

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra sklářství a keramiky

ŘEZÁNÍ SKLA NÁSTROJI S PEVNĚ VÁZANÝMI DIAMANTOVÝMI ZRNY

Kandidátská disertační práce

Aspirant: Ing. Josef Sixta

Školitelé: Prof. Ing. dr. techn. František Kotěmíd

Doc. Ing. Oldřich Krejčíř, CSc

Liberec, leden 1979

Obsah

Titulní list	1
Obsah	2
Přehled použitých označení	5
Úvod	9
Stručný přehled práce	10
1. Teoretický rozbor řešené problematiky	12
1.1 Rozbor pochodu řezání skla dianástroji	13
1.1.1 Nástroj - kotoučová pila	13
1.1.2 Obrobek	17
1.1.3 Okolní prostředí	18
1.1.4 Strojní zařízení	20
1.2 Základní otázky kinematiky řezání skla dianástroji	21
1.3 Vzdálenost dvou sousedních diamantových zrn	24
1.4 Ustálení řezných sil	28
2. Výchozí podmínky měření	33
2.1 Kotoučová pila	33
2.2 Obrobek	35
2.3 Chladicí prostředí	37
2.4 Strojní zařízení	39
2.4.1 Požadavky na konstrukci pily	41
2.4.2 Laboratorní pila	41
3. Experimentální část	45
3.1 Volba výstupních veličin	45
3.1.1 Měření řezných sil	45
3.1.2 Stanovení hmotnostního úbytku	50
3.1.3 Stanovení jakosti povrchu obrobku	51
3.2 Volba vstupních veličin	52
3.3 Zajištění podmínek měření	52
3.3.1 Zajištění konstantních technologických podmínek měření	53
3.3.2 Počáteční podmínky měření	53
3.4 Stanovení chyby měření	54

3.5 Rozbor vlivu řezné rychlosti, rychlosti posuvu do řezu, zrnitosti a koncentrace diamantu na proces řezání	58
3.5.1 Naměřené hodnoty	58
3.5.2 Stanovení stupně vlivu jednotlivých faktorů	60
a) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na radiální řeznou sílu	60
b) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na tangenciální řeznou sílu	65
c) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na hmotnostní úbytek	66
3.5.3 Odvození vztahu pro výpočet řezných sil a hmotnostního úbytku	67
a) Tvar rovnice pro výpočet radiální řezné síly	69
b) Tvar rovnice pro výpočet tangenciální řezné síly	71
c) Tvar rovnice pro výpočet hmotnostního úbytku	71
3.6 Rozbor vlivu řezné rychlosti, zrnitosti diamantu, druhu a množství chladiva na proces řezání	73
3.6.1 Naměřené hodnoty	74
3.6.2 Stanovení stupně vlivu jednotlivých faktorů	75
a) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na radiální řeznou sílu	75
b) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na tangenciální řeznou sílu	75
c) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na hmotnostní úbytek	75
3.6.3 Vztah pro výpočet řezných sil a hmotnostního úbytku	79
a) Tvar rovnice pro výpočet radiální řezné síly	79
b) Tvar rovnice pro výpočet tangenciální řezné síly	81

c) Tvar rovnice pro výpočet hmotnostního úbytku	83
3.7 Komplexní rozbor vlivu sledovaných faktorů na proces řezání	85
3.7.1 Vliv sledovaných faktorů na hmotnostní úbytek dlanástroje	88
3.7.2 Vliv sledovaných faktorů na velikosti řezných sil	90
4. Hodnocení výsledků práce	92
4.1 Hodnocení vlivu sledovaných faktorů na řezné síly	92
4.2 Hodnocení vlivu sledovaných faktorů na hmotnostní úbytek dlanástroje	93
4.3 Doporučení pro využití řešené problematiky v praxi	94
4.3.1 Doporučení pro výrobce kotoučových diamantových pil	95
4.3.2 Doporučení pro uživatele kotoučových diamantových pil	96
4.3.3 Doporučení pro konstruktéry strojního zařízení	98
Závěr	100
Seznam použité literatury	101

PŘEHLED POUŽITÝCH OZNAČENÍ

a	- velikost amplitudy čáry mikroreliefu	$[\mu\text{m}]$,
a_t	- hloubka třísky	$[\text{cm}]$,
a_0, a_i	- regresní parametry	,
A	- práce	$[\text{J}]$,
A_0	- koeficient	,
b	- šířka kotoučové pily	$[\text{cm}, \text{mm}]$,
b_0, b_i	- regresní koeficienty transformované rovnice	,
C	- čerpadlo	,
d	- průměr kotoučové pily	$[\text{cm}, \text{mm}]$,
e	- základ přirozeného logaritmu	,
E	- modul pružnosti v tahu	$[\text{N}/\text{cm}^2]$,
f	- plocha kontaktu dianástroje s obrobkem	$[\text{cm}^2]$,
G_N	- hmotnostní úbytek dianástroje	$[\text{g}]$,
G_N^0	- hmotnostní úbytek dianástroje vyčíslený podle upravené rovnice	$[\text{g}]$,
ΔG_N	- hmotnost spotřebované pracovní části dianástroje	$[\text{g}]$,
h_{C1}	- hloubka důlku ve skle C1	$[\text{cm}]$,
h_i	- krok úrovně i-tého faktoru	,
h_0	- hloubka důlku ve skle obecném	$[\text{cm}]$,
H_V	- mikrotvrдость skla podle Vickerse	,
H_{MR}	- tvrdost skla podle Mackenzona	,
i	- index	,
k	- konstanta tenzometru	,
k_1, k_3	- koeficienty úměrnosti	,
K	- koncentrace diamantu v pracovní části dianástroje	$[\%]$,
K_v	- objemová koncentrace diamantu v pracovní části dianástroje	$[\text{crt}/\text{cm}^3]$,
Δl	- délka plochy po křivce kontaktu	$[\text{cm}]$,
l_p	- předpokládaná vzdálenost dvou sousedních pracovních zrn	$[\text{cm}]$,
l_t	- teoretická vzdálenost dvou sousedních zrn	$[\text{cm}]$,
$\frac{\Delta l}{l}$	- poměrné prodloužení	,
L	- délka úseku	$[\text{cm}]$,
m	- počet měření	,

M_o	- ohybový moment	$[Nm]$
n	- otáčky kotoučové pily	$[1/min]$
N	- normální síla	$[N]$
N	- nádrž	
N_d	- zatížení na mezi pevnosti v tlaku	$[N/cm^2]$
N_1	- počet zrn v 1 cm^3 pracovní vrstvy	
p	- hloubka mikroreliefu	$[\mu m]$
P_t	- okamžitá řezná síla	$[N]$
P_o	- počáteční řezná síla	$[N]$
P_∞	- řezná síla po dostatečně dlouhé době	$[N]$
P_N	- normální řezná síla	$[N]$
P_T	- tangenciální řezná síla	$[N]$
ΔP	- rozdíl řezných sil	$[N]$
$\overline{P_P}$	- ustálená radiální řezná síla	$[N]$
$\overline{P_T}$	- ustálená tangenciální řezná síla	$[N]$
P_R^o	- radiální řezná síla vypočtená podle upravené rovnice	$[N]$
P_T^o	- tangenciální řezná síla vypočtená podle upravené rovnice	$[N]$
q	- energetická kapacita řezání	$[J/cm^3]$
Q	- obecná funkce	
r	- stupeň krácení	
R	- elektrický odpor	$[n]$
$\frac{\Delta R}{R}$	- poměrná změna odporu	
R_a	- střední úchylka nerovnosti	$[\mu m]$
R_p	- střední hodnota hloubky mikroreliefu	$[\mu m]$
R_t	- maximální výška nerovnosti	$[\mu m]$
R_K	- odpor kompenzačního tenzometru	$[n]$
R_R	- odpor tenzometru pro měření radiální síly	$[n]$
R_T	- odpor tenzometru pro měření tangenciální síly	$[n]$
s	- směrodatná odchylka	
S	- součet čtverců	
SV	- škrticí ventil	
t	- veličina charakterizující délku pracovního cyklu	$[min]$
$t_{\alpha=0.05}$	- kritická hodnota Studentova rozdělení pro 95%-ní hladinu významnosti	

T	- tečná síla	[N]
T_D	- dilatometrický bod měknutí	[°K]
T_L	- bod měknutí podle Littletona	[°K]
T_T	- teplota transformace	[°K]
T_{FP}	- bod tečení	[°K]
U	- energie napjatosti	[J/cm ³]
v_p	- rychlost posuvu do řezu	[cm/min]
v_r	- obvodová rychlost pily	[cm/min]
v_f	- řezná rychlost	[m/s]
V_1	- objem jednoho zrna	[cm ³]
ΔV_M	- objem odděleného materiálu	[cm ³]
ΔV_N	- objem spotřebované pracovní části dianástroje	[cm ³]
$\bar{x}$	- střední hodnota měřené veličiny	
x_i	- změřená veličina	
x_i^+	- horní úroveň i-tého faktoru	
x_i^-	- dolní úroveň i-tého faktoru	
x_i^*	- transformovaná úroveň i-tého faktoru	
X_i	- úroveň i-tého faktoru před transformací	
$\bar{X}_i$	- základní úroveň i-tého faktoru	
y_i	- nezávisle proměnná	
Y	- regreseční funkce	
$\bar{Z}$	- životnost nástroje	
Z_s	- střední lineární rozměr diamantového zrna	[cm, μ m]
Z_{max}	maximální lineární rozměr diamantového zrna	[cm, μ m]
Z_{min}	minimální lineární rozměr diamantového zrna	[cm, μ m]
α	- úhel normály	[°]
β	- koeficient charakterizující rychlost nárůstu řezné síly	
ε	- hmotnostní koeficient	[cm ³ .mg/%]
η	- zesílení zpětné vazby	
μ_c	- karátová účinnost dianástroje	[cm ³ /crt, ...]
μ_g	- hmotnostní účinnost dianástroje	[g/kg, ...]
μ_v	- objemová účinnost dianástroje	
ν	- stupeň volnosti	
ξ	- poměr řezných sil	
σ	- napětí	[N/cm ²]

9 δ_D - měrná hmotnost diamantu

$\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

σ_{Dd} - dovolené namáhání na mezi pevnosti v tlaku

$\left[\frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \right]$

ω - chybová funkce

ÚVOD

V předložené práci byl proveden rozbor řezání skla nástrojem s pevně vázanými diamantovými zrny. Řezání skla těmito nástroji patří podle posledního průzkumu využívání nástrojů s diamantovými zrny /1/ do jedné z hlavních oblastí použití. Hlavním cílem práce je stanovit vliv základních faktorů ovlivňujících technologii řezání skla, navrhnout laboratorní strojní zařízení, vypracovat metodiku měření, ale hlavně určit optimální technologické podmínky využití kotoučových pil a stanovit základní podklady pro konstrukci strojního zařízení pro řezání skla nástrojem s vázanými diamantovými zrny jak ručně, tak automaticky.

Při řešení zkoumané problematiky bylo využíváno úzké spolupráce s ISM v Kyjevě (Institut svěřetvrdých materiálů Akademie nauk USSR - Výzkumný ústav velmi tvrdých materiálů Akademie věd USSR), včetně osobního styku s výzkumnými pracovníky uvedeného ústavu při služebních cestách v letech 1971 /2/ a 1974 /3/ a tříměsíční studijní stáž v ISM v letech 1972 - 73 /4,5/. Řešení bylo prováděno v rámci státního úkolu C - 55 - 322 - 008 řešeného v letech 1971 - 1975 a v rámci fakultního výzkumného úkolu VŠST - FS - 003 řešeného na katedře sklářství a keramiky Vysoké školy strojní a textilní v Liberci v následujících dvou letech.

Přechod na využití nástrojů s vázanými diamantovými zrny pro řezání skla má v některých případech ekonomicky nepřesvědčivé výsledky. Příčinu těchto výsledků je nutné hledat v neznalosti základní teorie opracování skla vázanými diamantovými zrny. Bez znalostí základů teorie opracování skla tímto nástrojem, bez znalostí vlivu jednotlivých faktorů, se ekonomické výsledky nezlepší. K urychlení určení vlivu alespoň základních faktorů bylo použito několik základních matematicko-statistických metod.

STRUČNÝ PŘEHLED PRÁCE

Předložená kandidátská disertační práce řeší otázky řezání skla nástroji s pevně vázanými diamantovými zrny. Práce je rozdělena na čtyři samostatné kapitoly.

V první kapitole je proveden teoretický rozbor řešené problematiky. Zde je uveden rozbor pochodu řezání skla dianástroji, ve kterém jsou stručně charakterizovány jednotlivé skupiny objektů (podrobněji v /7/), které řezání skla ovlivňují. Dále jsou uvedeny základní otázky kinematiky řezání skla dianástroji se zaměřením na výpočet a průběh velikostí řezných sil. V téže kapitole je proveden, jak teoretický výpočet vzdálenosti dvou sousedních diamantových zrn v pracovní vrstvě dianástroje, tak i výpočet předpokládané vzdálenosti dvou pracovních diamantových zrn. K určení vlivu jednotlivých faktorů na velikosti řezných sil bylo nutné provést vyčíslení tzv. ustálené řezné síly. Touto problematikou se zabývá poslední část první kapitoly.

V druhé kapitole předložené práce jsou vytypovány a specifikovány výchozí podmínky jednotlivých měření. Jednotlivé podmínky jsou sepsány do čtyř základních skupin podle hlavních objektů ovlivňujících proces řezání skla. Zde je věnována větší pozornost strojnímu (laboratornímu) zařízení, na kterém byla prováděna veškerá měření.

Ve třetí kapitole, obsahově nejrozsáhlejší, jsou popsána všechna měření, včetně volby vstupních (nezávisle proměnných) a výstupních (závisle proměnných) veličin. Dále je uveden způsob jak bylo postupováno při zajišťování konstantních podmínek měření a při stanovování chyby měření. V dalších podkapitolách je proveden rozbor vlivu jednotlivých vybraných skupin faktorů na proces řezání, přesněji na velikost řezných sil a hmotnostního úbytku dianástroje. Každá část této kapitoly je provedena tak, aby bylo patrné kvantitativní vyjádření stupně vlivu vybraných faktorů.

V poslední, čtvrté, kapitole předložené práce je provedeno hodnocení výsledků se zřetelem na doporučení předkládaná výrobcům kotoučových diamantových pil na bázi syntrovaného kovového

pojiva, dále na doporučení uživatelům těchto nástrojů a v neposlední řadě na doporučení konstruktérům nových strojních zařízení.

V závěru práce jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

První část práce je věnována teoretickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Druhá část práce je věnována praktickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Třetí část práce je věnována praktickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Čtvrtá část práce je věnována praktickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Pátá část práce je věnována praktickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Šestá část práce je věnována praktickým úvahám o dianástrojích a jejich využití v průmyslu. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Seznam literatury je uveden na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

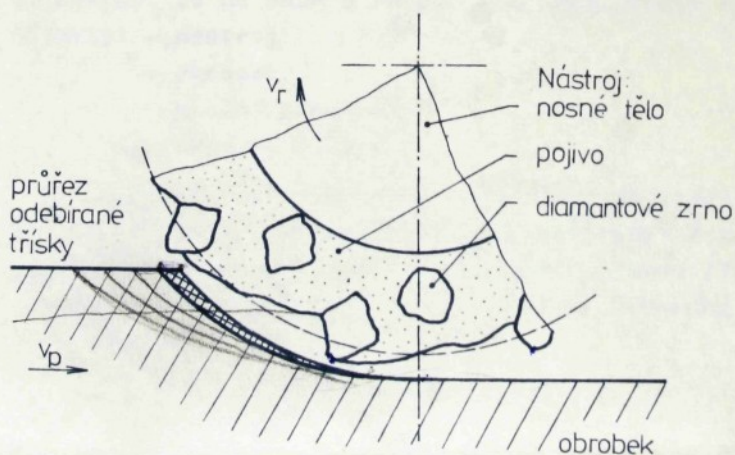
Prílohy jsou uvedeny na konci práce. V této části jsou uvedeny hlavní poznatky, které mohou ovlivnit další výzkum v oblasti využívání dianástrojů při studeném opracování skla ve sklářském průmyslu.

1. TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Využití nástrojů obsahujících přírodní nebo syntetická diamantová zrna (dále jen dianástroje) se ve sklářském průmyslu stále více uplatňuje. Jednou z hlavních oblastí použití dianástrojů je oddělování různých částí skla z celku, tzv. řezání skla. Při využívání dianástrojů, tedy i při řezání, jde vždy o takové technologické operace, které je možné úspěšně řešit jen při znalosti obecných zákonitostí teorie brusného pochodu.

Brusný pochod je charakterizován některými specifickými podmínkami, kterými se liší od jiných druhů obrábění /6/. Většina jich je patrná z uvedeného výčtu a obr. 1:

- nástroj na povrchové přímce nemá souvislý břit,
- mezi tloušťkou a šířkou vrstvy ubírané brusným zrnem není žádná závislost,
- jednotlivá brusná zrna mají nepravidelný tvar a mají zaoblené vrcholy a většinou záporné řezné úhly,
- brusná zrna jsou na pracovní ploše nástroje rozmístěna nepravidelně,
- nástroj pracuje s velkými řeznými rychlostmi a s obrovským počtem brusných zrn na pracovní ploše, takže jednotlivá



Obr. 1 Postupné ubírání třísek jednotlivými zrny

brusná zrna ubírají třísky prakticky okamžitě a brusný nástroj ubere za časovou jednotku velké množství třísek.

Z běžné provozní praxe ještě nevymizel názor, že broušení (hlavně jeho technologie) je ovlivňováno jen brusnou rychlostí, velikostí úběru a druhem nástroje. Tyto názory jsou stále více vyvraceny současným výzkumem, který oprávněně tvrdí, že na brusný pochod má vliv velmi mnoho dalších parametrů.

1.1 Rozbor pochodu řezání skla dianástroji

Výzkum složitých jevů vyskytujících se při řezání skla dianástroji začíná výzkumem objektu a ujasněním kvalitativních příčin vzájemného působení nástroje a opracovávaného materiálu. Je nutné vymezit jednotlivé faktory, které mají na sledovaný proces vliv, vybrat z nich ty nejpodstatnější a stanovit jejich vzájemné kvalitativní závislosti. Závislosti jsou tím hodnotnější, čím jsou jednodušší a čím širší oblast zahrnují.

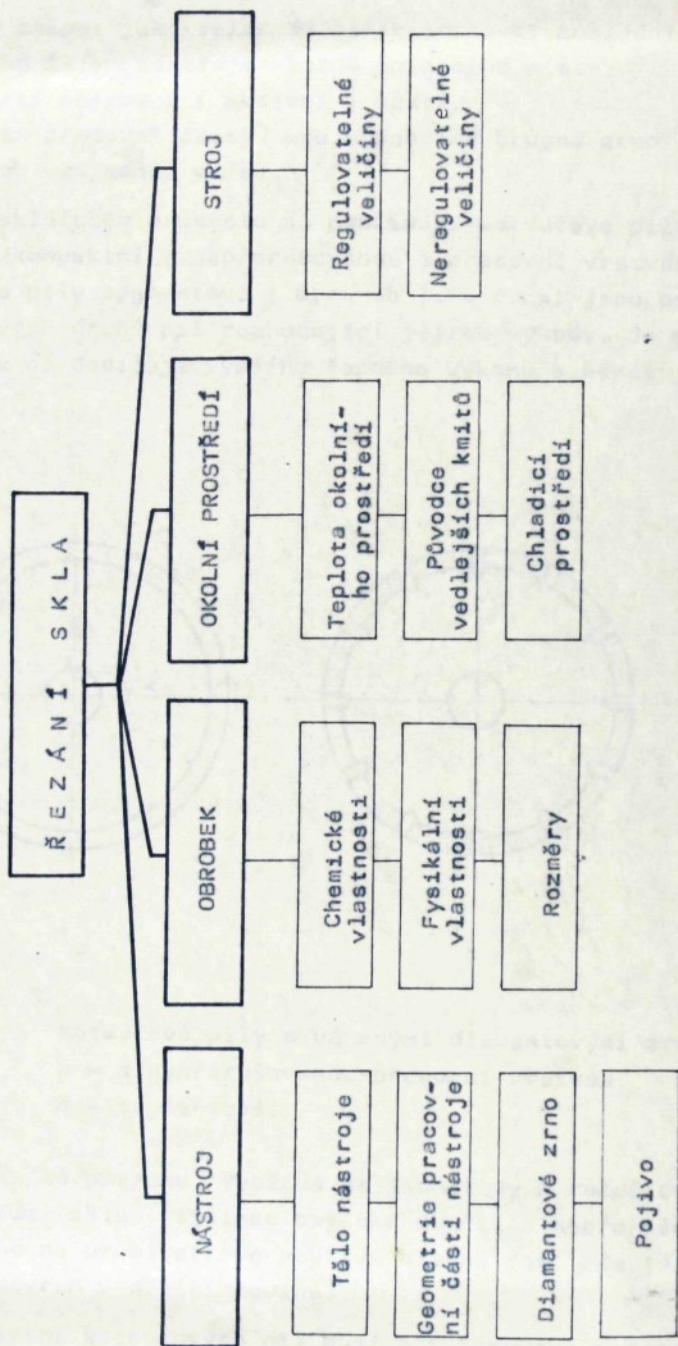
Z podrobného rozboru procesu broušení skla dianástroji, a tedy i řezání skla dianástroji, bylo možné stanovit schema pochodu řezání, které je uvedeno na obr. 2. Z obr. 2 je zřejmé, že na pochod řezání mají vliv čtyři základní objekty: - nástroj,

- obrobek,
- okolní prostředí,
- strojní zařízení.

Rozborem výše uvedených základních objektů se ukázala složitost problematiky řezání skla dianástroji. V této práci se vychází z podrobného rozboru brusného pochodu /7, 8/ a výzkum se omezil na výběr faktorů, které lze v provozní praxi snadno ovlivnit.

1.1.1 Nástroj - kotoučová pila

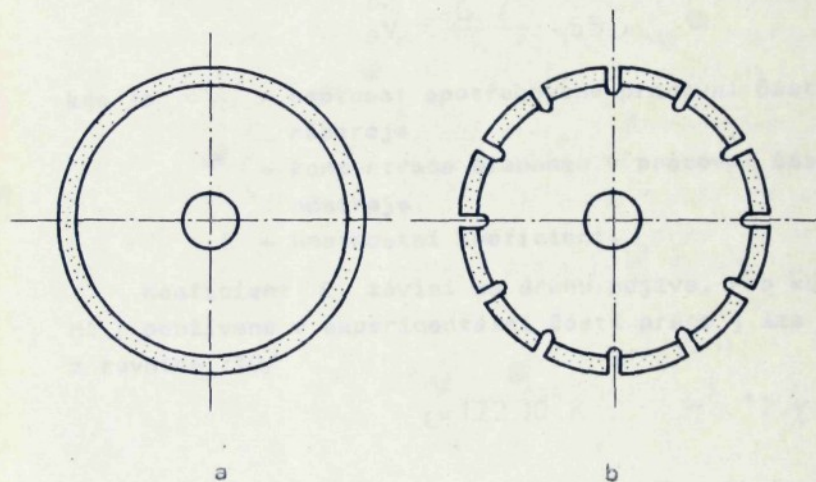
Nejdůležitější místo při rozboru pochodu řezání skla dianástroji zaujímá vlastní nástroj - kotoučová pila. Nástroj



Obr. 2 Schéma pochodu řezání

- je nutné chápat jako celek a charakterizovat základními prvky:
- vlastním tělem nástroje včetně upínacího místa,
 - geometrií pracovní (aktivní) části.
 - složením pracovní části, kde hodnotíme brusné zrna i pojivo a jejich vzájemnou vazbu.

Va sklářském průmyslu se používají kotoučové pily dvojího druhu: s kompaktní (nepřerušovanou) pracovní vrstvou (obr. 3a) nebo pily segmentové (obr. 3b). V praxi jsou pro volbu jednotlivých druhů pil rozhodující jejich výhody. Se segmentovou pilou se docílí vyššího řezného výkonu s horší jakostí



Obr. 3 Kotoučové pily s vázanými diamantovými zrny

a - s nepřerušovanou pracovní vrstvou.

b - segmentové.

opracovávaného povrchu. Využívá se jich tedy k rozdělování velkých bloků skla, většinou optického. Pil s nepřerušovaným povrchem se na druhé straně používá hlavně tam, kde jde o jakostní povrch v dělicí rovině.

Využívání kotoučových pil musí být jednotně hodnoceno.

Lze využít jednotného hodnocení pro všechny dianástroje, tzv. objemovou účinnost dianástroje - μ_V , kterou lze vyjádřit ze vztahu /9/

$$\mu_V = \frac{\Delta V_M}{\Delta V_N}, \quad (1)$$

kde je ΔV_M - objem odděleného (odbroušeného) materiálu,
 ΔV_N - objem spotřebované pracovní části dianástroje.

V některých případech je stanovení jmenovatele rovnice (1) velmi obtížné. Hlavně v laboratorních podmínkách, kdy zkoušky jsou krátkodobého charakteru. K stanovení objemu je ovšem možné použít přepočtu z váhového úbytku pracovní části dianástroje z rovnice

$$\Delta V_N = \frac{\Delta G_N \cdot \varepsilon}{K} \cdot 4,55, \quad (2)$$

$3,5 \text{ g/cm}^3$

kde je ΔG_N - hmotnost spotřebované pracovní části dianástroje,

K - koncentrace diamantu v pracovní části dianástroje,

ε - hmotnostní koeficient.

Koeficient ε , závisí na druhu pojivo. Pro kovové pojivo M1 (používané v experimentální části práce) lze stanovit z rovnice /10/

$$\varepsilon = 1,22 \cdot 10^{-5} \cdot K \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Po dosazení hmotnostního koeficientu ε do rovnice (2) a po úpravě dostáváme velmi jednoduchý vztah pro přepočet

$$\Delta V_N = \Delta G_N \cdot 5,55 \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

V praxi se používají k hodnocení dianástrojů i jiná kritéria, např. :

- μ_G - hmotnostní účinnost dianástroje,
- μ_C - karátová účinnost dianástroje,
- $\bar{Z}$ - životnost dianástroje.

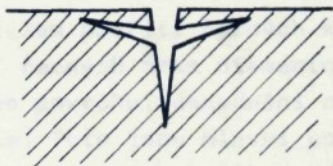
1.1.2 Obrobek

Výrobce skleněného zboží v první řadě zajímá, jaká bude jakost povrchu výrobků při nasazení nového druhu obráběcího nástroje - tedy i při nasazení dianástrojů místo nástrojů klasických.

Studiem fyzikálních vlastností skla, které mohou ovlivňovat proces mechanického opracování při využití dianástrojů, bylo stanoveno, že rozhodující fyzikální vlastností skla je jeho teoretická pevnost /9/. (*teoretická*)

Teoretická pevnost je určena vazebními silami sklo-tvorných atomů. Praktická hodnota, která se nejvíce přibližuje teoretické pevnosti je mikrotvrdoost skla. Mikrotvrdoost skla berou také někteří autoři za základní fyzikální vlastnost, mající vliv na opracování skla dianástroji.

Při broušení skla dianástroji je rozrušováno sklo nejvíce jedním ze čtyř základních efektů, které určil Preston již v roce 1921 /11/. ^{gib}to efektem rypání diamantovým hrotem do povrchu skla. Při tomto působení diamantového hrotu na povrch skla vznikají dvě mikrotrhlínky, přibližně



Obr. 4 Tvar mikrotrhlin vzniklých vlivem rypání skla diamantovým hrotem

na sebe kolmé (obr. 4).

Vlivem vysoké relativní rychlosti mezi dianástrojem a obrobkem a velkého počtu diamantových zrn na povrchu pracovní části nástroje dochází k vytvoření velkého počtu velmi malých mikrotrhlinek, jak na povrchu, tak i v podpovrchové vrstvě.

Mikrotrhlínka směrem do skloviny je v některých případech velmi hluboká, což znesnadňuje chemické leštění.

1.1.3 Okolní prostředí

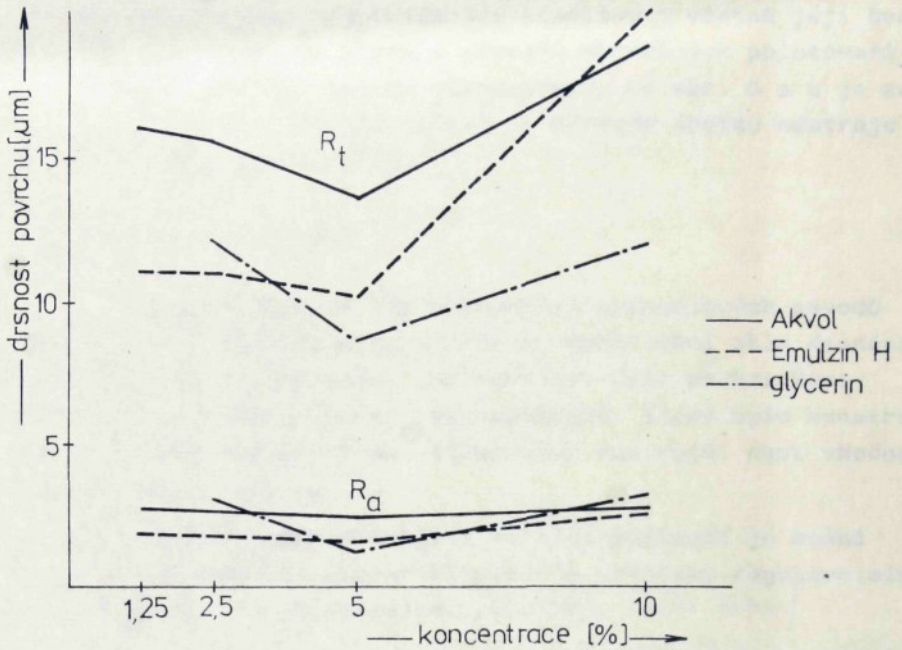
Dalším objektem, který vystupuje v pochodu řezání skla dianástrojem je okolní prostředí. Tato skupina faktorů se pro operaci řezání skla dianástroji oproti broušení nebo leštění skla zužuje jen na vliv chladicího prostředí. Je možné předpokládat, že vedlejší kmity nenabudou tak vysokých hodnot, že by negativně působily na pochod řezání skla dianástroji. Okolní teplota v tomto případě nehraje žádnou roli.

Přítomnost chladicího prostředí je při všeobecném použití dianástrojů nezbytně nutná. Vyplývá to z vlastností materiálu, který je podstatnou, účinnou, složkou nástroje, tedy diamantu. Diamant při zvýšené teplotě (již nad 700°C) podléhá nadměrně oxidaci.

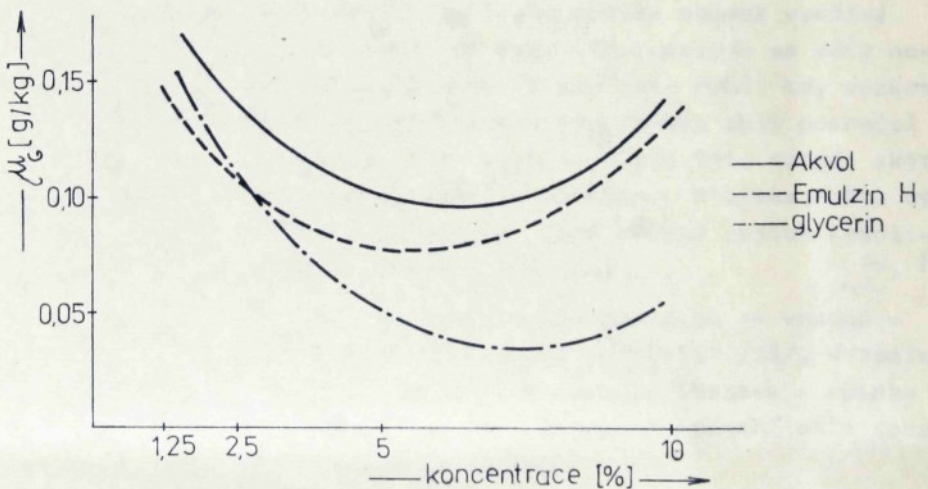
Pojem chladicí prostředí je volen záměrně, poněvadž v současné době jsou prováděny zkoušky chlazení dianástrojů pomocí vzduchu, mlhoviny nebo kapaliny. Při řezání skla dianástroji se výhradně používá chlazení proudem kapaliny nazývané chladicí, nebo lépe, řeznou kapalinou. Řezné kapaliny jsou vedle konstrukce obráběcího stroje a dianástroje jedním z hlavních faktorů, které významně ovlivňují produktivitu a ekonomii opracování /12/. (*lech, Klebe, Hejman*)

Hlavním účelem použití řezných kapalin je zvýšení trvanlivosti břitů (řezných hran diamantových zrn), zlepšení jakosti obráběného povrchu, usnadnění odvodu třísek a snížení spotřeby energie. Toto jsou hlavní požadavky na řezné kapaliny, ale tím není jejich výčet ukončen. Od ideální řezné kapaliny se dále požadují následující vlastnosti : nekorozivost vůči nástroji, vysokou provozní stálost, nízkou biologickou dráždivost, odolnost proti pění, dobrou sedimentační schopnost, pasivitu vůči vrchním nátěrům a těsnícím materiálům, bezpečnost z požárního hlediska, snadnou likvidaci upotřeбенé kapaliny a nízkou cenu.

Vliv několika provozně používaných řezných kapalin byl stanoven při zkouškách broušení optických polotovarů na stroji fy Optibel - MD. Zkoušky byly zaměřeny především na



Obr. 5 Závislost jakosti povrchu na druhu chladicí (řezné) kapaliny



Obr. 6 Závislost měrného úbytku dianástroje na druhu chladicí (řezné) kapaliny

zjištění ekonomicky nejvýhodnější kapaliny (včetně její koncentrace) z hlediska jakosti povrchu obráběných polotovarů a z hlediska měrného úbytku dianástroje. Na obr. 5 a 6 je zachycena závislost jakosti povrchu a měrného úbytku nástroje na druhu řezné kapaliny /12/.

1.1.4 Strojní zařízení

V současné době si již pracovníci průmyslových závodů uvědomují, že strojní zařízení má na opracování skla dianástroji, tedy i na řezání skla, značný vliv. Bylo praktickými zkouškami prokázáno, že strojní zařízení, které bylo konstruováno výhradně pro využívání klasických nástrojů, není vhodné osazovat dianástroji.

Parametry charakterizující strojní zařízení je možné rozdělit do dvou základních skupin, na veličiny regulovatelné a na veličiny neregulovatelné. /13, 14/. *(keta, keta)*

Jednou z rozhodujících veličin, ze skupiny regulovatelných, je způsob zajištění posuvu do řezu /15/. *klon, keta* Existují dva způsoby zajištění posuvu do řezu. První způsob s konstantním tlakem mezi sklem a dianástrojem. Tento způsob je provázen proměnnou rychlostí posuvu. Rychlost úběru se stává funkcí otupení (kvality) nástroje. Druhý způsob naopak využívá konstantní rychlosti posuvu do řezu. Tato metoda se vždy nepovažovala za příliš praktickou. V současné době, kdy výzkum ve vývoji a výrobě dianástrojů pro opracování skla pokročil dopředu, se tato metoda stále více používá. Tato metoda skýtá velké výhody v konstrukci hnacího agregátu. Vřetena mohou být pevně spojena s hnacím agregátem, čímž odpadá jejich komplikované axiální vedení a jejich utěsnění. *upínka, keta*

Pevnou vazbu mezi obrobkem a dianástrojem je vhodné v některém bodě přenosového mechanismu "narušit" /16/. V tomto bodě pak můžeme soustavu stroj - nástroj - obrobek - upínka vhodně "naladit" a odstranit tak nevhodné kmitání celé soustavy a zvyšování úbytku dianástroje.

1.2 Základní otázky kinematiky řezání skla dianástrojem

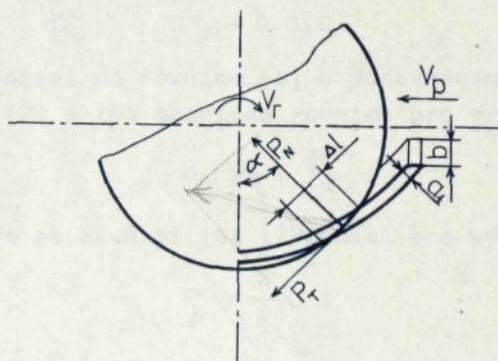
Pro zkoumání kinematiky řezání skla kotoučovou diamantovou pilou je nutné provést několik předpokladů :

- proces řezání kotoučovou pilou je ustálen,
- obrobek je rozměrově stálý a jeho fyzikální i chemické vlastnosti jsou homogenní,
- vliv odbroušeného skla a řezné kapaliny, tzv. šlem, není brán v úvahu,
- rozrušení skla se děje jen vlivem tangenciální síly,
- relativní dráhu diamantového zrna a obrobku uvažujeme jako kruhovou.

Na základě uvedených předpokladů, vznikají v ploše kontaktu dianástroje a obrobku dvě složky řezných sil, viz obr. 7 : P_T - tangenciální řezná síla,

P_N - normální řezná síla

a jsou po celé elementární ploše kontaktu rovnoměrně rozloženy.



Obr. 7 Rozložení sil na kotoučové pile

Jak je patrné z obr. 7 velikost elementární kontaktní plochy lze stanovit z výrazu

$$f = b \Delta l, \quad (5)$$

kde je b - šířka kotoučové pily,

Δl - délka plochy po křivce kontaktu, na které a dostatečnou přesností můžeme konstatovat že hloubka řezu je konstantní.

Řezné síly P_T a P_N jsou mezi sebou vázány vztahem

$$\frac{P_T}{P_N} = \xi, \quad (6)$$

kde je ξ - poměr řezných sil, určený pokusem.

Koeficient ξ za uvedených předpokladů je konstantní pro dané technologické podmínky.

Práce, kterou je nutné vykonat pro odbroušení (rozrušení) skla vlivem tangenciální síly po elementární dráze křivky kontaktu f bude

$$dA = P_T \cdot dl, \quad (7)$$

zavedením tzv. energetické kapacity řezání - q lze práci stanovit z rovnice

$$dA = q \cdot dV_M, \quad (8)$$

kde je dV_M - elementární objem odbroušeného skla.

Z obr. 5 je patrné, že dV_M lze stanovit z rovnice

$$dV_M = b \cdot a_t \cdot dl \quad (9)$$

a po dosazení do rovnice (8) a porovnáním pravých stran rovnice (7) a (8) obdržíme rovnici pro výpočet

$$P_T = q \cdot b \cdot a_t. \quad (10)$$

S ohledem na rovnici (6) i rovnici pro výpočet P_T

$$P_N = \frac{q}{\xi} \cdot b \cdot a_t. \quad (11)$$

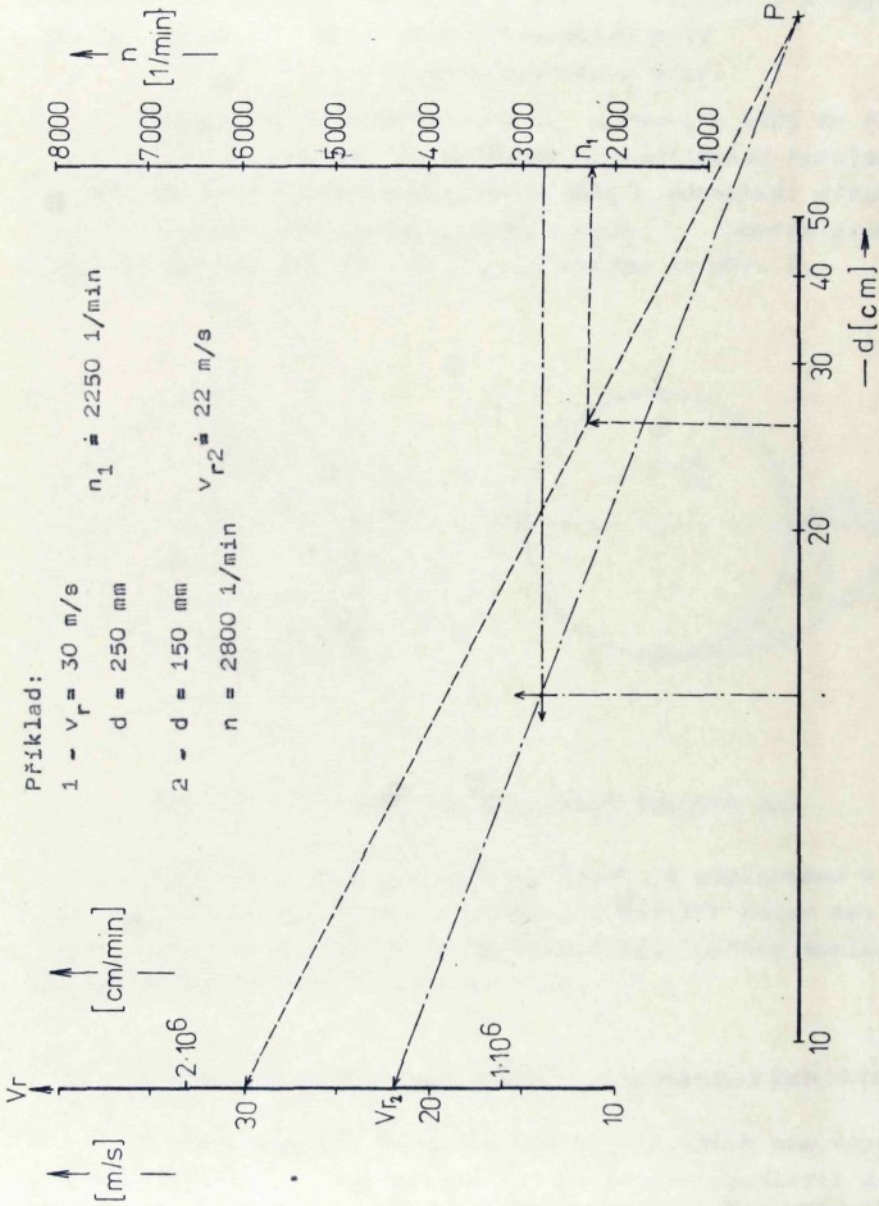
Hloubku třísky odpovídající elementární ploše kontaktu f je možné přibližně stanovit z rovnice

$$a_t = \frac{v_p}{v_r} \cdot a_l \cdot \sin \alpha, \quad (12)$$

kde je v_p - rychlost posuvu do řezu,

v_r - obvodová rychlost pily (řezná rychlost),

α - úhel normály (viz obr. 7).



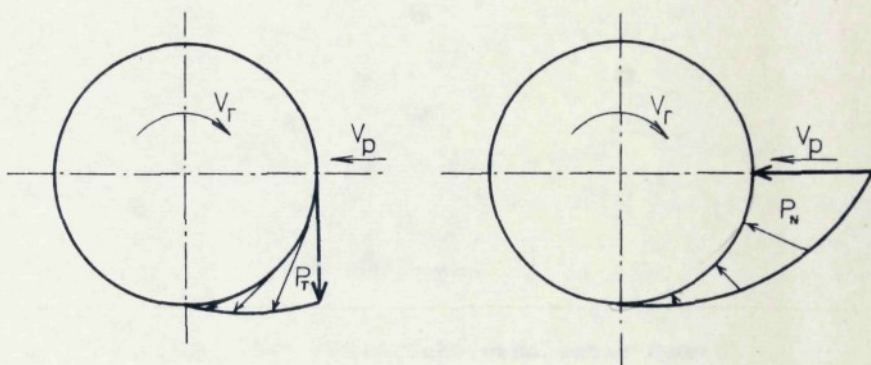
Obr. 8 Nomogram pro stanovení řezné rychlosti pily

S odpovídající přesností určíme v_r pomocí nomogramu uvedeného na obr. 8 a znásobíme koeficientem 6000 tak, abychom řeznou rychlost obdrželi v rozměru cm/min. V nomogramu na obr. 8 je :

d - průměr kotoučové pily,

n - otáčky kotoučové pily.

Po dosazení hloubky třísky a_t z rovnice (12) do rovnic (10) a (11) je patrné, že velikost elementárních řezných sil závisí na poloze kontaktní plochy pily s obrobkem, přesněji na úhlu normály kontaktní plochy s osou y . Charakteristický průběh řezných sil P_T a P_N je uveden na obr. 9.



Obr. 9 Charakteristický průběh řezných sil

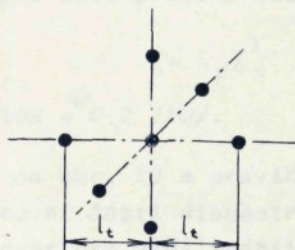
Z tohoto důvodu bylo měření, které je popisováno v experimentální části práce, prováděno v místech kolem osy x proto, aby dvousložkovým dynamometrem byly měřeny maximální hodnoty řezných sil (viz obr. 21).

1.3 Vzdálenost dvou sousedních diamantových zrn

V předcházející kapitole byl uveden vztah pro výpočet hloubky třísky a_t (12) závisící na poměru rychlosti dořezu a řezné rychlosti, dále na délce kontaktu, na které s dostatečnou přesností můžeme konstatovat, že hloubka řezu bude konstantní, a na poloze kontaktu.

K dosazení do rovnice (12) známe okamžitě všechny veličiny vyjma Δl . Tuto délku je možné nahradit, na základě rozboru kinematiky řezání, předpokládanou vzdáleností dvou sousedních diamantových zrn na povrchu pracovní části diamantstroje. K určení této vzdálenosti je nutné vyjít z následujících předpokladů :

- diamantová zrna jsou v pracovní části diamantstroje rozmístěna rovnoměrně a pokud možno pravidelně,
- diamantová zrna jsou stejného rozměru a mají pokud možno i stejný tvar.



Obr. 10 Teoretická vzdálenost dvou sousedních diamantových zrn

Na základě uvedených předpokladů lze konstatovat, že každé diamantové zrno je obklopeno šesti jinými zrn, které jsou od něj vzdálena o stejný rozměr.

Počet zrn v 1 cm^3 pracovní vrstvy lze stanovit z rovnice

$$N_1 = \frac{K_v}{V_1} ; \frac{\rho_2}{\rho_0} \quad (13)$$

kde je K_v - objemová koncentrace diamantu, ct/cm^3
 V_1 - objem jednoho zrna $/17/$. cm^3

Objemovou koncentrací K_v lze stanovit podle vztahu

$$K_v = \frac{4,4 \cdot 0,2 \cdot 10}{\rho_0} \cdot K, \quad (14)$$

$$100\% = 12,5 \text{ ct/cm}^3$$

$$k_1 = 0,125$$

kde ρ je měrná hmotnost diamantu a rovná se přibližně $3,5 \text{ g/cm}^3$. Po dosazení ρ a vyčíslení číselných konstant dostaneme rovnici pro určení objemové koncentrace.

$$K_v = 2,5143 \cdot 10^{-3} \cdot K = 0,0025 \cdot K = k_1 \cdot K \quad (15)$$

Tvar diamantového zrna výrobce diamantového bortu nikdy neudává. Závisí na něm řezné vlastnosti dianastroje. V literatuře se vyskytuje několik odkazů na vztah určující úměru mezi lineárním rozměrem diamantového zrna Z_s a objemem zrna /7, 10, 17/. Z široké škály měření získaných přímo ve výrobě umělého diamantu, z kterého byly vyrobeny experimentální nástroje, byl pro tuto práci zvolen vztah

$$V_1 = k_2 \cdot Z_s^3 \quad (16)$$

$$\text{kde } k_2 = 0,192 = 0,2 / 10/. \quad (17)$$

Ze schema na obr. 10 a pravidelného rozložení diamantových zrn v pracovní části dianastroje lze stanovit rovnici pro výpočet teoretické vzdálenosti dvou sousedních diamantových zrn, které se účastní pracovního pochodu.

$$l_t^3 = \frac{k_2 \cdot Z_s^3}{k_v} = \frac{V_1}{V} \quad l_t = Z_s \sqrt[3]{\frac{k_2}{k_1 \cdot K}} \quad (18)$$

Po dosazení a vyčíslení obdržíme konečný výraz

$$l_t = 4,3 \cdot Z_s \sqrt[3]{\frac{1}{K}} \quad (19)$$

Z provedených měření v ISM bylo stanoveno /4/, že na povrchu pracovní vrstvy dianastroje se pracovního pochodu zúčastňuje v průměru jen 10 až 50 % diamantových zrn. Množství je závislé na technologických podmínkách. Závislost nebyla ještě přesně zpracována. V našem případě k určení předpokládané vzdálenosti dvou sousedních diamantových zrn účastnících se pracovního pochodu se předpokládalo, že pracovního pochodu se účastní 20 až 50 % diamantových zrn v závislosti na velikosti zrna. Předpokládanou vzdálenost dvou pracovních diamantových zrn bylo možno stanovit ze vztahu

$$l_p = k_3 \cdot l_t \quad (20)$$

tab. 1

Zrnitost diamantu / $\mu\text{m}/$		Koncentrace diamantu /%							
$Z_{\text{max}}/Z_{\text{min}}$	Z_s	12,5		25		50		100	
		l_t	l_p	l_t	l_p	l_t	l_p	l_t	l_p
315/250	281	0,0521	0,0620	0,0413	0,0492	0,0328	0,0390	0,0260	0,0310
250/200	223	0,0413	0,0731	0,0328	0,0580	0,0260	0,0461	0,0207	0,0366
200/160	178	0,0338	0,0732	0,0262	0,0581	0,0208	0,0461	0,0165	0,0366
160/125	141	0,0261	0,0677	0,0207	0,0537	0,0165	0,0426	0,0131	0,0308
125/100	112	0,0208	0,0598	0,0165	0,0474	0,0131	0,0376	0,0104	0,0299
100/80	89	0,0165	0,0513	0,0131	0,0407	0,0104	0,0323	0,0082	0,0256
80/63	71	0,0132	0,0433	0,0104	0,0340	0,0083	0,0273	0,0066	0,0216

kde $k_3 = 4 - 10 \cdot Z_s$. (21)

Po dosazení do rovnice (19) a vyčíslení dostáváme rovnici pro stanovení předpokládané vzdálenosti dvou sousedních pracujících zrn

$$l_p = 4,3 \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{K}} \cdot (4 - 10 \cdot Z_s) . \quad (22)$$

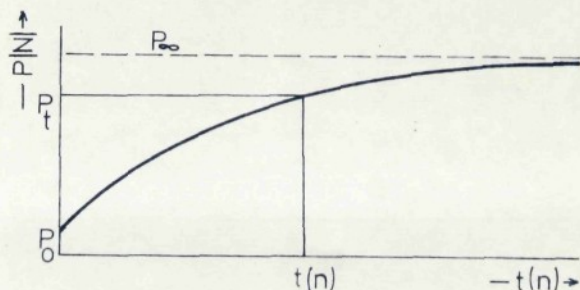
Velikosti l_t a l_p pro běžně užívané kotoučové pily jsou uvedeny v tab. 1.

1.4 Ustálení řezné síly

Jeden z hlavních předpokladů pro stanovení základních otázek kinematiky řezání skla dianástroji je ustálení procesu řezání. Tento předpoklad je nutné zdůraznit na základě provozních i laboratorních zkušeností. Při využívání dianástrojů je známo, že pokles ^{mechanické} pracovní schopnosti dianástroje je závislý na čase /17/. Z měření řezných sil při řezání skla kotoučovou pilou v laboratořích katedry sklářství a keramiky a zpracovaných grafických závislostech řezných sil na počtu řezů (obr. 11) bylo možné konstatovat : ustálení velikosti řezných sil se děje podle exponenciální funkce (viz obr. 12) ve tvaru

$$P_t = P_\infty - (P_\infty - P_0) \cdot e^{\beta t} , \quad (23)$$

kde je t - veličina charakterizující délku pracovního procesu (čas, počet řezů, množství odděleného skla a pod.) ,



Obr. 12 Schematické znázornění nárůstu řezné síly

ZAVISLOST REZNE SÍLY NA POČTU REZU
SERIE ČÍSLO: 22

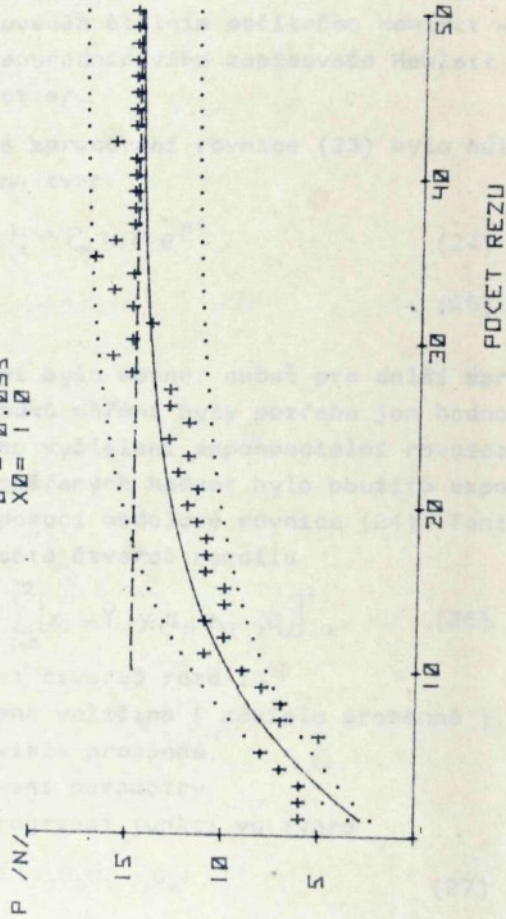
$$P(X) = P + A \cdot E^{\uparrow}(B \cdot (X - X_0))$$

$$P = 14.787$$

$$A = -11.948$$

$$B = -0.095$$

$$X_0 = 1.0$$



Obr. 13 Ukázka záznamu a výpočtu radiální
řezné síly

- P_t - okamžitá řezná síla,
 P_0 - počáteční řezná síla,
 P_∞ - řezná síla po dostatečně dlouhé době po
 "naostření" pily, hodnota tzv. ustálené řezné
 síly.
 β - koeficient charakterizující rychlost nárůstu
 řezné síly.

Grafické provedení záznamu řezných sil změřených při experimentech byl prováděn stolním počítačem Hewlett - Packard typ 9830 A a pomocí souřadnicového zapisovače Hewlett - Packard 9862 A Colcalátor Plotter.

Při matematickém zpracování rovnice (23) bylo nutné tuto rovnici zjednodušit na tvar

$$P_t = P_\infty - \Delta P \cdot e^{\beta t}, \quad (24)$$

$$\text{kde } \Delta P = P_\infty - P_0. \quad (25)$$

Toto zjednodušení bylo možné, neboť pro další zpracování a vyhodnocování výsledků měření byly potřeba jen hodnoty P_∞ a β . K matematickému vyčíslení exponenciální rovnice (24) a tím k zpracování naměřených hodnot bylo použito exponenciální regresní analýzy pomocí modelové rovnice (24). Tento úkol byl řešen metodou součtů čtverců rozdílů

$$S = \sum_{i=0}^m [x_i - Y(y_i, a_1, a_2, \dots, a_k)]^2, \quad (26)$$

kde je S - součet čtverců rozdílů,
 x_i - změřená veličina (závisle proměnná),
 y_i - nezávisle proměnná,
 $a_1, a_2, \dots, a_k$ - regresní parametry
 a symbol Y je pro regresní funkci ve tvaru

$$Y = Y(y_i, a_1, a_2, \dots, a_k). \quad (27)$$

Neznámé parametry $a_1, a_2, \dots, a_k$ určíme z podmínky

$$S \rightarrow S_{\min}. \quad (28)$$

Podmínku minima S jednoznačně vyjadřuje rovnice

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (29)$$

S použitím rovnic (24) a (26) dostaneme kritériální funkci ve tvaru

$$S = \sum_{i=0}^m (P_i - P_{\infty} + \Delta P \cdot e^{\beta t_i})^2 \quad (30)$$

a podmínka určená rovnicí (29) vede k soustavě nelineárních rovnic

$$\frac{\partial S}{\partial P_{\infty}} = -2 \cdot \sum_{i=0}^m (P_i - P_{\infty} + \Delta P \cdot e^{\beta t_i}) = 0, \quad (31)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \Delta P} = -2 \cdot \sum_{i=0}^m (P_i - P_{\infty} + \Delta P \cdot e^{\beta t_i}) \cdot e^{\beta t_i} = 0, \quad (32)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -2 \cdot \sum_{i=0}^m (P_i - P_{\infty} + \Delta P \cdot e^{\beta t_i}) \cdot e^{\beta t_i} \cdot t_i = 0. \quad (33)$$

Z rovnice (31) vypočteme parametr P_{∞} , který dosadíme do rovnic (32) a (33) a vypočteme

$$\Delta P_1(\beta_i) = \frac{\sum_{i=0}^m P_i \cdot e^{\beta t_i} - \frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=1}^m P_i \cdot \sum_{i=0}^m e^{\beta t_i}}{\sum_{i=0}^m e^{2\beta t_i} - \frac{1}{n+1} \left| \sum_{i=0}^m e^{\beta t_i} \right|^2}, \quad (34)$$

$$\Delta P_2(\beta_i) = \frac{\sum_{i=0}^m P_i \cdot t_i \cdot e^{\beta t_i} - \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^m P_i \cdot \sum_{i=0}^m t_i \cdot e^{\beta t_i}}{\sum_{i=0}^m t_i \cdot e^{2\beta t_i} - \frac{1}{n+1} \left(\sum_{i=0}^m e^{\beta t_i} \sum_{i=0}^m t_i \cdot e^{\beta t_i} \right)^2}. \quad (35)$$

Rovnice (34) a (35) představují soustavu dvou lineárních rovnic pro neznámé ΔP a β . Tato soustava byla řešena iteračně. Byla utvořena chybová funkce

$$\omega = \Delta P_1(\beta_i) - \Delta P_2(\beta_i). \quad (36)$$

Pro správné řešení výše uvedené soustavy bylo nutné nalézt takové β , aby chybová funkce (36) dosáhla nulovou hodnotu, resp. aby

$$|\omega_i| \leq \omega_{\max}. \quad (37)$$

K zrychlení zajištění této podmínky bylo zvoleno tzv. zesílení zpětné vazby podle vztahu

$$\eta = - \frac{1}{\left| \frac{\partial \omega}{\partial \beta} \right|_{\beta_i}} \quad (38)$$

a pomocí tohoto zesílení pak určována další hodnota neznámé podle rovnice

$$\beta_{i+1} = \beta_i + \eta \cdot \omega_i \quad (39)$$

Numerické provedení popsané metody by bylo běžnými prostředky velmi zdoluhavé. Byl vypracován program pro řešení celé regresní analýzy pro stolní počítač Hewlett - Packard typ 9830 A, pomocí kterého bylo numerické zpracování velmi zkráceno.

2. VÝCHOZÍ PODMÍNKY MĚŘENÍ

Z provedeného rozboru pochodu řezání skla dianástroji je patrné, že předložená práce nemohla zpracovat danou problematiku v celé šíři. Veličin, které pochod řezání skla dianástroji ovlivňují je velmi mnoho. Z tohoto důvodu bylo nutné z jednotlivých základních objektů vybrat jen několik veličin, které byly v průběhu měření variabilní, ostatní pak byly udržovány na konstantní úrovni.

2.1 Kotoučová pila

K experimentům byla použita sada kotoučových pil rozměrů podle obr. 13. Tato sada byla vyrobena výzkumným závodem ISM v Kyjevě. Kotoučové pily mají označení

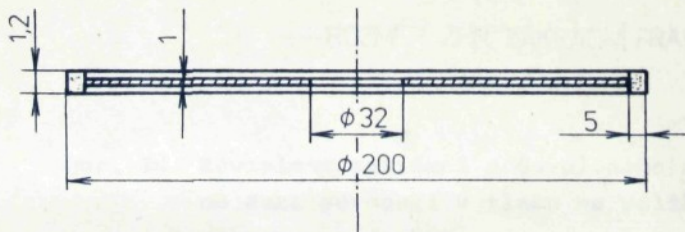
$$\text{AOK } 200 \times 1,2 \times 5 \times 32 \times Z_{\max}/Z_{\min} \times K - \text{M1}.$$

V uvedeném označení pil jsou následující symboly nahrazeny číselnými údaji :

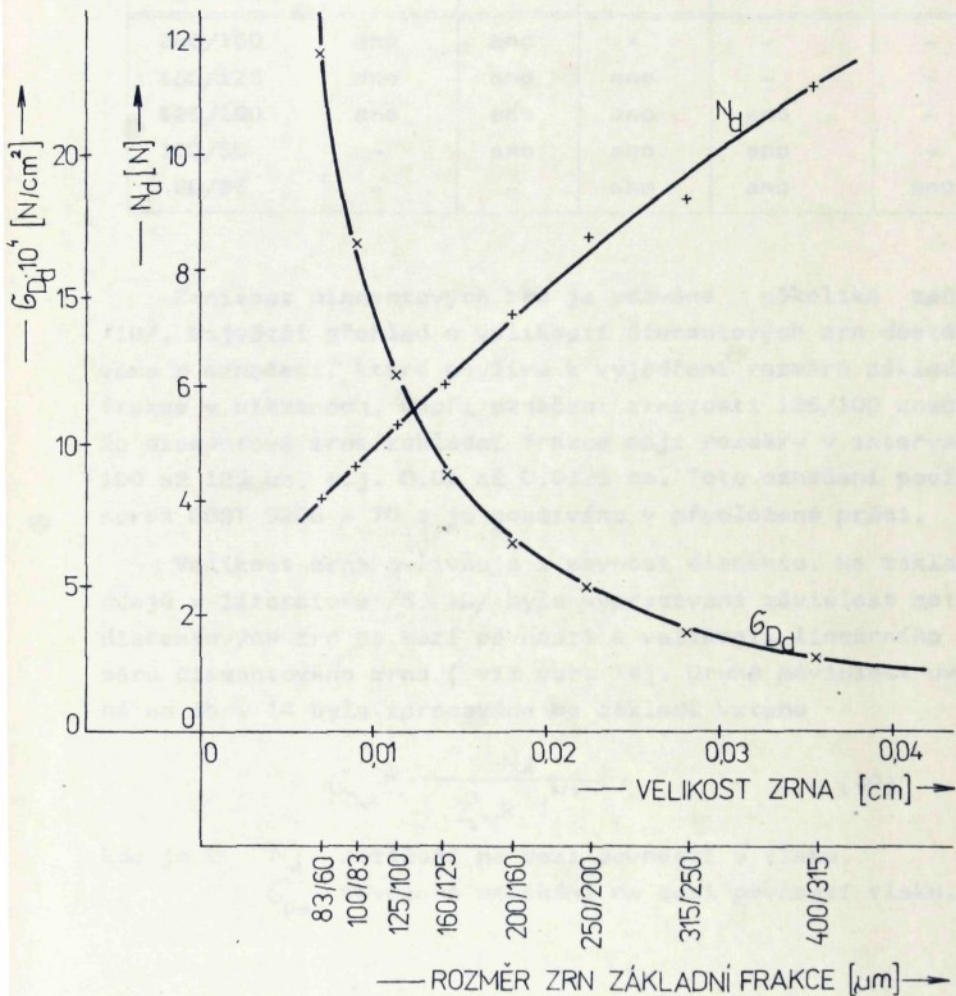
$Z_{\max}/Z_{\min}$ - zrnitostí diamantu,

K - koncentrací diamantových zrn v pracovní části dianástroje.

Poslední označení M1 udává druh pojiva. V našem případě jde o kovové pojivo v základním složení 80 % mědi a 20 % mosazi. Sada pil byla vyrobena s použitím zrn synteticky vyrobeného diamantu značky ACB v pěti různých zrnitostech i koncentracích (viz tab. 2).



Obr. 13 Rozměrové hodnoty experimentálních pil



Obr. 14 Závislost zatížení a dovoleného namáhání na mezi pevnosti v tlaku na velikosti zrn diamantu typu ACB

tab. 2

Zrnitost $Z_{\max}/Z_{\min}$	Koncentrace - K [%]				
	100	50	25	12,5	6,3
200/160	ano	ano	-	-	-
160/125	ano	ano	ano	-	-
125/100	ano	ano	ano	ano	-
100/80	-	ano	ano	ano	-
80/63	-	-	ano	ano	ano

Zrnitost diamantových zrn je udávána několika způsoby /18/. Největší přehled o velikosti diamantových zrn dostáváme z označení, které používá k vyjádření rozměrů základní frakce v mikronech, např. označení zrnitosti 125/100 značí, že diamantová zrna základní frakce mají rozměry v intervalu 100 až 125 μm , t.j. 0,01 až 0,0125 cm. Toto označení používá norma GOST 9206 - 70 a je používáno v předložené práci.

Velikost zrna ovlivňuje i pevnost diamantu. Na základě údajů v literatuře /5, 10/ byla vypracována závislost zatížení diamantových zrn na mezi pevnosti a velikosti lineárního rozměru diamantového zrna (viz obr. 14). Druhá závislost uvedená na obr. 14 byla zpracována na základě vztahu

$$G_{Dd} = \frac{N_d}{(Z^3 \cdot k_2)^{1/3}}, \quad (40)$$

kde je N_d - zatížení na mezi pevnosti v tlaku,
 G_{Dd} - dovolené namáhání na mezi pevnosti tlaku.

2.2 Obrobek

Při hodnocení vlivu opracovávaného výrobku na proces řezání skla dianastroji je nutné brát v úvahu jeho chemické a fyzikální vlastnosti a jeho vlastní velikost i tvar.

U chemických vlastností se jedná v podstatě o chemické složení opracovávaného skla, které je přirozeně ve velmi úzkém vztahu k jeho fyzikálním vlastnostem. Jelikož při úběru

tab. 3

sklo	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	PbO	CaO	MgO	B ₂ O ₃	SB ₂ O ₃	CeO ₂	TiO ₂
C1	73,3	5,8	12,0	6,3	2,1	1,5	0,8	0,2	-	-
Róza	42,2	-	5,7	48,7	-	-	1,4	2,0	-	-
Jonquil	68,0	12,8	5,1	-	4,9	-	1,2	-	2,0	6,0

tab. 4

sklo	ρ	T _T	T _D	T _L	T _{FP}	H _{MIR}	H _V
C1	2,51	738	788	948	1166	1,000	4836
Róza	3,80	703	748	858	1043	0,903	4415
Jonquil	2,57	813	853	986	1146	1,066	5834

materiálu během řezání nedochází k chemickým pochodům, lze vlivy složení skla charakterizovat fyzikálními vlastnostmi, případně jejich změnou, nebo změnou chemického složení mimo proces obrábění.

K měření bylo používáno skleněných polotvarů o rozměrech 60 x 60 x 20 mm vyrobených lisováním z bižuterních sklovin označovaných : C1,

Róza,

Jonquil.

Označení skel a jejich složení je uvedeno v tab. 3 a některé fyzikální vlastnosti používaných skel jsou uvedeny v tab. 4. Z fyzikálních vlastností jsou uvedeny jen ty, u kterých se dala předpokládat souvislost s procesem řezání skla dianástroji. Dále v tab. 4 jsou uvedeny dvě hodnoty tvrdosti. Relativní tvrdost - H_{MR} - stanovená metodou tryskání brusného zrna proti povrchu skla, t.j. zkouškou podle Mackenzona /17/. Relativní tvrdost skla byla pak definována podle vztahu

$$H_{MR} = \frac{h_{c1}}{h_o}, \quad (41)$$

kde je h_{c1} - hloubka důlku ve skle C1,
 h_o - hloubka důlku ve skle obecném.

Další uvedenou tvrdostí je mikrotvrdost podle Vickerse stanovená zatížením do 2 N.

2.3 Chladicí prostředí

V rozboru procesu řezání skla dianástroji bylo konstatováno, že tuto operaci výraznou měrou ovlivňuje ze skupiny okolního prostředí jen chladicí prostředí.

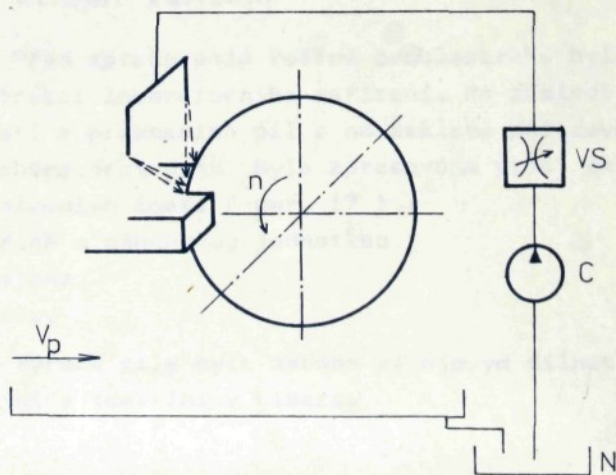
Při řezání skla dianástroji se většinou používala jako řezná kapalina voda. V současné době, t.j. po rozšíření tohoto způsobu oddělování skleněných částí, se začíná používat i jiných řezných kapalin. Nevýhodou využívání jiných řezných kapalin než vody je instalace uzavřeného okruhu dodávky řezné kapaliny.

Při měření v experimentální části práce bylo použito jako řezných kapalin :

- vody,
- emulzinu H v 5 % ředění s vodou,
- glassgrindtu v 2,5 % ředění s vodou.

Emulzin H byl zvolen na základě měření provedených v práci /12/. Jedná se o emulgační olej, který tvoří s vodou emulzi. Ve srovnání s vodními roztoky mají tyto emulze zhruba stejné tepelné hodnoty a tedy i vysoký chladicí účinek. Poskytují však současně vyšší ochranu proti korozi a mají již určitou mazací schopnost. Velikost poměru chladicího a mazacího účinku, ale i velikost ochranných schopností je dána koncentrací emulze, t.j. obsahem olejové fáze. Se zvyšováním koncentrace klesá chladicí účinek, ale roste mazací účinek a smáčecí schopnost i ochranná schopnost proti vzniku koroze.

Dále bylo použito řezné kapaliny glassgrindt 960. Tato řezná kapalina je výrobkem fy Haughton a dováží se do ČSSR z Německé spolkové republiky. Tuto kapalinu používá několik sklářských závodů v ČSSR.



Obr. 15 Schema rozvodu řezné kapaliny

SV - škrťací ventil,

C - čerpadlo,

N - nádrž

K dodávce řezných kapalin do místa styku dianastroje se sklem bylo použito běžného čerpadla (zajišťující dodávku řezné kapaliny při opracování kovů) se škrcením průtočného množství na výstupu. Vlastní rozvod řezné kapaliny byl proveden dvěma tryskami. Trysky byly směřovány přímo na pracovní část diapily. Schema rozvodu je uvedeno na obr. 15, vlastní provedení v činnosti je patrné z obr. 16.



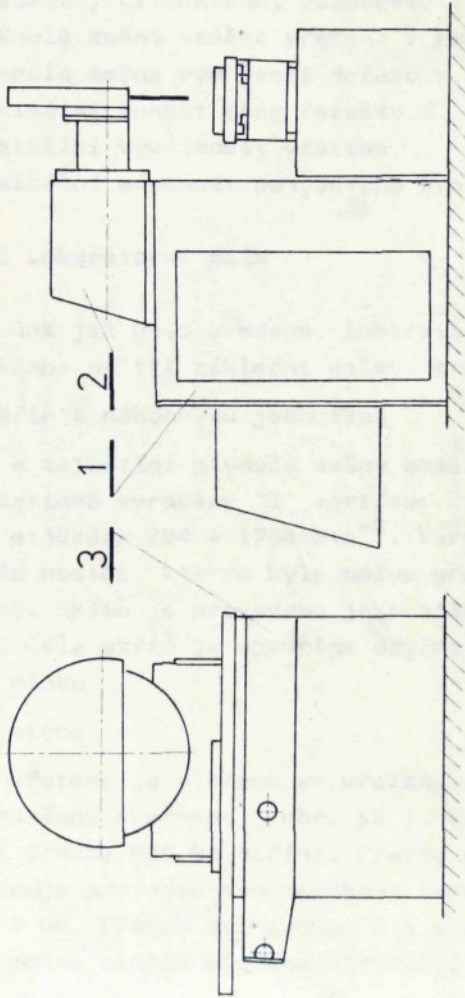
Obr. 16 Činnost chladicích trysek

2.4 Strojní zařízení

Před zpracováním řešené problematiky bylo nutné provést konstrukci laboratorního zařízení. Na základě získaných zkušeností z provozních pil a na základě požadavků, kladených na laboratorní pilu, byla zpracována pila, skládající se ze tří hlavních částí (obr. 17) :

- skříně s náhonovou jednotkou,
- vřetena,
- stolu.

Výroba pily byla zadána vývojovým dílnám Vysoké školy strojní a textilní v Liberci.



Obr. 17 Schema laboratorní pily

- 1 - skříň s náhonovou jednotkou,
- 2 - vřeteno,
- 3 - pohybový stůl.

2.4.1 Požadavky na konstrukci pily

Zkonstruované a vyrobené laboratorní pily se používalo k zajištění řezných podmínek pro řezání skla dianástroji. Dále bylo možné ji použít k testování různých diapiel o průměrech 200 - 400 mm. Z těchto důvodů byly kladeny na vlastní konstrukci následující základní požadavky :

- plynulá změna otáček vřetena v rozmezí $500 - 4000 \text{ min}^{-1}$,
- plynulá změna rychlosti dořezu v rozmezí $0,01 - 4 \text{ m/min}$,
- maximální tuhost rámu řezačky,
- maximální vyváženost vřetena,
- maximální přesnost pohybového stolu.

2.4.2 Laboratorní pila

Jak již bylo uvedeno, laboratorní pila byla konstrukčně rozdělena na tři základní celky, které tvoří :

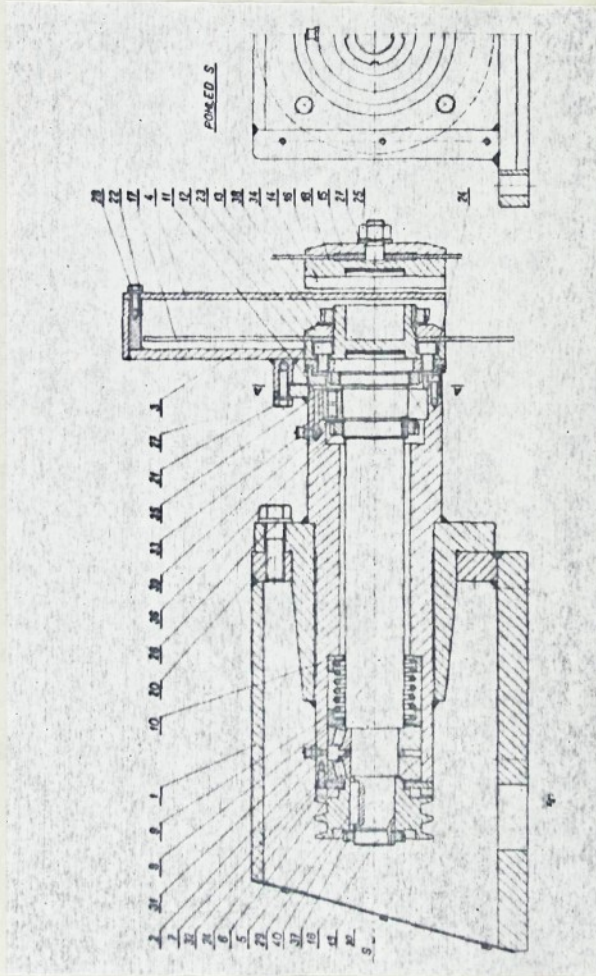
a) skříň s náhonovou jednotkou

k zajištění plynulé změny otáček kotoučové pily byl zvolen seriově vyráběný "Z" variátor typu 12.114.10 o výstupních otáčkách $294 - 1764 \text{ min}^{-1}$. Variátor byl uložen na posuvném nosiči, kterým bylo možné provádět napínání hnacích řemenů. Skříň je provedena jako silnostěnný svařenec s dvěma výky. Celá skříň je upevněna čtyřmi šrouby M14 k základovému bloku

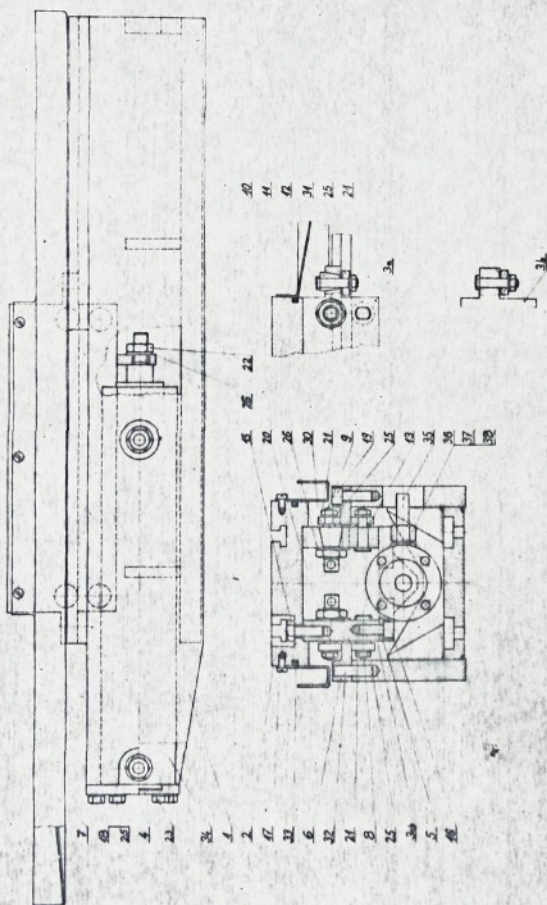
b) vřeteno

vřeteno je uloženo ve vřeteníku, který je proveden jako silnostěnný svařenec (obr. 18). Vřeteník je připevněn šesti šrouby M16 ke skřini. Převod mezi variátorem a vlastním vřetenem je proveden dvojnásobnou řemenicí klínovými řemeny $13 \times 8 \text{ mm}$. Převod byl zvolen $2,5 : 1$, čímž je zaručena plynulá změna otáček vřetena v rozmezí $735 - 4410 \text{ min}^{-1}$.

Uložení vřetena bylo konzultováno v technickém konzultačním středisku Výzkumného ústavu valivých ložisek v Praze. Uložení bylo shledáno vyhovujícím a byla doporučena ložiska výrobní přesnosti P6. Použitím těchto ložisek bylo docíleno vhodného uložení vřetena s klidným chodem.



Obr. 18 Řez vřetenem laboratorní pily



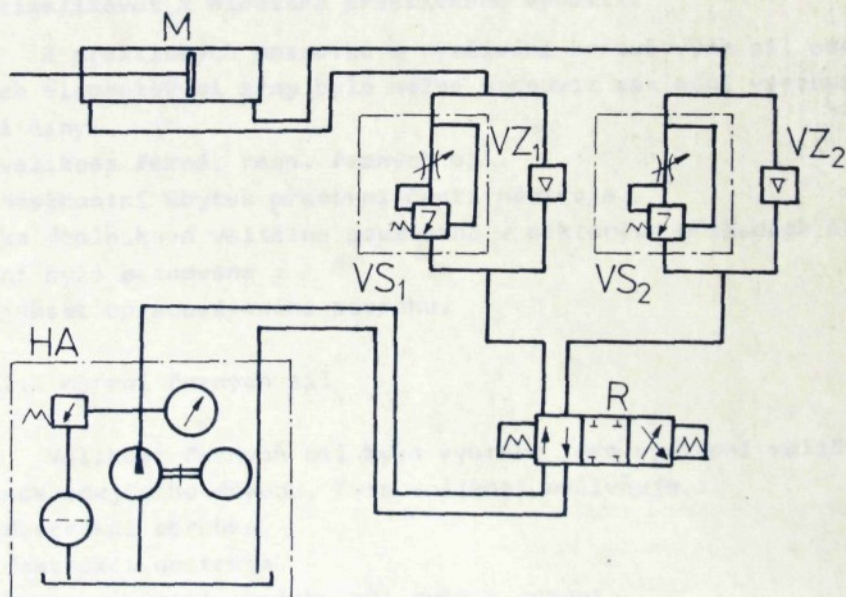
Obr. 19 Pohybový st01

Upínání kotoučové pily je provedeno s ohledem na různé pily (různé upínací otvory), na výměnné trny.

c) stůl

k zajištění přesného měření dynamických poměrů při řezání skla dianastroji byla zvolena konstrukce samostatně umístěného stolu. Stůl byl umístěn na samostatný základový blok. Toto uspořádání zaručuje nepřenos kmitů z náhonové jednotky na stůl a dále na měřicí čidla.

Stůl byl konstruován s ohledem na dynamické měření s vymezováním vůlí vodicích kladek ve dvou rovinnách (obr. 19). Pohyb stolu je realizován hydraulickým válcem JHVJ 50/250. Hydraulický válec je ovládán obvodem (obr. 20) s řízením rychlosti pomocí škrcení.



Obr. 20 Schema hydraulického obvodu

- M - hydraulický přímočarý motor,
- VZ - zpětný ventil,
- VS - škrticí ventil se stabilizací,
- R - čtyřcestný třípolohový rozvaděč,
- HA - hydraulický agregát

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

K objasnění problematiky řezání skla dianástroji bylo nutné provést řadu měření. Veškerá měření probíhala v prostorách a za použití přístrojového parku katedry sklářství a keramiky Vysoké školy strojní a textilní v Liberci.

3.1 Volba výstupních veličin

Výstupní veličiny je nutné volit tak, aby byly dobře měřitelné, jejich velikost se dala zaznamenávat (nejlépe průběžně) a dávaly největší obraz o sledované problematice. Na základě těchto znalostí, hlavně pak průběhu jejich změn, je možné provádět objektivní hodnocení uskutečněných měření. Sledovaný proces, v našem případě řezání skla dianástroji, optimalizovat z hlediska praktického využití.

Z praktických poznatků o využívání kotoučových pil osazených diamantovými zrny bylo možné stanovit základní výstupní veličiny:

- velikost řezné, resp. řezných sil,
- hmotnostní úbytek pracovní části nástroje.

Jako doplňková veličina používaná v některých případech měření byla stanovena :

- jakost opracovávaného povrchu.

3.1.1 Měření řezných sil

Velikost řezných sil byla vybrána jako výstupní veličina z následujícího důvodu. Tato velikost ovlivňuje :

- destrukci obrobku,
- destrukci nástroje,
- pracovní úsilí obsluhy při ručním řezání,
- konstrukci strojního zařízení.

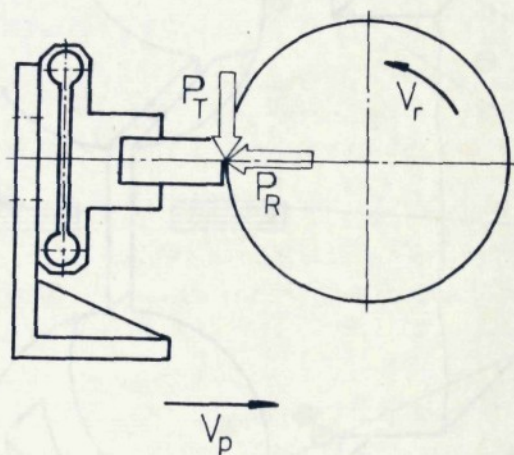
Ze základních otázek kinematiky řezání skla dianástroji bylo stanoveno, že rozrušení skla vzniká vlivem tečné síly P_T .

→ je nadle předpoklad

Standardní průběh velikostí sil byl uveden na obr. 7. Z důvodů proměnné velikosti řezných sil v závislosti na poloze kontaktu bylo zvoleno měření sil v místě maximálních hodnot (obr. 21). Z běžných konstrukčních zvyklostí byla normální řezná síla označována v následujících částech práce jako síla radiální P_R .

K měření těchto dvou navzájem kolmých sil byl zvolen dvousložkový dynamometr, který k zaručení správnosti měření musel splňovat základní požadavky :

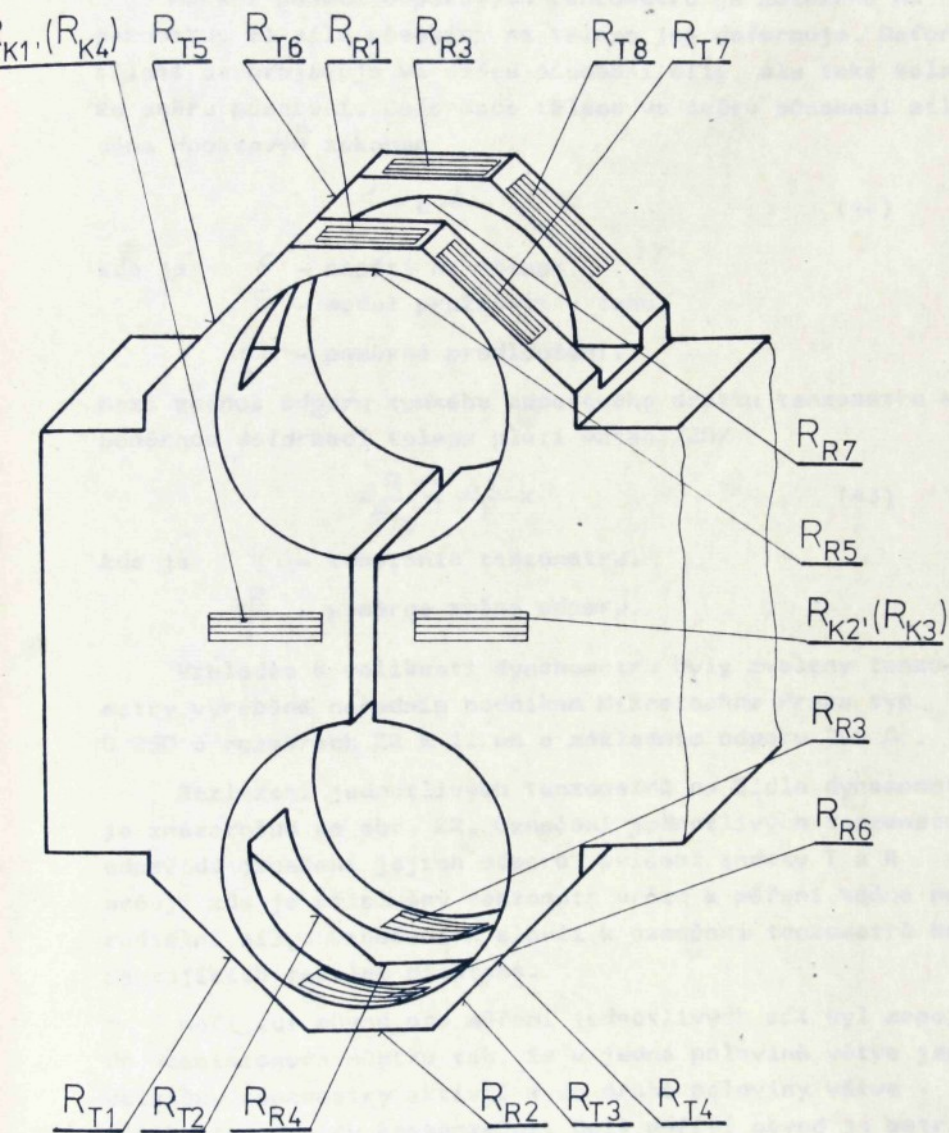
- snímání obou sil na jednom tělese (zaručení objektivnosti měření),



Obr. 21 Schema měření řezných sil

- jednotlivé snímané silové složky se navzájem nesmí ovlivňovat,
- zajistit dostatečnou tuhost, přičemž v místech měření deformace dynamometru musí docházet k dostatečným relativním prodloužením (zaručení vhodné citlivosti měření).

Jako snímače deformací byly zvoleny, vzhledem k provozním podmínkám, odporové tenzometry. Tvar dynamometru a rozmístění tenzometrů je patrné z obr. 22 /19/.



Obr. 22 Tvar čidla dynamometru

Měření pomocí odporových tenzometrů je založeno na poznatku, že síla působící na těleso jej deformuje. Deformace tělesa se projevuje ve směru působení síly, ale také kolmo ke směru působení. Deformace tělesa ve směru působení síly je dána Hookeovým zákonem

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} , \quad (42)$$

kde je σ - napětí na tělese,

E - modul pružnosti v tahu,

$\frac{\Delta l}{l}$ - poměrné prodloužení.

Mezi změnou odporu tenkého odporového drátku tenzometru a poměrnou deformací tělesa platí vztah /20/

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \cdot k , \quad (43)$$

kde je k - konstanta tenzometru,

$\frac{\Delta R}{R}$ - poměrná změna odporu.

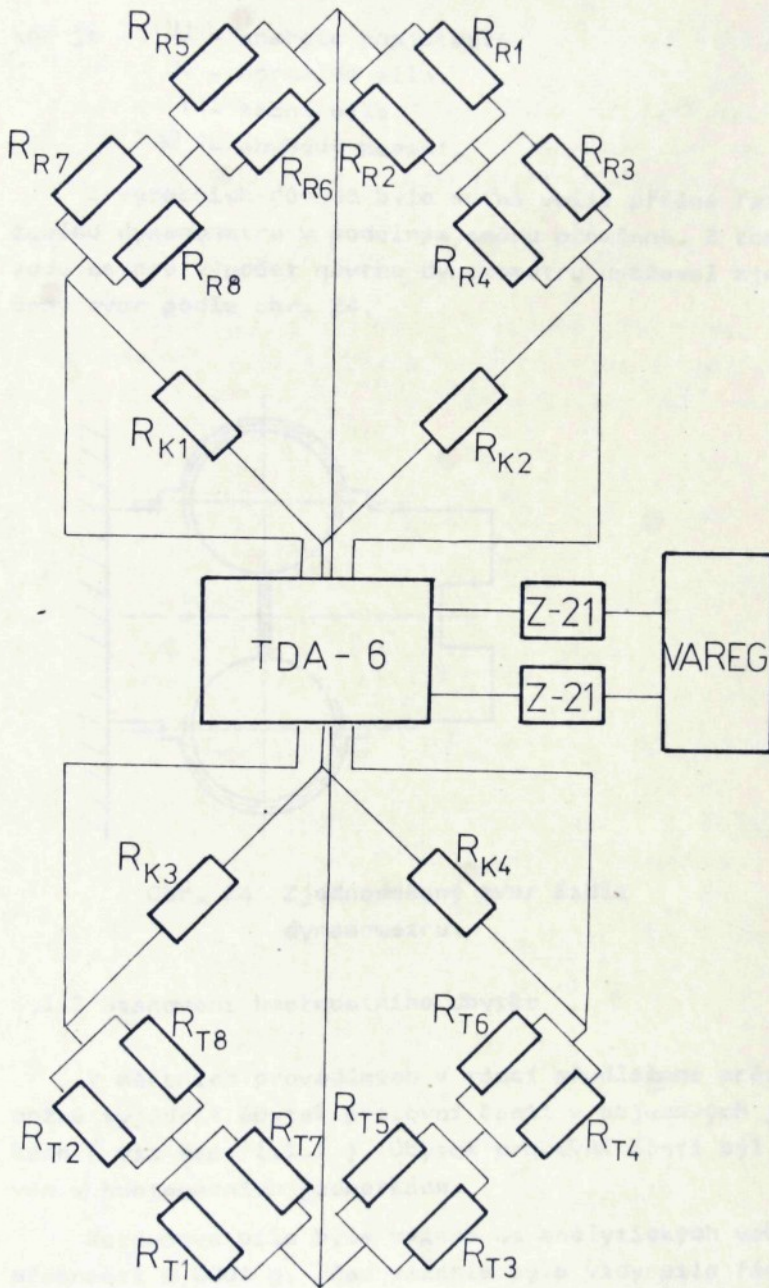
Vzhledem k velikosti dynamometru byly zvoleny tenzometry vyráběné národním podnikem Mikrotechna Praha typ D 250 o rozměrech 22 x 11 mm a základním odporu 250 Ω .

Rozložení jednotlivých tenzometrů na čidle dynamometru je znázorněno na obr. 22. Označení jednotlivých tenzometrů odpovídá označení jejich odporů, přičemž indexy T a R určují zda je příslušný tenzometr určen k měření tečné nebo radiální síly. Označení K slouží k označení tenzometrů kompenzujících tepelné dilatace.

Měřicí obvod pro měření jednotlivých sil byl zapojen do Wheatstonova můstku tak, že v jedné polovině větve jsou umístěny tenzometry aktivní a do druhé poloviny větve můstku tenzometry kompenzační. Celý měřicí obvod je patrný z obr. 23.

Při výpočtu čidla dynamometru bylo použito deformačních podmínek plynoucích z Castiliánovy věty

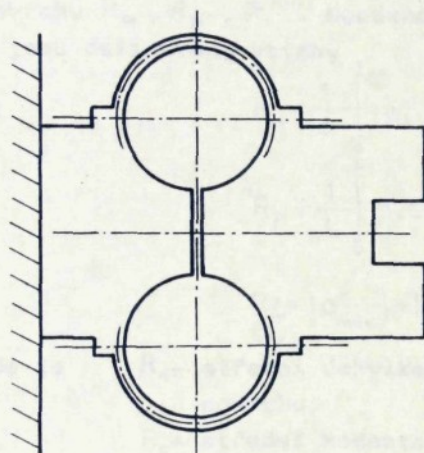
$$\frac{\partial U}{\partial N} = 0 , \quad \frac{\partial U}{\partial T} = 0 , \quad \frac{\partial U}{\partial M_0} = 0 , \quad (44 - 46)$$



Obr. 23 Schema měřicího obvodu

kde je U - energie napjatosti,
 N - normální síla,
 T - tečná síla,
 M_o - ohybový moment.

Z výrobních důvodů bylo nutné volit příčné řezy navrženého dynamometru v podélném směru proměnné. Z tohoto důvodu se pro výpočet návrhu dynamometru uvažoval zjednodušený tvar podle obr. 24.



Obr. 24 Zjednodušený tvar čidla dynamometru

3.1.2 Stanovení hmotnostního úbytku

V měřeních prováděných v rámci předložené práce nebylo možné vyjádřit úbytek pracovní části v objemových jednotkách (viz kap. 1.1.1). Úbytek pracovní části byl stanovován v hmotnostních jednotkách.

Kotoučová pila byla vážena na analytických vahách s přesností 0,0001 g. Před vážením byla vždy pila řádně očištěna a sušena po dobu 30 minut při teplotě 50°C. Tímto způsobem mělo dojít k odstranění vody nasáté do pórů pojiva.

Úbytek vyjádřený v hmotnostních jednotkách bylo možné použít pro další hodnocení procesů řezání i když diamantová

zrna byla v pracovní části nástroje vázána pojivem kovovým. Toto pojivo nepodléhalo korozi. Také nosné tělo nástroje bylo potaženo tenkou vrstvou nekorodujícího materiálu. Tímto způsobem bylo zajištěno, že hmotnostní rozdíly zjištěné vážením byly vyvolány úbytkem pracovní části nástroje.

3.1.3 Stanovení jakosti povrchu obrobku

Hodnocení jakosti povrchu se provádí podle běžných technických zvyklostí profilometrickými veličinami drsnosti povrchu R_a , R_p , R_t . Uvedené veličiny mají rozměr délky a jsou definovány vztahy

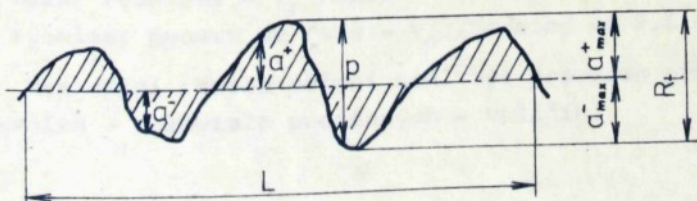
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |a| \cdot dL, \quad (47)$$

$$R_p = \frac{1}{L} \int_0^L p \cdot dL, \quad (48)$$

$$R_t = |a_{\max}^+| + |a_{\max}^-|, \quad (49)$$

kde je

- R_a - střední úchylka nerovnosti od střední čáry povrchu,
- R_p - střední hodnota hloubky mikroreliefu měřená od maximální pozitivní výchylky,
- R_t - maximální výška nerovností,
- L - délka úseku po němž bylo prováděno měření,



Obr. 25 Schematické znázornění povrchu obrobku

- α - velikost amplitudy čáry mikroreliefu,
 p - hloubka mikroreliefu.

Jednotlivé parametry pro stanovení profilometrických veličin jsou patrné z obr. 25. V případě, že bylo vhodné použít doplňkové výstupní veličiny k hodnocení sledovaného procesu řezání, bylo použito hodnot R_a , R_t . Měření povrchu obrobku bylo prováděno ve Výzkumném ústavu skla a bižuterie v Jablonci nad Nisou na zařízení Hommel - Tester (měření a vyhodnocení odpovídá normě DIN 4768).

3.2 Volba vstupních veličin

Na základě provozních zkušeností byl proveden výběr vstupních - nezávisle proměnných veličin. V této kapitole jsou uvedeny vstupní veličiny použité při všech měřeních již bez odůvodnění jejich volby :

- a) nástroj :
koncentrace - $K \text{ } \%/ \text{ } - \text{ od } 12,5 \text{ až do } 100$
zrnitost - $Z_{\max}/Z_{\min} \text{ } \mu\text{m}/ - 200/160 \text{ do } 80/63$
- b) obrobek :
druh skla - mikrotvrdość - různé složení skla
- c) chladicí prostředí :
druh řezné kapaliny - voda, emulze vody a emulzinu H,
emulze vody a Glassgrindtu 960
množství řezné kapaliny - $L_k \text{ } \text{l}/\text{min}/ - \text{ od } 6,5 \text{ do } 13,0$
- d) strojní zařízení :
řezná rychlost - $V_f \text{ } \text{m}/\text{s}/ - \text{ od } 20 \text{ až do } 45$
rychlost posuvu do řezu - $V_p \text{ } \text{cm}/\text{min}/ \text{ od } 2,5 \text{ do } 10$
Maximální rozsah měření mohl být proveden pro sedm vstupních - nezávisle proměnných - veličin.

3.3 Počáteční podmínky měření

Každá serie měření musela probíhat za přesně definovaných technologických podmínek tak, aby jednotlivá měření se dala zopakovat. Během měření bylo nutné udržovat všechny

technologické podmínky na konstantní úrovni. Jednou ze závažných podmínek reprodukovatelnosti bylo uvedení kotoučové pily do tzv. počátečních podmínek.

3.3.1 Zajištění konstantních technologických podmínek měření

Technologické podmínky jednotlivých serií měření byly udržovány na konstantní úrovni během celé série měření následujícím způsobem :

- | | |
|-------------------------|---|
| koncentrace diamantu | - vhodnou volbou nástroje, |
| zrnitost diamantu | - dtto |
| obrobek | - vhodnou volbou vzorku: veškeré skleněné polotovary jednoho druhu byly vyrobeny z jedné tavby, takže bylo možné s určitostí konstatovat, že jednotlivé vzorky skla byly chemicky i fyzikálně shodné, |
| řezná kapalina | - před měřením celé série byla vždy připravena nová "čistá" kapalina, |
| množství řezné kapaliny | - pomocí nastavení škrticího ventilu ve výtlačné větvi; kontrola byla prováděna měřením dodávaného množství za dobu 20 sec., |
| řezná rychlost | - nastavením odpovídajících otáček pily; měření otáček pomocí přítlačného otáčkoměru, |
| rychlost posuvu do řezu | - měřením času potřebného k překonání konstantní délky u každého pokusu; automatické měření pomocí mikrospínačů a elektrických stopek. |

3.3.2 Počáteční podmínky měření

Jednou ze základních podmínek reprodukovatelnosti prováděných měření bylo nutné najít metodu jak uvést kotoučovou pilu vždy do stejných počátečních podmínek. K tomuto účelu bylo prováděno tzv. naostření pily pomocí siliciumpokouškového kotouče typu C 49 80 K 9 V.

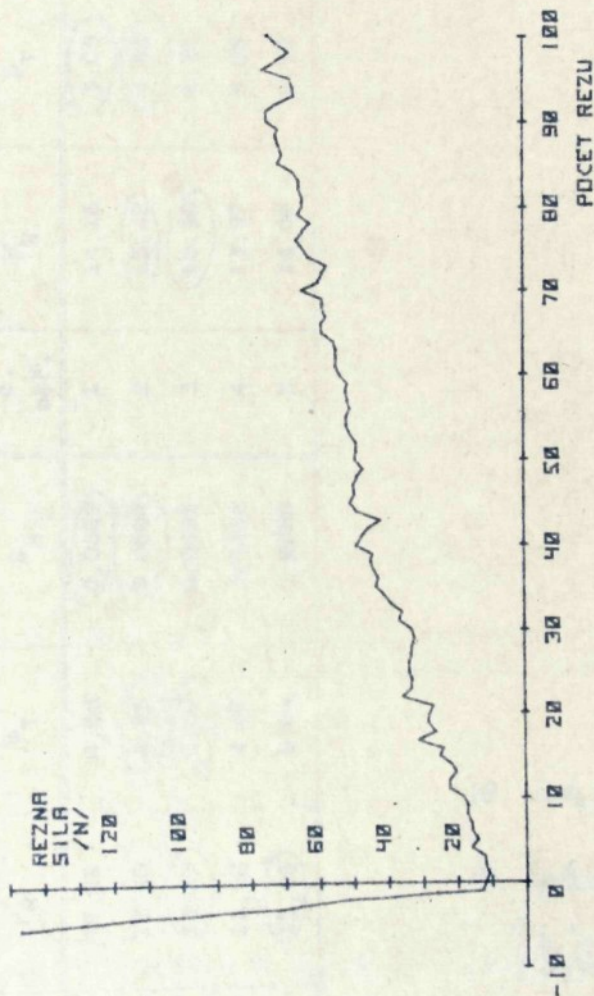
Naostření pily (jiným způsobem nazývané oživení) bylo prováděno pro jednotlivé série měření vždy za konstantních technologických podmínek. Přesto se během měření ukázalo, že pro zajištění konstantních p r a c o v n í c h podmínek pily bylo nutné provést pět řezů, nejlépe za konstantních podmínek. Během těchto řezů dojde k ustálení povrchu pracovní části dlanástroje na vhodné počáteční řezné podmínky. Dojde k odstranění zbytku rozdrčených diazrn a úpravě povrchu pojiva. Teprve po těchto tzv. předzkusných řezech byl nástroj připraven k provedení série měření. Následující příklad ukazuje nutnost tohoto postupu. Průběh radiální řezné síly pro serii měření včetně tzv. předzkusných řezů je uveden na obr. 26. Jde o měření označené č. 64 proběhlé za těchto podmínek : $K = 25 \%$, $Z_s = 80/63 \text{ } \mu\text{m}$, $v_r = 112 \text{ } 000 \text{ cm/min}$, $v_p = 5,0 \text{ cm/min}$, sklo - jonquil, chladivo - voda, množství $L_{ch} = 6,5 \text{ l/min}$. Prvních 5 řezů podle výše uvedeného způsobu bylo ze série vyloučeno včetně hmotnostního úbytku.

3.4 Stanovení chyby měření

Pro matematické zpracování výsledků měření bylo nutné provést v rámci jedné série měření 50 nebo 100 řezů do hloubky 20 mm, t.j. bylo odřiznuto 24 cm^3 resp. 48 cm^3 skla. Měření bylo vždy prováděno dvěma pilami, které výrobce označil jako stejné. (Bylo nutné vyloučit rozdílnosti vzniklé výrobou). Během měření byly zaznamenávány průběžně řezné síly P_R a P_T (viz obr. 27). Naměřené hodnoty byly zpracovány počítačem a určena hodnota ustálené řezné síly $\overline{P_R}$ a $\overline{P_T}$ (viz kap. 1.4). Po celém měření byl určen i hmotnostní úbytek u obou pil (viz kap. 3.1.2). Z uvedeného je patrné, že jedno měření bylo časově náročné. Z tohoto důvodu byla měření prováděna bez opakování.

K upřesnění, zda-li tento postup byl zvolen správně, bylo přikročeno k stanovení chyby měření. Pro dvě pily osazené diamantovými zrny o velikosti $Z_s = 160 / 125 \text{ } \mu\text{m}$ a koncentraci $K = 50 \%$ bylo provedeno 2×5 měření po 50 řezech. Hodnoty ustálených řezných sil a hmotnostních úbytků z těchto měření jsou uvedeny v tab. 5 a bylo jich použito k výpočtu intervalu

ZAVISLOST RADIALNI REZNE SILY NA POCTU REZU



Obr. 26 Průběh radiální řezné síly včetně tzv. předzkusových řezů

tab. 5

výrobní číslo pily : 6 - 32053					výrobní číslo pily : 6 - 32054				
č. měř.	$\bar{P}_R$	$\bar{P}_T$	G_N	č. měř.	$\bar{P}_R$	$\bar{P}_T$	G_N	č. měř.	G_N
1	12,29	4,68	0,0669	1	14,16	5,06	0,0682	1	0,0682
2	12,56	4,85	0,0684	2	13,42	4,92	0,0703	2	0,0703
3	13,27	5,02	0,0635	3	12,96	4,71	0,0736	3	0,0736
4	11,98	4,67	0,0718	4	13,97	5,06	0,0694	4	0,0694
5	12,96	5,04	0,0650	5	14,02	5,10	0,0653	5	0,0653

30 kontrol

13 kontrol

43,3%

spolehlivosti jednotlivých veličin pro tzv. malý rozsah měření (pro $m < 30$).

Pro výpočet mezi 95 %-ního intervalu spolehlivosti se vychází z následujících rovnic /21/

$$\bar{x} - t_{\alpha=0,05} \cdot \frac{s}{\sqrt{m}}, \quad (50)$$

$$\bar{x} + t_{\alpha=0,05} \cdot \frac{s}{\sqrt{m}}, \quad (51)$$

kde je $\bar{x}$ - střední hodnota měřené veličiny

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}, \quad (52)$$

x_i - změřená hodnota veličiny,

s - směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \left[\sum x_i^2 - \frac{1}{m} (\sum x_i)^2 \right]}, \quad (53)$$

m - počet měření,

$t_{\alpha=0,05}$ - kritická hodnota Studentova rozdělení pro 95%-ní hladinu významnosti a $\nu = m-1$ stupňů volnosti

$$t_{\alpha=0,05} = 2,262. \quad (N=9) \quad (54)$$

Po dosazení naměřených hodnot (tab. 5) a výpočtu dle rovnic (50) a (51) byly získány následující intervaly spolehlivosti :

$$\text{pro } \bar{P}_R \quad \langle 12,62 ; 13,70 \rangle, \quad (55)$$

$$\bar{P}_T \quad \langle 4,79 ; 5,03 \rangle, \quad (56)$$

$$G_N \quad \langle 0,0659 ; 0,0705 \rangle. \quad (57)$$

Z vypočtených mezi intervalu spolehlivosti a uvedených hodnot naměřených veličin v tab. 5 je patrné, že většina naměřených hodnot do spočítaných intervalů zapadá. (43,3%)

Volbou měřicí metody pomocí dvou pil lze předpokládat, že průměrná hodnota naměřených veličin padne do intervalu spolehlivosti. Z tohoto důvodu byla měření prováděna bez opakování s dobrou reprodukovatelností. Soubory hodnot bylo možné zpracovat vhodnými statistickými metodami.

3.5 Rozbor vlivu řezné rychlosti, rychlosti posuvu do řezu, zrnitosti a koncentrace diamantu na proces řezání

Před stanovením stupně vlivu řezné i posuvové rychlosti, dále koncentrace i zrnitosti diamantových zrn v pojivu bylo nutné provést výběr variability uvedených vstupních veličin. Horní meze úrovní jednotlivých veličin (označené +) i spodní meze úrovní (označené -) jsou uvedeny v tab. 6.

tab. 6

faktor	označení	rozměr	úroveň	
			+	-
v_r	x_1	cm/min	210 000	120 000
v_p	x_2	cm/min	7,5	2,5
z_s	x_3	cm	0,0141	0,0112
K	x_4	%	100	25

Pro matematickostatistické zpracování bylo nutné sestavit matici faktorového pokusu. V tomto případě byl použit úplný faktorový pokus. Série pokusů pro 4 nezávisle proměnné se skládá z 2^4 , t.j. 16, pokusů.

Matici pokusů bylo nutné stanovit tak, aby splňovala dva základní požadavky /22, 23/ :

- skládní součin dvou libovolně zvolených sloupců nedá sloupec stejných znamének,
- ani jeden sloupec není známkově shodný se sloupci ostatními.

3.5.1 Naměřené hodnoty

Počítačem zpracované naměřené hodnoty výstupních veličin pro pokusy měření 1 - 16 jsou uvedeny v tab. 7.

3.5.2 Stanovení stupně vlivu jednotlivých faktorů

Z uvedených hodnot v tab. 7 bylo možné stanovit rozptylové diagramy vlivů jednotlivých faktorů i jejich iterací prvního řádu na všechny tři výstupní veličiny - řezné síly $\bar{P}_R$ a $\bar{P}_T$ i hmotnostní úbytek nástroje G_N .

a) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na radiální řeznou sílu

Postup pro sestavení rozptylového diagramu bude podrobně popsán v případě výpočtu stupně vlivu řezné rychlosti, rychlosti posuvu do řezu, koncentraci a zrnitosti diamantu na radiální řeznou sílu.

Pro jednotlivé faktory $X_1 - X_4$ se do rozptylového diagramu zaznamenávají body ve dvou sloupcích (podle příslušné úrovně faktoru) v příslušné hodnotě výstupní veličiny. Stupeň vlivu se hodnotí pomocí rozdílu mediánů obou sloupců jednotlivých úrovní sledovaných faktorů. Stupeň vlivu pro tento případ (označení faktorů odpovídá tab. 6) je uveden na obr. 28 A. Ke kvantitativnímu stanovení jednotlivých vlivů se vezmou dva vizuálně největší rozdíly mediánů a stanovení vlivu se provede pomocí tabulky se dvěma výstupy (tab. 8).

Z hodnot uvedených v tab. 8 byl proveden výpočet vlivu vybraných efektů X_2 a X_4 dle rovnic

$$x_2 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2}{2} - \frac{\bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{2} \doteq 8,66 \quad (58)$$

$$x_4 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_3}{2} - \frac{\bar{Y}_2 + \bar{Y}_4}{2} \doteq 10,47. \quad (59)$$

Dalším krokem stanovení stupně vlivu dalších faktorů je sejmutí vlivu vybraných faktorů X_2 a X_4 . Toto se provede následujícím způsobem :

- od každé hodnoty výstupní veličiny $\bar{P}_R$ na úrovni $+X_2$ se odečte hodnota 8,66 a na úrovni $+X_4$ hodnota 10,47.
- ke každé hodnotě výstupní veličiny $\bar{P}_R$ na úrovni $-X_2$ se přičte hodnota 8,66 a na úrovni $-X_4$ hodnota 10,47.

tab. 8

	$+x_4$	$-x_4$
$+x_2$	25,00	14,54
	25,47	10,55
	27,00	16,58
	<u>33,00</u>	<u>18,00</u>
	$\sum y_i = 110,47$	$\sum y_i = 59,67$
	$\bar{y}_1 = \frac{1}{4} \sum y_i = 27,6175$	$\bar{y}_2 = \frac{1}{4} \sum y_i = 14,9175$
$-x_2$	13,41	6,36
	18,05	10,32
	14,93	8,31
	<u>20,49</u>	<u>9,02</u>
	$\sum y_i = 86,88$	$\sum y_i = 34,01$
	$\bar{y}_3 = \frac{1}{4} \sum y_i = 16,7175$	$\bar{y}_4 = \frac{1}{4} \sum y_i = 8,5025$

Dále se provede výpočet stupňů vlivu efektů x_1 a x_3 pomocí obdobné tabulky se dvěma vstupy ovšem z opravených výstupních veličin (viz tab. 9 - hodnoty $\bar{P}_R^1$). Na základě sejmutí vlivu faktorů x_1 a x_3 (viz tab. 9 - hodnoty $\bar{P}_R^2$) a provedení rozptylového diagramu interakcí prvního řádu (obr. 28 C) je možné vybrat dvě interakce, v našem případě $x_1 x_3$ a $x_2 x_3$, a provést opět výpočet stupně a jejich sejmutí vlivu (viz tab. 9 - hodnoty $\bar{P}_R^3$).

Poslední fází je výpočet stupně vlivu zbývajících interakcí na sledovanou výstupní veličinu.

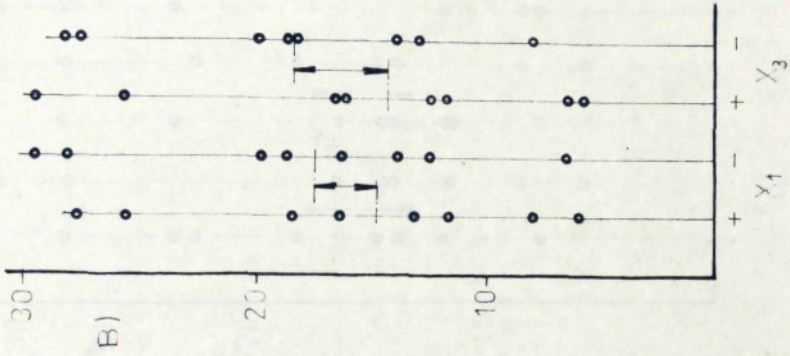
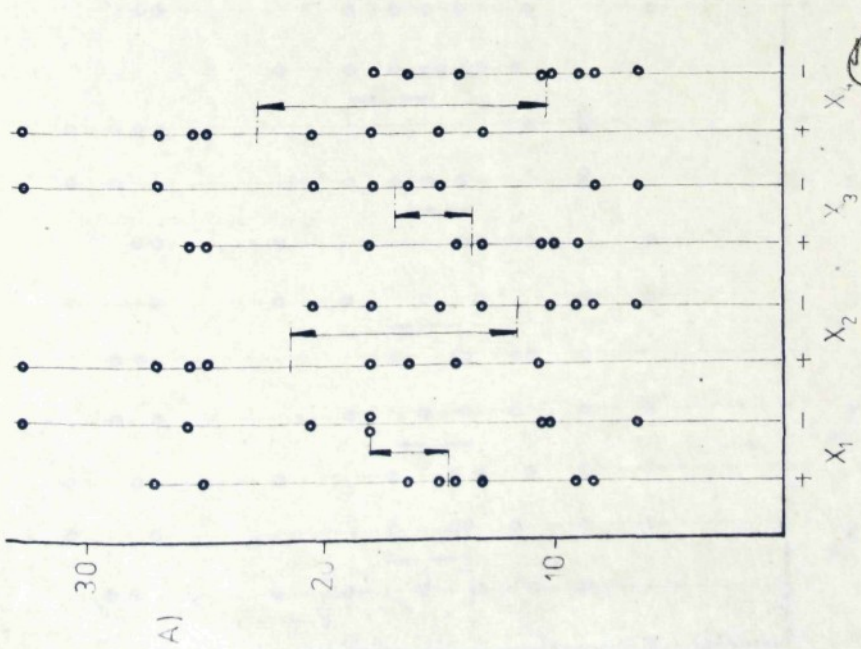
Na základě uvedeného postupu byl stanoven stupeň vlivu jednotlivých faktorů i jejich interakcí prvního řádu na radiální řeznou sílu $\bar{P}_R$:

$$x_4 = + 10,47$$

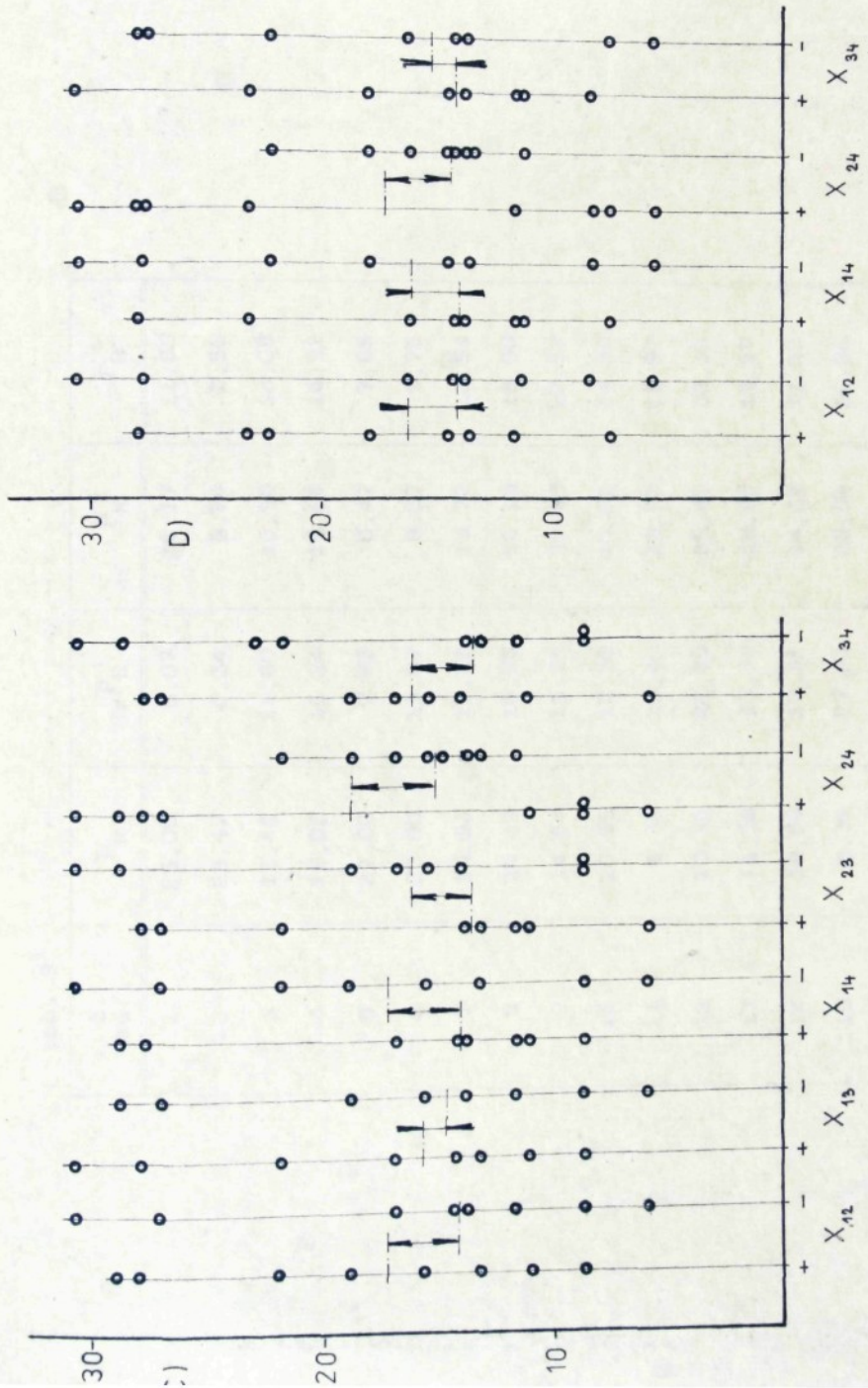
$$x_2 = + 8,66$$

$$x_3 = - 2,95$$

$$x_1 = - 2,35$$



Obr. 28 Rozptylový diagram



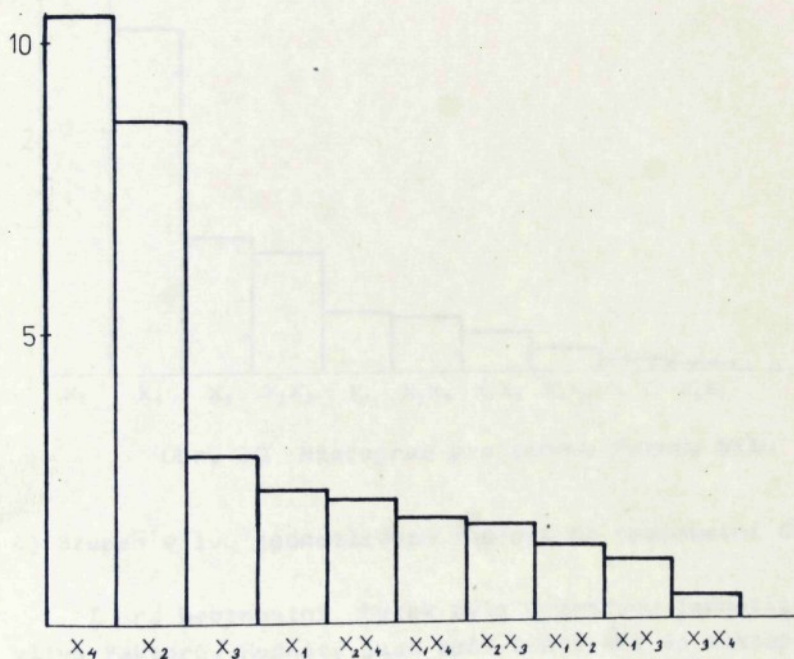
Obr. 28 Rozptylový diagram

tab. 9

č. měř.	$\bar{P}_R$	$\bar{P}_R^1$	$\bar{P}_R^2$	$\bar{P}_R^3$
1	25,00	5,87	11,17	11,89
2	25,47	6,34	5,74	8,56
3	13,41	11,60	16,90	14,08
4	18,05	16,24	15,64	14,92
5	27,00	7,87	8,47	7,65
6	33,00	13,87	8,57	5,75
7	14,93	13,12	13,72	16,54
8	20,49	18,68	13,18	18,90
9	14,54	16,35	21,85	22,57
10	10,55	12,36	11,76	14,58
11	6,36	25,49	30,79	27,97
12	10,32	29,45	28,85	28,13
13	16,58	18,39	18,99	18,27
14	18,00	19,81	14,31	11,49
15	8,31	27,44	28,04	30,86
16	9,02	28,15	22,85	23,57

$$\begin{array}{ll} x_2 x_4 = + 2,21 & x_1 x_2 = + 1,38 \\ x_1 x_4 = - 1,86 & x_1 x_3 = + 1,05 \\ x_2 x_3 = - 1,77 & x_3 x_4 = - 0,47 \end{array}$$

Větší přehled o velikosti stupňů vlivů jednotlivých faktorů včetně jejich interakcí prvního řádu dává histogram (viz obr. 29).



Obr. 29 Histogram pro radiální řeznou sílu

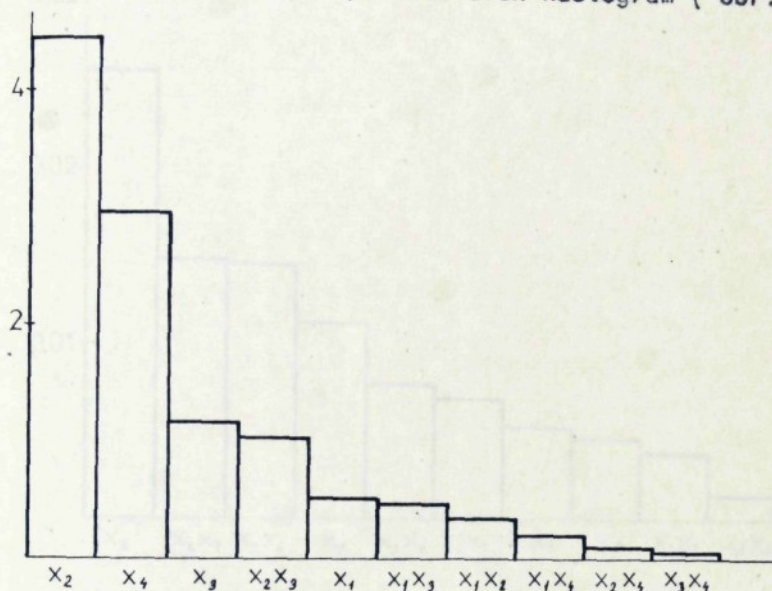
b) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na tangenciální řeznou sílu

Obdobným způsobem byl proveden výpočet stupně vlivu jednotlivých faktorů na tečnou řeznou sílu $\bar{P}_T$. Hodnoty jsou seřazeny podle velikosti do sestupné řady :

$$\begin{array}{ll} x_2 = + 4,45 & x_3 = - 1,16 \\ x_4 = + 2,96 & x_2 x_3 = - 1,06 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} x_1 = - 0,53 & x_1 x_4 = - 0,23 \\ x_1 x_3 = + 0,51 & x_2 x_4 = + 0,13 \\ x_1 x_2 = - 0,37 & x_3 x_4 = + 0,12 \end{array}$$

Pro lepší přehled byl opět sestaven histogram (obr. 30).



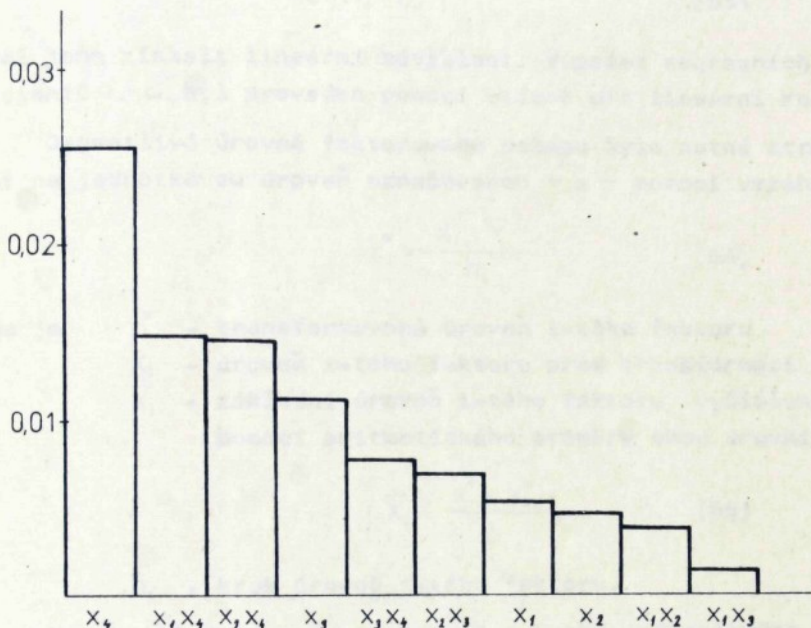
Obr. 30 Histogram pro tečnou řeznou sílu

c) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na hmotnostní úbytek

I pro hmotnostní úbytek byly vypočteny jednotlivé stupně vlivu faktorů. Hodnoty jsou opět sestaveny do sestupné řady:

$$\begin{array}{ll} x_4 = - 0,0256 & x_2 x_3 = - 0,0071 \\ x_1 x_4 = + 0,0149 & x_1 = + 0,0055 \\ x_2 x_4 = + 0,0148 & x_2 = + 0,0049 \\ x x_3 = - 0,0113 & x_1 x_2 = + 0,0040 \\ x_3 x_4 = - 0,0079 & x_1 x_3 = - 0,0015 \end{array}$$

Také v tomto případě byl sestaven histogram (obr. 31).



Obr. 31 Histogram pro hmotnostní úbytek

3.5.3 Odvození vztahu pro výpočet řezných sil a hmotnostního úbytku

Předložená práce si klade za úkol stanovit funkční závislost výstupních veličin (obecně Q) na vstupních veličinách, v tomto případě na v_r, v_p, Z_s, K . Z rozboru naměřených hodnot bylo možné vytvořit předpoklad, že obecná funkční závislost

$$Q = f(v_r, v_p, Z_s, K) \quad (60)$$

se může vyjádřit vztahem ve tvaru

$$Q = A_0 v_r^{a_1} v_p^{a_2} Z_s^{a_3} K^{a_4} \quad (61)$$

K matematickému zpracování výše uvedené závislosti je vhodné rovnici (61) zlogaritmovat na tvar

$$\log Q = \log A_0 + a_1 \log v_r + a_2 \log v_p + a_3 \log Z_s + a_4 \log K, \quad (62)$$

ve kterém

$$\log A_0 = a_0, \quad (63)$$

čímž jsme získali lineární závislost. Výpočet regresních koeficientů $a_0 - a_4$ byl proveden pomocí vztahů pro lineární regresi.

Jednotlivé úrovně faktorového pokusu bylo nutné ztransformovat na jednotkovou úroveň označovanou + a - pomocí vztahu

$$x_i^* = \frac{X_i - \bar{X}_i}{h_i}, \quad (64)$$

kde je x_i^* - transformovaná úroveň i-tého faktoru,
 X_i - úroveň i-tého faktoru před transformací,
 $\bar{X}_i$ - základní úroveň i-tého faktoru, vyčíslenou pomocí aritmetického průměru obou úrovní

$$\bar{X}_i = \frac{x_i^+ + x_i^-}{2}, \quad (65)$$

h_i - krok úrovně i-tého faktoru.

V tab. 10 jsou uvedeny úrovně a kroky jednotlivých faktorů pro transformaci podle následující symboliky:

$$x_1 = \log v_r, \quad (66)$$

$$x_2 = \log v_p, \quad (67)$$

$$x_3 = \log Z_s, \quad (68)$$

$$x_4 = \log K, \quad (69)$$

$$Y = \log Q. \quad (70)$$

Rovnice (62) po transformaci má tvar

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4, \quad (71)$$

kde jsou $b_0 - b_4$ - regresní koeficienty transformované rovnice.

K stanovení regresních koeficientů v rovnici (62) je nutné nejprve vyčíslit regresní koeficienty rovnice (71)

tab. 10

faktor	úroveň		$\bar{x}_i$	h_i
	x^+	x^-		
x_1	5,32222	5,07918	5,2007	0,12152
x_2	0,87506	0,39794	0,6365	0,23856
x_3	-1,85078	-1,95078	-1,9008	0,05000
x_4	-2,00000	1,39794	1,6989	0,30103

podle vztahů

$$b_0 = \frac{\sum Y_i}{2^m} , \quad (72)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{2^m} Y_j x_{ij}}{2^m} , \quad (73)$$

kde je 2^m - počet měření - v našem případě

$2^m = 16$ (úplný faktorový pokus)

a posléze provést zpětnou transformaci pomocí vztahů

$$a_0 = b_0 - \sum_{i=1}^m \frac{b_i \bar{x}_i}{h_i} , \quad (74)$$

$$a_i = \frac{b_i}{h_i} . \quad (75)$$

a) Tvar rovnice pro výpočet radiální řezné síly

Vypočtené regresní koeficienty a_i jsou uvedeny v tab. 11. Dosazením koeficientu a_i (podle tab. 11) do rovnice (62) a po jejím delogaritmování získáme vztah pro výpočet radiální řezné síly

$$\bar{P}_R = 1,028 \cdot \frac{v_p^{0,485} \cdot K^{0,471}}{v_r^{0,259} \cdot z_s^{0,743}} . \quad (76)$$

Rovnice (76) pro výpočet radiální řezné síly je pro praktické využití velmi složitá a její vyčíslení by bylo časově velmi náročné, proto byla upravena na tvar

tab. 11

a_i	
a_0	+ 0,012
a_1	- 0,259
a_2	+ 0,485
a_3	- 0,743
a_4	+ 0,471

$$P_R^0 = 0,75 \cdot \frac{\sqrt{V_p K}}{V_r 0,25 Z_s 0,75} \quad (77)$$

Platnost vztahů (76) a (77) byla ověřena porovnáním. Porovnání vypočtených hodnot s hodnotami naměřenými je provedeno v tab. 12. Chyba odchylek vypočtených hodnot od hodnot změřených byla vyčíslena s přesností 0,1 %.

tab. 12

č. měř.	P_R změř.	P_R	chyba /‰/	P_R	chyba /‰/
1	25,00	23,72	- 5,1	23,45	- 6,2
2	25,47	27,42	+ 7,7	26,97	+ 5,9
3	13,41	13,91	+ 3,8	13,54	+ 1,0
4	18,05	16,09	- 10,9	15,57	- 13,7
5	27,00	28,14	+ 4,2	27,87	+ 3,2
6	33,00	32,54	- 1,4	32,05	- 2,9
7	14,93	16,51	+ 10,6	16,09	+ 7,8
8	20,49	19,09	- 6,8	18,51	- 9,7
9	14,54	12,34	- 15,1	11,72	- 19,4
10	10,55	14,26	+ 35,2	13,49	+ 27,8
11	6,36	7,24	+ 13,8	6,77	+ 6,4
12	10,32	8,37	- 18,9	7,79	- 24,6
13	16,58	14,64	- 11,7	13,93	- 16,0
14	18,00	16,93	- 6,0	16,03	- 11,0
15	8,31	8,59	+ 3,3	8,06	- 3,2
16	9,02	9,93	+ 10,1	9,25	+ 2,6

b) Tvar rovnice pro výpočet tangenciální řezné síly

Vypočtené regresní koeficienty a_i jsou uvedeny v tab. 13.

tab. 13

a_i	
a_0	- 0,876
a_1	- 0,115
a_2	+ 0,676
a_3	- 0,617
a_4	+ 0,373

Stejným způsobem byly vyčísleny vztahy pro výpočet tangenciální řezné síly, a to vztah bez zaokrouhlení jednotlivých exponentů

$$\overline{P_r} = 0,133 \cdot \frac{v_p^{0,676} \cdot K^{0,373}}{v_r^{0,115} \cdot z_s^{0,617}} \quad (78)$$

vztah se zaokrouhlením

$$P_r^* = 0,1 \cdot \frac{v_p^{0,7} \cdot K^{0,4}}{v_r^{0,1} \cdot z_s^{0,6}} \quad (79)$$

Platnost vztahů (78) a (79) je opět ověřena porovnáním - viz tab. 14.

c) Tvar rovnice pro výpočet hmotnostního úbytku

Vypočtené regresní koeficienty a_i jsou uvedeny v tab. 15.

tab. 15

a_i	
a_0	- 4,818
a_1	+ 0,460
a_2	+ 0,156
a_3	- 0,886

tab. 14

č. měř.	$\bar{P}_T$ změř.	$\bar{P}_T$	chyba /‰/	P_T°	chyba /‰/
1	8,40	9,74	+ 16,6	9,79	+ 16,5
2	9,86	10,44	+ 5,9	10,35	+ 5,0
3	6,23	4,66	- 25,2	4,54	- 27,2
4	4,77	4,97	+ 4,2	4,80	+ 0,6
5	10,00	11,29	+ 12,9	11,24	+ 12,4
6	13,00	12,04	- 7,4	11,89	- 8,6
7	5,20	5,37	+ 3,3	5,21	+ 0,2
8	5,95	5,73	- 3,7	5,51	- 7,4
9	6,35	5,84	- 8,0	5,62	- 11,4
10	5,28	6,23	+ 18,0	5,95	+ 12,6
11	2,53	2,78	+ 9,9	2,61	+ 3,0
12	3,40	2,96	- 12,8	2,76	- 18,9
13	7,78	6,73	- 13,5	6,46	- 17,0
14	8,70	7,18	- 17,5	6,83	- 21,5
15	2,85	3,20	+ 12,4	2,99	+ 5,0
16	2,85	3,41	+ 19,9	3,16	+ 11,0

tab. 16

č. měř.	ΔG_N změř.	ΔG_N	chyba /‰/	ΔG_N°	chyba /‰/
1	0,0500	0,0469	- 6,3	0,0370	- 26,0
2	0,0485	0,0362	- 25,3	0,0288	- 40,7
3	0,0376	0,0395	+ 5,0	0,0324	- 16,6
4	0,0191	0,0305	+ 60,2	0,0244	+ 28,0
5	0,0650	0,0575	- 11,6	0,0455	- 30,0
6	0,0500	0,0444	- 11,1	0,0354	- 29,3
7	0,0812	0,0484	- 40,4	0,0386	- 52,5
8	0,0207	0,0374	+ 81,3	0,0300	+ 45,3
9	0,0728	0,0781	+ 7,3	0,0644	- 11,5
10	0,0414	0,0604	+ 45,8	0,0501	+ 20,9
11	0,0648	0,0658	+ 1,6	0,0546	- 15,7
12	0,0952	0,0509	- 46,6	0,0425	- 55,4
13	0,0813	0,0958	- 17,8	0,0792	- 2,5
14	0,0750	0,0740	- 1,3	0,0616	- 17,9
15	0,0537	0,0807	+ 50,2	0,0672	+ 25,1
16	0,0425	0,0624	- 32,5	0,0522	- 43,5

Z uvedených regresních koeficientů byly získány vztahy pro výpočet hmotnostního úbytku dlanástroje. Přesný tvar

$$\Delta G_N = 0,000015 \cdot \frac{v_r^{0,460} v_p^{0,156}}{z_s^{0,886} K^{0,368}}, \quad (80)$$

upravený tvar

$$\Delta G_N = \frac{v_r^{0,45} \cdot v_p^{0,15}}{z_s^{0,9} \cdot K^{0,4}} \cdot 10^{-5}. \quad (81)$$

Ověření platnosti je provedeno v tab. 16.

3.6 Rozbor vlivu řezné rychlosti, zrnitosti diamantu, druhu a množství chladiva na proces řezání

Z velkého počtu faktorů, které ovlivňují proces řezání skla byly v této kapitole vzaty pro sledování v úvahu :

- řezná rychlost,
- zrnitost diamantových zrn,
- druh chladicí (řezné) kapaliny,
- množství chladicí (řezné) kapaliny.

Oproti předcházející kapitole byl potlačen vliv nejvýznamějších faktorů, rychlosti posuvu do řezu a koncentrace diamantových zrn v pojivu dlanástroje. Tímto potlačením byly zvýrazněny jednotlivé stupně sledovaných faktorů.

Na základě výběru tří druhů chladicích (řezných) kapalin byly provedeny tři série samostatných měření. Každá série pro jeden druh chladicí kapaliny, vždy za stejných technologických podmínek. Zvolené úrovně jednotlivých vstupních parametrů jsou uvedeny v tab. 17.

tab. 17

faktor	označení	rozměr	úroveň	
			+	-
v_r	x_1	cm/min	210000	120000
z_s	x_2	cm	0,0223	0,0141
L_{ch}	x_3	l/min	13	6,5

3.6.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty byly zpracovány na počítači stejným způsobem, jako v předcházejících kapitolách a jsou uvedeny v následujících tabulkách :

- tab. 18 - serie měření číslo 17 - 24 - za použití čisté vody,
- tab. 19 - serie měření číslo 25 - 32 - za použití emulze vody a emulzinu H,
- tab. 20 - serie měření číslo 33 - 40 - za použití emulze vody a Glassgrindtu 960.

V uvedených tabulkách je znázorněno i schema úplného faktového pokusu.

tab. 18

č. měř.	faktor			$\bar{P}_R$	$\bar{P}_T$	G_N
	x_1	x_2	x_3			
17	-	+	+	20,716	4,339	0,0373
18	-	+	-	19,370	4,484	0,0669
19	-	-	+	31,542	5,085	0,1005
20	-	-	-	19,703	4,293	0,0827
21	+	+	+	13,083	2,510	0,0495
22	+	+	-	16,137	2,284	0,0365
23	+	-	-	26,541	5,199	0,0650
24	+	-	-	19,011	4,333	0,0670

tab. 19

č. měř.	faktor			$\bar{P}_R$	$\bar{P}_T$	G_N
	x_1	x_2	x_3			
25	-	+	+	12,290	4,675	0,0669
26	-	+	-	13,436	4,171	0,0650
27	-	-	+	13,513	3,723	0,1067
28	-	-	-	18,100	3,187	0,0426
29	+	+	+	13,086	3,187	0,0426
30	+	+	-	17,386	4,535	0,0323
31	+	-	+	13,806	4,253	0,0948
32	+	-	-	14,137	3,196	0,0526

tab. 20

č. měř.	faktor			P_R	P_T	G_N
	x_1	x_2	x_3			
33	-	+	+	23,297	4,944	0,0527
34	-	+	-	21,272	4,467	0,0764
35	-	-	+	17,302	3,155	0,1283
36	-	-	-	20,253	5,482	0,0854
37	+	+	+	12,956	3,565	0,0529
38	+	+	-	10,933	2,732	0,0736
39	+	-	+	22,471	4,181	0,0717
40	+	-	-	16,287	3,123	0,0605

3.6.2 Stanovení stupně vlivu jednotlivých faktorů

Z uvedených hodnot v tab. 18 - 20 a za pomoci rozptylových diagramů bylo možné stanovit stupně vlivu jednotlivých faktorů na sledované (výstupní) veličiny pro všechny tři druhy chladicí (řezné) kapaliny.

a) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na radiální řeznou sílu

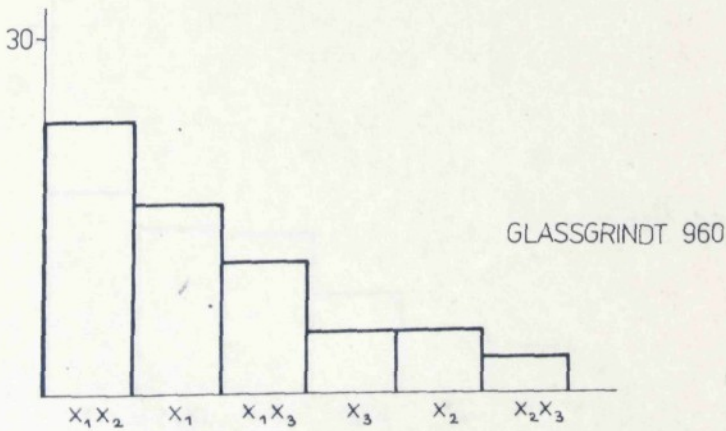
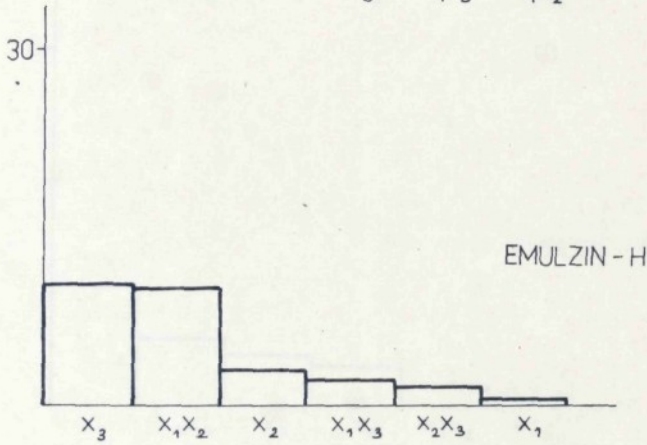
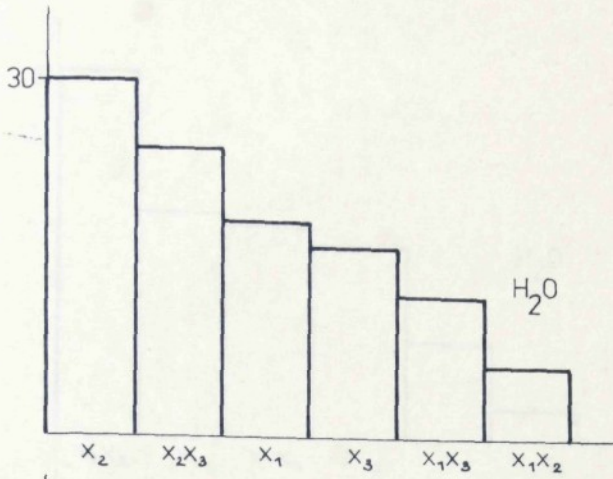
Shodným způsobem, jak bylo uvedeno v kapitole 3.5.2. byly stanoveny stupně vlivů pro jednotlivé serie měření. Velikost jednotlivých stupňů faktorů i jejich interakcí jsou vyjádřeny pomocí histogramu na obr. 32.

b) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na tangenciální řeznou sílu

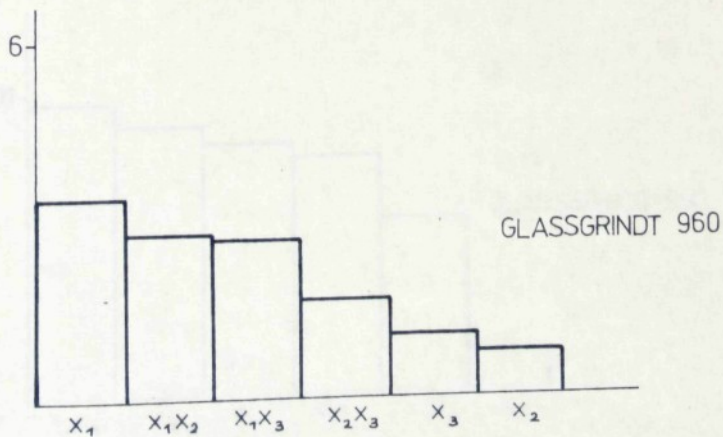
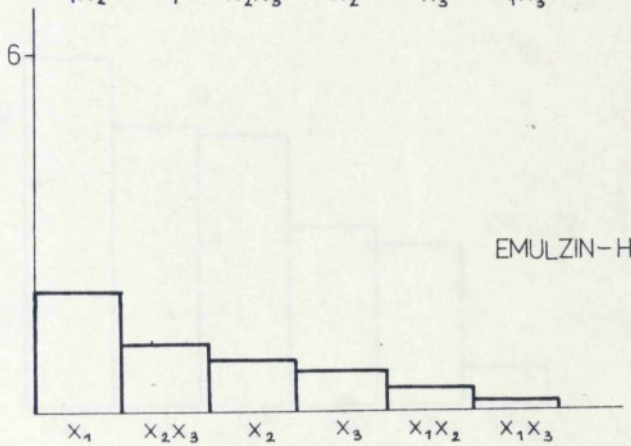
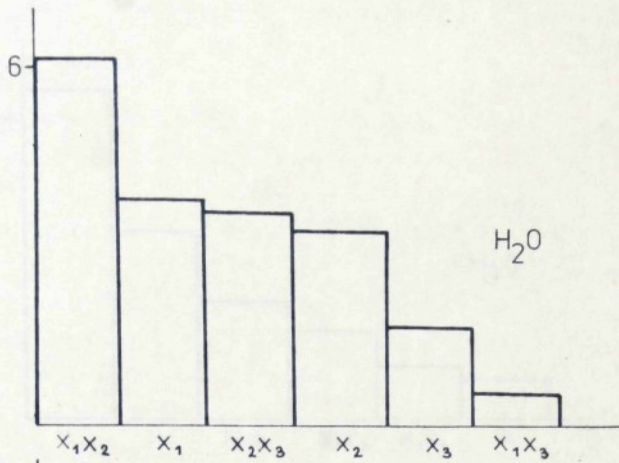
Jednotlivé stupně vlivu samotných faktorů i jejich interakcí jsou uvedeny na obr. 33.

c) Stupeň vlivu jednotlivých faktorů na hmotnostní úbytek

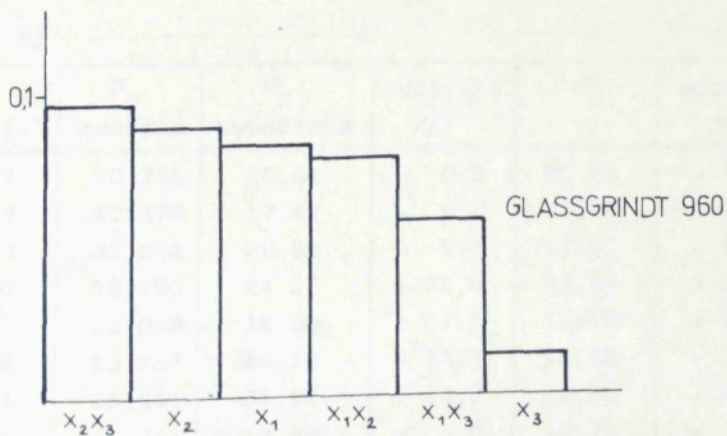
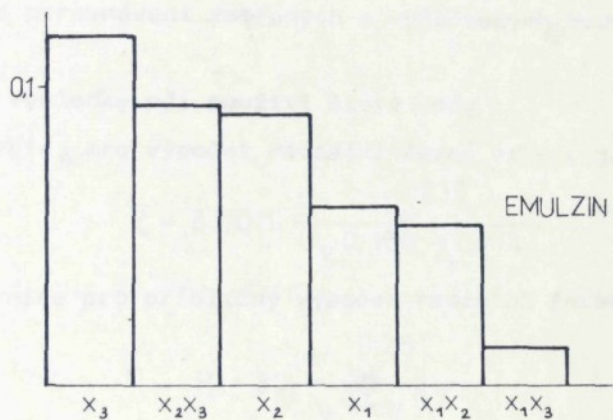
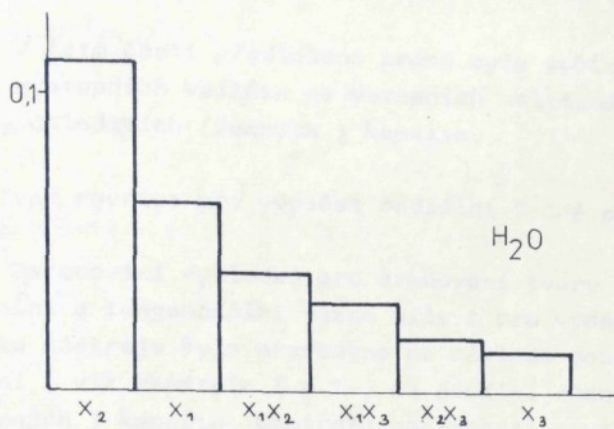
Jednotlivé stupně vlivu samotných faktorů i jejich interakcí jsou uvedeny na obr. 34.



Obr. 32 Histogramy pro radiálční řezné síly



Obr. 33 Histogramy pro tangenciální řezné síly



Obr. 34 Histogramy pro hmotnostní úbytek nástroje

3.6.3 Vztah pro výpočet řezných sil a hmotnostního úbytku

V této části předložené práce byla vyčíslena obecná závislost výstupních veličin na vstupních veličinách pro jednotlivé druhy chladicích (řezných) kapalin.

a) Tvar rovnice pro výpočet radiální řezné síly

Zpracování výsledků pro stanovení tvaru rovnic pro výpočet radiální a tangenciální řezné síly i pro výpočet hmotnostního úbytku nástroje bylo provedeno na základě samostatných serií měření (viz kapitola 3.6.1) za použití různých druhů chladicích (řezných) kapalin. Kontrola správnosti rovnic je provedena způsobem porovnávání změřených a vypočtených hodnot výstupních veličin.

Výsledky při použití čisté vody :

- rovnice pro výpočet radiální řezné síly (nezaokrouhlená)

$$\bar{P}_R = 63,011 \cdot \frac{L_{ch}^{0,239}}{v_r^{0,380} z_s^{0,714}} \quad (82)$$

- rovnice pro přibližný výpočet radiální řezné síly

$$P_R^o = 80 \cdot \frac{L_{ch}^{0,25}}{v_r^{0,4} z_s^{0,7}} \quad (83)$$

tab. 21

č. měř.	$\bar{P}_R$ změřená	$\bar{P}_R$ vypočtená	odchylka [%]	P_R^o	odchylka [%]
17	20,716	20,61	- 0,5	20,23	- 2,3
18	19,370	17,47	- 9,8	17,02	- 12,3
19	31,542	28,59	- 9,4	27,89	- 11,6
20	19,703	24,23	+ 23,0	23,45	+ 19,0
21	13,083	16,66	+ 27,0	16,18	+ 23,6
22	16,137	14,12	- 12,5	13,60	- 15,7
23	26,541	23,11	- 12,9	22,30	- 16,0
24	19,011	19,59	+ 3,0	18,75	- 1,4

Výsledky při použití chlazení emulze z čisté vody a Glassgrindtu 960 v 2,5 % ředění :

- rovnice pro výpočet radiální řezné síly (nezaokrouhlená).

$$\bar{P}_R = 2136,502 \cdot \frac{L_{ch}^{0,153}}{v_r^{0,540} z_s^{0,329}} \quad (84)$$

- rovnice pro přibližný výpočet radiální řezné síly

$$P_R^\circ = 1700 \cdot \frac{L_{ch}^{0,1}}{v_r^{0,5} z_s^{0,3}} \quad (85)$$

tab. 22

č. měř.	$\bar{P}_R$ změřená	$\bar{P}_R$ vypočtená	odchylka / % /	P_R°	odchylka / % /
25	23,297	19,97	- 14,3	19,85	- 14,8
26	21,272	17,95	- 15,6	18,52	- 12,9
27	17,302	23,21	+ 34,0	22,78	+ 31,6
28	20,253	20,87	+ 3,1	21,25	+ 4,9
29	12,956	14,76	+ 13,9	15,01	+ 15,8
30	10,933	13,27	+ 21,4	14,00	+ 28,1
31	22,471	17,16	- 23,6	17,22	- 23,4
32	16,287	15,43	- 5,3	16,06	- 1,4

Výsledky při použití chlazení emulze z čisté vody a emulzínu H v 5ti % ředění :

- rovnice pro výpočet radiální řezné síly (nezaokrouhlená)

$$\bar{P}_R = 14,394 \cdot \frac{v_r^{0,01}}{z_s^{0,091} L_{ch}^{0,222}} \quad (86)$$

- rovnice pro přibližný výpočet radiální řezné síly

$$P_R^\circ = \frac{14}{z_s^{0,1} L_{ch}^{0,2}} \quad (87)$$

tab. 23

č. měř.	$\bar{P}_R$ změřená	$\bar{P}_R$ vypočtená	odchylka / % /	P_R°	odchylka / % /
33	12,290	12,86	+ 4,6	12,26	- 0,2
34	13,436	15,00	+ 11,6	14,08	+ 4,8
35	13,513	13,40	- 0,8	12,84	- 5,0
36	18,100	15,63	- 13,6	14,74	- 18,5
37	13,086	12,93	- 1,2	12,26	- 6,3
38	17,386	15,08	- 13,3	14,08	- 19,0
39	13,806	13,47	- 2,4	12,84	- 7,0
40	13,137	15,72	+ 19,6	14,74	+ 12,2

b) Tvar rovnice pro výpočet tangenciální řezné síly

Výsledky měření při použití chlazení čisté vody :

- rovnice pro přesný výpočet tangenciální řezné síly

$$\bar{P}_T = 62,787 \cdot \frac{L_{ch}^{0,149}}{v_r^{0,532} z_s^{0,809}}, \quad (88)$$

- rovnice pro přibližný výpočet tangenciální řezné síly

$$P_T^\circ = 80 \cdot \frac{L_{ch}^{0,15}}{v_r^{0,55} z_s^{0,8}}, \quad (89)$$

(kontrola výsledků provedena v tab. 24).

Výsledky měření při použití chlazení emulze vody a Glassgrindtu 960 v 2,5% ředění :

- rovnice pro přesný výpočet tangenciální řezné síly

$$\bar{P}_T = 1141,217 \cdot \frac{L_{ch}^{0,039}}{v_r^{0,491} z_s^{0,027}}, \quad (90)$$

- rovnice pro přibližný výpočet tangenciální řezné síly :

$$P_T^\circ = \frac{1400}{v_r^{0,5}}, \quad (91)$$

(kontrola výsledků provedena v tab. 25).

tab. 24

č. měř.	$\bar{P}_T$ změřená	$\bar{P}_T$ vypočtená	odchylka /‰/	P_T°	odchylka /‰/
17	4,339	3,97	- 8,5	3,96	- 8,7
18	4,484	3,58	- 20,1	3,57	- 20,4
19	5,085	5,75	+ 13,2	5,72	+ 12,5
20	4,293	5,19	+ 20,9	5,15	+ 20,0
21	2,510	2,95	+ 17,5	2,91	+ 16,0
22	2,284	2,66	+ 16,4	2,63	+ 14,9
23	5,199	4,27	- 17,8	4,20	- 19,2
24	4,333	3,85	- 11,1	3,79	- 12,6

tab. 25

č. měř.	$\bar{P}_T$ změřená	$\bar{P}_T$ vypočtená	odchylka /‰/	P_T°	odchylka /‰/
25	4,944	4,45	- 9,9	4,04	- 18,3
26	4,467	4,34	- 2,9		- 9,5
27	3,155	4,51	+ 42,9		+ 28,1
28	5,482	4,39	- 19,9		- 26,3
29	3,565	3,38	- 5,1	3,06	- 14,3
30	2,732	3,29	+ 20,6		+ 11,8
31	4,181	3,42	- 18,1		- 26,9
32	3,123	3,33	+ 6,8		- 2,2

Výsledky měření při použití chlazení emulze čisté vody
a emulzinu H v 5ti % ředění :

- rovnice pro přesný výpočet tangenciální řezné síly

$$\bar{P}_T = 116,723 \cdot \frac{Z_s^{0,107}}{v_r^{0,235} L_{ch}^{0,058}} \quad (92)$$

- rovnice pro přibližný výpočet tangenciální řezné síly

$$P_T^\circ = 80 \cdot \frac{Z_s^{0,1}}{v_r^{0,2} L_{ch}^{0,1}} \quad (93)$$

(kontrola výsledků provedena v tab. 26).

tab. 26

č. měř.	$\bar{P}_T$ změřená	$\bar{P}_T$ vypočtená	odchylka /‰/	P_T°	odchylka /‰/
33	4,675	4,29	- 8,3	4,08	- 12,7
34	4,171	4,46	+ 7,0	4,37	+ 4,8
35	3,723	4,08	+ 9,7	3,90	+ 4,7
36	4,581	4,25	- 7,2	4,18	- 8,8
37	3,187	3,76	+ 18,0	3,65	+ 14,5
38	4,535	3,91	- 13,7	3,91	- 13,8
39	4,253	3,58	- 15,8	3,48	- 18,1
40	3,196	3,73	+ 16,6	3,73	+ 16,9

c) Tvar rovnice pro výpočet hmotnostního úbytku

Výsledky měření při použití chlazení čisté vody :

- rovnice pro přesný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N = 0,12 \cdot \frac{1}{v_r 0,433 z_s 1,136 L_{ch} 0,042} , \quad (94)$$

- rovnice pro přibližný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N^\circ = \frac{0,12}{v_r 0,45 z_s 1,15 L_{ch} 0,05} , \quad (95)$$

(kontrola výsledků provedena v tab. 27).

Výsledky měření při použití chlazení emulze vody a
Glassgrindtu 960 v 2,5 % ředění :

- rovnice pro přesný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N = \frac{1,185}{v_r 0,429 z_s 0,605 L_{ch} 0,045} , \quad (96)$$

- rovnice pro přibližný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N^\circ = \frac{2,5}{v_r 0,5 z_s 0,6} , \quad (97)$$

(kontrola výsledků provedena v tab. 28).

tab. 27

č. měř.	G_N změřený	G_N vypočtený	odchylka /‰/	G_N°	odchylka /‰/
17	0,0373	0,0512	+ 37,4	0,0434	+ 16,3
18	0,0669	0,0528	- 21,1	0,0449	- 32,8
19	0,1005	0,0863	- 14,1	0,0735	- 26,8
20	0,0827	0,0888	+ 7,4	0,0761	- 8,0
21	0,0495	0,0402	- 18,7	0,0337	- 31,8
22	0,0365	0,0414	+ 13,4	0,0349	- 4,3
23	0,0650	0,0677	+ 4,2	0,0571	- 12,0
24	0,0670	0,0697	+ 4,0	0,0591	- 11,7

tab. 28

č. měř.	G_N změřený	G_N vypočtený	odchylka /‰/	G_N°	odchylka /‰/
25	0,0527	0,0698	+ 32,5	0,0707	+ 34,1
26	0,0764	0,0721	- 5,7	0,0707	- 7,5
27	0,1283	0,0922	- 28,2	0,0931	- 27,5
28	0,0854	0,0951	+ 11,3	0,0931	+ 9,0
29	0,0529	0,0549	+ 3,9	0,0534	+ 1,0
30	0,0736	0,0567	- 23,0	0,0534	- 27,4
31	0,0717	0,0725	+ 1,1	0,0704	- 1,9
32	0,0605	0,0748	+ 23,6	0,0704	+ 16,3

Výsledky měření při použití chlazení emulze vody a emulzinu H v 5ti% ředění :

- rovnice pro přesný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N = 0,54 \cdot \frac{L_{ch}^{0,570}}{v_r^{0,576} z_s^{0,853}}, \quad (98)$$

- rovnice pro přibližný výpočet hmotnostního úbytku nástroje

$$G_N^\circ = 0,6 \cdot \frac{L_{ch}^{0,6}}{v_r^{0,6} z_s^{0,9}}, \quad (99)$$

(kontrola byla provedena v tab. 29).

tab. 29

č. měř.	G_N změřený	G_N vypočtený	odchylka /‰/	G_N°	odchylka /‰/
33	0,0669	0,0708	+ 5,8	0,0768	+ 14,8
34	0,0650	0,0477	- 26,6	0,0507	- 22,0
35	0,1067	0,1047	- 1,9	0,1161	+ 8,8
36	0,0537	0,0705	+ 31,3	0,0766	+ 42,6
37	0,0426	0,0513	+ 20,4	0,0549	+ 28,9
38	0,0323	0,0345	+ 7,0	0,0362	+ 12,2
39	0,0948	0,0758	- 20,0	0,0830	- 12,5
40	0,0526	0,0511	- 2,9	0,0547	+ 4,1

3.7 Komplexní rozbor vlivu sledovaných faktorů na proces řezání

V předcházejících kapitolách předložené práce byl proveden rozbor vlivu : - řezné rychlosti,

- rychlosti posuvu do řezu,
- koncentrace diamantu,
- zrnitosti diamantu,
- druh chladicí (řezné) kapaliny,
- množství chladicí kapaliny

na velikost řezných sil a hmotnostní úbytek diapily. Vliv jednotlivých výše uvedených faktorů na sledované výstupní veličiny byl prováděn odděleně pro určité skupiny vybraných faktorů. K dalšímu měření a hodnocení výsledků bylo využito unikátní sady diapil vyrobených v ISM v Kyjevě. Na základě této sady byly provedeny tři série měření, při kterých byl sledován vliv všech šesti výše uvedených faktorů a druhu opracovávaného skla na řezné síly a hmotnostní úbytek nástroje. Opracovávané sklo se od sebe lišilo složením, což není pro opracování diánástroji určující, ale lišilo se svojí mikrotvrdostí.

K stanovení vlivu těchto sedmi faktorů na sledované výstupní veličiny byly provedeny tři série měření s využitím největšího počtu diapil. Využití diapil pro jednotlivé série měření je patrné z obr. 35.

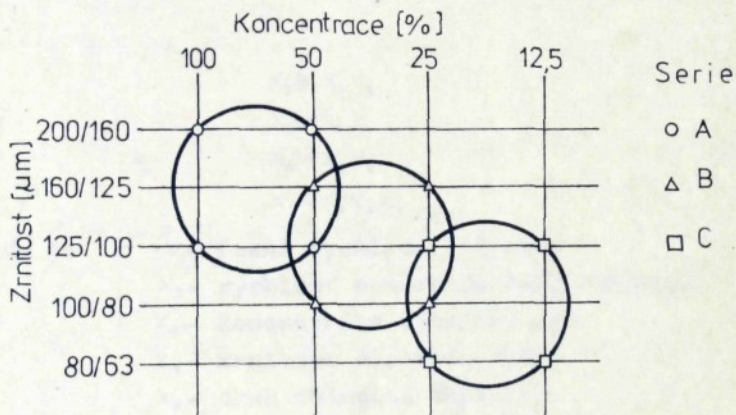
Pro stanovení vlivu jednotlivých faktorů bylo použito nasyceného faktorového pokusu, kde počet měření v jedné serii byl určen

$$m = 2^{\sum x_i - r} \quad (100)$$

kde je m - počet pokusů v serii, který musí vyhovovat podmínce

$$m \geq \sum x_i \quad (101)$$

$\sum x_i$ - počet nezávisle proměnných faktorů,
 r - stupeň krácení.



Obr. 35 Využití diapil pro měření

V našem případě šlo o nasycený faktorový pokus, kde $m = 8$ a $\sum x_i = 7$ sestaveného pro jednotlivé serie měření podle schematu uvedeného v tab. 30.

Sestavení kombinací úrovní pro jednotlivá měření bylo provedeno na základě degenerující podmínky.

tab. 30

Číslo měření v sérii			nezávisle proměnný faktor						
A	B	C	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
41	49	57	+	+	+	+	+	+	+
42	50	58	+	+	+	-	-	-	-
43	51	59	+	-	-	+	+	-	-
44	52	60	+	-	-	-	-	+	+
45	53	61	-	+	-	+	-	+	-
46	54	62	-	+	-	-	+	-	+
47	55	63	-	-	+	+	-	-	+
48	56	64	-	-	+	-	+	+	-

$$x_3 = x_1 x_2,$$

$$x_5 = x_1 x_4,$$

$$x_6 = x_2 x_4,$$

$$x_7 = x_1 x_2 x_4,$$

(102)

kde je

x_1 - řezná rychlost /cm/min/.

x_2 - rychlost posuvu do řezu /cm/min/.

x_3 - koncentrace diamantu /%/.

x_4 - zrnitost diamantu /cm/.

x_5 - druh chladicí kapaliny.

x_6 - množství chladicí kapaliny /l/min/.

x_7 - druh opracovávaného skla vyjádřený mikrotvrdostí podle Vickerse.

Ve třech seriích A až C měření byly měněny faktory x_3 a x_4 podle obr. 35, ostatní faktory podle tabulky 31.

Před komplexním rozбором výsledků této části práce je nutné uvést, že dvě měření nebylo možné provést z následujícího důvodu. Pilový list vlivem nastavených technologických podmínek, byl tak tepelně namáhán, že v místě styku s obrobkem docházelo k intenzivnímu hoření. Tím docházelo k oxydaci diamantu a k otavování pojiva. Vzniklé řezné síly, hlavně pak radiální řezná síla, byly měřicími přístroji pro svoji velikost již neměřitelné.

tab. 31

faktor	úroveň faktoru	
	+	-
x ₁	270000	150000
x ₂	10	5
x ₅	emulze vody a emulzinu H v 5ti % ředění	voda
x ₆	13	6,5
x ₇	5834	4415

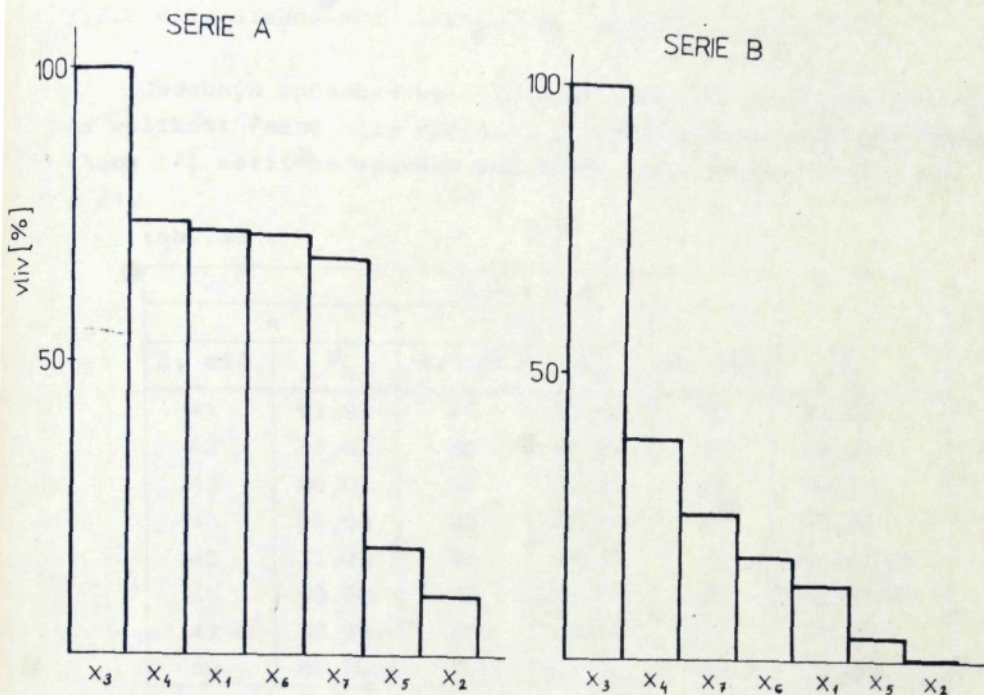
Další stoupnutí radiální řezné síly by mělo za následek deformaci pilového listu. Z tohoto důvodu byla měření číslo 61 a 62 přerušena po několika sekundách.

3.7.1 Vliv sledovaných faktorů na hmotnostní úbytek dianástroje

Hmotnostní úbytek dianástroje byl sledován stejnou měřicí metodou, která byla již popsána v předcházejících částech předložené práce. Výsledky měření hmotnostního úbytku všech tří serií měření jsou uvedeny v tab. 32.

tab. 32

s e r i e					
A		B		C	
č. měř.	G _N	č. měř.	G _N	č. měř.	G _N
41	0,0501	49	0,0653	57	0,1342
42	0,0473	50	0,0557	58	0,3278
43	0,0469	51	0,1240	59	0,1537
44	0,0656	52	0,1902	60	0,3945
45	0,0704	53	0,1382	61	nezjištěno
46	0,0579	54	0,3781	62	nezjištěno
47	0,0207	55	0,0302	63	0,0879
48	0,0584	56	0,0782	64	0,3815



Obr. 36 Histogram pro hmotnostní úbytek nástroje

Na základě hodnot hmotnostního úbytku diapily po odříznutí skla o celkové ploše 200 cm³ uvedených v tab. 32 bylo možné stanovit histogramy vlivu jednotlivých sledovaných faktorů. Histogramy jsou provedeny jen pro serie měření A a B (viz obr. 36). Pro serii měření C nebylo možné histogram stanovit, pro neúplnost jednotlivých měření ve faktorovém pokusu.

Hodnoty stupně vlivu jednotlivých sledovaných faktorů na obr. 36 až 38 jsou vyjádřeny v procentech. Za hodnotu 100 % byl vzat vliv faktoru s maximální hodnotou stupně vlivu na sledovanou výstupní veličinu. Další hodnoty stupně vlivu jednotlivých faktorů jsou vyjádřeny obdobným způsobem, ale jejich hodnotu lze získat již jen v procentech faktoru s maximální hodnotou stupně vlivu. Toto vyjádření dává velmi dobrý přehled o celkové situaci řešení problematiky.

3.7.2 Vliv sledovaných faktorů na velikosti řezných sil

Obdobným způsobem byl stanoven vliv jednotlivých faktorů na velikost řezné síly radiální i tangenciální. Výsledky měření všech tří serií zpracované počítačem jsou uvedeny v tab. 33 a 34.

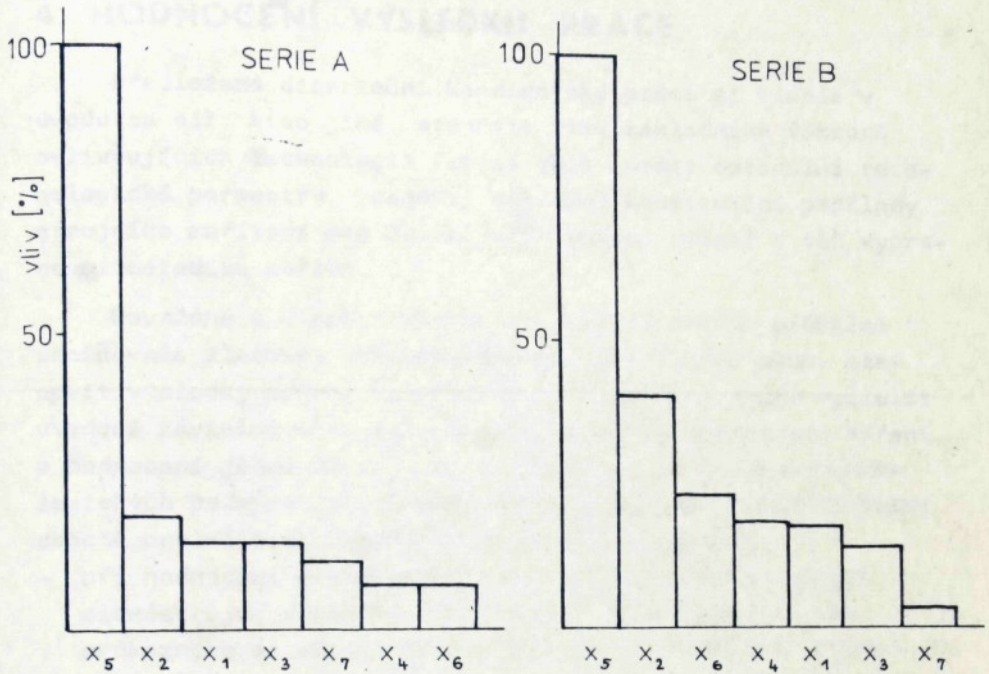
tab. 33

s e r i e					
A		B		C	
č. měř.	$\bar{P}_R$	č. měř.	$\bar{P}_R$	č. měř.	$\bar{P}_R$
41	93,97	49	90,59	57	84,25
42	23,63	50	43,58	58	38,64
43	68,01	51	70,27	59	78,34
44	31,54	52	15,23	60	10,52
45	31,23	53	48,32	61	nezjištěna
46	98,55	54	123,26	62	nezjištěna
47	35,79	55	24,84	63	22,40
48	80,52	56	110,50	64	84,51

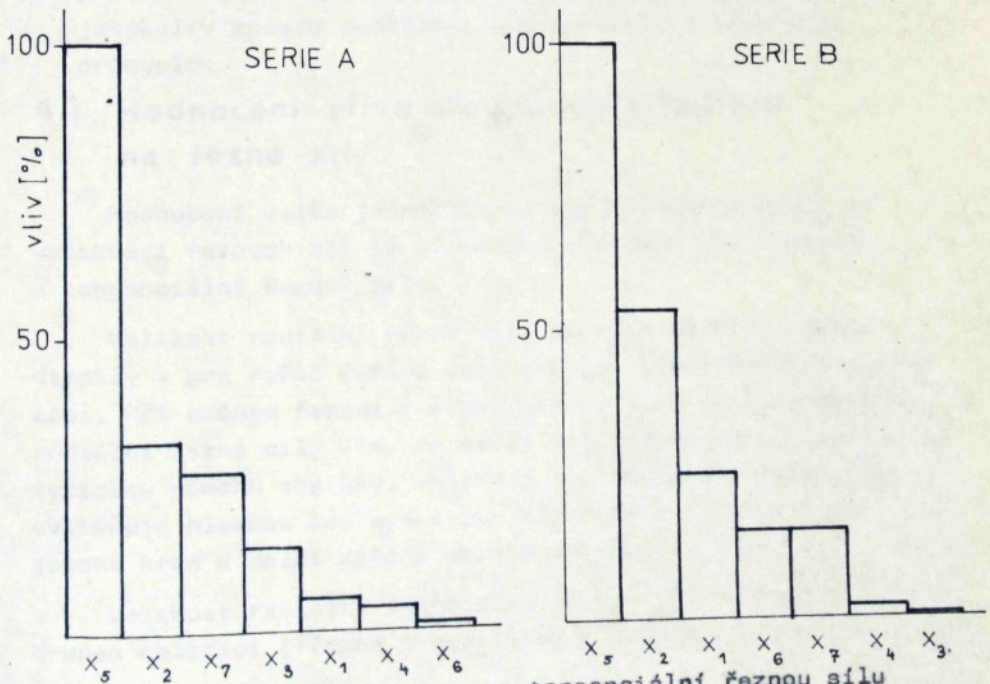
tab. 34

s e r i e					
A		B		C	
č. měř.	$\bar{P}_T$	č. měř.	$\bar{P}_T$	č. měř.	$\bar{P}_T$
41	29,30	49	27,60	57	23,10
42	9,14	50	10,86	58	10,91
43	22,32	51	21,40	59	20,35
44	10,43	52	4,43	60	4,01
45	11,29	53	16,36	61	nezjištěna
46	30,47	54	36,58	62	nezjištěna
47	8,12	55	5,14	63	4,86
48	19,85	56	21,35	64	26,75

Z uvedených hodnot řezných sil byly sestaveny histogramy stupně vlivu jednotlivých faktorů, jak pro radiální, tak i tangenciální řeznou sílu (viz obr. 37 a 38).



Obr. 37 Histogram pro radiální řeznou sílu



Obr. 38 Histogram pro tangenciální řeznou sílu

4. HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRÁCE

Předložená disertační kandidátská práce si kladla v úvodu za cíl, mimo jiné, stanovit vliv základních faktorů ovlivňujících technologii řezání skla, určit optimální technologické parametry, stanovit základní konstrukční podklady strojního zařízení pro řezání skla pomocí diapil a též vypracovat metodiku měření.

Navržená a v práci používaná, měřicí metoda průběžně umožňovala sledovat stav řezných sil při řezání skla, stanovit výsledky měření, na základě kterých bylo možné vyčíslit uvedené závislosti a vyslovit závěr. Navrženou metodu měření a hodnocení jednotlivých pil i vhodnosti zvolených technologických podmínek při řezání lze aplikovat v provozní praxi (obecně pro většinu dianástrojů) ve dvou případech :

- při hodnocení (testování) řezných vlastností nových dianástrojů; výsledků testování je možné použít jako průkazného materiálu při reklamačních jednáních s dodavatelem dianástrojů,
- při zjišťování optimálních technologických podmínek pro jakýkoliv způsob využívání dianástrojů ve sklářském průmyslu.

4.1 Hodnocení vlivu sledovaných faktorů na řezné síly

Hodnocení vlivu jednotlivých sledovaných faktorů na velikosti řezných sil je provedeno odděleně pro radiální a tangenciální řeznou sílu.

Velikost radiální řezné síly má vliv na volbu druhu diapily - pro ruční řezání nebo strojní (automatické) řezání. Při ručním řezání (oddělování) má velká hodnota radiální řezné síly vliv na nižší pracovní výkon a vyšší fyzickou námahu obsluhy. Velikost tangenciální řezné síly ovlivňuje hloubku lešturových záprasků a tudíž určuje jakost hran a další způsob opracování dělicí roviny.

Velikost radiální řezné síly je ovlivňována nejvíce druhem chladicí (řezné) kapaliny. Z provedených měření

(kap. 3.6 a 3.7) lze jednoznačně určit, že druh chladicí kapaliny (ale i její příprava a čistota !) výrazně převyšují stupně vlivu dalších sledovaných faktorů. Po druhu chladicí kapaliny nejvíce ovlivňuje velikost radiální řezné síly velikost rychlosti posuvu do řezu, to jest veličina ovlivňující výkon zkoumané operace (kap. 3.5 a 3.7). Vliv velikosti rychlosti posuvu do řezu je ovlivňován velikostí použitého diamantového zrna (kap. 3.7) za předpokladu stálého počtu pracovních zrn v aktivní vrstvě diapily. Se zmenšujícím diamantovým zrnem a zároveň s klesající koncentrací stoupá vliv velikosti rychlosti posuvu do řezu. Velikost použitého diamantového zrna (za stejné koncentrace diamantu) v aktivní vrstvě diapily ovlivňuje velikost radiální řezné síly nevýrazně (kap. 3.5); čím větší zrno použijeme k výrobě pily, tím dosáhneme menších řezných sil. Řezná rychlost ovlivňuje radiální řeznou sílu velmi nepatrně (kap. 3.5 až 3.7). Jen v případě použití chladicí kapaliny emulze vody a Glassgrindtu 960 v 2,5 % ředění vystoupil vliv řezné rychlosti nepatrně do popředí. Se zvyšující řeznou rychlostí klesá velikost radiální řezné síly.

Velikost tangenciální řezné síly je ovlivňována jednotlivými sledovanými faktory obdobně jako radiální řezná síla. Jen vliv velikosti rychlosti posuvu do řezu je u tangenciální řezné síly výraznější (kap. 3.7). Výraznější je i závislost vlivu velikosti rychlosti posuvu do řezu na velikosti zrna při stejném počtu pracovních zrn v aktivní vrstvě diapily.

4.2 Hodnocení vlivu sledovaných faktorů na hmotnostní úbytek dianastroje

Z výsledků 64 serií měření je možné pro hodnocení hmotnostního úbytku aktivní vrstvy diapily - v současné době ekonomicky nejdůležitější veličiny - vyslovit následující závěry.

Hmotnostní úbytek je nejvíce ovlivňován koncentrací diamantových zrn v aktivní vrstvě diapily (kap. 3.5 a 3.7). dále pak vzájemným sladěním hodnot koncentrace a zrnitosti diamantu (kap. 4.3). Použitím jemnějšího diamantového zrna v aktivní vrstvě diapily se stupeň vlivu koncentrace diamantu ještě zvýrazní (kap. 3.7).

Další skupinu faktorů se středním vlivem na hmotnostní úbytek diapily tvoří :

- zrnitost diamantu v aktivní vrstvě,
- řezná rychlost,
- množství chladicí (řezné) kapaliny,
- druh opracovávaného skla (kap. 3.5 až 3.7).

Zrnitost má z této skupiny faktorů největší význam. Hmotnostní úbytek diapily se snižuje použitím větších diamantových zrn při výrobě aktivní vrstvy diapily.

Do poslední skupiny faktorů, která má velmi malý vliv na velikost hmotnostního úbytku se řadí :

- druh chladicí kapaliny,
- velikost rychlosti posuvu do řezu.

Na tomto místě předložené práce je nutné podotknout, že pořadí stupně vlivu jednotlivých sledovaných faktorů na velikost hmotnostního úbytku aktivní vrstvy diapily je nutné chápat s přihlédnutím na hodnoty úrovní jednotlivých faktorů. (Pozn. : Výrazným zvyšováním rychlosti posuvu do řezu nad horní úroveň - 10 cm/min - tohoto sledovaného faktoru lze předpokládat zvýraznění stupně vlivu rychlosti posuvu do řezu na velikost hmotnostního úbytku diapily.)

4.3 Doporučení pro využití řešené problematiky v praxi

Výsledků řešené problematiky - řezání skla pomocí kotoučových pil s pevně vázanými syntetickými diamantovými zrny - lze využít ve třech různých oblastech :

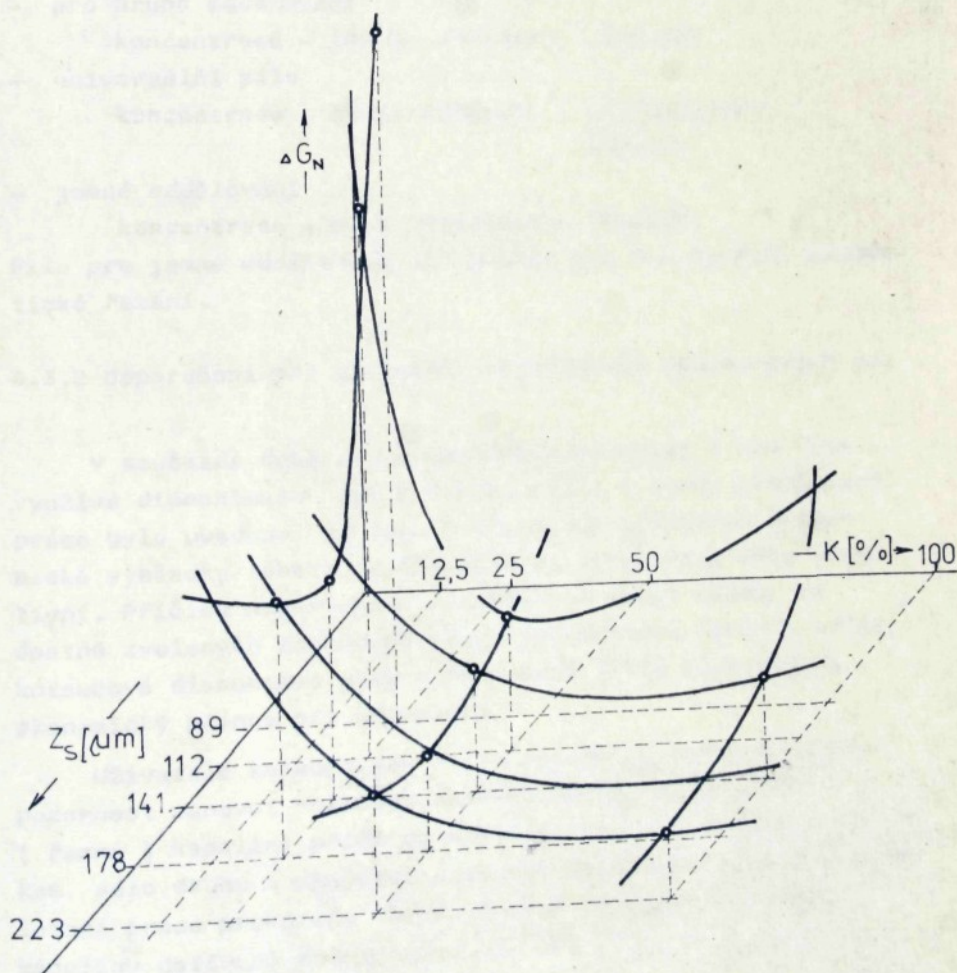
- při výrobě kotoučových diamantových pil,
- při využívání kotoučových diamantových pil ve sklářském průmyslu,

- při konstrukci speciálního strojního zařízení.

4.3.1 Doporučení pro výrobce kotoučových diamantových pil

Výsledky a závěry uvedené v předložené práci lze pro výrobce kotoučových diamantových pil shrnout do následujícího doporučení :

ekonomické využívání kotoučových diamantových pil se syntrovaným pojivem na bázi mědi a mosazi a při využití synteticky vyrobeného diamantu je ze strany výrobce určováno zrnitostí a koncentrací diamantového zrna v aktivní vrstvě nástroje.



Obr. 39 Závislost hmotnostního úbytku na koncentraci a

Z výsledků měření provedených v experimentální části práce bylo možné graficky sestavit závislost hmotnostního úbytku na koncentraci a zrnitosti syntetického diamantu (viz obr. 39).

Z této grafické závislosti je patrné, že hmotnostní úbytek diapily při řezání skla dosahuje ve zkoumané oblasti lokálního minima

při koncentraci	50 - 100 %.
při zrnitosti	160/125 - 200/160 μm .

Výrobci kotoučových diamantových pil s obdobným pojivem lze doporučit výrobu tří základních typů pil:

- pro hrubé oddělování
koncentrace - 100 %, zrnitost - 250/200,
- universální pilu
koncentrace - 80 %, zrnitost - 160/125 nebo 200/160,
- jemné oddělování
koncentrace - 50 %, zrnitost - 125/100.

Pilu pro jemné oddělování lze použít jen pro strojní automatické řezání.

4.3.2 Doporučení pro uživatele kotoučových diamantových pil

V současné době se ve sklářském průmyslu stále více využívá diamantových pil k řezání skla. V úvodu předložené práce bylo uvedeno, že jsou v některých případech ekonomické výsledky tohoto nového způsobu opracování skla negativní. Příčinu negativních výsledků je nutné hledat ve špatně zvolených technologických podmínkách. Správná volba kotoučové diamantové pily sama o sobě ještě nezajišťuje ekonomický přínos pro uživatele.

Uživatelé kotoučových diamantových pil musí největší pozornost věnovat chlazení, způsobu přívodu chladicí (řezné) kapaliny přímo do místa kontaktu nástroje s obrobkem, dále druhu a množství chladicí kapaliny. Výsledky předložené práce prokázaly, že zvyšování množství chladicí kapaliny dodávané způsobem použitým v práci nad hranici

3 l/min není vhodné. Zvýšením dodávaného množství nad tuto hranici stoupne nadměrně výstupní rychlost chladicí kapaliny z trysek. Proud chladicí kapaliny dopadá pak s velkou kinetickou energií na pilový list, případně obrobek, odráží se a do místa kontaktu nástroje s obrobkem se dostane chladicí kapaliny velmi málo.

Další pozornost je nutné věnovat druhu chladicí (řezné) kapaliny včetně její přípravy. Z výsledků uvedených v předložené práci lze doporučit k chlazení při běžném řezání emulze vody a emulgačního oleje Emulzín H v 3 - 4 % ředění. Vyšší koncentrace emulze má za následek zvýšenou pěnivost chladicí kapaliny a tím snížení chladicího účinku.

Účinný způsob přívodu chladicí kapaliny, správná volba druhu chladicí kapaliny podmiňuje další doporučení při volbě technologických parametrů - řezné rychlosti.

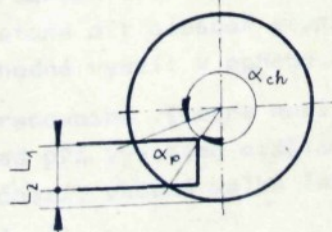
- rychlosti posuvu do řezu.

Minimální hodnotu řezné síly zvýšit na hranici 30 m/s. Se stoupajícím účinkem chlazení zvýšit řeznou rychlost na 40 až 50 m/sec, v některých případech i více.

Řeznou rychlost ovlivňuje i možnost dostatečného schladnutí diamantového zrna v aktivní vrstvě diapily. Dobré schladnutí je ovlivňováno poměrem pracovního času (dobou styku diamantového zrna s obrobkem) k času chlazení. Obecně lze tuto domněnku vyjádřit funkcí

$$v_r = Q \left(\frac{t_1}{t_2} \right) = Q \left(\frac{\alpha_p}{2\pi - \alpha_p} \right), \quad (103)$$

kde je t_1 - čas pracovní $\approx \alpha_p$,
 t_2 - čas chlazení $\approx \alpha_{ch} = 2\pi - \alpha_p$
 (viz obr. 40).



Obr. 40 Vyjádření času pracovního a času chlazení

S klesajícím poměrem $\frac{t_1}{t_2}$ může uživatel zvyšovat řeznou rychlost a naopak.

Volbu velikosti rychlosti posuvu do řezu ovlivňuje požadavek jakosti opracovávaného povrchu a velikost lasturovitých záprasků na hranách dělicích rovin. Při řezání bez nároku na jakost povrchu je možné zvyšovat rychlost posuvu do řezu nad hranici 10 cm/min. Volbu velikosti rychlosti posuvu do řezu ovlivňuje také síla řezaného skla (L_2 - obr. č. 40). Se zvyšující silou řezaného skla je nutné snížit rychlost posuvu do řezu (z důvodu horší dodávky chladicí kapaliny do místa kontaktu nástroje s obrobkem).

Velikost lasturovitých záprasků na hranách dělicích rovin je možné snížit správnou volbou upnutí obrobku. Na základě platnosti rovnic (10) a (12) a praktických zkušeností je patrné, že velikost tangenciální řezné síly je závislá na hodnotě α_{max} a tudíž na hodnotě L_1 - obr. č. 40. Snížením hodnoty L_1 na minimum je možné zvýšit rychlost posuvu do řezu.

4.3.3 Doporučení pro konstruktéry strojního zařízení

Z uvedených předcházejících doporučení a na základě provozních a laboratorních zkušeností je možné stanovit základní pravidla pro konstrukci speciálního strojního zařízení určeného k řezání skla pomocí kotoučových diamantových pil:

- otáčky pracovního vřetene musí umožňovat dosáhnout řeznou rychlost minimálně 40 m/sec. Bude-li provozně nutné používat různých druhů pil (různého průměru) musí otáčky vřetene mít alespoň stupňovitou regulaci otáček. Je vhodné využít k pohonu různých typů variátorů;
- uložení pracovního vřetene musí zajišťovat plynulý a klidný chod při vysokých otáčkách (vyvážení všech rotujících částí, vhodná volba ložisek, účinný způsob mazání a j.):

- upínací příruby musí být maximálního průměru. Minimální průměr upínací příruby nesmí klesnout pod třetinu průměru pily. Změnu pilového listu o jiném upínacím průměru může umožnit jen výměna celé upínací hlavy, to značí, že upínací hlava musí být výměnná. Její uchycení ve vřetenu musí být provedeno velmi pečlivě s ohledem na minimální přípustnou excentricitu;
- přívod chladicí řezné kapaliny musí zajišťovat dodávku chladicí kapaliny do místa kontaktu nástroje s obrobkem. Při návrhu vřetene je vhodné počítat s přívodem chladicí kapaliny jeho středem. Přívod chladicí kapaliny je pak možné za působení odstředivé síly směřovat do místa kontaktu nástroje s obrobkem;
- pohybový stůl musí zajistit pomocí pohonu plynule regulovatelnou rychlost posuvu do řezu v rozmezí 5 až 20 cm/min. Náhon pohybového stolu je nejlépe realizovat pomocí pneumatického obvodu, případně obvodu hydraulického.

Při konstrukci speciálního strojního zařízení určeného k řezání skla pomocí kotoučových diamantových pil je nutné dbát všech platných ČSN, hlavně pak bezpečnostních předpisů, vydaných pro provoz zařízení za vlhka a při vysokých řezných rychlostech.

ZÁVĚR

Předložená dizertační kandidátská práce se skládá ze čtyř hlavních kapitol, z nichž první dvě předkládají obecný rozbor řešené problematiky, včetně návrhu měřicí metody, způsobu vyhodnocení získaných výsledků. Výběr nezávisle proměnných faktorů mající podstatný vliv na řešenou problematiku byl podřízen snaze maximálně využít sadu sovětských nástrojů. Ke stanovení vhodné koncentrace a zrnitosti diamantu v aktivní vrstvě kotoučové diamantové pily se sintrovaným kovovým pojivem bylo nutné provést 64 sérií měření.

Ve třetí a čtvrté kapitole jsou řešeny a vyhodnoceny stupně vlivů jednotlivých sledovaných faktorů. Na základě zjištěných stupňů vlivů a matematického vyjádření závislosti řezných sil a hmotností úbytku na nezávisle proměnných jsou navržena doporučení pro výrobce kotoučových diamantových pil, uživatele těchto pil i doporučení pro konstruktéry speciálních strojních zařízení.

Z faktorů, které ještě ovlivňují hmotnostní úbytek diapi, a tím i ekonomiku řezání skla diamantovou pilou, je vlastní pojivo, jeho kvalita, druh, mikrotvrdost, pórovitost apod. Tyto aspekty nebyly předmětem zkoumání z objektivních příčin. Výrobce diamantových pil nesděluje svoji výrobní dokumentaci a technologii. O dianástrojích sděluje vždy co nejméně informací.

Závěrem předložené dizertační kandidátské práce lze konstatovat, že provedený komplexní rozbor vlivu sedmi různých faktorů na proces řezání skla diapiami je ojedinělý a jeho matematické zpracování bude určovat nové směry ve vývoji diapi, jejich využívání na nově zkonstruovaných strojních zařízeních.

Seznam použité literatury

- /1/ SIXTA, J. - KLEBSA, V.: Zpracování průmyslového skla. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST 1978.
- /2/ SIXTA, J.: Zpráva z konference INTERDIAMONT - Kijev 71. Liberec, VŠST 1971.
- /3/ SIXTA, J.: Zpráva z konference Sintetičeskyje almazы - ključ k techničeskemu progressu. Kyjev, srpen 1974, Liberec, VŠST 1974.
- /4/ SIXTA, J.: Zpráva ze studijní stáže v Institutu svěrchtvěrdých materiálův AN USSR. Kyjev, listopad 1973 - únor 1973, Liberec, VŠST 1973.
- /5/ SIXTA, J., Sklář a keramik, 25, 1975, s. 49.
- /6/ MASLOV, J.N.: Základy theorie broušení kovů. 1. vyd. Praha 1953.
- /7/ SIXTA, J.: Opracování skla diamantovými nástroji. /Písemná část odborné zkoušky kandidátského minima/. Liberec, 1975, VŠST.
- /8/ -: Využití diamantových nástrojů ve sklářském průmyslu - Diamant A. /Výzkumná zpráva/. Praha, SVÚST 1973.
- /9/ MINÁŘ, S., Jemná mechanika, 19, 1974, s. 280, 311.
- /10/ BAKUL, V.N. aj.: Spravočnik po almaznoj abrabotke metallorėžuščego instrumenta. 1. izd. Kyjev 1971.
- /11/ GÖTZ, J. a kol.: Broušení a leštění skla. 1. vyd. Praha 1963.
- /12/ SIXTA, J. - KLEBSA, V. - HEJCMAN, J.: Vliv chladicího prostředí na proces frézování optického skla diamantovými nástroji. In.: Sborník vědeckých prací VŠST v Liberci, XI, Liberec 1978, s. 281.
- /13/ SIXTA, J. - KLEBSA, V.: Problémy konstrukce strojů na opracování skla diamantovými nástroji. In.: Sklářské stroje, Praha 1974, s. 147.

- /14/ SIXTA, J. - KLEBSA, V.: Abarudovanie dlja abrabotky stěkla almaznym instrumentom. 1. izd. Kyjev 1974.
- /15/ KLEBSA, V. - SIXTA, J.: Optimalizace pracovních podmínek diamantových korunkových vrtáků. In.: Mechanické opracování skla, Ústí n.L. 1974, s. 129.
- /16/ LEPITOVA, N.P. - GRIŠAJEV, A.I. - SIXTA, J., Sintetičeskije almazы, 6, 175, č. 2, s. 59.
- /17/ MATUŠEK, M. - ŠIKOLA, Č., Sklář a keramik, 25, 1975, s. 229, 306.
- /18/ KLEBSA, V. - SIXTA, J., Sklář a keramik, 23, 1973, s. 141.
- /19/ TSCHIFR, L. - GOSTER, V., Industrie Diamanten Rundschau, 3, 1969, s. 195.
- /20/ NĚMEC, J.: Odporové tenzometry v praxi. 1. vyd. Praha 1967.
- /21/ FELIX, M. - BLÁHA, K.: Matematickostatistické metody v chemickém průmyslu. 1. vyd. Praha 1962.
- /22/ TICHOMOROV, V.B.: Matěmaticeskije metody planirovanija pro izučeniji netkanych matěrialov. 1. izd. Moskva 1960.
- /23/ NOVOTNÝ, F. - SIXTA, J.: Využití metod plánování experimentu pro efektivnější vedení výzkumných prací. In.: Mechanické opracování skla, Ústí n.L. 1977, s. 56.