimentu při uskutečnění řezného procesu

3.4.2.1 Vybavení pracoviště

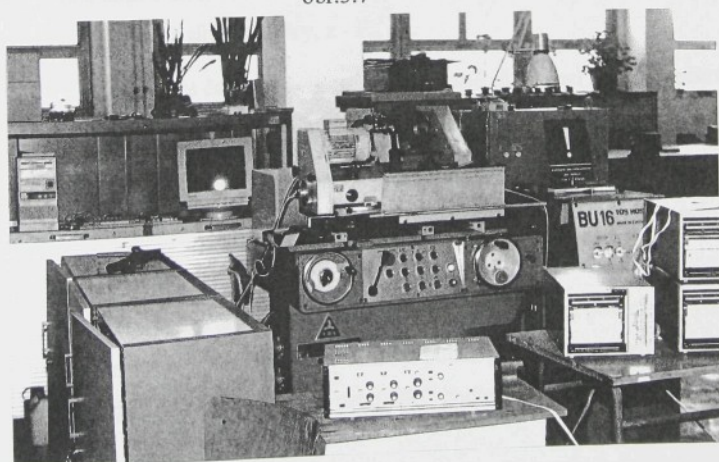
Experimentální pracoviště v současné podobě (obr.3.8) bylo vybaveno hrotovou bruskou BU 16, výrobce TOS Holice, rok výroby 1990. Bruska má možnost volby dvou obvodových rychlostí broušení kotouče daných $n_s = 2812$ nebo 2097 min^{-1} (po dohodě s výrobcem bylo využito obou stupňů), plynulou změnu přísuvové rychlosti pracovního vřeteníku zejména pro zapichovací způsob broušení a



obr.3.6



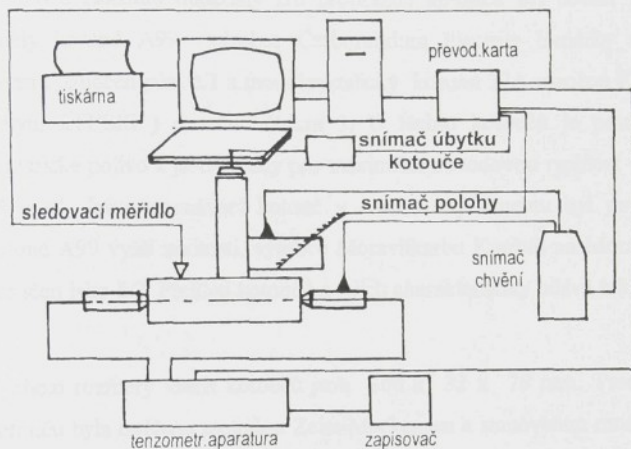
obr.3.7



obr.3.8

plynulou změnu podélné rychlosti posuvu stolu. Otáčky obrobku, t.j. obvodová rychlost obrobku se mění stupňovitě od $n_w = 100 \text{ min}^{-1}$ do 1000 min^{-1} .

Pro další výzkum, zejména řešení otázky inteligentního řízení procesu broušení, bude pracoviště dobudováno do podoby na obr.3.9.



obr.3.9

K monitorování procesu broušení byla použita tenzometrická aparatura T1000 s napájením měřícího můstku 4V s frekvencí 5 kHz v maximální citlivosti. Tato aparatura byla použita ke sledování velikosti složek řezné síly v osách $y, z - F_n, F_t$.

Pro zápis časové závislosti složky řezné síly F_n byl použit zapisovač Vareg 2.

Měření drsnosti bylo prováděno měřícím přístrojem Hommel-Tester T500. Tento přístroj umožnil snímat drsnost povrchu v hodnotách R_a, R_z, R_m .

Pro hlubší analýzu vlivu procesu broušení na stav povrchové vrstvy byla měřena její tvrdost K měření byl použit přístroj Rockwell s identory pro zjišťování hodnot HRB nebo HRC podle tvrdosti povrchu vzorku.

3.4.2.2 Brousicí kotouče.

Brousicí kotouč je svým vlivem jedním z hlavních činitelů procesu. Jeho vlastnosti jsou dány technickou charakteristikou. Tyto vlastnosti je nutno však ověřit pro určitý rozptyl hodnot ve výrobě. Vzhledem k použitému stroji byl zvolen maximální průměr kotouče $d_s=300$ mm. Jako dva základní materiály zrn brousících kotoučů byl použit bílý umělý korund A99 výrobce Carborundum Electrite Benátky nad Jizerou označen jako č.1 a monokrystalický korund 27A výrobce FAG (nyní EFESIS) označen číslem 3. U těchto kotoučů je použito keramické pojivo a jsou určeny pro maximální obvodovou rychlost $v_s = 45 \text{ m.s}^{-1}$. Jako srovnávací kotouč v závěru experimentu byl použit kotouč A99 vyšší zrnitosti, výrobce Moravítkarbo Kunštát na Moravě, označen jako č.2. Přehled kotoučů a jejich charakteristiky udává tab.IV.

Výchozí rozměry všech kotoučů jsou $300 \times 32 \times 76$ mm. Tvrdost kotoučů byla ověřena metodou Zeiss-Mackensen a stanovením modulu pružnosti akustickým signálem v závodě Carborundum Benátky.

tab.IV.

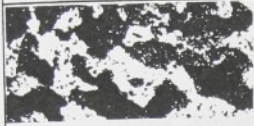
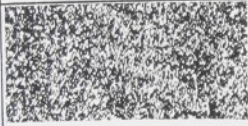
Poř. čís.	Brousicí kotouč	Rozměr	Zeiss-M. h [mm]	E [kN.mm ⁻²]	ρ [g.cm ⁻³]
1.	A99 100J 9V	Ø 300x32x76	3,8/ J	44.236	1.905
2.	A99 60M 8V	Ø 300x32x76	2,7/ M	63.2	2.31
3.	27A 120J 9V	Ø 300x32x76	3,7/ J	44.81	2.075

3.4.2.3 Materiál obrodku.

Protože byly pro průmyslové závody současně zjišťovány některé vlastnosti materiálů po broušení, byly tyto materiály zařazeny také do skupiny vzorků pro experiment. Jednotlivé materiály shrnuje tab. V. s udáním jejich charakteristiky. Vzorky byly vytvořeny v několika kusech, aby experiment mohl plynule pokračovat a také aby nedocházelo k příliš rychlému zmenšování průměru obrodku, což by mělo za následek znatelný pokles obvodové rychlosti.

Struktura jednotlivých materiálů je také popsána v tabulce, odpovídá jejich zpracování. Vzorky materiálu měly šířku $B_s=15\text{mm}$, průměr byl dán výchozím průměrem polotovaru. Vzorky materiálu byly upínány do přípravku pomocí otvoru o průměru 20 mm.

tab.V

MIKROSTRUKTURA	VZOREK	TVRDOST	SLOŽENÍ DLE ČSN [%]
 300:1	12 050.1	HRB 85	0.42-0.5 C 0.5-0.8 Mn 0.17-0.37 Si 0.25 Cr, 0.3 Ni, 0.3 Cu
 500:1	12 050.4	HRC 40	jako 12 050.1
 500:1	15 241.6	HRC 45	0.35-0.4 C 0.6-0.8 Mn 0.17-0.37 Si 1.7-2.0 Cr 0.6 Ni, 0.1-0.2 V
 500:1	17 027.0	HRB 83	0.15-0.25 C 0.9 Mn 0.7 Si 14.0-16.0 Cr
 500:1	17 027.2	HRC 40	jako 17 027.0

3.4.2.4 Řezná kapalina.

Řezná kapalina byla použita od výrobce TRIGA Praha . Jedná se o Robol ve 2% koncentraci doporučené výrobcem. Do řezu bylo konstantně dodáváno $Q_f = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$.

3.5 Metodika měření

Experimentální pracoviště na němž je měření prováděno ukazuje obr. 3.9. Při měření jednotlivých veličin bylo používáno následujících postupů:

Rozměry obrobku - měřeno mikrometrem na 3 místech a brán aritmetický průměr těchto měření

z měření vyplývá: - velikost obvodové rychlosti obrobku v_w

- velikost úběru materiálu V_w, Q_w

Úbytek brousicího kotouče - měřen "žiletkovou metodou" jako otisk profilu kotouče do ocelové planžety (čepelky) s vyhodnocením na metalografickém mikroskopu. Tento mikroskop má přídavné zařízení pro přesný odečet měřených hodnot s přesností odpočtu $1\mu m$.

Z měření vyplývá: - obvodová rychlost brousicího kotouče v_s

- objemové opotřebení brousicího kotouče V_s, Q_s

Orovnání brousicího kotouče - jsem prováděl po ukončení každého cyklu broušení, t.j. po čtyřech pracovních záběrech kotouče. K orovnání jsem použil jednokamenový diamantový orovnač. Orovnání probíhalo ve dvou etapách :

1) hrubé orovnání o hloubce $a_d = 0.05\text{ mm}$,

2) jemné orovnání o hloubce $a_d = 0.025\text{ mm}$ při rychlosti posuvu $v_d = 0.5\text{ mm} \cdot s^{-1}$.

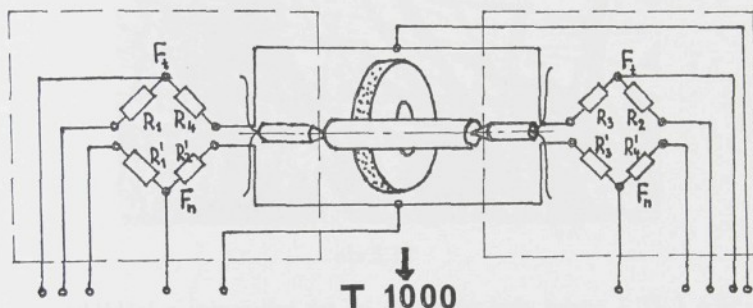
orovnání ovlivňuje : - velikost obvodové rychlosti kotouče zmenšením

jeho průměru

- kvalitu broušené plochy

Velikost řezných sil - měřil jsem dvousložkovým tenzometrickým dynamometrem, jehož schéma ukazuje obr.3.10. Dynamometr je zkonstruován jako speciální hroty s deformačními členy ve tvaru trubky. Ve dvou hlavních směrech působících sil, normálové F_n a tečné F_t , byl opatřen tenzometrickými snímači (na každém hrotu jsou umístěny dva

snímače pro příslušnou sílu). Změna odporu, vyvolaná průhybem deformačních členů působením složek řezné síly, byla zpracovávána tenzometrickou aparaturou T 1000. Registrace probíhala jednak graficky (pro F_n) zapisovačem Varg 2 (obr.3.11) a jednak pomocí převodní karty počítačem. Kalibrace celé soustavy byla provedena třmenovým siloměrem, zapůjčeným školícím pracovištěm.



obr.3.10

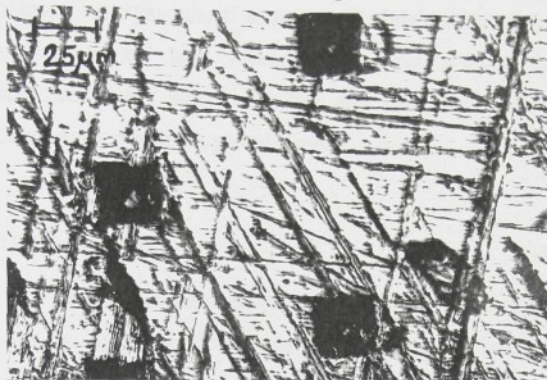
Drsnost povrchu - měřena přístrojem Hommel-Tester T500 pracujícím na principu piezoelektrického jevu v krystalech, kdy při snímání profilu diamantovým hrotem dochází k deformaci krystalu a statisticky se vyhodnocuje průběh signálu s výstupem v hodnotách R_a , R_z , R_m . Po každém broušení se provádělo měření drsnosti na třech různých místech povrchu.



obr.3.11

Průběh tvrdosti povrchové vrstvy - měření se provádělo na šikmém řezu pod úhlem $7^\circ 30'$, vybroušeném na povrchu broušené plochy brousicím

papírem č.600 pod vodou. Byla měřena hodnota mikrotvrdosti podle Vickerse na přídatném zařízení metalografického mikroskopu Jenavert (obr.3.12). Zatěžovací síla byla použita 1.75 N, toto měření ani vyhodnocení není součástí práce a bude zpracováno samostatně.



obr.3.12

Ukládání a zpracování dat do databanky bylo řešeno [33] a je zahrnuto do architektury databanky. Průběh tvrdosti povrchové vrstvy a odhad průběhu se musí stát nedílnou součástí výstupních parametrů povrchu. Zápis do databanky je prováděn po 25 μm hloubky pod povrchem s hodnotami naměřené mikrotvrdosti :

$h_v0.25$ $h_v0.5$ $h_v0.75$ $h_v1.0$ $h_v1.25$

Velikost chvění brouscího vřeteníku - byla snímána pro úplnost měření a za účelem dalšího využití při hledání závislosti mezi jednotlivými vlivy procesu broušení. Byly zaznamenávány hodnoty zrychlení a rychlosti za současného zápisu průběhu chvění na zapisovači. Veličina byla měřena snímačem chvění 2513 Brüel - Kjaer.

Oba posledně jmenované údaje nesouvisely s cílem práce. Vzhledem k předpokladu, že ve výzkumu budu pokračovat i v budoucnosti, prováděl jsem měření co nejkomplexněji. Předpokládám, že posledně jmenovanými vlivy se budu zabývat dále v souvislosti s řízením cyklu broušení k dosažení určité jakosti povrchové vrstvy po broušení.

Každý jednotlivý pokus byl opakován čtyřikrát na téže vzorku materiálu pro maximální odstraňování nahodilých vlivů a rozptylu podmínek měření. Upínací síla po celou dobu byla konstantní z důvodu minimalizace rozptylu tuhosti soustavy. V rámci možností a přesnosti kontrolních zařízení byly veškeré další vlivy systému i řezných podmínek udržovány jako konstantní, aby bylo možno jednoznačně vytvořit závěry k veličinám proměnlivým.

3.5.1 Uchovávání dat

V průběhu řešení byla vyvinuta určitá architektura banky dat, která má v současné době podobu odpovídající řešení systému automatického řízení procesu broušení. Databanka je tvořena čtyřmi skupinami dat :

- a) data vstupní (B_s , d_{w1} , d_s , n_w , n_s , b_d , v_{fr} , kotouč, obrobek)
- b) data procesní (F_t , F_n ...)
- c) data postprocesní (R_a , R_z , a_e )
- d) data analytická (d_{eq} , h_{eq} , V_w , V_s , Q_s )

Pro zajištění dat při jednotlivých měřeních byl od počátku vytvořen tiskopis měření (příl. 1), který obsahoval měřené a vstupní údaje. Na jeho základě se prováděl zápis do banky dat.

Pro ucelenost banky dat jsou ukládány také hodnoty chvění naměřené na brousicím vřeteníku jako maxima rychlosti a zrychlení, po zapojení počítače PC je průběh chvění ze snímače 2513 spolu se zápisem časového průběhu závislostí $F_n - \tau$, $F_t - \tau$ ukládán do paměti počítače a na diskety.

Ve vytvořené bance dat je evidován maximální počet zjišťovaných veličin, které umíme změřit a registrovat v relativně krátké době.

3.5.2 Plánování experimentu

Experiment byl naplánován dle kap. 3.3.1.1. Pro základní experiment byly vybrány následující řídicí faktory:

brousíci kotouč : 2 typy

broušený materiál : 2 základní druhy

obvodová rychlost kotouče : 2 (možnosti stroje)

rychlost přísuvu broušícího vřeteníku : 2

Jedná se tedy o plán experimentu s počtem pokusů $N = 2^k$. Při vytvoření matice plánovaného experimentu jsem vycházel z ortogonálního plánu (obr.3.5) pro čtyři nezávisle proměnné. Vzhledem k možnostem stroje (limitující počet nastavení) jsem za základ vzal čtyřbodový ortogonální plán. Na základě tohoto plánu byla sestavena matice plánovaného experimentu (obr.3.13).

Čís.měř.	faktor A	faktor B	faktor C	faktor D	v_s	v_f	kotouč	mat.obrobku
1.	- 1	- 1	- 1	- 1	33	0.26	A 99	12050.0
2.	+ 1	- 1	- 1	- 1	43	0.26	A 99	12050.0
3.	- 1	+ 1	- 1	- 1	33	0.64	A 99	12050.0
4.	+ 1	+ 1	- 1	- 1	43	0.64	A 99	12050.0
5.	- 1	- 1	+ 1	- 1	33	0.26	27 A	12050.0
6.	+ 1	- 1	+ 1	- 1	43	0.26	27 A	12050.0
7.	- 1	+ 1	+ 1	- 1	33	0.64	27 A	12050.0
8.	+ 1	+ 1	+ 1	- 1	43	0.64	27 A	12050.0
9.	- 1	- 1	- 1	+ 1	33	0.26	A 99	12050.6
10.	+ 1	- 1	- 1	+ 1	43	0.26	A 99	12050.6
11.	- 1	+ 1	- 1	+ 1	33	0.64	A 99	12050.6
12.	+ 1	+ 1	- 1	+ 1	43	0.64	A 99	12050.6
13.	- 1	- 1	+ 1	+ 1	33	0.26	27 A	12050.6
14.	+ 1	- 1	+ 1	+ 1	43	0.26	27 A	12050.6
15.	- 1	+ 1	+ 1	+ 1	33	0.64	27 A	12050.6
16.	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1	43	0.64	27 A	12050.6

obr.3.13

Jak již bylo řečeno dříve, byla každá kombinace faktorů opakována 4x z důvodu eliminace vlivů a potvrzení výsledků. Pro potvrzení zkoumaného jevu bylo v závěru experimentu použito náhodného výběru dalších tří materiálů a byl sledován další druh brousícího kotouče s větším zrnem Al_2O_3 . Kombinace faktorů zůstala vzhledem ke srovnatelnosti výsledků. Výsledky těchto měření jsou potom použity v závěru práce pro dokreslení a potvrzení domněnky.

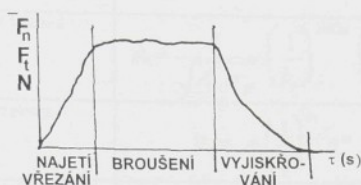
3. 5. 3 Nosné veličiny

Prováděné experimenty byly vedeny se záměrem potvrdit vypovídací schopnost časového průběhu závislosti složky řezné síly F_n a navrhnout aplikaci této závislosti při vlastním procesu broušení. Tento průběh, protože se jedná o časově proměnnou veličinu, má dynamický charakter a měl by, předpokládáme, popsat lépe celý proces broušení než veličiny statické. Od této filosofie jsou odvozeny sledované a vyhodnocované veličiny procesu broušení. Základem řešení, pro poměrně velkou absenci této problematiky v literatuře, je tedy časový průběh normálové složky řezné síly F_n [25]. V současné době nejznámější přístupy k problematice hodnot drsnosti povrchu a velikosti složek řezné síly shrnují tab.VI a VII.

3.5.3.1 Časová závislost řezné síly

Časová závislost řezné síly je dána průběhem dvou složek řezné síly u zapichovacího broušení a tří složek řezné síly u podélného broušení rotačních ploch. Vzhledem k poměru velikostí jednotlivých složek řezné síly se budeme zabývat závislostí dominantní složky - složkou F_n . Časová závislost je tvořena [25], [96], [97] třemi oblastmi (obr. 3.14), kdy v první oblasti dochází k eliminaci vlivů při postupném najetí nástroje do záběru. Dochází k napružení soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek (S-N-O-P), k odstranění nalomených a uvolněných zrn z brousícího kotouče [43], [84] a k

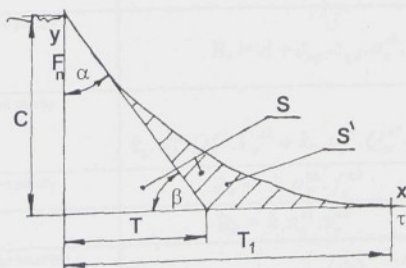
postupnému vřezávání nástroje do obrobku na plnou hloubku záběru. Po této etapě následuje období plného odebrání materiálu obrobku (pracovní fáze) s kolísáním velikosti řezné síly, což je dáno morfolo-



obr.3.14

gií brousícího kotouče, nehomogenitou povrchové vrstvy obrobku (velikost odebírané vrstvy materiálu, vměstky, tvrdá zrna oxidů, karbidů a pod.), vlivem tuhosti soustavy a působením okolí na tuto soustavu (ovlivňuje zejména geometrický tvar obrobené součásti).

Poslední etapou je fáze vyjiskřování, kdy nástroj teoreticky vyjíždí ze záběru, ve skutečnosti změna hloubky třísky je dána uvolňováním soustavy a dosažením rovnovážného stavu při nulové hodnotě stykové plochy nástroje a obrobku. Řezání materiálu přechází postupně ve škrábání, plastickou deformaci povrchu s ukončením při nulové hodnotě řezné síly. Podle předpokladu by tato fáze měla mít zásadní vliv na drsnost a kvalitu obrobené plochy časovou délkou etapy a svým průběhem. Fázi vyjiskřování lze také charakterizovat řezivostí nástroje pro reálné případy [25].



obr.3.15

TAB.VI

DRSNOST POVRCHU				
ROK	AUTOR	DRUH BROUŠENÍ	VZTAH	LIT.
1952	Salje	rovinné broušení	$R_t = \frac{1}{\sqrt{A \cdot \alpha_p}} \cdot \left(\frac{1}{b_s}\right)^{1+1/m} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{1+1/m} \cdot v_c^{1/m} \cdot a_e^{1+1/m}$	[75]
1969	Brown, Peters	válcové plochy	$R_t = A \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^m \cdot a_e^m$	[76]
1974	Snoeys, Peters, Decneut	válcové plochy	$R_a = R_t \cdot h'_{eq}$	[76]
1977	Verkerk	válcové plochy	$R_t = \frac{\pi^2 \cdot d_s}{4d_{eq} \cdot (1+q)^2}$	[86]
1978	Bhateja		$R_a = k_0 - k_1 \left(1 + \frac{k_2}{v_s}\right)^{-1}$	[8]
1979	Maslov	válcové plochy	$R_a = \frac{C_{Ra} \cdot v_w^p \cdot a_e^z \cdot f_d^q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{v_s^w \cdot d_w^\mu \cdot B_s^n}$	[55]
1979	Maslov	diamantový kotouč	$R_a = c_a \cdot v_s^{e1} \cdot v_w^{e2} \cdot a_e^{e3} \cdot v_{fd}^{e4}$	[55]
1986	Kocman	rovinné broušení	$R_a = k \cdot v_{fd}^{k1} \cdot a_e^{k2}$	[41]
1989	Malkin	válcové plochy	$R_a = R_0 \cdot a_d^{e1} \cdot f_d^{e2} \cdot h'_{eq}$	[53]
1989	König, Knop	válcové plochy	$R_z = A_1 \cdot R_{tooth}^{e3} \cdot a_e^{e1} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e2} \cdot v_c^{e2} \cdot V_w^{e4} + A_2 \cdot R_{tooth}^{e7} \cdot a_e^{e5} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e6} \cdot v_c^{e6} \cdot V_w^{e8}$	[44]
1992	Tönshof, Peters	válcové plochy	$R_t = c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e1} \cdot a_e^{e2} \cdot \left(\frac{1}{d_{eq}}\right)^{e3}$	[79]
1992	Tönshoff, Peters	válcové plochy	$R_z = A + c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot a_e^{e1} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e2} \cdot v_c^{e3} \cdot V_w^{e4}$	[79]
1994	Rowe, Inasaki, Malkin	válcové plochy	$R_z = k_1 \cdot u_d^{e1} \cdot Q_w^{e2} \cdot V_w^{e3} + k_2 \cdot u_d^{e4} \cdot Q_w^{e5} \cdot (V_w + k_3)^{e6}$	[71]
1995	Rowe, Chen, Mills	válcové plochy	$R_a = k \cdot a_d^{k1} \cdot f_d^{k2}$	[69]
1996	Dubovská		$R_a = k \cdot a_e^{e1} \cdot v_s^{e2}$	[20]
1996	Chen, Duffie	sférické broušení	$R_t = c_w \cdot c_g \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e1} \cdot a_e^{e2} \cdot \left(\frac{1}{d_{eq}}\right)^{e3}$	[34]

TAB.VII

ŘEZNÉ SÍLY - BROUŠENÍ VÁLCOVÝCH PLOCH			
ROK	AUTOR	VZTAH	LIT.
1971	Lindsay	$F'_n = A_1 \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$	[40]
1974	Peters, Decneut	$F'_t = A \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{2m-1} \cdot a_e^m \cdot d_{eq}^{1-m}$	[76]
1974	Snoeyes, Peters, Decneut	$F'_t = F_1 \cdot h_{eq}^f$ $F'_n = \frac{F_1}{\mu} \cdot h_{eq}^f$	[76]
1979	Maslov	$F_z = p \cdot a \cdot b$ $F_z = c_p \cdot v_w^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot v_{fa}^{e_3} \cdot v_s^{e_4} \cdot B_s^{e_5}$	[55]
1987	Saljé, Bock	$F'_n = A \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^m \cdot a_e^{1-m/2} \cdot d_{eq}^{1-m/2}$	[73]
1988	Rowe	$F'_t = \frac{e_c \cdot v_w \cdot a_e}{v_s}$	[70]
1990		$F'_n = k \cdot \frac{Q_w}{v_s}$	[99]
1992	Tönshoff	$F'_n = c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$	[79]

Rovnice vyjiskřovací křivky (obr.3.15) je dána závislostí [72] :

$$C_k = F_n \cdot t^k \quad (25)$$

$$y = C \cdot e^{-x/T_1} \quad (26)$$

Nejjednoduššími údaji, které lze použít pro praxi, jsou časové údaje T , T_1 , úhly α , β , popisující fázi " najetí " vyjiskřovací křivky.

Pro potřebu charakterizovat řezivost brousícího kotouče jsou použita kritéria [25]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{C}{T} \quad \text{kritérium strmosti} \quad (27)$$

$$U = 10^5 \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{S} \quad \text{kritérium strmosti práce vyjiskřování} \quad (28)$$

$$R = \frac{10^6}{S \cdot T_1} \quad \text{kritérium časového objemu práce vyjiskřování} \quad (29)$$

$$A = C \cdot T \quad \text{kritérium počátečního impulsu,} \quad (30)$$

kde velikost plochy je dána hodnotou integrálu vyjiskřovací křivky :

$$S = \int_0^T C \cdot e^{-x/T_1} \cdot dx \quad (31)$$

Z praktického hlediska a s ohledem na využití zjištěných závislostí a vztahů, jsou nejdůležitějšími údaje popisující kvalitu povrchu obrobene plochy. Z toho důvodu byly zjišťovány vztahy jednotlivých parametrů vyjiskřovací křivky k drsnosti povrchu dané hodnotou R_a .

Ze souboru charakterizujících veličin C , T , $\operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{tg} \beta$, S byly nejlepší výsledky dosaženy při použití hodnot úhlu β , eventuálně $\operatorname{tg} \beta$ ($\operatorname{tg} \alpha$). Pro další využití je nejvhodnější právě tato snadno odečitatelná a případně ovlivnitelná veličina. V případě velikosti plochy pod křivkou nebo velikosti zbytkové plochy S' , bychom museli nejprve určit velikost

této plochy a její hodnotu plošně ovlivňovat v případě použití k řízení procesu.

3.5.4 Provedení experimentu.

Při provádění experimentálních měření na brusce byl použit následující standartní postup.

V případě použití nového brousicího kotouče byl měřen jeho průměr pomocí úchylkoměru nastaveného na hodnotu jeho průměru. Velikost naměřené odchylky určila potom průměr kotouče.

Vlastní měření bylo zahájeno kontrolou přesnosti cejchování dynamometru. Následovalo zapnutí stroje a několikanásobné projetí všech funkcí naprázdno. Stroj byl spuštěn 30 minut před vlastním měřením k dosažení provozní teploty a srovnatelného stavu všech měření. Stejnou dobu před měřením byly zapnuty všechny měřicí přístroje. U vzorku materiálu byl změřen počáteční průměr mikrometrem, potom byl vzorek upnut do přípravku a s přípravkem mezi hroty brusky. Následovalo najetí brousicího kotouče pro broušení prvního kusu vzorku. Po nastavení rychlosti přísuvu brousicího větveníku v_f a tloušťky odebraného materiálu a_e byl spuštěn pracovní cyklus stroje (otáčky brousicího větene i případně otáčky obrobku byly nastavovány vždy předem v závislosti na plánu měření). V průběhu pracovního cyklu byla změřena maximální hodnota obou složek řezné síly - F_n , F_t a doba průběhu cyklu. Po ukončení cyklu bylo měřen konečný průměr obrobku a změřena drsnost povrchu R_a , R_z , R_m na třech různých místech vzorku. Postupně následovaly vždy nejméně čtyři pracovní cykly při stejných řezných podmínkách. Pouze v případě nepravidelnosti některých měřených hodnot jsem provedl měření pěti až šesti cyklů.

Po ukončení každého souboru pracovních cyklů jsem provedl stanovení úbytku brousicího kotouče pomocí otisku do ocelové planžety a změřením tohoto otisku pod mikroskopem. Dále odbroušení povrchu vzorku pod úhlem $7^\circ 30'$ a stanovení průběhu mikrotvrdosti. Potom byl

orovnána brousicí kotouč a velikost tohoto orovnáni určovala také vstupní průměr kotouče pro další měření. Bylo to možné proto, že kotouč šířky 32mm měl pracovní styk se vzorkem šířky pouze 15mm. Poté následoval další soubor pracovních cyklů. V předložené práci jsem vycházel z výsledků 546 experimentálních měření.

Záznam časového průběhu složky F_n řezné síly byl vyhodnocován po ukončení měření ručně za pomoci dílenského mikroskopu. Zde byla měřena právě velikost úhlu β , který určuje hodnotu strmosti vyjiskřovací křivky.

4.0 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Popsaná oblast procesu broušení je příliš široká a bude vyžadovat další roky práce k dosažení plně automatického (inteligentního) řízení procesu bez zásahu obsluhy při dosažení požadovaných výstupních parametrů obrobené plochy [95] , [97] . Tato práce proto řeší část uváděné problematiky a to vztah vyjiskřovací fáze pracovního cyklu a některých veličin broušení.

Mezi tyto veličiny řadíme :

- a) závislost drsnosti povrchu na vyjiskřovací fázi
- b) vztah charakteristické (- kých) veličiny vyjiskřovací fáze a veličin pracovní fáze procesu broušení

4.1 Vztah drsnosti povrchu a vyjiskřovací fáze

Základní otázkou je, zda existuje jakákoli souvislost mezi vyjiskřovací křivkou a drsností povrchu. Tuto souvislost lze hledat jako jednoduchou při závislosti na jedné charakteristické veličině vyjiskřovací fáze, nebo závislost vícenásobnou s možností zpřesnění závislosti dalšími veličinami charakterizujícími vlastní proces řezání.

4.1.1 Jednoduchá závislost

Z literatury [55] , [79] jsou zřejmé některé veličiny ovlivňující finální drsnost povrchu po broušení válcové plochy R_a . K těmto veličinám můžeme přiřadit také ty, které na základě experimentálních

dat byly vybrány procedurou STEP (Stepwise Variable Selection) statistického programového systému Statgraphics jako veličiny ovlivňující drsnost výstupní broušené plochy. Procedura STEP je metodou pro výběr nejlepší podmnožiny vysvětlujících proměnných. Po vyvolání procedury je nutno zadat proměnné daného datového souboru. Zjistil jsem, že je nejvýhodnější zadat všechny proměnné, mimo takových, které jsou jinou proměnnou ovlivněny. Například je nesmyslem zadávat velikost průměru obrobku nebo kotouče, přestože dochází k jejich změně v průběhu broušení. Tyto veličiny jsou totiž obsaženy v hodnotách obvodových rychlostí. Po zadání dojde ke spuštění procedury a ta na základě F-rozdělení vybere pouze takové proměnné, které mají nejužší vazbu ke sledované závisle proměnné.

Po proběhnutí procedury byly mezi tyto veličiny jsou zařazeny:

$tg \beta$ - strmost vyiskřovací křivky

l_k - kinematická délka stykového oblouku

d_{eq} - ekvivalentní průměr

v_w - obvodová rychlost obrobku

Pokud došlo k výběru více veličin procedurou, byl výběr omezen jen na uvedené veličiny. Dále u nich byl zkoumán vztah k drsnosti povrchu R_a . Následně budou použity také k vytvoření vícenásobné závislosti ve vztahu k této drsnosti. Jako jednoduché závislosti byly použity :

$$\text{lineární závislost} \quad R_a = k_1 + k_2 \cdot x \quad (32)$$

$$\text{exponenciální} \quad R_a = e^{(k_1 + k_2 \cdot x)} \quad (33)$$

$$\text{multiplikativní} \quad R_a = k_1 \cdot x^{k_2} \quad (34)$$

Výsledné koeficienty případně exponenty těchto veličin pro jednotlivé vztahy ukazuje tab. VIII-IX . Koeficienty a exponenty byly získány pomocí procedury Regression Analysis. Tato procedura na základě zadaného souboru dat vytvoří vybranou závislost v konkrétním tvaru. K výpočtu parametrů funkcí je použita metoda nejmenších čtverců. Pro danou závislost jsou určeny hodnoty konstant a statistické parametry a to především hodnota korelačního koeficientu a koeficien-

TAB.VIII
R_a ~ tg β

Matériel	Kotouč	k ₁ + k ₂ · x				e (k ₁ +k ₂ · x)				k ₁ · x ^{k₂}			
		k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	0.294	0.0081	0.64	41.34	-1.218	0.0234	0.616	37.90	-1.265	0.112	0.526	27.64
12050.4	A99 100J	0.291	0.0035	0.406	16.44	-1.24	0.012	0.41	17.09	-1.335	0.102	0.50	25.05
15241	A99 100J	0.54	-0.019	-0.61	37.07	-0.67	-0.04	-0.59	34.40	-0.386	0.322	-0.69	47.47
17027.0	A99 100J	0.21	0.03	0.57	32.52	-1.37	0.066	0.63	39.99	-2.19	0.66	0.7	49.26
17027.4	A99 100J	0.42	-0.003	0.29	8.35	-0.88	-0.007	-0.26	6.87	-0.786	-0.079	-0.33	11.18
12050.1	27A 100J	0.374	-0.0032	-0.085	0.72	-1.04	-0.0067	-0.061	0.37	-0.97	-0.067	-0.11	1.29
12050.4	27A 100J	0.309	-0.0036	-0.36	13.0	-1.185	-0.0127	-0.35	12.35	1.14	-0.079	-0.33	10.87
15241	27A 100J	0.314	0.0052	0.18	3.38	-1.15	0.0098	0.12	1.44	-1.07	0.0019	0.003	0.0001
17027.0	27A 100J	0.54	0.059	0.19	3.77	-1.13	0.11	0.29	8.28	-1.79	0.79	0.37	13.35
17027.4	27A 100J	0.238	0.011	0.82	67.15	-1.4	0.035	0.82	67.7	-1.566	0.228	0.766	58.68
12050.1	A99 60M	0.677	-0.012	-0.31	9.76	-0.405	-0.018	-0.30	8.97	-0.366	-0.095	-0.366	13.36
12050.4	A99 60M	0.781	0.034	-0.25	6.38	-0.374	0.051	-0.24	5.74	-0.264	-0.275	-0.384	14.74

R_a ~ l_k

Matériel	Kotouč	k ₁ + k ₂ · x				e (k ₁ +k ₂ · x)				k ₁ · x ^{k₂}			
		k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	0.28	0.164	0.58	33.61	-1.265	0.468	0.55	30.50	-0.92	0.159	0.49	23.82
12050.4	A99 100J	0.306	0.0199	0.06	0.35	-1.2	0.077	0.07	0.48	-1.15	0.02	0.046	0.21
15241	A99 100J	0.71	-0.64	-0.54	28.86	-0.299	-1.369	-0.52	26.61	-1.47	-0.678	-0.52	27.03
17027.0	A99 100J	-0.04	1.135	0.80	64.68	-1.9	2.43	0.86	74.1	0.053	1.04	0.86	73.55
17027.4	A99 100J	0.465	-0.16	-0.36	12.62	-0.77	-0.38	-0.33	10.73	-1.1	-0.19	-0.38	14.13
12050.1	27A 100J	0.116	0.5	0.50	25.26	-1.78	1.47	0.51	26.07	-0.55	0.69	0.51	26.0
12050.4	27A 100J	0.33	-0.12	-0.26	6.73	-1.09	0.41	-0.25	6.39	-1.44	-0.19	-0.25	6.24
15241	27A 100J	0.35	0.009	0.01	0.01	-0.99	-0.15	-0.06	0.42	-1.12	-0.08	-0.07	0.46
17027.0	27A 100J	-1.76	5.41	0.82	66.99	-4.1	7.31	0.88	77.55	2.05	3.46	0.88	77.65
17027.4	27A 100J	0.13	0.4	0.84	70.14	-1.73	1.23	0.85	72.36	-0.69	0.59	0.85	72.52
12050.1	A99 60M	0.72	-0.22	-0.21	4.58	-0.33	-0.34	-0.2	4.10	-0.61	-0.15	-0.2	3.9
12050.4	A99 60M	0.74	-0.2	-0.06	0.38	-0.53	-0.097	-0.02	0.03	-0.63	-0.06	-0.025	0.06

TAB.IX
R₂ ~ d_{eq}

Material	Kotouč	k ₁ + k ₂ · x				e (k ₁ +k ₂ · x)				k ₁ · x ^{k₂}			
		k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	0.42	-0.0016	-0.05	0.28	-0.65	-0.008	-0.09	0.86	0.44	-0.39	-0.08	0.72
12050.4	A99 100J	0.24	0.0015	0.08	0.68	-1.54	0.0076	0.13	1.62	-2.6	0.37	0.13	1.59
15241	A99 100J	3.28	-0.05	-0.35	12.31	5.5	-0.11	-0.35	12.43	25.2	-6.48	-0.35	12.29
17027.0	A99 100J	0.51	-0.001	-0.015	0.02	-0.36	-0.009	-0.06	0.35	0.94	-0.45	-0.06	0.31
17027.4	A99 100J	-2.48	0.05	0.87	75.34	-8.45	0.14	0.87	75.49	-30.866	7.49	0.87	75.48
12050.1	27A 100J	-3.83	0.08	0.46	20.73	-12.48	0.22	0.43	18.45	-45.74	11.3	0.43	18.26
12050.4	27A 100J	-2.81	0.06	0.69	48.24	-11.97	0.2	0.66	44.09	-43.35	10.63	0.66	43.86
15241	27A 100J	-5.75	0.1	0.78	60.58	-18.19	0.29	0.75	56.72	-70.84	17.13	0.75	56.65
17027.0	27A 100J	-44.99	0.86	0.56	31.62	-66.49	1.24	0.64	41.4	-262.86	66.03	0.64	41.54
17027.4	27A 100J	4.73	-0.08	-0.35	12.41	10.28	-0.21	-0.3	9.15	44.52	-11.43	-0.3	9.20
12050.1	A99 60M	2.08	-0.03	-0.18	3.24	1.83	-0.05	-0.18	3.18	8.31	-2.27	-0.17	3.03
12050.4	A99 60M	3.93	-0.07	-0.54	28.66	5.19	-0.12	-0.59	34.87	21.9	-5.82	-0.58	34.15

R₂ ~ v₂

Material	Kotouč	k ₁ + k ₂ · x				e (k ₁ +k ₂ · x)				k ₁ · x ^{k₂}			
		k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor. koef.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	0.337	0.0002	0.085	0.73	-1.1	0.0008	0.11	1.21	-1.15	0.024	0.1	1.09
12050.4	A99 100J	0.282	0.001	0.43	18.65	-1.27	0.0036	0.43	18.21	-1.59	0.13	0.46	21.55
15241	A99 100J	2.72	-0.1	-0.32	10.39	4.29	-0.24	-0.33	10.62	15.35	-5.26	-0.32	10.46
17027.0	A99 100J	0.5	-0.002	-0.01	0.02	-0.44	-0.019	-0.06	0.34	0.26	-0.36	-0.05	0.28
17027.4	A99 100J	-2.06	0.117	0.87	75.44	-7.36	0.305	0.87	75.54	-20.41	6.39	0.87	75.51
12050.1	27A 100J	-3.32	0.19	0.45	20.45	-11.12	0.51	0.43	18.3	-30.79	9.94	0.43	18.08
12050.4	27A 100J	-2.3	0.13	0.68	46.87	-10.19	0.45	0.65	42.70	-27.79	8.86	0.65	42.42
15241	27A 100J	-4.5	0.21	0.77	58.77	-14.64	0.59	0.74	54.75	-43.64	13.57	0.74	54.64
17027.0	27A 100J	-36.998	1.86	0.56	31.34	-55.03	2.67	0.64	41.10	-165.04	54.56	0.64	41.27
17027.4	27A 100J	4.67	-0.208	-0.43	18.73	10.53	-0.56	-0.39	14.84	34.37	-11.68	-0.39	14.92
12050.1	A99 60M	1.91	-0.07	-0.19	3.61	1.56	-0.11	-0.19	3.54	5.29	-2.0	-0.18	3.36
12050.4	A99 60M	3.4	-0.15	-0.54	29.11	4.26	-0.27	-0.59	35.36	13.5	-4.89	-0.59	34.53

tu determinace $(R - SQ)$ což je zahrnuto také ve výše uvedených tabulkách.

Koeficient korelace určuje míru korelace mezi dvěma proměnnými. Koeficient může nabývat hodnot od -1 do 1 vždy na dané hladině významnosti. Je-li jeho hodnota rovna nule, mezi proměnnými není lineární vztah. Čím více se hodnoty blíží 1 zleva i zprava, tím vyšší je stupeň závislosti.

Koeficient determinace $R-SQ$ je dvojmocí koeficientu korelace vynásobeným stem.

Mezi jednotlivými závislostmi je poměrně velký rozptyl hodnot koeficientu korelace, můžeme však jednoznačně potvrdit, že ani jedna z uvedených veličin nevytváří jednoduchou jednoznačně platnou závislost s drsností povrchu R_a .

4.1.2 Vícenásobná závislost

K vytvoření vícenásobné závislosti vede zejména ta skutečnost, že potřebujeme znát a vyhledat závislost a vliv takových veličin, které můžeme dále použít při řízení v automatickém (NC) cyklu a tak umožníme dosáhnout předem stanovenou kvalitu povrchu danou v této fázi její drsnosti.

Důležitým činitelem při hledání závislosti je také typ použitých matematických vztahů. Vyjdeme-li z dostupné literatury, můžeme navrhnout následující modely :

$$R_a = k + k_1 \cdot x + k_2 \cdot y + k_3 \cdot z \quad - \text{ lineární} \quad (35)$$

$$R_a = k + k_1 \cdot x \cdot y \cdot z \quad - \text{ multiplikativní} \quad (36)$$

$$R_a = k \cdot x^{k_1} \cdot y^{k_2} \cdot z^{k_3} \quad - \text{ exponenciální} \quad (37)$$

dále potom kvadratický model, který k popisu broušení použil už R. Kovacevic, H.H. Liaw a J.F. Barrows [47] :

$$R_a = k + k_1.x + k_2.y + k_3.z + k_4.x^2 + k_5.y^2 + k_6.z^2 + k_7.x.y + \\ + k_8.x.z + k_9.y.z, \quad (38)$$

a také model ve tvaru goniometrické řady :

$$R_a = k + k_1.\cos((\pi/\bar{x}).x) + k_2.\cos((\pi/\bar{y}).y) + k_3.\cos((\pi/\bar{z}).z) + \\ + k_4.\sin((\pi/\bar{x}).x) + k_5.\sin((\pi/\bar{y}).y) + k_6.\sin((\pi/\bar{z}).z) + \\ + k_7.\cos(((\pi/\bar{x}).x).((\pi/\bar{y}).y)) + k_8.\cos(((\pi/\bar{x}).x).((\pi/\bar{z}).z)) + \\ + k_9.\cos(((\pi/\bar{y}).y).((\pi/\bar{z}).z)) + k_{10}.\sin(((\pi/\bar{x}).x).((\pi/\bar{y}).y)) + \\ + k_{11}.\sin(((\pi/\bar{x}).x).((\pi/\bar{z}).z)) + k_{12}.\sin(((\pi/\bar{y}).y).((\pi/\bar{z}).z)) \quad (39)$$

Jako poslední potom model vyvažující odchylky naměřených hodnot :

$$R_a = k + k_1.\log(\Delta x) + k_2.\log(\Delta y) + k_3.\log(\Delta z) + k_4.\Delta x + k_5.\Delta y + \\ + k_6.\Delta z \quad (40)$$

Jednotlivé matematické modely byly zpracovány pro soubory vytvořené z experimentálních měření. Konstanty případně exponenty pro jednotlivé vztahy jsou tabulkově zpracovány (tab. X.-XIII.).

Uvedené tabulky také obsahují statistické charakteristiky zpracování - R-SQ, SE a MAE.

Koeficient determinace (R-SQ) je druhou mocninou koeficientu vícenásobné korelace. Používá se pro volbu mezi více regresními modely. Volíme ten model, který má nejvyšší koeficient determinace.

TAB.X

$$R_a = k + k_1 \cdot \operatorname{tg} \beta + k_2 \cdot l_k + k_3 \cdot d_{eq}$$

Material	Kotouč	konst. k	konst. k ₁	konst. k ₂	konst. k ₃	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	1.188	0.0018	0.236	-0.019	0.55	0.025	0.018
12050.4	A99 100J	0.38	0.0074	-0.2	-0.0007	0.21	0.037	0.028
15241	A99 100J	8.751	0.026	-2.04	-0.132	0.67	0.076	0.055
17027.0	A99 100J	-1.05	-0.016	1.55	0.018	0.64	0.089	0.06
17027.4	A99 100J	-2.26	0.0057	-0.3	0.05	0.76	0.03	0.023
12050.1	27A 100J	-5.68	-0.011	0.94	0.11	0.72	0.057	0.041
12050.4	27A 100J	-2.85	-0.0012	-0.106	0.061	0.5	0.035	0.02
15241	27A 100J	-6.0	0.028	-0.91	0.11	0.77	0.045	0.029
17027.0	27A 100J	-23.49	-0.216	6.85	0.42	0.76	0.37	0.18
17027.4	27A 100J	4.51	-0.0074	0.62	-0.082	0.62	0.034	0.02
12050.1	A99 60M	0.725	-0.014	0.074	-0.0015	0.1	0.12	0.088
12050.4	A99 60M	3.46	-0.03	0.538	-0.062	0.2	0.3	0.22

$$R_a = k + k_1 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot l_k \cdot d_{eq}$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	0.31	0.00024	0.42	0.028	0.021
12050.4	A 99 100J	0.3	0.000085	0.06	0.04	0.03
15241	A99 100J	0.5	-0.00045	0.27	0.11	0.089
17027.0	A99 100J	0.276	0.00088	0.4	0.11	0.072
17027.4	A99 100J	0.41	-0.000069	0.007	0.06	0.05
12050.1	27A 100J	0.335	0.00012	0	0.11	0.087
12050.4	27A 100J	0.302	-0.00009	0.05	0.048	0.042
15241	27A 100J	0.324	0.00012	0	0.097	0.079
17027.0	27A 100J	0.447	0.0028	0	0.77	0.62
17027.4	27A 100J	0.258	0.00031	0.65	0.032	0.024
12050.1	A99 60M	0.66	-0.00035	0.013	0.11	0.09
12050.4	A99 60M	0.737	-0.00096	0.003	0.34	0.28

TAB.XI

$$R_n = k \cdot \operatorname{tg} \beta^{k_1} \cdot l_k^{k_2} \cdot d_{eq}^{k_3}$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	5.792	-0.024	0.363	-3.596	0.48	0.034	0.027
12050.4	A 99 100J	-1.02	0.193	-0.27	0.155	0.38	0.045	0.037
15241	A99 100J	15.96	-0.338	-0.071	-9.19	0.62	0.079	0.061
17027.0	A99 100J	-2.117	-0.164	1.266	1.374	0.7	0.07	0.047
17027.4	A99 100J	-13.212	0.151	-0.388	7.22	0.76	0.033	0.025
12050.1	27A 100J	-22.713	-0.264	1.376	13.34	0.73	0.07	0.052
12050.4	27A 100J	-20.051	-0.0017	-0.254	11.297	0.44	0.06	0.037
15241	27A 100J	-40.687	0.648	-1.57	22.167	0.78	0.056	0.038
17027.0	27A 100J	-36.543	-1.194	4.17	22.29	0.78	0.2	0.098
17027.4	27A 100J	25.998	-0.35	1.337	-14.86	0.76	0.035	0.023
12050.1	A99 60M	1.682	-0.127	0.161	-1.05	0	0.08	0.058
12050.4	A99 60M	7.114	-0.476	1.288	-3.977	0.4	0.18	0.13

hodnota koeficientu k odpovídá log(k)

$$R_n = k + k_1 \cdot \log(\Delta \operatorname{tg} \beta) + k_2 \cdot \log(\Delta l_k) + k_3 \cdot \log(\Delta d_{eq}) + k_4 \cdot \Delta \operatorname{tg} \beta + k_5 \cdot \Delta l_k + k_6 \cdot \Delta d_{eq}$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	koef. k ₄	koef. k ₅	koef. k ₆	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	0.36	0.0036	0.087	-0.012	0.0007	0.0157	-0.0408	0.79	0.017	0.012
12050.4	A 99 100J	0.196	0.006	0.25	0.01	-0.037	-0.0095	0.377	0.34	0.034	0.025
15241	A99 100J	6.49	-0.026	0.014	-0.052	0.05	6.37	-0.032	0.97	0.023	0.013
17027.0	A99 100J	1.243	-0.049	2.36	0.015	0.117	0.758	-0.243	0.84	0.058	0.032
17027.4	A99 100J	0.559	-0.005	0.092	0.049	0.0072	0.179	0.041	0.86	0.022	0.014
12050.1	27A 100J	-1.418	-0.004	0.658	0.158	-0.0195	-1.81	-0.0029	0.67	0.061	0.04
12050.4	27A 100J	0.595	-4.14E-6	0.041	0.07	0.015	0.302	0.06	0.48	0.036	0.019
15241	27A 100J	1.259	0.012	0.017	0.091	0.046	0.96	-0.0086	0.71	0.051	0.028
17027.0	27A 100J	-332.04	-1.18	10.93	7.36	4.76	-345.77	3.36	0.58	0.496	0.144
17027.4	27A 100J	-4.373	-0.015	0.194	-0.03	0.064	-4.82	0.0081	0.91	0.017	0.0047
12050.1	A99 60M	-10.43	0.024	-2.53	0.111	-0.043	-11.176	-0.0044	0.81	0.049	0.031
12050.4	A99 60M	1.99	-0.009	-1.53	0.045	0.016	0.763	-1.81	0.68	0.194	0.128

TAB.XII

$$R_s = k + k_1 \cdot \text{tg} \beta + k_2 \cdot l_k + k_3 \cdot d_{\text{eq}} + k_4 \cdot \text{tg}^2 \beta + k_5 \cdot l_k^2 + k_6 \cdot d_{\text{eq}}^2 + k_7 \cdot \text{tg} \beta \cdot l_k + k_8 \cdot \text{tg} \beta \cdot d_{\text{eq}} + k_9 \cdot l_k \cdot d_{\text{eq}}$$

Material	Kotouč	konst. k	konst. k ₁	konst. k ₂	konst. k ₃	konst. k ₄	konst. k ₅	konst. k ₆	konst. k ₇	konst. k ₈	konst. k ₉	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A 99 100J	-79.75	0.6	-27.56	3.376	-0.0035	-3.42	-0.036	0.23	-0.013	0.58	0.88	0.013	0.007
12050.4	A 99 100J	1.68	0.236	-10.365	-0.0028	0.00023	2.07	-0.0004	-0.061	-0.004	0.178	0.56	0.027	0.017
15241	A 99 100J	-20.92	-0.8	2.21	0.89	-0.0015	-26.97	-0.01	0.31	0.01	0.39	0.96	0.024	0.01
17027.0	A 99 100J	-523.74	1.42	5573.42	-23.88	0.0011	-0.00013	-0.19	-0.31	-0.025	107.38	0.93	0.038	0.018
17027.4	A 99 100J	62.588	0.365	-19.99	-2.23	0.0015	5.84	0.02	-0.11	-0.0065	0.29	0.91	0.018	0.01
12050.1	27A 100J	-686.15	2.59	-8.14	25.95	0.004	93.04	-0.24	-0.18	-0.049	-1.51	0.77	0.052	0.022
12050.4	27A 100J	-380.97	1.54	-171.74	15.83	0.001	283.17	-0.14	-0.12	-0.029	-1.88	0.78	0.023	0.011
15241	27A 100J	53.16	0.32	-180.07	-0.47	-0.0025	442.31	0.024	0.097	-0.0054	-4.59	0.71	0.051	0.022
12050.1	A99 60M	-156.94	-2.85	310.18	4.07	0.001	-378.24	-0.049	0.2	0.058	0.71	0.88	0.038	0.019
12050.4	A99 60M	-216.55	0.75	-378.3	12.39	-0.0036	850.034	-0.089	0.35	-0.019	-8.38	0.66	0.2	0.12

Koefficienty po provedení kvalitativní selekce

Material	Kotouč	konst. k	konst. k ₁	konst. k ₂	konst. k ₃	konst. k ₄	konst. k ₅	konst. k ₆	konst. k ₇	konst. k ₈	konst. k ₉	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A 99 100J	-72.7	0.457	-14.43	3.011			-0.031	0.053	-0.0096	0.28	0.85	0.014	0.0096
12050.4	A 99 100J	1.568	0.218	-9.886			1.8	-0.0004	-0.045	-0.0038	0.17	0.6	0.026	0.017
15241	A 99 100J	2.865	-0.088				-66.265	-0.005	0.14		1.138	0.98	0.02	0.011
17027.0	A 99 100J	-610.91	1.3	6273.25	-26.02		-1.45	-0.22		-0.025	120.49	0.945	0.035	0.018
17027.4	A 99 100J	61.288		-2.39	-2.27		2.545	0.021				0.91	0.018	0.013
12050.1	27A 100J	-12.11	0.82	0.24			0.994			-0.016		0.80	0.048	0.033
12050.4	27A 100J	-11.505		-83.88	1.12		213.93				-2.31	0.79	0.022	0.014
15241	27A 100J	56.65		-245.51			613.12	0.027			-6.41	0.85	0.037	0.024
12050.1	A99 60M	-53.607	-0.808	250.63			-275.39		0.017			0.88	0.038	0.027
12050.4	A 99 60M	-251.41			10.49		49.75	-0.1			-1.0	0.65	0.2	0.155

TAB.XIII

$$R_a = k + k_1 \cdot \cos((\pi / \sqrt{t g \beta}) \cdot t g \beta) + k_2 \cdot \cos((\pi / \sqrt{k}) \cdot l_k) + \dots$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	koef. k ₄	koef. k ₅	koef. k ₆	koef. k ₇	koef. k ₈	koef. k ₉	koef. k ₁₀	koef. k ₁₁	koef. k ₁₂	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	1.4	0.018	0.16	1.04	-0.02	0.22	-0.29	-0.003	0.0063	-0.167	0.0022	0.0032	0.00029	0.81	0.016	0.0089
12050.4	A 99 100J	3.057	-0.014	-0.247	2.98	-0.031	-0.02	-0.82	0.0106	0.006	0.106	0.0102	0.0085	0.157	0.57	0.027	0.015
15241	A99 100J	-16.36	-0.01	-18.23	-2.057	0.23	-4.08	8.9	-0.011	-0.06	-0.22	-0.048	-	3.266	0.99	0.013	0.0048
17027.0	A99 100J	27.73	-0.209	-71.5	85.02	-0.202	-1.11	5.72	0.058	0.03	5.66	-0.11	-0.012	4.54	0.99	0.014	0.0047
17027.4	A99 100J	6.23	-0.035	0.88	5.15	-0.05	0.0065	0.005	0.0098	-0.078	-0.29	-0.099	0.029	-0.061	0.97	0.01	0.004
12050.1	27A 100J	-244.65	-0.09	24.04	-266.1	0.014	-10.55	19.4	-0.14	-0.07	-6.81	0.02	0.026	5.56	0.84	0.044	0.016
12050.4	27A 100J	-31.1	-0.037	68.52	-87.04	0.187	6.33	-20.3	0.014	0.0044	-2.59	0.019	0.0078	-7.46	0.92	0.014	0.005
15241	27A 100J	96.09	-0.32	40.097	63.1	-0.83	2.15	-12.79	-0.006	-0.112	-2.57	-0.156	-0.16	-3.76	0.66	0.055	0.0106
12050.1	A99 60M	-20.88	0.139	10.207	-30.47	-0.275	-3.166	8.75	0.071	-0.16	-2.5	-0.134	-0.086	1.72	0.90	0.036	0.013
12050.4	A99 60M	-63.71	0.127	27.255	-87.61	0.04	3.012	-5.96	0.046	-0.05	-1.7	-0.033	-0.056	-2.56	0.51	0.238	0.131

Standartní chyba (SE) je druhou odmocninou rozptylu reziduí, kdy reziduem rozumíme rozdíl čtverců pozorované hodnoty a hodnoty vyhlazené regresním modelem. Nejvhodnější je model s nejnižší hodnotou SE.

Průměrná absolutní chyba (MAE) je průměrnou absolutní hodnotou reziduí.

K vytvoření závislostí byly použity hodnoty strmosti vyjiskřovací křivky $\tan \beta$, délky stykového oblouku l_k a ekvivalentního průměru d_{eq} . Obvodová rychlost obrobku jako čtvrtý člen snižovala téměř u všech souborů hodnoty koeficientů R-SQ a zhoršovala výsledný efekt závislostí.

Jestliže provedeme rozbor jednotlivých závislostí, dojdeme k následujícím závěrům :

1. U všech typů rovnic je patrna vysoká závislost drsnosti povrchu R_a na vybraných veličin mimo lineární závislost
2. V řadě případů (pro řadu souborů) je možno s úspěchem použít různé typy rovnic
3. Naopak pro některé soubory lze použít pouze jeden matematický vztah. Například se jedná o datový soubor při použití brousícího kotouče A99 60M 8V.
4. Všeobecně nejvhodnější se jeví použití goniometrické řady

Všeobecným závěrem je, že drsnost povrchu R_a závisí na $\tan \beta$, l_k a d_{eq} a tato závislost je nejlépe popsateľná vztahy (38) a (39). Určitém problémem je tepelně zpracovaný materiál 12 050.4, kdy přesnost vztahů je na nižším stupni. Bude nutné v dalším pokračování práce zjistit vliv struktury materiálu a zajistit způsob matematického vyjádření. Tuto nepřesnost nemůžeme řešit prostřednictvím tvrdosti materiálu např. HV, protože např. ocel 17 027.4 (HRC 40) vykazuje vysokou závislost při vyjádření v kvadratickém tvaru i goniometrické řadě.

TAB.XIV

MATERIÁL : 12 050.4
KOTOUČ : A99 100J 9V

Čís. měř.	R _s - skutečné μm	R _s - modelové						H.K. Tinschhoff	
		J.N.Maslov		kvadrat.závislost		goniometr.řada			
		μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %
(1)	0.263	0.310	15.25	0.329	20.014	0.290	9.215	0.302	13.048
(2)	0.3	0.310	3.48	0.333	10.069	0.272	-10.173	0.302	0.906
(3)	0.356	0.310	-14.71	0.350	-1.799	0.323	-10.274	0.304	-17.047
(4)	0.33	0.311	-6.07	0.357	7.664	0.335	1.764	0.304	-8.372
(5)	0.293	0.311	5.76	0.369	20.522	0.323	9.282	0.304	3.600
(6)	0.316	0.311	-1.66	0.375	15.748	0.313	-1.136	0.304	-4.141
(7)	0.34	0.356	4.49	0.428	20.678	0.347	2.066	0.352	3.484
(8)	0.353	0.356	0.75	0.434	18.696	0.351	-0.570	0.353	0.098
(9)	0.34	0.355	4.49	0.476	28.695	0.356	4.634	0.355	4.350
(10)	0.35	0.355	1.68	0.464	24.693	0.322	-8.385	0.354	1.316
(11)	0.28	0.294	5.01	0.309	9.464	0.291	4.001	0.291	4.093
(12)	0.29	0.294	1.65	0.337	13.963	0.303	4.319	0.295	1.703
(13)	0.3	0.295	-1.64	0.401	25.358	0.296	-1.032	0.295	-1.514
(14)	0.306	0.295	-3.77	0.373	17.822	0.287	-6.495	0.295	-3.931
(15)	0.29	0.258	-12.26	0.283	-2.374	0.253	-14.475	0.251	-15.160
(16)	0.253	0.258	1.99	0.301	15.925	0.253	-0.040	0.252	-0.456
(17)	0.233	0.258	9.80	0.305	23.703	0.260	10.316	0.252	7.550
(18)	0.233	0.258	9.88	0.269	13.333	0.271	13.977	0.251	7.272
(19)	0.363	0.375	3.12	0.386	5.890	0.367	1.249	0.362	-0.115
(20)	0.376	0.375	-0.35	0.396	5.053	0.369	-1.908	0.363	-3.548
(21)	0.376	0.375	-0.23	0.438	14.086	0.356	-5.667	0.363	-3.556
(22)	0.37	0.376	1.66	0.417	11.465	0.368	-0.452	0.363	-1.886
(23)	0.333	0.319	-4.33	0.330	-0.999	0.335	0.671	0.316	-5.228
(24)	0.31	0.319	2.97	0.347	10.741	0.313	1.105	0.321	3.452
(25)	0.306	0.319	4.07	0.357	14.110	0.302	-1.530	0.322	4.806
(26)	0.303	0.319	5.19	0.372	18.482	0.290	-4.571	0.321	5.742

RO - relativní odchylka

TAB.XV

MATERIÁL : 12 050.1
KOTOUČ : A99 100J 9V

Čís. měř.	R _a - skutečné μm	R _a - modelové						H.K.Tönshoff	
		J.N.Maslov		kvadrat.závislost		goniometr.fada			
		μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %
(1)	0.283	0.284	0.32	0.282	-0.39	0.287	1.40	0.288	1.87
(2)	0.31	0.283	-9.37	0.287	-7.76	0.292	-6.00	0.288	-7.35
(3)	0.273	0.282	3.27	0.299	8.72	0.295	7.61	0.288	5.35
(4)	0.273	0.281	2.99	0.274	0.46	0.296	7.96	0.288	5.36
(5)	0.346	0.371	6.73	0.348	0.42	0.354	2.28	0.346	-0.08
(6)	0.39	0.370	-5.23	0.386	-1.03	0.381	-2.22	0.346	-12.58
(7)	0.383	0.369	-3.74	0.382	-0.27	0.386	0.77	0.345	-10.98
(8)	0.37	0.367	-0.58	0.386	4.35	0.390	5.18	0.344	-7.33
(9)	0.363	0.377	3.64	0.363	-0.07	0.375	3.29	0.375	3.16
(10)	0.39	0.375	-3.73	0.390	0.06	0.392	0.75	0.374	-4.25
(11)	0.396	0.374	-5.98	0.386	-2.69	0.388	-2.16	0.373	-6.24
(12)	0.386	0.372	-3.93	0.381	-1.31	0.392	1.52	0.373	-3.55
(13)	0.336	0.328	-2.63	0.341	1.31	0.327	-2.94	0.315	-6.73
(14)	0.326	0.327	0.25	0.337	3.09	0.327	0.21	0.312	-4.41
(15)	0.32	0.325	1.83	0.327	2.35	0.328	2.48	0.312	-2.27
(16)	0.306	0.324	5.48	0.297	-3.03	0.330	7.31	0.312	2.00
(17)	0.353	0.370	4.57	0.357	1.14	0.371	4.79	0.368	4.18
(18)	0.373	0.369	-1.05	0.362	-3.09	0.370	-0.83	0.367	-1.45
(19)	0.36	0.368	2.25	0.359	-0.06	0.371	3.06	0.366	1.88
(20)	0.37	0.366	-0.92	0.357	-3.46	0.368	-0.30	0.366	-1.04
(21)	0.33	0.323	-2.04	0.332	0.86	0.350	5.98	0.308	-7.01
(22)	0.326	0.322	-1.25	0.336	2.99	0.336	3.04	0.308	-5.92
(23)	0.336	0.321	-4.59	0.330	-2.01	0.337	0.25	0.308	-9.16
(24)	0.326	0.321	-1.73	0.321	-1.51	0.339	3.64	0.306	-6.46

RO - relativní odchylka

TAB.XVI

MATERIÁL : 12 050.4
KOTOUČ : 27A 120J 8V

Čís. měř.	R _s - skutečné μm	kvadrát.závislost		R _a - modelové goniometr.řada		H.K.Tönshoff	
		μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %
(1)	0.233	0.245	5.05	0.262	11.03	0.251	7.08
(2)	0.253	0.236	-6.94	0.270	6.36	0.240	-5.50
(3)	0.256	0.252	-1.68	0.281	8.82	0.238	-7.59
(4)	0.236	0.239	1.12	0.259	8.80	0.237	0.14
(5)	0.28	0.252	-10.91	0.271	-3.10	0.236	-18.64
(6)	0.206	0.235	12.07	0.202	-2.21	0.234	11.87
(7)	0.213	0.206	-3.07	0.193	-10.48	0.223	4.56
(8)	0.223	0.223	0.01	0.207	-7.44	0.220	-1.20
(9)	0.366	0.361	-1.39	0.373	1.86	0.353	-3.81
(10)	0.346	0.354	2.19	0.362	4.46	0.337	-2.63
(11)	0.336	0.316	-6.24	0.355	5.33	0.335	-0.30
(12)	0.306	0.319	4.09	0.314	2.33	0.325	5.79
(13)	0.3	0.307	2.39	0.289	-3.48	0.301	0.35
(14)	0.29	0.292	0.75	0.289	-0.28	0.297	2.45
(15)	0.323	0.302	-6.87	0.295	-9.33	0.293	-10.16
(16)	0.286	0.293	2.27	0.273	-4.80	0.294	2.76
---	---	---	---	---	---	---	---

RO - relativní odchylka

TAB.XVII

MATERIÁL : 12 050.1
KOTOUČ : 27A 120J 8V

Čís. měř.	R _s skutečné μm	kvadrát.závislost		R _s - modelové goniometr.fada		H.K.Tönshoff	
		μm	RO %	μm	RO %	μm	RO %
(1)	0.27	0.275	1.89	0.268	-0.69	0.229	-17.77
(2)	0.203	0.244	16.78	0.185	-9.70	0.231	12.20
(3)	0.21	0.210	0.16	0.188	-11.69	0.233	10.24
(4)	0.213	0.219	2.92	0.168	-26.64	0.223	4.47
(5)	0.306	0.376	18.58	0.291	-5.25	0.294	-4.13
(6)	0.306	0.281	-8.79	0.328	6.63	0.300	-2.02
(7)	0.316	0.318	0.58	0.292	-8.12	0.306	-3.19
(8)	0.333	0.323	-3.18	0.339	1.87	0.326	-2.18
(9)	0.383	0.438	12.60	0.388	1.33	0.362	-5.72
(10)	0.38	0.379	-0.02	0.372	-1.95	0.366	-3.76
(11)	0.4	0.357	-12.03	0.430	7.06	0.393	-1.65
(12)	0.376	0.321	-17.05	0.338	-11.32	0.375	-0.30
(13)	0.58	0.576	-0.55	0.545	-6.36	0.526	-10.23
(14)	0.416	0.417	0.22	0.422	1.31	0.502	17.02
(15)	0.456	0.461	0.95	0.414	-10.19	0.489	6.73
(16)	0.52	0.491	-5.72	0.480	-8.12	0.499	-4.07
---	---	---	---	---	---	---	---

RO - relativní odchylka

Pro srovnání výsledků vybraných matematických modelů pro popis drsnosti povrchu R_a slouží porovnání skutečně dosažených hodnot procesu broušení a hodnot stanovených těmito modely. K porovnání byly použity vztahy pro drsnost J.N.Maslova a H.K.Tönshoffa. Na základě relativních odchylek modelových a skutečných hodnot (tab. XIV.-XVII.) musím konstatovat, že nově zjištěné závislosti ve vztahu k $tg\beta$ jsou plnohodnotné srovnávacím vztahům. Vliv nižší hodnoty $R-SQ$ se neproказuje.

4.2 Závislost strmosti vyjiskřovací křivky

Jestliže tedy v předešlé části byla prokázána závislost drsnosti povrchu na strmosti vyjiskřovací křivky a kinematických veličinách řezného procesu (l_k , d_{eq}) je nutné, pro další využití této závislosti, zjistit vztah strmosti vyjiskřovací křivky $tg\beta$ a dalších veličin provázejících řezný proces..

Na základě experimentálně získaných hodnot byla provedena selekce jednotlivých charakteristických veličin procesu broušení a došlo tak k přiblížení se platné závislosti strmosti a dalších veličin.

Výběr členů závislosti byl opět prováděn pomocí programu STEP. Jednotlivé veličiny ve vztahu ke strmosti vyjiskřovací křivky daném $tg\beta$ byly zobrazovány také graficky, pro úplnost znalosti o jejich vlivu bylo provedeno zjištění jejich jednoduchých, případně vícenásobných závislostí.

4.2.1 Jednoduché závislosti

V průběhu výběru nezávislých veličin bylo zjištěno, že nejvhodnější kombinací strmost ovlivňujících veličin je normálová složka řezné síly F_n' , kinematická délka stykového oblouku l_k , obvodová rychlost brousícího kotouče v_s a obvodová rychlost obrobku v_w . U těchto veličin byla současně zjišťována jednoduchá závislost k $tg\beta$ (tab. XVIII-XIX.). Z uvedených tabulek je zřejmé, že $tg\beta$ je silně

TAB.XVIII

tg $\beta \sim F_n$

Material	Kotouč	$k_1 + k_2, x$				$e^{(k_1+k_2, x)}$				k_1, x^{k_2}			
		k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)	k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)	k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	1.163	1.325	0.74	54.33	0.788	0.242	0.76	57.11	0.588	0.90	0.80	64.25
12050.4	A99 100J	-1.59	2.13	0.70	49.58	0.339	0.345	0.81	65.91	0.44	0.987	0.77	59.25
15241	A99 100J	1.19	1.44	0.78	61.08	0.84	0.23	0.82	66.47	0.47	1.016	0.87	75.31
17027.0	A99 100J	-0.14	2.33	0.77	58.63	1.21	0.236	0.70	48.99	0.94	0.89	0.66	44.09
17027.4	A99 100J	-3.94	3.52	0.96	91.41	0.51	0.402	0.95	90.34	0.137	1.52	0.96	92.38
12050.1	27A 100J	-1.83	2.64	0.91	82.24	-0.168	0.51	0.95	89.94	0.371	1.27	0.94	89.08
12050.4	27A 100J	-1.12	2.74	0.95	90.26	0.326	0.398	0.92	84.54	0.65	1.14	0.92	85.55
15241	27A 100J	-0.787	2.37	0.92	85.36	0.759	0.33	0.93	85.62	0.502	1.19	0.95	91.04
17027.0	27A 100J	-3.26	3.23	0.93	86.27	0.167	0.53	0.86	74.4	0.155	1.5	0.84	71.33
17027.4	27A 100J	-1.995	3	0.87	76.39	0.46	0.45	0.91	83.48	0.415	1.35	0.93	86.22
12050.1	A99 60M	-1.017	1.39	0.93	86.18	-0.011	0.33	0.92	85.12	-0.366	1.316	0.96	91.90
12050.4	A99 60M	-0.678	1.357	0.90	80.27	-0.28	0.416	0.92	84.24	-0.20	1.234	0.95	90.77

tg $\beta \sim k_2$

Material	Kotouč	$k_1 + k_2, x$				$e^{(k_1+k_2, x)}$				k_1, x^{k_2}			
		k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)	k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)	k_1	k_2	Cor.koeff.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	-1.94	19.78	0.89	78.94	0.280	3.467	0.87	76.46	2.969	1.34	0.88	77.52
12050.4	A99 100J	-5.18	29.297	0.75	56.98	0.020	4.091	0.75	56.09	3.13	1.53	0.72	51.14
15241	A99 100J	-10.14	35.53	0.95	89.99	-0.8	5.31	0.94	87.56	3.73	2.61	0.94	87.66
17027.0	A99 100J	-9.40	41.80	0.96	91.89	-0.17	4.90	0.98	95.99	3.78	2.07	0.97	93.57
17027.4	A99 100J	-2.79	18.4	0.70	48.55	0.07	3.35	0.69	47.76	2.87	1.57	0.69	47.74
12050.4	27A 100J	-11.432	41.51	0.92	84.79	-0.92	5.92	0.87	76.55	4.03	2.78	0.87	76.55
15241	27A 100J	-5.68	26.05	0.91	82.01	0.058	3.67	0.91	83.68	3.206	1.83	0.91	83.35
17027.0	27A 100J	-8.1	32.36	0.96	91.8	-0.34	4.63	0.95	90.98	3.56	2.21	0.95	91.0
17027.4	27A 100J	-5.12	21.14	0.77	59.88	-0.93	4.89	0.75	56.49	3.077	2.19	0.75	56.14
12050.1	A99 60M	-4.686	19.14	0.78	61.19	-1.46	5.75	0.78	61.57	3.26	2.58	0.79	62.27

TAB.XIX

tgβ ~ y_g

Material	Kotouč	k ₁ + k ₂ · x				e (k ₁ + k ₂ · x)				k ₁ · x ²			
		k ₁	k ₂	Cor.koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor.koef.	R-SQ (%)	k ₁	k ₂	Cor.koef.	R-SQ (%)
12050.1	A99 100J	2.03	0.115	0.22	4.72	0.93	0.02	0.23	5.23	-1.13	0.795	0.23	5.29
12050.4	A99 100J	-4.08	0.298	0.36	12.64	0.44	0.034	0.29	8.36	-2.8	1.25	0.29	8.41
15241	A99 100J	0.81	0.18	0.26	6.60	0.74	0.03	0.28	7.77	-2.12	1.104	0.28	7.74
17027.0	A99 100J	12.87	-0.13	-0.24	5.87	2.46	-0.011	-0.19	3.68	3.55	-0.416	-0.19	3.73
17027.4	A99 100J	2.70	0.18	0.16	2.67	0.96	0.029	0.23	5.28	-1.85	1.08	0.23	5.28
12050.1	27A 100J	-1.19	0.19	0.37	13.59	0.199	0.039	0.41	16.91	-3.64	1.46	0.41	16.97
12050.4	27A 100J	7.35	0.027	0.031	0.10	1.79	0.003	-0.023	0.05	1.50	0.110	-0.022	0.05
15241	27A 100J	13.54	-0.144	-0.24	5.98	2.34	-0.009	-0.11	1.30	3.26	-0.35	-0.11	1.28
17027.0	27A 100J	-3027.7	70.16	0.80	64.62	-544.69	12.64	0.82	67.38	-2055.76	546.2	0.82	67.37
17027.4	27A 100J	-1472.16	34.19	0.96	91.99	-209.55	4.88	0.95	91.06	-794.76	211.45	0.95	91.06
12050.1	A99 60M	-3.23	0.20	0.40	16.11	-0.79	0.05	0.45	20.67	-6.28	2.08	0.45	20.66
12050.4	A99 60M	-0.83	0.119	0.26	6.57	-0.87	0.05	0.36	12.88	-5.90	1.91	0.36	12.89

závislý at' už lineárně, exponenciálně nebo multiplikativně na vztažné složce řezné síly F_n' a délce stykového oblouku l_k . Naopak nízká závislost je zjištěna u rychlosti v_s , v_{fr} . Přesto je jisté, že tyto rychlosti zpřesňují ve vícenásobné závislosti vztah pro určení strmosti vyjiskřovací křivky.

Závislost $\text{tg}\beta$ a F_n potvrzuje také literatura [79], kdy je vytvářen syntetický matematický model pro F_n' ve tvaru :

$$F_n' = F_s' \cdot c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot a_e^{e1} \cdot (1/q)^{e2} \cdot v_c^{e3} \cdot V_w'^{e4} \quad (41)$$

a syntetický matematický model pro drsnost povrchu definovanou R_t a R_z :

$$R_t = c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot (1/q)^{e1} \cdot a_e^{e2} \cdot (1/d_{eq})^{e3} \quad (42)$$

$$R_z = A + c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot a_e^{e1} \cdot (1/q)^{e2} \cdot v_c^{e3} \cdot V_w'^{e4} \quad (43)$$

Zde vidíme zřejmou závislost mezi F_n' a R_z (R_t) - veličiny a_e , $1/q$, v_c , V_w' . Toto současně dokazuje oprávněnost existence vztahu :

$$\text{tg}\beta = k \cdot F_n'^q, \quad (44)$$

který byl vytvořen na základě experimentů. Uvedená závislost je základem, kdy zařazením dalších ovlivňujících veličin se vztah podařilo zpřesnit. Z předešlých odstavců je zároveň zřejmé, že $\text{tg}\beta$ je veličinou související s hodnotou drsnosti povrchu ve vícenásobné závislosti spolu s l_k a d_{eq} . Z uvedených vztahů vyplývá, že $\text{tg}\beta$ by zde měl vytvářet závislost spolu se složkou řezné síly a rychlostními parametry (v_c , v_f).

4.2.2 Vícenásobná závislost

K vytvoření vícenásobné závislosti byly použity stejné tvary matematických modelů jako v případě hledání závislosti drsnosti povrchu a strmosti vyjiskřovací křivky. V případě vícenásobné závislosti byla provedena grafická přiblížení závislosti (obr.4.1 až obr.4.10), kdy byla vyjádřena závislost $\text{tg}\beta=f_1(F_n')$, $\text{tg}\beta=f_2(F_n', l_k, v_s)$, $\text{tg}\beta=f_3(F_n', l_k, v_f)$ a stav nejlépe popisující závislost $\text{tg}\beta=f_4(F_n', l_k, v_f, v_s)$. Na obr.4.11 je znázorněna linearizace vztahu, další grafy ukazují závislost nalezenou pro jednotlivé materiálové soubory v logaritmických

souřadnicích. U uvedených grafů je na vodorovnou osu vynášena hodnota naměřené velikosti tangenty úhlu β , na svislou osu je vynesena hodnota tangenty zjištěná výpočtem.

Jednotlivé závislosti jsou zpracovány ve formě tabulek s hodnotami konstant a exponentů (tab.XX.-XXIV.). Při použití matematických vztahů lze konstatovat, že závislost $\text{tg}\beta$ na třech i čtyřech veličinách charakterizujících proces broušení je ve většině případů velmi těsná. To znamená kvadratická forma závislosti, včetně této formy po odstranění nejméně ovlivňujících členů rovnice i vztahy další vykazují vysokou závislost uvedených veličin.

Po zhodnocení všech závislostí můžeme uvést jako platnou výslednou závislost :

$$\text{tg}\beta = k \cdot (F_n' \cdot l_k \cdot v_s)^{k_1} \quad (45)$$

nebo :

$$\text{tg}\beta = k \cdot F_n'^{k_1} \cdot l_k^{k_2} \cdot v_s^{k_3} \cdot v_f^{k_4} \quad (46)$$

4.2.3 Jiné závislosti

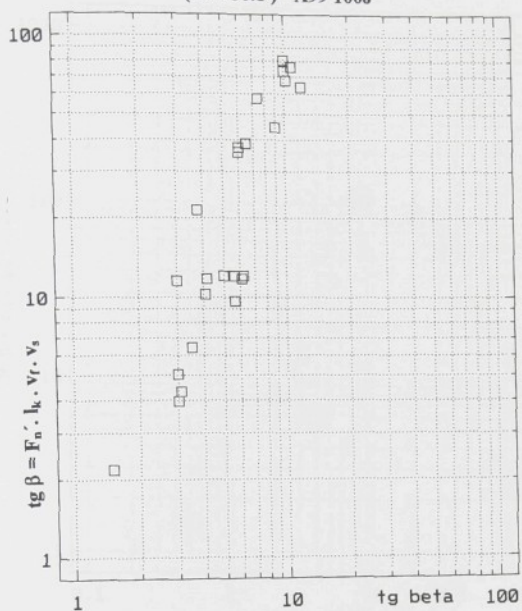
Pro dokumentování problematiky použití vyjiskřovací křivky v oblasti broušení byly také vytvořeny, v současné době snad nejuznávanější, diagramy broušení (příl. 3) některých souborů. Při použití hodnot $\text{tg}\beta$ byla pozorována lineární závislost $h_{eq} - \text{tg}\beta$ v těchto diagramech, to znamená že také platí :

$$\text{tg}\beta = \text{tg}\beta_1 \cdot h_{eq}^{k_1} \quad (47)$$

V závislosti na drsnosti povrchu v těchto diagramech má průběh $\text{tg}\beta$ klesající tendenci vůči R_a , to znamená, že s poklesem strmosti vyjiskřovací křivky roste kvalita plochy v hodnotách R_a . Protože však veličina h_{eq} je veličinou tvořenou třemi hodnotami reálného procesu jak bylo již v úvodních kapitolách deklarováno, diagramy musí zachovávat konstantní hodnoty řady dalších veličin např. V_w' , d_{eq} , tlak a množství

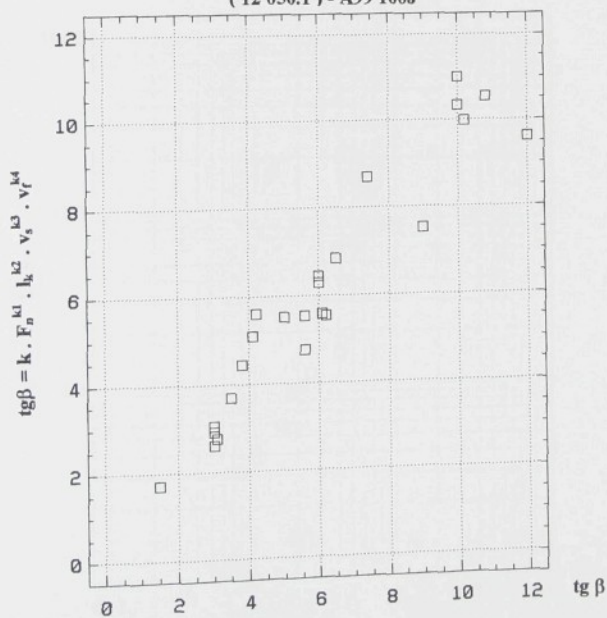
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_r, v_s)$

(12 050.1) - A99 100J



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_r, v_s)$

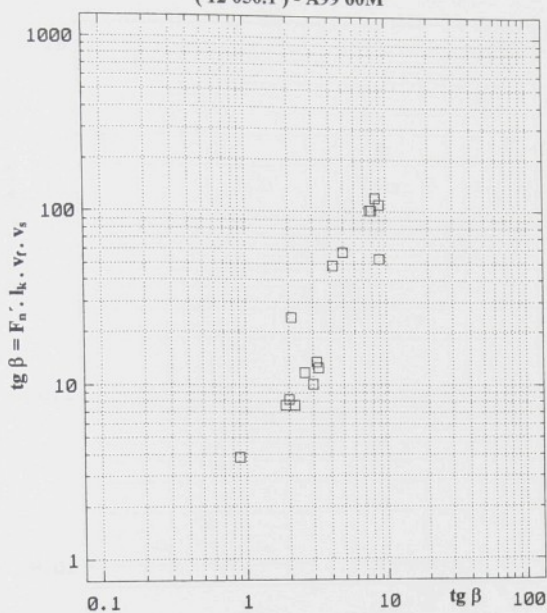
(12 050.1) - A99 100J



obr.4.1

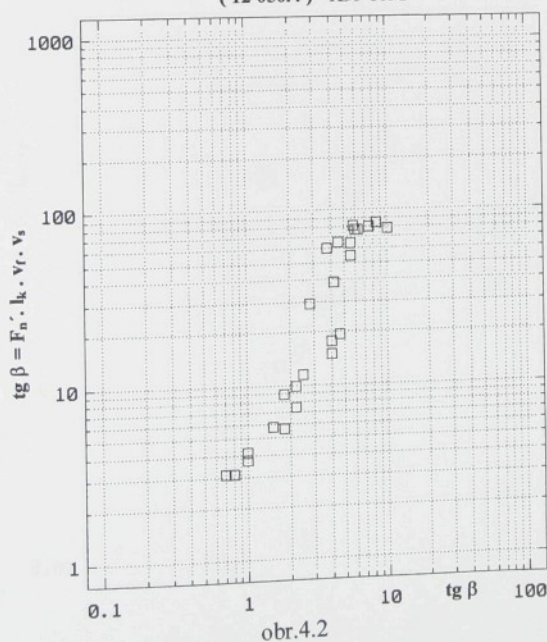
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_f, v_s)$

(12 050.1) - A99 60M



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_f, v_s)$

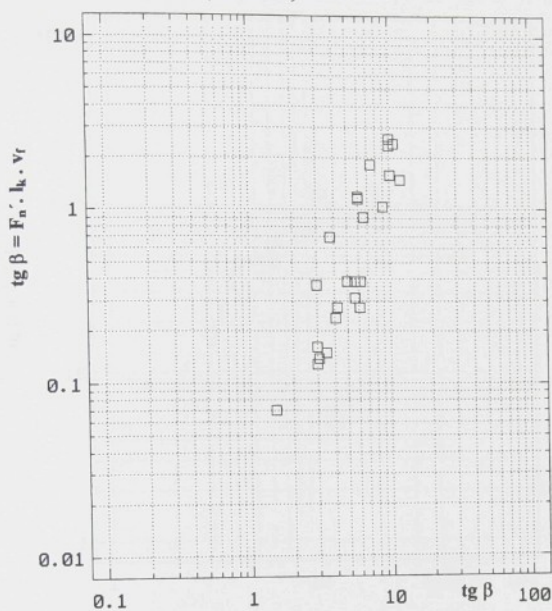
(12 050.4) - A99 60M



obr.4.2

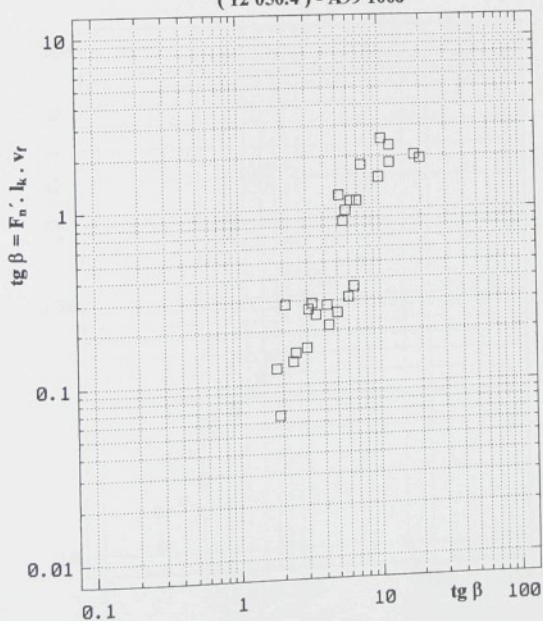
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, \nu_r)$

(12 050.1) - A99 100J



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, \nu_r)$

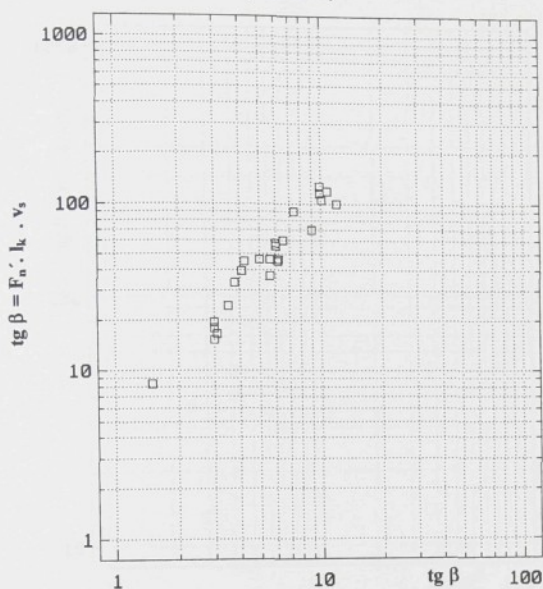
(12 050.4) - A99 100J



obr.4.3

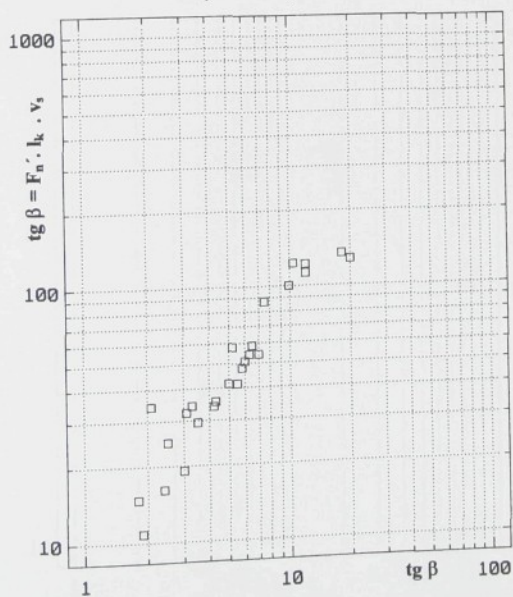
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(12 050.1)



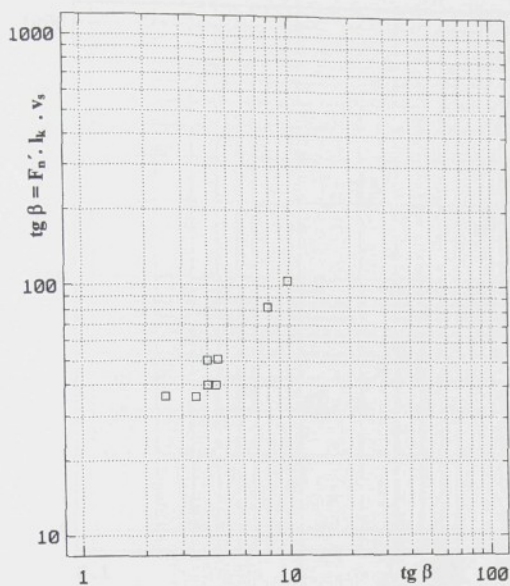
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(12 050.4) - A99 100J



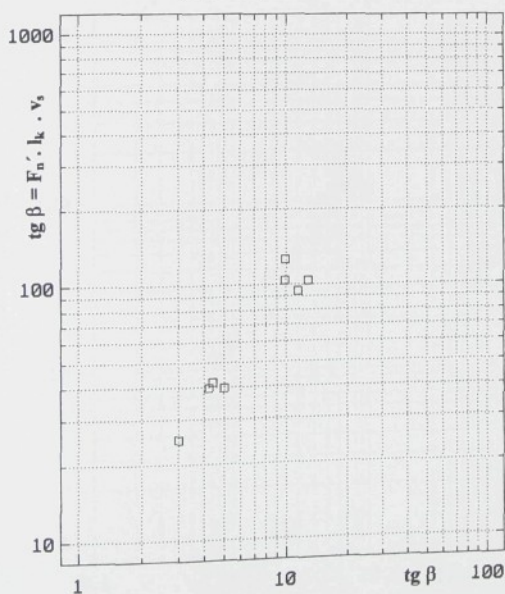
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta$ - $\operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(17 027.0) - monocr. 26A



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta$ - $\operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

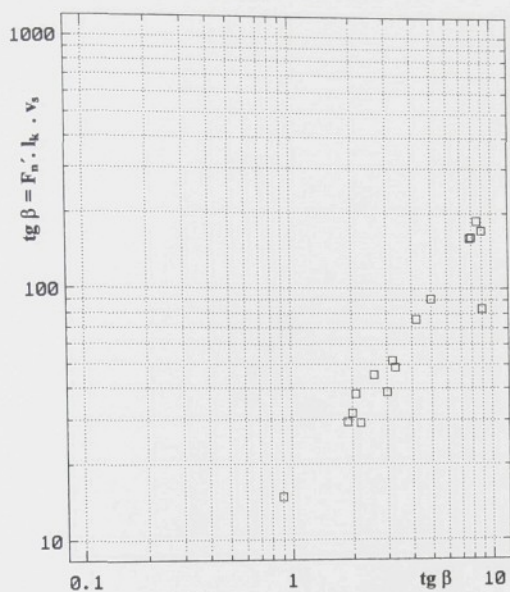
(17 027.2) - monocr. 26A



obr.4.5

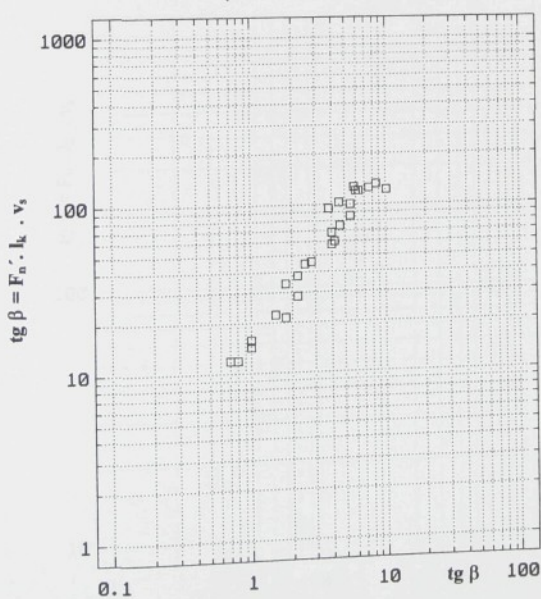
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(12 050.1) - A99 60M



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

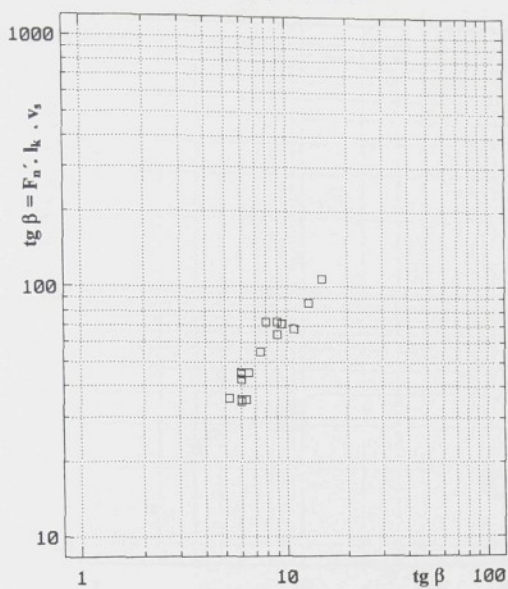
(12 050.4) - A99 60M



obr.4.6

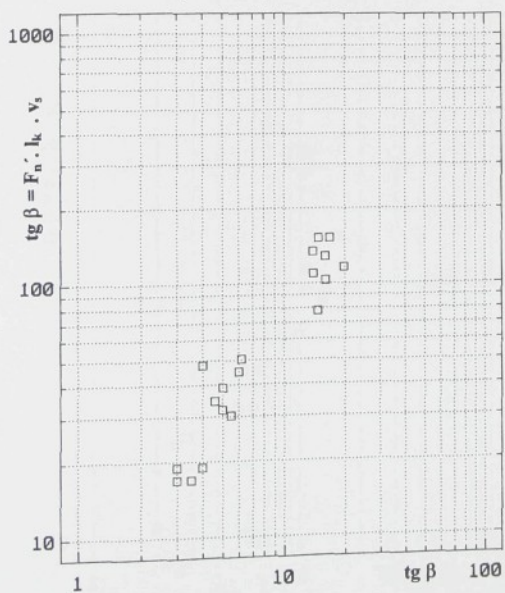
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(17 027.0) - A99 100J



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

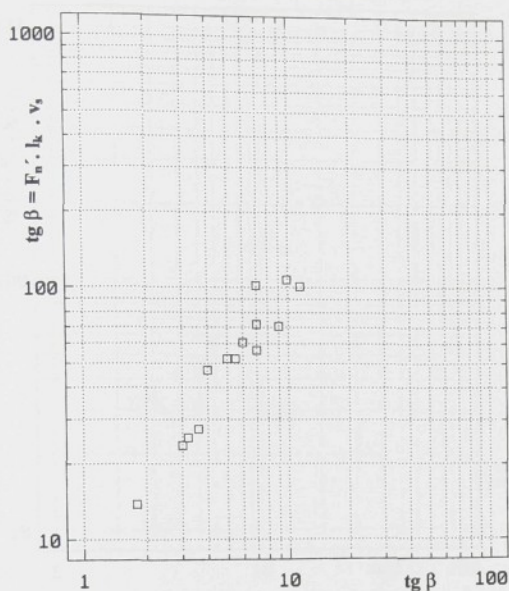
(17 027.2) - A99 100J



obr.4.7

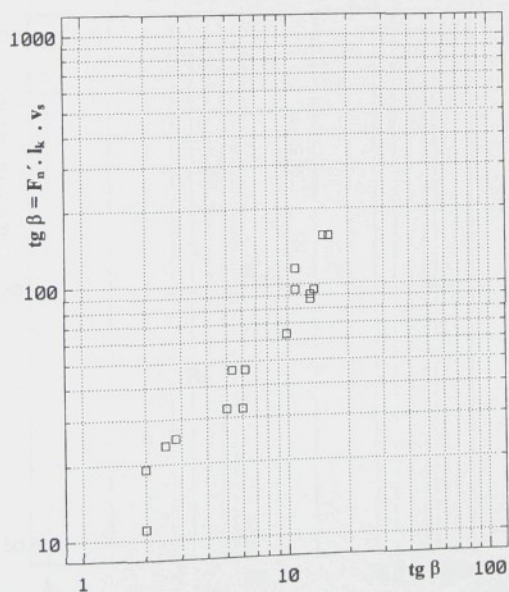
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(12 050.1) - monocr. 26A



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

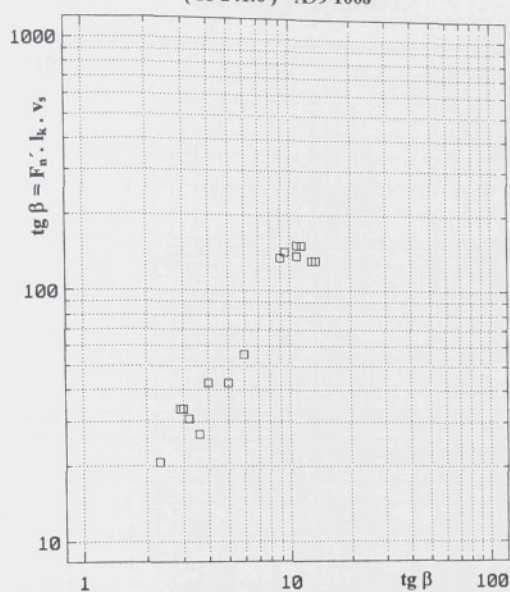
(12 050.4) - monocr. 26A



obr.4.8

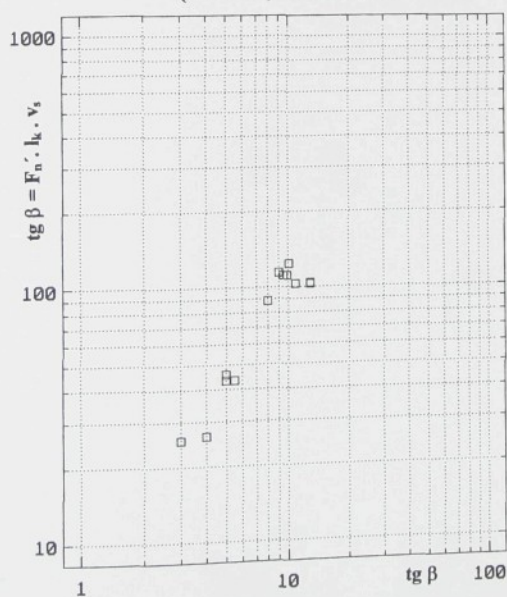
ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

(15 241.6) - A99 100J



ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_s)$

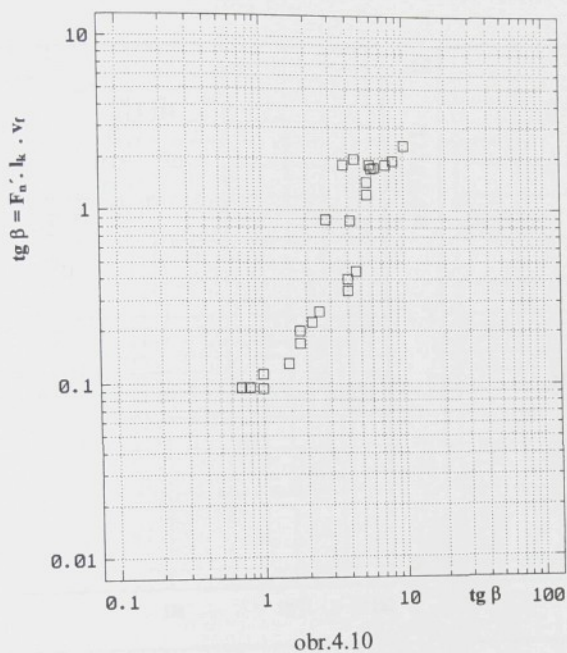
(15 241.6) - monocr. 26A



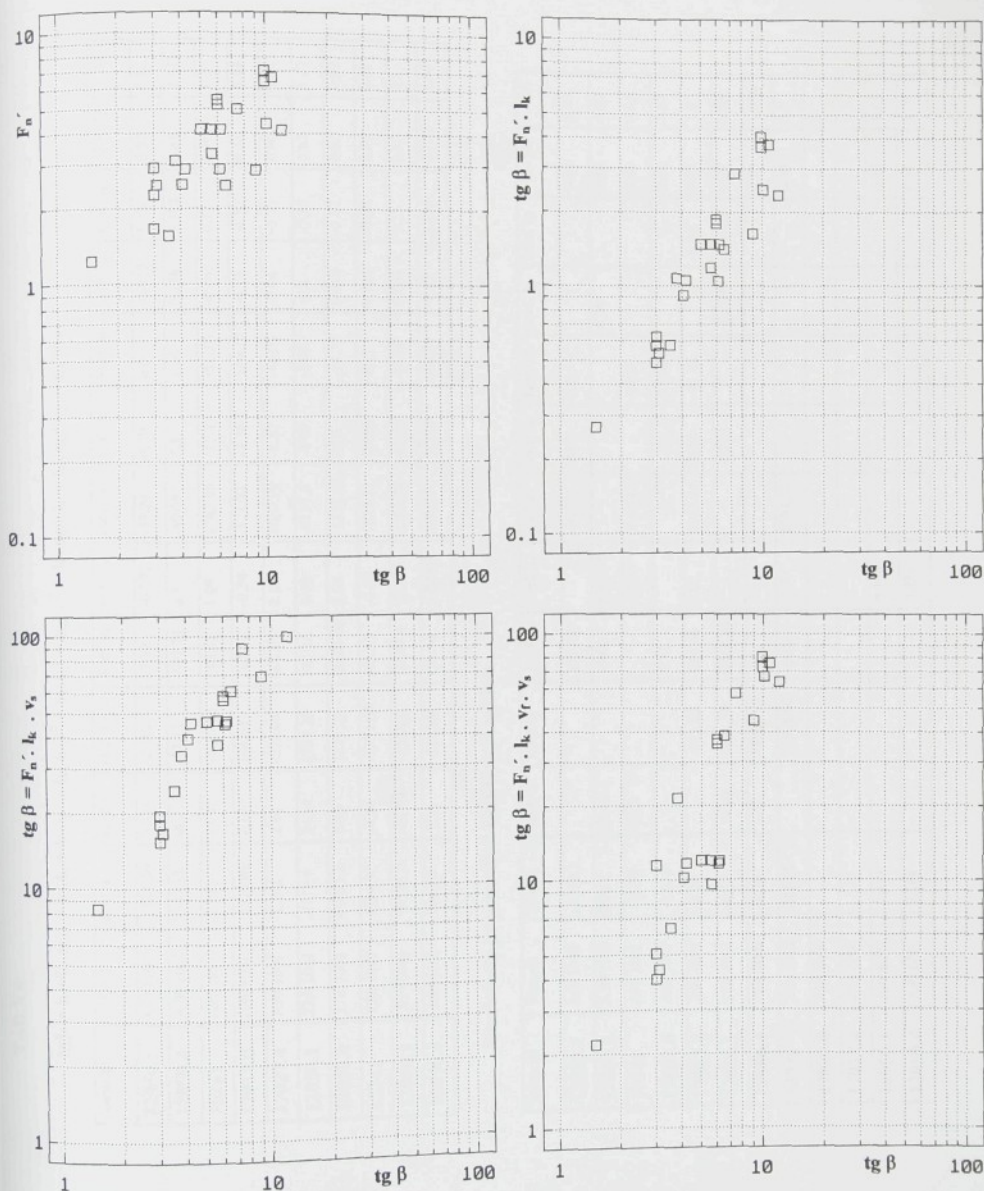
obr.4.9

ZÁVISLOST $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \beta = f(F_n', l_k, v_t)$

(12 050.1) - A99 60M



VÝVOJ ZÁVISLOSTI $\text{tg}\beta - \text{tg}\beta = f(F_n', l_k, v_r, v_s)$
(12 050.1) - A99 100J



obr.4.11

TAB.XX

$$\text{tg}\beta = k + k_1 \text{tg}\beta + k_2 l_k + k_3 v_g + k_4 \text{tg}\beta^2 + k_5 l_k^2 + k_6 v_g^2 + k_7 \text{tg}\beta l_k + k_8 \text{tg}\beta v_g + k_9 l_k v_g$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	koef. k ₄	koef. k ₅	koef. k ₆	koef. k ₇	koef. k ₈	koef. k ₉	R - SQ	SE
12050.1	A99 100J	-1039.26	0.624	-29.83	57.99	-0.177	-39.29	0.79	6.0	-0.017	1.33	0.92	0.8
12050.4	A 99 100J	7349.58	-8.075	-37.46	-407.71	0.3	-49.05	5.5	1.25	0.198	3.124	0.89	1.61
15241	A99 100J	-2.076	17.97	-1199.16	116.42	1.09	1463.95	-15.75	-51.18	-0.065	0.72	0.99	0.5
17027.0	A99 100J	-1914.09	2.19	186.55	102.54	-0.34	-171.32	1.36	14.415	-0.13	-1.87	0.84	1.14
17027.4	A99 100J	-1.205	2.46	-579.68	664.97	2.85	1067.29	-8.87	-46.07	-0.04	-5.77	0.96	1.11
12050.1	27A 100J	-8159.9	34.94	4354.26	383.16	4.48	-4151.3	-4.97	-54.9	-0.8	-7.36	0.85	1.17
12050.4	27A 100J	41267.3	5.99	1311.27	-2229.06	0.58	-1125.07	29.3	-17.75	0.016	-5.57	0.97	0.87
15241	27A 100J	1294.92	-4.54	-1751.09	-46.33	-3.67	1625.51	0.606	49.3	0.116	-0.68	0.96	0.69
12050.1	A99 60M	70528.0	-31.04	-5568.5	-3674.8	-2.259	5703.76	47.66	45.04	0.704	5.25	0.33	2.1
12050.4	A99 60M	556.39	7.35	-322.85	-26.44	1.089	280.54	0.331	-18.57	-0.12	3.233	0.703	1.86

Koeficienty po provedení kvalitativní selekce

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	koef. k ₄	koef. k ₅	koef. k ₆	koef. k ₇	koef. k ₈	koef. k ₉	R - SQ	SE
12050.1	A99 100J	-2754.1			153.03		-16.03	-2.07	2.9			0.94	0.73
12050.4	A 99 100J	18.81	-9.42		-0.44	0.43				0.24		0.88	1.62
15241	A99 100J	-45.59	23.3			1.79	364.27		-78.0			0.98	0.65
17027.0	A99 100J	-3.014			0.12				4.198			0.91	0.87
17027.4	A99 100J	-1.24		-573.22	684.46	2.72	1071.84	-9.13	-41.92		-6.48	0.97	1.0
12050.1	27A 100J	-8.57	14.45	3621.34	4558.84			-59.31		-0.334	-106.02	0.94	0.69
12050.4	27A 100J	-6.78	1.72	19.28								0.95	1.056
15241	27A 100J	385.56		-1568.56	-0.19	-3.93	1399.78		53.14			0.98	0.5
17027.0	27A 100J												
17027.4	27A 100J												
12050.1	A99 60M	1.969				0.106						0.49	1.83
12050.4	A99 60M	0.849				0.237						0.66	1.98

TAB.XXI

$$\operatorname{tg} \beta = k + k_1 \cdot F_n' + k_2 \cdot l_k + k_3 \cdot v_s$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	R - SQ	SE
12050.1	A99 100J	-5.61	0.885	12.03	0.1	0.87	1.06
12050.4	A 99 100J	-17.175	1.91	12.26	0.32	0.8	2.14
15241	A99 100J	-16.23	0.195	31.79	0.191	0.95	0.98
17027.0	A99 100J	-10.235	2.11	14.46	0.123	0.87	1.0
17027.4	A99 100J	-3.84	1.906	21.37	-0.099	0.94	1.44
12050.1	27A 100J	-4.75	2.1	6.62	0.036	0.82	1.22
12050.4	27A 100J	-8.58	1.72	19.26	0.047	0.95	1.06
15241	27A 100J	-3.99	1.55	10.59	0.018	0.85	1.31
17027.0	27A 100J	-4528.1	1.76	-15.24	104.94	0.98	0.39
17027.4	27A 100J	-2.29	0.74	-480.42	534.24	0.88	1.33
12050.1	A99 60M	-3.25	1.136	5.62	0.018	0.84	1.14
12050.4	A99 60M	-5.04	1.02	6.74	0.06	0.83	1.036

$$\operatorname{tg} \beta = k + k_1 \cdot F_n' \cdot l_k \cdot v_s$$

Material	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	R - SQ	SE
12050.1	A99 100J	1.733	0.078	0.89	0.96
12050.4	A 99 100J	-0.066	0.11	0.87	1.73
15241	A99 100J	1.215	0.073	0.88	1.48
17027.0	A99 100J	0.889	0.126	0.89	0.93
17027.4	A99 100J	1.54	0.11	0.85	2.31
12050.1	27A 100J	1.065	0.087	0.81	1.23
12050.4	27A 100J	1.66	0.098	0.87	1.75
15241	27A 100J	1.64	0.08	0.79	1.52
17027.0	27A 100J	-0.29	0.098	0.95	0.545
17027.4	27A 100J	1.106	0.091	0.81	1.69
12050.1	A99 60M	0.968	0.046	0.82	1.22
12050.4	A99 60M	0.23	0.056	0.86	0.96

TAB.XXII

$$\lg \beta = k \cdot F_n^{-k_1} \cdot I_k^{k_2} \cdot v_r^{k_3}$$

Materiál	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	0.85	0.52	1.04	-0.096	0.90	0.07	0.053
12050.4	A 99 100J	0.82	0.7	1.0	0.15	0.81	0.13	0.09
15241	A99 100J	5.12	0.49	35.73	-16.83	0.95	0.06	0.044
17027.0	A99 100J	-0.067	0.81	-4.1	2.57	0.88	0.048	0.036
17027.4	A99 100J	1.26	0.77	4.14	-1.515	0.95	0.069	0.048
12050.1	27A 100J	-1.17	0.96	-11.285	5.88	0.91	0.069	0.048
12050.4	27A 100J	-1.32	0.76	-14.86	8.1	0.93	0.087	0.061
15241	27A 100J	-0.434	0.94	-7.9	4.2	0.92	0.058	0.037
17027.0	27A 100J	10.65	0.7	77.03	-38.67	0.97	0.033	0.019
17027.4	27A 100J	-3.505	0.534	-33.64	17.53	0.94	0.06	0.036
12050.1	A99 60M	-2.5	1.22	-15.99	8.28	0.93	0.078	0.047
12050.4	A99 60M	0.453	1.0	1.8	-0.53	0.92	0.093	0.063

$$\lg \beta = k \cdot (F_n' \cdot I_k \cdot v_r)^{k_1}$$

Materiál	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	0.85	0.43	0.78	0.106	0.08
12050.4	A 99 100J	0.876	0.546	0.79	0.13	0.103
15241	A99 100J	0.86	0.49	0.85	0.109	0.095
17027.0	A99 100J	0.97	0.35	0.84	0.055	0.045
17027.4	A99 100J	1.03	0.48	0.95	0.068	0.049
12050.1	27A 100J	0.85	0.46	0.74	0.117	0.087
12050.4	27A 100J	0.97	0.58	0.91	0.098	0.068
15241	27A 100J	0.91	0.42	0.89	0.068	0.049
17027.0	27A 100J	0.81	0.45	0.65	0.11	0.091
17027.4	27A 100J	0.94	0.5	0.93	0.06	0.046
12050.1	A99 60M	0.67	0.56	0.80	0.134	0.1
12050.4	A99 60M	0.66	0.6	0.85	0.128	0.098

hodnota koeficientu k odpovídá log(k)

TAB.XXIII

$$\operatorname{tg} \beta = k \cdot F_n^{-k_1} \cdot l_k^{k_2} \cdot v_s^{k_3}$$

Materiál	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	R - SQ	SE
12050.1	A99 100J	-0.519	0.68	0.69	0.77	0.93	0.06
12050.4	A 99 100J	-1.825	0.95	0.72	1.51	0.90	0.091
15241	A99 100J	-1.48	0.63	1.23	1.47	0.98	0.04
17027.0	A99 100J	-0.04	0.78	0.84	0.53	0.87	0.05
17027.4	A99 100J	1.346	0.73	1.16	-0.28	0.95	0.07
12050.1	27A 100J	-0.219	1.0	0.56	0.43	0.905	0.07
12050.4	27A 100J	0.029	0.79	1.22	0.52	0.92	0.09
15241	27A 100J	-0.046	0.95	0.47	0.33	0.91	0.06
17027.0	27A 100J	-1722.98	0.58	-1.73	1053.25	0.88	0.066
17027.4	27A 100J	-5714.8	0.73	-35.3	3485.9	0.93	0.065
12050.1	A99 60M	-0.454	1.07	0.55	0.39	0.91	0.088
12050.4	A99 60M	-1.01	0.96	0.79	0.83	0.95	0.077

$$\operatorname{tg} \beta = k \cdot (F_n \cdot l_k \cdot v_s)^{k_1}$$

Materiál	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	Cor. koef.	R - SQ (%)
12050.1	A99 100J	-0.939	0.69	0.97	93.54
12050.4	A 99 100J	-1.77	0.9	0.95	89.74
15241	A99 100J	-1.62	0.82	0.97	94.1
17027.0	A99 100J	-1.24	0.82	0.94	87.94
17027.4	A99 100J	-1.21	0.81	0.95	90.2
12050.1	27A 100J	-1.49	0.81	0.96	91.2
12050.4	27A 100J	-1.65	0.90	0.96	92.4
15241	27A 100J	-1.25	0.77	0.95	90.6
17027.0	27A 100J	-2.62	1.06	0.95	89.8
17027.4	27A 100J	-1.74	0.88	0.97	93.2
12050.1	A99 60M	-2.29	0.88	0.96	92.4
12050.4	A99 60M	-2.455	0.91	0.98	95.1

TAB.XXIV

$$\lg \beta = k \cdot F_n^{-k_1} \cdot l_k^{k_2} \cdot v_s^{k_3} \cdot v_f^{k_4}$$

Materiál	Kotouč	koef. k	koef. k ₁	koef. k ₂	koef. k ₃	koef. k ₄	R - SQ	SE	MAE
12050.1	A99 100J	-0.52	0.68	0.69	0.77	-0.00004	0.92	0.063	0.046
12050.4	A 99 100J	-2.155	0.8	0.34	1.79	0.43	0.93	0.079	0.05
15241	A99 100J	-0.37	0.63	7.67	1.26	-3.17	0.98	0.041	0.027
17027.0	A99 100J	0.028	0.81	-8.55	-0.54	4.9	0.87	0.049	0.035
17027.4	A99 100J	1.27	0.49	-12.32	-1.21	6.89	0.95	0.068	0.048
12050.1	27A 100J	-1.17	0.96	-11.3	-0.00065	5.89	0.90	0.072	0.048
12050.4	27A 100J	-1.42	0.75	-17.15	-0.13	9.24	0.92	0.09	0.06
15241	27A 100J	-0.87	0.9	-25.2	-0.91	12.91	0.92	0.058	0.039
17027.0	27A 100J	587.27	0.87	85.38	-351.78	-42.47	0.96	0.037	0.017
17027.4	27A 100J	-4236.2	0.66	-54.55	2581.9	14.39	0.93	0.063	0.03
12050.1	A99 60M	-2.86	1.12	-15.4	0.34	8.07	0.93	0.079	0.044
12050.4	A99 60M	-1.066	0.97	0.56	0.84	0.11	0.94	0.079	0.055

hodnota koeficientu k odpovídá log(k)

kapaliny , je nutné toto brát pouze jako důkaz platnosti zjištěných závislostí $tg\beta$ a R_a . $Tg\beta$ je tedy exponenciální závislostí h_{eq} , kdy se jedná v podstatě o závislost na v_s , v_w , a a_c , což tedy potvrzuje přímou závislost $tg\beta$ na těchto veličinách.

4.3 Aplikace a využití nových poznatků

Při zjišťování vztahu vyjiskřovací křivky a kvality povrchu po broušení byla nalezena závislost mezi strmostí vyjiskřovací křivky a drsností povrchu danou hodnotou R_a . Současně bylo zjištěno, že strmost vyjiskřovací křivky je závislá na velikosti normálové složky řezné síly F_n' , kinematické délce stykového oblouku l_k a rychlostech v_s a v_f .

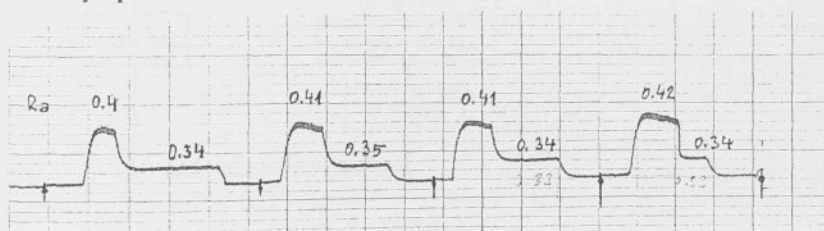
Tyto závěry je nutno dále rozvinout a zejména aplikovat pro vlastní proces broušení. V kap. 3.1 byly popsány do současnosti vyvinuté, případně zkoumané, systémy pro řízení procesu broušení. Se znalostí těchto systémů lze tedy využít v práci uvedené výsledky a aplikovat je prakticky dvěma způsoby :

1. Nepřímo v expertním systému, kdy za pomoci banky dat zjistíme konstanty a platné závislosti pro dané materiály, při kontrole normálové složky řezné síly je možno dodržovat takovou její hodnotu, která odpovídá výstupní drsnosti povrchu (při dodržení ostatních podmínek daných závislostí)

2. Přímou v tzv. inteligentním systému řízení (GICS - Grinding Intelligent Control System), kdy počítač bude sledovat strmost vyjiskřovací křivky a regulaci v_f , případně v_s , dovede řezný proces k požadované drsnosti povrchu. Tento systém vychází z údajů již proběhlých cyklů, které jsou uloženy v bance dat. Po vložení údajů o broušeném materiálu použije řídicí systém postupně matematické modely k určení výstupních parametrů broušené plochy. Na základě dat uložených v bance dat stanoví hodnoty konstant a exponentů. Následně stanoví maximální odchylku daného modelu při použití výstupních hodnot banky dat např. R_a . Stejným postupem určí odchylky při použití

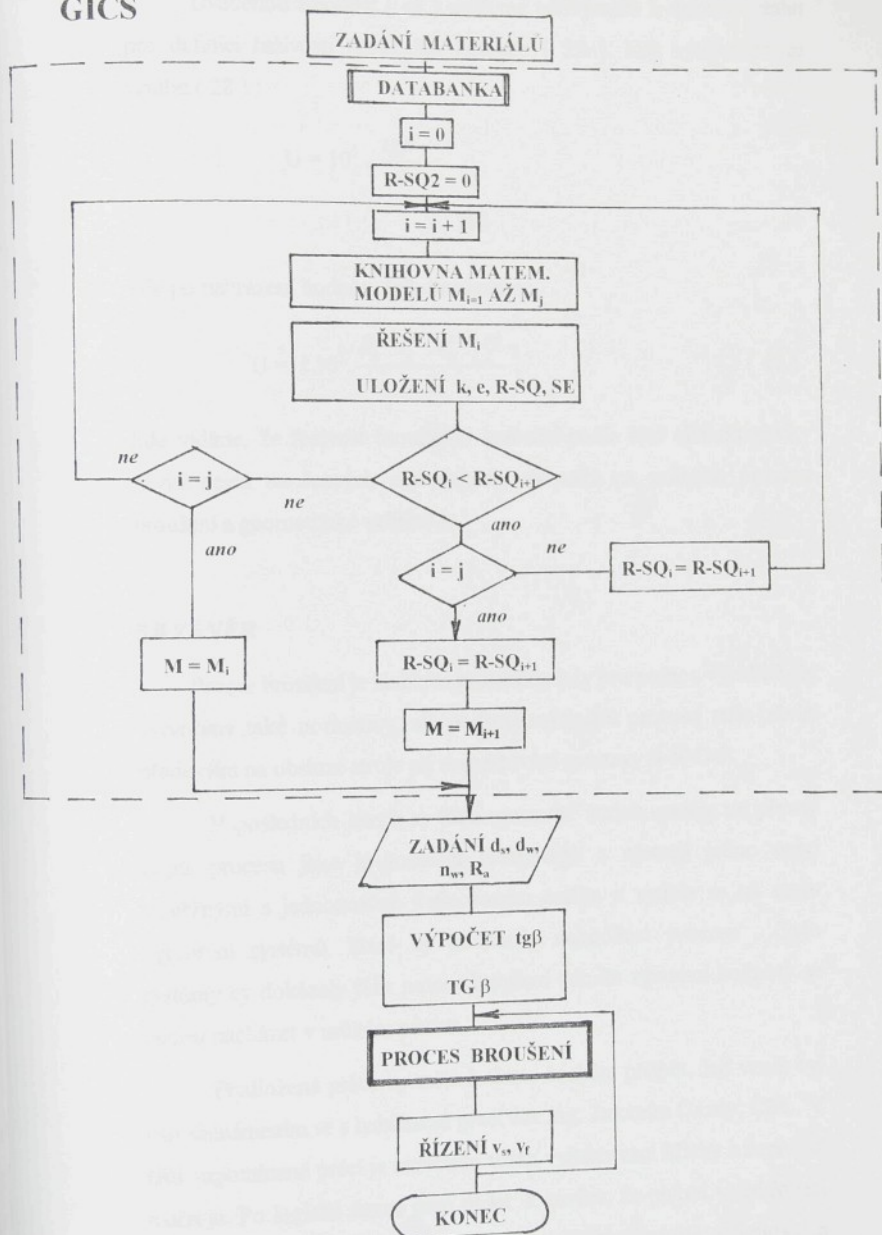
ostatních vložených matematických modelů. Model s nejmenší odchylkou pro daný materiál použije řídicí systém k dalšímu řízení vlastního procesu broušení. V souvislosti s tím stanoví technickou charakteristiku brousicího kotouče. Vlastní řízení bude prováděno podle vyspělosti systému jednou (např. axiálním posuvem) nebo více veličinami (n_s , n_w , v_{fs} , v_{fr}). Tato veličina je nazývána veličinou řídicí. Při řízení bude limitován požadovanými výstupními parametry broušené plochy.

Možnost regulace a vliv této regulace je prokázán stanovenými matematickými závislostmi v předložené práci, ať už se jedná o jednoznačně potvrzenou závislost R_a a $\text{tg}\beta$, tak i závislost $\text{tg}\beta$, v_f a v_s . Důkazem je také obr. 4.12, kdy při několika ověřovacích cyklech byla regulována rychlost přísuvu u zapichovacího broušení. V horní části časových závislostí jsou dosažené drsnosti povrchu bez stupňové regulace, v dolní části potom dosažená drsnost s regulací. Tato regulace byla prováděna ručně.



obr.4.12

Systém GICS budu nutno ještě doplnit o závislosti a znalosti průběhu tvrdosti povrchové vrstvy a průběhu napětí v povrchové vrstvě. Potom budeme moci hovořit o plně automatickém systému, který vlastně provede optimalizaci, za pomoci banky dat a daných matematických závislostí, na základě stěžejní (limitní) požadované výstupní veličiny. Touto veličinou je např. drsnost povrchu R_a , hodnota tvrdosti povrchové vrstvy atd. V jednotlivých případech budou samozřejmě potlačeny limitní hodnoty ostatních výstupních veličin, případně některé z nich, protože by jinak nebylo možné najít řešení. Vývojový diagram systému je na obr. 4.13.



obr.4.13

Uvedenou závislost (46) můžeme také použít k úpravě vztahu pro definici řezivosti brousícího kotouče [25], kdy vycházíme ze vztahu (28) :

$$U = 10^5 \cdot \frac{tg\beta}{S},$$

kde po nahrazení hodnoty $tg\beta$ dostáváme :

$$U = k \cdot 10^5 \cdot \frac{F_n^{k1} \cdot l_k^{k2} \cdot v_s^{k3} \cdot v_f^{k4}}{S}, \quad (48)$$

kde vidíme, že řezivost brousícího kotouče podle této charakteristiky závisí nejen na řezných podmínkách, ale také na průběhu procesu broušení a geometrické veličině l_k .

5.0 ZÁVĚR

Proces broušení je složitým procesem, kdy pro pomoc výrobě byly vytvořeny také normativy, ale podstata výsledků procesu stále závisí především na obsluze stroje při respektování soustavy S-N-O-P.

V posledních letech se řada pracovišť vzdala naděje na přesný popis procesu jako je tomu u technologií s nástroji jedno nebo vícebřitými s jednoznačně definovaným ostřím a vydala se na cestu vytvoření systémů, které by odstranily nahodilost procesu . Tyto systémy by dokázaly řídit proces broušení tak, že výstupní hodnoty se budou nacházet v určitém pásmu.

Předložená práce by měla k těmto snahám přispět. Její vznik byl dán seznámením se s habilitační prací doc.ing. Jaromíra Gazdy, CSc.. V této vzpomínané práci je rozebírán vztah vyjiskřovací křivky a řezivosti nástroje. Po logické úvaze jsem došel k závěru, že pokud vyjiskřovací křivka souvisí s řezivostí brousícího kotouče, musí nutně ovlivňovat a být obrazem kvality výsledné plochy.

Protože se tyto předpoklady potvrdily, alespoň je to můj názor podepřený řadou experimentů a jejich zpracováním, lze je dále aplikovat, tak jak bylo navrženo v kap.4. Práce zároveň vytvořila typ závislosti drsnosti povrchu R_a na strmosti vyjiskřovací křivky a závislosti strmosti této křivky na vlastním řezném procesu.

Objevuje se však i řada otázek, kdy mezi nimi je podíl materiálů nástroje a obrobku na hodnotách konstant a exponentů, jak se jejich hodnoty změní při použití jiného řezného prostředí a podobně. A nesmíme ani zapomenout na tuhost soustavy S-N-O-P a její ovlivnění těchto závislostí. Myslím však, že nic nebrání tomu, aby výsledky práce byly využity pro další práce v oblasti automatizace procesu broušení.

V rámci interního grantu řeším v současné době úkol přímého ukládání hodnot z procesu do databáze ACCESS přes interface ADDA ISES Professional. Část tohoto úkolu je již vyřešena. Celý úkol tvoří:

- a) zápis a ukládání vstupních hodnot
- b) snímání a ukládání procesních hodnot
- c) zápis a ukládání postprocesních hodnot

Na závěr práce a této kapitoly bych chtěl poděkovat zvláště panu doc.ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. a doc.ing. Vladimíru Gabrielovi, CSc. za cenné rady, připomínky, náměty a poskytnutí vlastních zkušeností, mnohdy i povzbuzení. Dále bych rád poděkoval katedře technické výchovy UJEP za všestrannou pomoc včetně pomoci při pracích spojených s prováděním experimentů a to zvláště ing.Ladislavu Stančíkovi.

LITERATURA.

1. Armarego, E.J.A. , Braun, R.H. : Obrabotka metallov rezaniem. Mašinstroenie, Moskva 1977
2. Allanson, D.R., Kelly,S., Terry, S., Moruzzi, J.L., Rowe, W.B.:Coping with Compliance in the Control of Grinding Processes. CIRP, 38/1/1989, str. 311-314
3. Backer,W.R., Marshall,E.R., Shaw,M.C.: The Size Effect in Metal Cutting. Transactions of the ASME. Series B, January 1952, s.61-72
4. Backer,W.R., Merchant,M.E.: On the Basic Mechanics of the Grinding Process. Transactions of the ASME. Series B, January 1958, str. 141-148
5. Békés,J.,Andonov,I.: Analýza a syntéza strojárskych objektov a procesov. Alfa, Bratislava 1986
6. Bhateja,C.P.,Chisholm,A.W.J.,Pattinson,E.J.: A Computer - Aided Study of the Texture of the Working Surfaces of Grinding Wheels. Proceedings of the 12th International Machine Tool Design and Research Conference, Mac Millan Press Ltd., Publishers
7. Bokučava, T.V.: Šlifovanie metallov s podačej ochlaďdajúcej židkosti čerez pory šlifovalnovo kruga. Moskva 1959
8. Bhateja,Ch.P.: A Proposal for Some Functional Characteristic Parameters of Abrasive Grinding Wheels. CIRP Annals, vol.27,No.1/1978, s.237-241
9. Bhateja,Ch.P.: The Intrinsic Characteristics of Ground Surfaces. Grinding,Theory,Techniques and Troubleshooting, SME, Michigan 1982, str.139-147
10. Brinksmeier,E.,Werner,F.: Monitoring of Grinding Wheel Wear. Annals of the CIRP, vol.41/1/1992, str.373-376
11. Buda,J., Souček,J., Vasilko,K. : Teória obrábania. Alfa, Bratislava 1983
12. Bumbálek,B.,Odvoď,V.,Ošťádal,B.: Drsnost povrchu. SNTL, Praha 1989
13. Bumbálek,B.,Ondra,J.: Metodika sestavování modelu obrobiteľnosti materiálu na základě jeho strukturně mechanických vlastností. Strojirenství č.8/1987, str.447-449
14. Černý,V., Pospíšil,L. : Brusivo a brusné nástroje. SNTL, Praha 1967
15. Daněk,R., Laštovička,Z.: Broušení modifikovaných tvarů oběžných dráh a opěrných čel vnitřních kroužků kuželíkových ložisek. Stroj. výroba 7/1984, str. 485-487
16. Dostál, F. : Drsnost obrobených ploch. SNTL, Praha 1962

17. Dong, W.P., Webster, J.A.: Assessment of Frequency Characteristics of Acoustic Emission in Grinding. Proceedings IMEC'96, Storrs, 1996, str.34-37
18. Dráb, V. a kol.: Technologie I.- Návody ke cvičení. VŠST, Liberec 1987
19. Drastík, F.: Technické kreslení podle mezinárodních norem I. Montanex, Ostrava 1994
20. Dubovská, R.: Matematické modelovanie mikrogeometrie brúseného povrchu. Sborník vědecké konference, Košice 1996, str.32-35
21. Furukawa, Y., Ohiski, S., Shiozaki, S.: Selection of Creep Feed Grinding Conditions in View of Workpiece Burning. CIRP, 28/1/1979, str. 213-218
22. Gašpárek, J.: Dokončovacie spôsoby obrábania. Alfa, Bratislava 1979
23. Garšin, A.P. a kol.: Abrasivní materiály. Leningrad 1983
24. Gazda, J. a kol.: Teorie obrábění - řezné síly při obrábění. VŠST, Liberec 1993
25. Gazda, J.: Řezivost brusných kotoučů. Habilitační práce, VŠST, Liberec 1979
26. Gazda, J.: Modelování brusného procesu. KDP, VŠST, Liberec 1973
27. Gazda, J., Janoušek, J.: Nástroje a podmínky pro broušení slitin niklu. Stroj. výroba, sv.34/1986, č.3, s.171-174
28. Gu, D.Y., Wager, J.G.: Further Evidence on the Contact Zone in Surface Grinding. CIRP, 39/1/1990, str.349-352
29. Hahn, R.S., Lindsay, R.P.: Principles of Grinding. Machinery Magazine, July 1971, str.55 - 63
30. Hahn, R.S., Lindsay, R.P.: Principles of Grinding-the Metal Removal Parameter. Machinery Magazine, August 1971, str.33-39
31. Hahn, R.S., Lindsay, R.P.: Principles of Grinding - the Wheel Removal Parameter. Machinery Magazine, September 1971, str. 33-39
32. Hahn, R.S., Lindsay, R.P.: Principles of Grinding - Surface Finish, Geometry, Integrity. Machinery Magazine, October 1971, str.57-67
33. Chaloupková, J.: Brúsenie-moderná výrobná a dokončovacia metóda. Dipl. práce, UJEP Ústí n.L., 1996
34. Chen, C.A., Duffie, N.A.: A Process Model of Spherical Grinding Tools for Automated Surface Finishing Processes. Manufacturing Engineering.: 2000 and Beyond, Freund Publishing, London, 1996, str.31-33
35. Jakubcová, H.: Elektrická měření neelektrických veličin. ČVUT, Praha 1983

36. Jenčík, J., Kühn, L. : Technická měření ve strojírenství. SNTL, Praha 1982
37. Jersák, J.: Matematické modelování kinematiky procesu broušení. KDP, VŠST, Liberec 1987
38. Jersák, J.: Orovnávání brousicích kotoučů polykrystalickými diamantovými orovnačiči. Stroj. výroba, č.8-9/1992, str.12-14
39. Jevsejev, D.G.: Formirovanije svojstv poverchnostnykh slojev pri abrazivnoj obrabotke. Šaratov, 1975
40. Lindsay, R.P.: Principles Of Grinding: Four Years Later. Grinding, Theory, Techniques and Troubleshooting, SME, Michigan 1982, str.42-50
41. Kocman, K.: Řezné podmínky pro rovinné broušení s aplikací na celostátní normativy. Stroj. výroba, č. 11/1986, str. 868-873
42. Kissoczy, Š.: Striedná hrúbka triesky pri brúsení. KDP, SVŠT, Bratislava 1962
43. Kissoczy, Š.: Vplyv spôsobu orovnávanía brúsneho kotúča na brúsny proces. Sborník vedeckých prác stroj. fakulty SVŠT, zväzok 5, Bratislava 1965, s. 45-49
44. Knop, M.: Rechnergeführte Stellgrößenauswahl beim Außenrundeinsteichschleifen - Abrichteinfluß und Temperaturberechnung. Dr.-Ing.Diss., RWTH Aachen 1989
45. König, W., Cronjäger, L., Spur, G.: Machining of New Materials. CIRP Annals vol. 39/2/1990, str. 673-681
46. König, W., Arciszewski, A.: Continuous Dressing - Dressing Conditions Determine Material Removal Rates and Workpiece Quality. Annals of the CIRP, vol.37/1/1988, str.303-307
47. Kovacevic, R., Liaw, H.H., Barrows, J.F.: Surface Roughness and its Relationship to Cutting Parameters in Abrasive Waterjet Cutting. The Proceeding Third International Grinding Conference, Fontana, October 1988, str. 589/1 - 589/15
48. Kysilka, J.: Vliv podmínek orovnění brousicího kotouče na výsledek broušení. Stroj. výroba, č.7/1985, str. 514-515
49. Lurje, G.B.: Šlifovanie metallov. Moskva, Mašinostrojenie 1969
50. Mádl, J.: Experimentální metody v teorii obrábění. ČVUT, Praha 1987
51. Maksoud, T.M.A., Dean, C., Jones, T., Howes, T.D.: Theoretical and Experimental Investigation Into the Effect of Lateral Oscillation in Cylindrical Grinding. SME, Dearborn, 1988, str. 601/1 - 601/17
52. Malkin, S.: Comparison of Single Point and Rotary Dressing of Grinding Wheels. Grinding, Theory, Techniques and Troubleshooting, SME, Michigan 1982, str.130-136

53. Malkin, S.: Grinding of Metals : Theory and Application. Journal of Applied Metalworking, January 1984, str.95 - 109
54. Marinescu, I.D., Zeng, R.: Acoustic Emission Investigation of Ceramic Lapping Process. Proceedings IMEC'96, Storrs, 1996, str.65-69
55. Maslov, J.N.: Teorie broušení kovů. SNTL, Praha 1979
56. Mouka, E., Chladil, J. : Teorie obrábění. VUT, Brno 1989
57. Neckář, F., Kvasnička, I.: Vybrané statě z úběru materiálu. 1.vydání, ČVUT, Praha 1991
58. Novák, Z., Bumbálek, B.: Broušení a jakost povrchu plazmaticky stříkaných povlaků. Sborník konference Brúsenie IV, Brno 1994, str.74-80
59. Němec, J.: Odporové tenzometry v praxi. SNTL, Praha 1967
60. Ondráček, E., Janíček, P.: Výpočtové modely v technické praxi. SNTL, Praha 1990
61. Ošťádal, B.: Broušení slitiny EI 698-D. Strojírenství č.9/1985, str.505-508
62. Ošťádal, B.: Problematika stanovení řezivosti brousících kotoučů. Stroj. výroba, č.7/1986, str. 556-557
63. Ošťádal, B.: Využití diagramů broušení pro stanovení obrobiteľnosti materiálu a řezivosti brousících kotoučů. Strojírenství č.5/1985, str.298-303
64. Peklenik, J.: Contribution to a Correlation Theory for the Grinding Process. Transactions of the ASME, vol.86/1964, str.97-106
65. Přikryl, Z., Musílková, R.: Teorie obrábění. Třetí vydání. SNTL, Praha 1982
66. Noboru, U., Obuchi, Y., Matsuo, T., Nomura, H.: Expert System for Grinding. Proceeding Third International Grinding Conference, Fontana 1988, s. 622/1-11
67. Reinhold, R., Clausnitzer, M.: Schleifen. 1.vydání, VEB Verlag Technik, Berlin 1988
68. Roček, V.: Technologie rychlostního broušení do plna. Stroj.výroba, sv. 36/1988, č.2, s.149-152
69. Rowe, W.B., Chen, X., Mills, B.: Towards an Adaptive Strategy for Dressing in Grinding Operations. Proceedings of the 31st International Matador Conference
70. Rowe, W.B., Pettit, J.A., Boyle, A., Moruzzi, J.L.: Avoidance of Thermal Damage in Grinding and Prediction of the Damage Threshold. Annals of the CIRP, vol.37/1/1988, str.327-330
71. Rowe, W.B., Inasaki, I., Malkin, S.: Applications of Artificial Intelligence in Grinding. Annals of the CIRP, vol.43/2/1994, str.1-11

72. Říčka J.: Řezivost brusného nástroje jako funkce jeho stavu a podmínek broušení. *Strojírenství*, č.9/1971, str.540-545
73. Saljé, E., Paulmann, R.: Relations Between Abrasive Processes. *Annals of the CIRP*, vol.37/2/1988, str.641-648
74. Saljé, E.: Grinding Processes Considered as Feedback Control Systems. *Annals of the CIRP*, vol.17/1/1978, str.205-210
75. Saljé, E.: Gesetzmäßigkeiten und Kennzahlen beim Schleifen. Dr.-Ing.Diss., TH Aachen 1952
76. Snoeys,R.,Peters,J.,Decneut,A.: The Significance of Chip Thickness in Grinding. *Annals of the CIRP*, vol. 23/2/1974, str. 227-237
77. Šlesár,M., Vasilko,K.,Fyzikálno-metalurgické pohľady na proces tvorenia triesky. *Strojírenství* č.7/1988, str.426-431
78. Tiep,V.N.: Obrobiteľnosť kovových materiálov broušením. KDP, VŠST, Liberec 1984
79. Tönshoff, H.K., Peters, J., Inasaki, I., Paul, T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. *Annals of the CIRP*, vol.41/2/1992, str.677-688
80. Tönshoff, H.K., Wulfberg, J.P., Kals, H.J.J., König, W.: Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes. *Annals of the CIRP*, vol.37/2/1988, str.611-622
81. Tönshoff,H.K., Foth,M.: In - Process Detection and Reduction of Workpiece Waviness Caused by Vibrations in External Plunge Grinding. *SME* 620/1-620/15
82. Werner,G.: Influence of Work Material on Grinding Forces. *Annals of the CIRP*. Vol.:27/1/1978, str.243-248
83. Vasilko,K. a kol.: Brúsenie a ostrenie rezných nástrojov. Alfa, Bratislava 1984
84. Vasilko,K., Bokučava, G.: Brúsenie kovových materiálov. Alfa, Bratislava 1988
85. Venk,S.,Govind,R.: An Expert System Approach to Optimization of the Centerless Grinding Process. *Annals of the CIRP*, vol.39/1, 1990, s. 489-496
86. Verkerk,J.,Pekelharing, A.J.: Characterization of Wheelwear in Plunge Grinding. *Annals of the CIRP*, vol.25/1/1977, str.127-131
87. Yamamoto,Y., Horike,M.: A Study on the Temperature Variation of Workpieces during Cylindrical Plunge Grinding Process. *Annals of the CIRP*. Vol. 25/1/1977, str. 151-154
88. Yoshikawa,H., Peklenik,J.: Three-dimensional Simulation Techniques of the Grinding Process. *Advances in Manufacturing Systems*. Pergamon Press, 1971
89. Zehnula,K. : Snímače neelektrických veličin. SNTL,Praha 1977

90. Holešovský,F., Stančík,L.: Dosažení vysoké kvality povrchu při broušení ocelí tř.16 220. Výzkumná zpráva pro Destá a.s., UJEP Ústí nad Labem 1991
91. Holešovský,F., Stančík, L.: Vliv brousicího kotouče a řezných podmínek na drsnost povrchu při broušení válcových ploch. Strojírenská výroba č.11-12/1995, str.38-40
92. Holešovský,F.: Broušení ocelí kotouči Al_2O_3 a monokrystalickým Al_2O_3 . Přednáška mezinár.konference "Brúsenie IV", Brno 1994
93. Holešovský,F.: Broušení korozivzdorných ocelí tř.17. Technika a trh, č.2/1995, str.16-20
94. Holešovský,F.: Matematické modelování některých charakteristik broušení. Sborník mezinár.vědecké konference, Ostrava 1995, s.72-76
95. Holešovský,F.: Monitorování procesu broušení pro řízení pracovního cyklu. Sborník mezinár. vědecké konference, Košice 1996, str. 16-20
96. Holešovský,F.: The Grinding Process Mathematical Modelling and Expert System. Proceedings International Manufacturing Engineering Conference, Storrs 1996, str.50-52
97. Holešovský,F.: Význam časové závislosti řezné síly v procesu broušení. Strojírenská technologie č.1/1996, str.22-25
98. Katalog brousících nástrojů Carborundum Electrite
99. Studer : Studer - Schleifdaten, katalog
100. Schaudt: Leitfaden der Schleiftechnik. Schaudt Maschinenbau GmbH, 1988
101. ČSN ISO 3002-1 až 3002-5

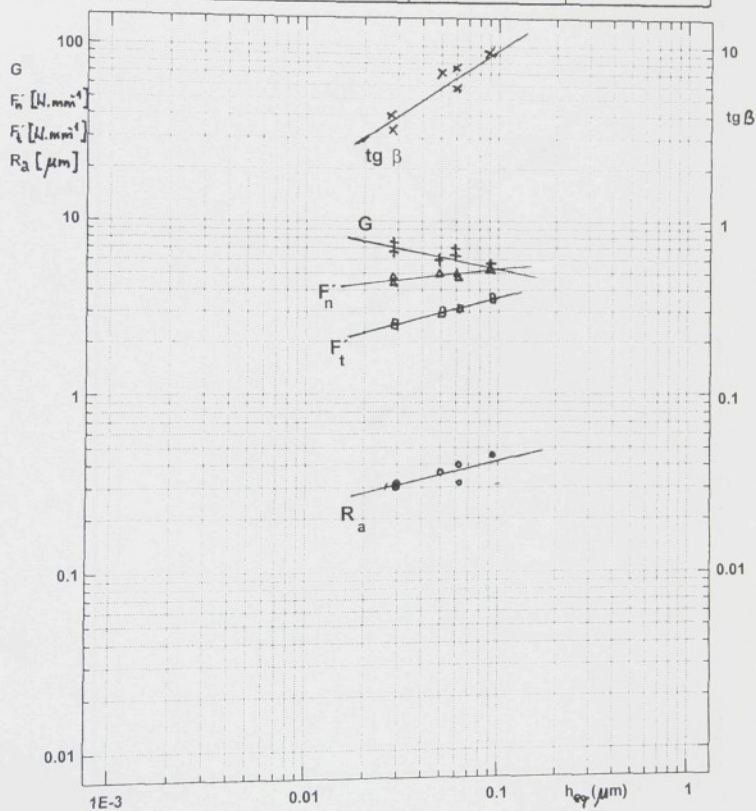
PŘÍLOHY.

FILE: A50A

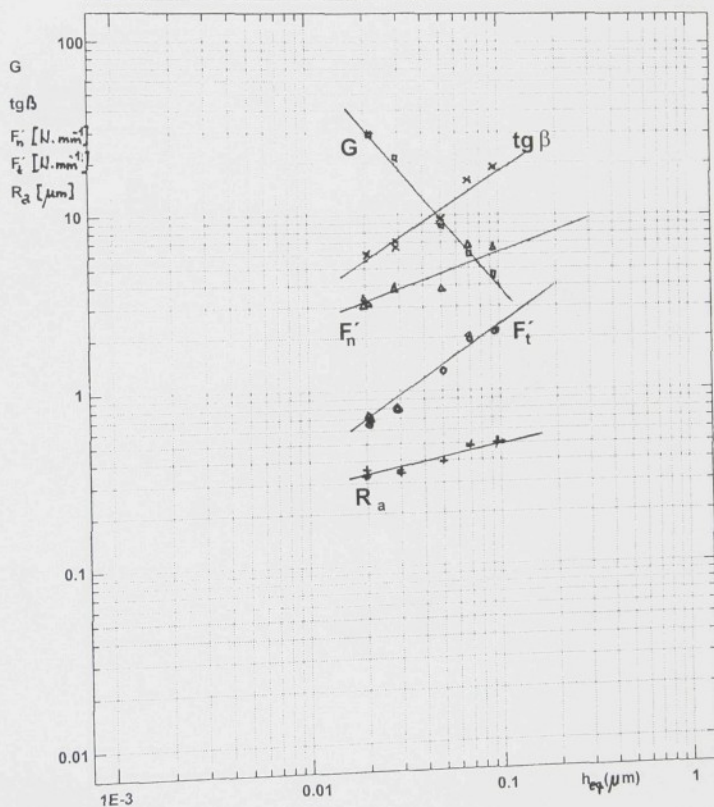
Fri Jan 31 1997 02:13:53 PM

Row	bd	ds	dw	a	rs	vfr	Ra1	Ra2	Ra3	Rz1
1	15.0	289.760	62.40	1.00000E-1	6.00000E-4	.26	.22	.30	.33	1.66
2	15.0	289.759	62.20	1.00000E-1	4.50000E-4	.26	.27	.29	.37	2.09
3	15.0	289.758	62.00	1.00000E-1	4.50000E-4	.26	.28	.27	.27	2.22
4	15.0	289.757	61.80	1.00000E-1	5.00000E-4	.26	.26	.27	.29	2.07
5	15.1	288.340	61.10	1.00000E-1	6.00000E-3	.64	.36	.35	.33	2.55
6	15.1	288.328	60.90	1.00000E-1	4.50000E-3	.64	.34	.42	.41	2.53
7	15.1	288.319	60.70	1.50000E-1	5.00000E-3	.64	.31	.43	.41	2.28
8	15.1	288.309	60.40	2.00000E-1	4.50000E-3	.64	.35	.33	.43	2.52
9	15.0	284.360	61.10	1.00000E-1	6.00000E-3	.64	.30	.38	.41	2.53
10	15.0	284.348	60.90	1.50000E-1	5.00000E-3	.64	.40	.37	.40	2.78
11	15.0	284.338	60.60	2.00000E-1	5.00000E-3	.64	.44	.37	.38	3.13
12	15.0	284.328	60.20	2.00000E-1	5.00000E-3	.64	.37	.37	.42	2.52
13	15.1	284.060	58.60	5.00000E-2	1.00000E-3	.26	.30	.34	.37	2.29
14	15.1	284.058	58.50	1.50000E-1	2.00000E-3	.26	.34	.33	.31	2.55
15	15.1	284.054	58.20	1.50000E-1	1.50000E-3	.26	.30	.31	.35	2.09
16	15.1	284.051	57.90	1.50000E-1	1.50000E-3	.26	.29	.29	.34	2.05
17	15.0	283.760	59.80	7.50000E-2	1.50000E-3	.64	.34	.40	.32	3.22
18	15.0	283.757	59.65	1.00000E-1	1.50000E-3	.64	.35	.41	.36	2.70
19	15.0	283.754	59.45	1.50000E-1	2.00000E-3	.64	.35	.38	.35	2.42
20	15.0	283.750	59.15	2.00000E-1	2.50000E-3	.64	.37	.37	.37	2.61
21	15.1	283.460	57.60	7.50000E-2	5.00000E-3	.26	.31	.40	.28	2.49
22	15.1	283.450	57.45	7.50000E-2	4.00000E-3	.26	.31	.38	.29	2.26
23	15.1	283.442	57.30	7.50000E-2	3.50000E-3	.26	.30	.38	.33	2.15
24	15.1	283.435	57.15	1.50000E-1	4.00000E-3	.26	.32	.34	.32	2.16

12 050.4		A99 100J 9V		E: 44.236 kN/mm ²
d_1 (mm): 283-286	v_0 (m/s): 31-42	ROBOL 2%	θ_f (mm/s): 0.4	
d_2 (mm): 58-62	q : 33-104-132	Q_f (l/min.mm): 2	a_d (μ m): 50+25	
d_3 (mm): 48-50	V_{sk} (mm ³): 430			
b_d (mm): 15				



17 027.0		A99 100J 9V	E: 44.236 kN/mm ²
d_s (mm): 288-291	v_g (m/s): 32-42	ROBOL 2%	u_g (mm/s): 0.4
d_i (mm): 63-66	q : 90-130	Q_f (l/min.mm): 2	a_f (μ m): 50+25
d_{eq} (mm): 52-55	V_d (mmf): 470		
h_f (mm): 15.1			



12 050.1		A99 60M 8V		E: 63.2 kN/mm ²
d _g (mm): 299	v _s (m/s): 33-44	ROBOL 2%	u _g (mm/s): 0.4	
d _w (mm): 56-58	q: 112-145	Q _T (l/min.mm): 2	a _g (μm): 50+25	
d _g (mm): 47-49	V _g (mm ³): 540			
b _g (mm): 15				

