

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

nositelka Řádu práce

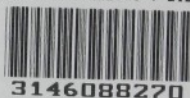
Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ KINEMATIKY PROCESU BROUŠENÍ
SIMULAČNÍ METODOU

Kandidátská disertační práce

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



Vypracoval:

Ing. Jan Jersák

Školitel:

Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry:

Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Liberec, březen 1988

Zpracoval : Ing. Jan Jersák

MDT : 621 . 923 . 1 [007 : 681 : 31

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ KINEMATIKY PROCESU BROUŠENÍ
SIMULAČNÍ METODOU

V kandidátské disertační práci je uveden jeden ze způsobů zkoumání problematiky procesu broušení. Princip matematického modelování kinematiky procesu broušení simulační metodou spočívá v nahrazení reálného procesu vzájemné interakce mezi nástrojem a obrobkem jeho matematickou podobou. Vzniklý model procesu broušení lze zpracovat na číslicovém počítači. V práci je naznačena možnost aplikace modelu pro výpočet různých veličin charakterizujících proces broušení. Správnost navrženého modelu je ověřována porovnáním reálného a simulovaného broušení. Z výsledků experimentů plyne, že naměřené a vypočítané hodnoty jsou srovnatelné. Přínosy metody jsou zejména v oblasti teoretické. Možnost vytvoření určité prognózy o procesu broušení však vytváří předpoklady pro použití modelu také v praxi .

Počet stran : 164

Počet obrázků : 99

Počet tabulek : 13

Počet příloh : 3

	strana
1. ÚVOD	5
1.1. Z historie broušení	7
1.2. Postavení procesu broušení v současné strojírenské výrobě	8
2. POZNATKY O VÝZKUMU PROCESU BROUŠENÍ	10
2.1. Výběr a zdůvodnění řešeného úkolu	12
2.2. Metodika zpracování úkolu	13
3. CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ	16
3.1. Stavba broušicího nástroje	17
3.1.1. Materiál brusiva	17
3.1.2. Vliv struktury a pojiva na vlastnosti broušicího nástroje	19
3.1.3. Tvar zrn brusiva, jejich geometrie a proces opotřebování	20
3.1.4. Topografie povrchu broušicího kotouče	26
3.2. Proces tvorby třísky	31
3.2.1. Trajektorie zrna brusiva a délka sty- kového oblouku při rovinném broušení obvodem kotouče	31
3.2.2. Vznik třísky - mikrořezání	35
3.2.3. Fáze vzniku třísky	36
3.2.4. Deformace materiálu při rytí zrnem brusiva	38
3.2.5. Zkoumání kořene třísky	40
3.2.6. Schemata vzniku třísky při broušení	42
3.2.7. Tvar třísek vznikajících při broušení	45
3.2.8. Rozměry vzniklých třísek	47
3.2.9. Síla působící na zrno brusiva	52
3.3. Drsnost povrchu a aktivní zrna brusiva při broušení	57
3.3.1. Aktivní zrna při broušení	57
3.3.2. Drsnost povrchu po broušení	60
4. METODA MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ KINEMATIKY PROCESU BROUŠENÍ	62

4.1. Zjednodušující předpoklady	62
4.2. Obecný popis matematického modelu	63
4.3. Základní prvky modelu	63
4.3.1. Modelovaný obrobek	63
4.3.2. Modelovaný brousicí kotouč	64
4.3.3. Modelované zrno brusiva	68
4.4. Kinematické poměry při modelování práce zrna	70
4.4.1. Pootočení prvního zrna brusiva do řezu	70
4.4.2. Působení obecného zrna brusiva	72
4.4.3. Pootáčení zrna v řezu	74
4.4.4. Ukončení procesu řezání	75
4.5. Mikrořezání zrna	76
4.6. Realizace modelu	79
4.6.1. Základní program - matematický model kinematiky procesu broušení	80
4.6.2. Dílčí programy	92
4.6.3. Dílčí program - určování počtu aktivních zrn	93
4.6.4. Dílčí program - výpočet drsnosti povrchu	93
4.6.5. Dílčí program - výpočet průřezu nedeformované třísky	100
4.6.6. Dílčí program - výpočet tangenciální složky síly při broušení	106
4.6.7. Dílčí program - testování	111
4.6.8. Podprogramy	119
5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ SIMULAČNÍ METODY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROCESU BROUŠENÍ	122
5.1. Metodika experimentů	122
5.1.1. Experimentální ověřování drsnosti povrchu	123
5.1.2. Experimentální určování tangenciální složky síly při broušení	124
5.2. Hodnocení experimentů	133
5.2.1. Hodnocení drsnosti povrchu	133
5.2.2. Hodnocení tangenciální složky síly	135

5.2.3. Hodnocení výsledků výpočtu	136
aktivních zrn brusiva a příčných průřezů nedeformovaných třísek	

6. ZÁVĚR	139
----------	-----

Seznam použitých zkratk a symbolů	143
-----------------------------------	-----

Seznam použité literatury	151
---------------------------	-----

Seznam příloh	164
---------------	-----

V těchto souvislostech vystupuje do popředí technologický proces výroby, při němž jednotlivé součástky a výrobky vznikají a zároveň se vytvářejí i jejich výsledné vlastnosti. Ve výrobě zaujímá důležité místo proces obrábění. Protože většina výše uvedených aspektů vede ve větší či menší míře ke zhoršování obrábělnosti konstrukčních materiálů, zvyšují se neustále požadavky jak na obráběcí stroje, tak na řezné nástroje, neboť nové trvanlivější a tvrdší konstrukční materiály vyžadují ještě tvrdší materiály pro obráběcí nástroje. Zároveň se ve stále větší míře orientuje pozornost na otázky spolehlivosti a životnosti výrobků, jež úzce souvisí zejména s úrovní dokončovacími operacemi. Z tohoto důvodu nároky na tyto operace neustále rostou. Také zdokonalování technologií výroby polotovarů, které umožňují snižovat přídatky na obrábění, a tak zároveň snižovat rozsah těžkých a energeticky náročných operací, opět vede ke zvyšování nároků na energeticky méně náročné dokončovací operace.

Jednou z nejnáročnějších dokončovacích operací je proces broušení. Ač patří broušení mezi nejstarší techno-

1. ÚVOD

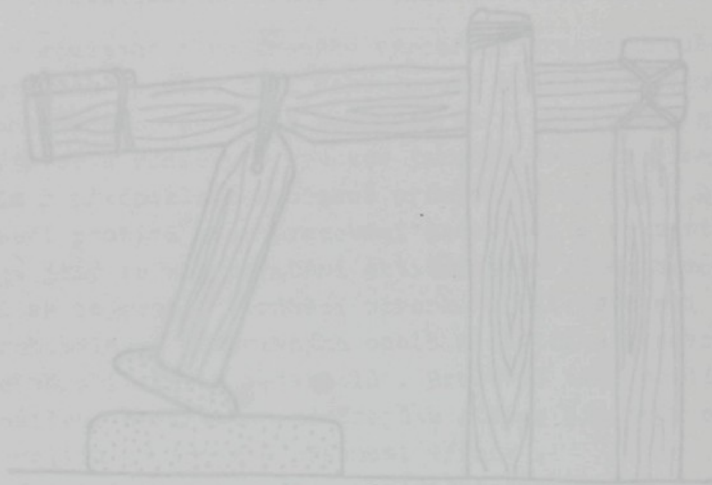
Strojírenství je jedním ze základních odvětví našeho národního hospodářství . V současné době je vývoj techniky charakterizován prudkým rozvojem jaderné energetiky , elektroniky a dalších technických odvětví . Zároveň se toto období vyznačuje přechodem od extenzivního k intenzivnímu rozvoji ve strojírenství , kdy stále výrazněji stoupají požadavky na úroveň technického řešení , provozní spolehlivost a životnost výrobků . Konstrukteři proto v širší míře používají materiály se zvýšenou pevností , mechanickou a tepelnou odolností a jejich požadavky vedou ke zlepšování vlastností dosud používaných materiálů , případně k vývoji zcela nových materiálů se zlepšenými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi . U jednotlivých součástí je zároveň požadována i vysoká přesnost a kvalita jejich opracování . Vedle toho se zároveň projevují i určité snahy o snižování spotřeby surovin i energie a tedy o lepší využití materiálu u jednotlivých výrobků .

V těchto souvislostech vystupuje do popředí technologický proces výroby , při němž jednotlivé součástky a výrobky vznikají a zároveň se vytvářejí i jejich výsledné vlastnosti . Ve výrobě zaujímá důležité místo proces obrábění . Protože většina výše uvedených aspektů vede ve větší či menší míře ke zhoršování obrobiteľnosti konstrukčních materiálů , zvyšují se neustále požadavky jak na obráběcí stroje , tak na řezné nástroje , neboť nové trvanlivější a tvrdší konstrukční materiály vyžadují ještě tvrdší materiál pro obráběcí nástroje . Zároveň se ve stále větší míře orientuje pozornost na otázky spolehlivosti a životnosti výrobků , jež úzce souvisí zejména s úrovní dokončovacích operací . Z tohoto důvodu nároky na tyto operace neustále rostou . Také zdokonalování technologií výroby polotovarů , které umožňuje snižovat přídavky na obrábění , a tak zároveň snižovat rozsah těžkých a energeticky náročných operací , opět vede ke zvyšování nároků na energeticky méně náročné dokončovací operace .

Jednou z nejrozšířenějších dokončovacích operací je proces broušení . Ač patří broušení mezi nejstarší techno-

logie obrábění vůbec , zaujímá v současné strojírenské výrobě velmi významné místo a řada prognóz svědčí o tom , že jeho význam ještě nadále poroste . Broušení je především procesem dokončovacím , ovšem vedle toho je v řadě případů také jediným procesem , pomocí kterého můžeme obrábět velmi tvrdé a těžkoobrobitelné materiály . V poslední době nabývá na významu také jako proces hrubovací , kdy probíhá za velké tloušťky odebírané vrstvy materiálu .

Značná pozornost je proto stále věnována také výzkumu procesu broušení . Jako velmi výhodné se v tomto směru jeví použití metod modelování . Jedna z těchto metod - metoda matematického modelování kinematiky procesu broušení pomocí simulační techniky bude vysvětlena v této práci .

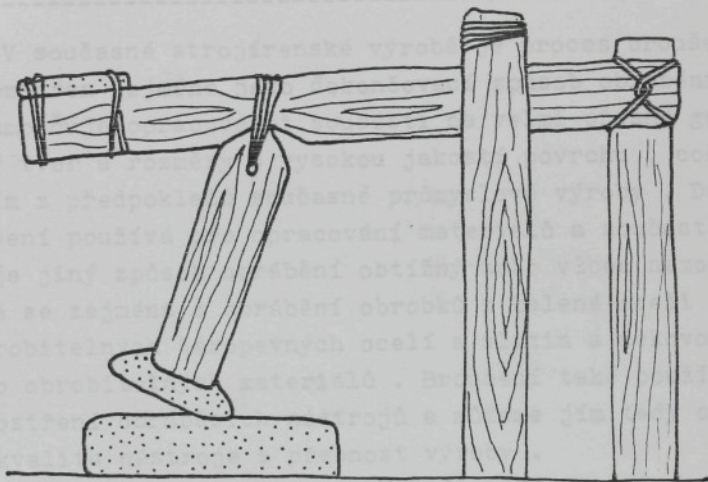


Obr. 1. Neolitická pila na kámen /5,404,130/

las přenesl určit , kdy bylo započato s obráběním kovů , ale je jisté , že již ve starověku byl vynalezen rotační " brousící kotouč " , který sloužil k nastření stromů i nástrojů a dochoven zůstal např. i středověký návod stroje na vybrušování válců /5,404,130/ od Lecharde de Vinsingh (přibí. z roku 1 300) . Koncem středověku se již naučili využívat k pohonu svých brousících strojů energii vodního toku .

1.1. Z historie broušení

Broušení je způsob obrábění materiálu , kdy do záběru přicházejí jednotlivé částice brusiva náhodného tvaru. Tento způsob obrábění nástrojem s nedefinovanou geometrií břitů patří k nejstarším způsobům obrábění vůbec . Na základě průzkumu archeologů bylo prokázáno , že broušení bylo používáno již před 40 tisíci lety /130/ k ostření nástrojů , zbraní a předpokládá se také , že již v době kamenné byly pro dělení kamenných kvádrů použity brousicí nástroje ve formě pil na kámen (obr.1) . Nástroje byly zhotoveny z některých volně se v přírodě vyskytujících nerostů a hornin , např. z pískovce, křemene , smirku ap. Ne-



Obr. 1. Neolitická pila na kámen /5,104,130/

lze přesně určit , kdy bylo započato s obráběním kovů , ale je jisté , že již ve starověku byl vynalezen rotující " brousicí kotouč " , který sloužil k ostření zbraní i nástrojů a dochován zůstal např. i středověký návrh stroje na vybrušování válců /104,130/ od Leonarda da Vinciho (přibl. z roku 1500) . Koncem středověku se lidé naučili využívat k pohonu svých brousících strojů energie vodního toku .

Prudký rozvoj technologie obrábění však lze u nástrojů s nedefinovanou geometrií břitů pozorovat od druhé poloviny 19.století , když strojírenství stanulo před úkolem hospodárně a rychle vyrábět přesné součásti ve velkém množství . V tomto období byl vynalezen umělý brousicí kotouč (r.1859) a byla sestavena první univerzální bruska (r.1860) . Také se podařilo uskutečnit syntézu karbidu křemíku (r.1891) .

Již v roce 1893 byl karbid křemíku průmyslově vyroben také v Čechách , v Benátkách nad Jizerou . V tamějším závodě byly za vedení Ing. Wilsona zhotoveny jedny z prvních brousicích kotoučů z umělého brusiva na světě /131/ .

1.2. Postavení procesu broušení v současné strojírenské výrobě

V současné strojírenské výrobě je proces broušení značně rozšířen zejména jako dokončovací způsob obrábění, neboť umožňuje opracovávat součásti na velmi přesný geometrický tvar a rozměry s vysokou jakostí povrchu , což je jedním z předpokladů současné průmyslové výroby . Dále se broušení používá pro opracování materiálů a součástí pro něž je jiný způsob obrábění obtížný nebo vůbec nemožný . Jedná se zejména o obrábění obrobků z kalené oceli , z těžkoobrobitelných žáropevných ocelí a slitin a nekovových těžko obrobitelných materiálů . Broušení také používáme při ostření obráběcích nástrojů a můžeme jím tedy ovlivnit kvalitu nástroje a přesnost výroby .

Specializace závodů , zhromadňování výroby a zavádění nových technologií výroby polotovarů - jako přesné lití , tváření ap. , umožňují neustále snižovat přídavky na obrábění součástí . Můžeme je často přímo brousit , aniž bychom je obráběli jinými nástroji . Další možností je použití speciálních strojů , které umožňují současné dokončovací obrábění na více plochách součástí . Nižší nároky na upínání a manipulaci s obrobkem , na údržbu nástroje a odvod třísek umožňují vedle podstatného zvýšení přesnosti výroby u těchto strojů dosáhnout úspor času i nákladů . Z hlediska produktivity a výrobních nákladů pak může broušení konkurovat soustružením , frézováním i dalším způsobům obrábění .

Jako účinný prostředek ke zvýšení produktivity práce a kvality povrchu je často doporučováno tzv. rychlostní broušení. Při současném zvýšení obvodové rychlosti kotouče a rychlosti posuvu nedochází ke změnám geometrie třísky, kvality povrchu a také velikost řezných sil zůstává zhruba stejná. Dalším způsobem zvyšujícím produktivitu práce je tzv. silové broušení, které lze použít v těžkém strojírenství při broušení velkých výkovků a odlitků.

Požadavky stále vyšší přesnosti výroby a obrábění materiálů se ztíženou obrobitelností je možno řešit při použití technologie broušení. Proto se také předpokládá, že v budoucnu se bude 40 až 50 % všech součástí opravovat touto technologií /8/.

$A = f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}, C_{30}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}, C_{38}, C_{39}, C_{40}, C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{45}, C_{46}, C_{47}, C_{48}, C_{49}, C_{50}, C_{51}, C_{52}, C_{53}, C_{54}, C_{55}, C_{56}, C_{57}, C_{58}, C_{59}, C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{64}, C_{65}, C_{66}, C_{67}, C_{68}, C_{69}, C_{70}, C_{71}, C_{72}, C_{73}, C_{74}, C_{75}, C_{76}, C_{77}, C_{78}, C_{79}, C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}, C_{85}, C_{86}, C_{87}, C_{88}, C_{89}, C_{90}, C_{91}, C_{92}, C_{93}, C_{94}, C_{95}, C_{96}, C_{97}, C_{98}, C_{99}, C_{100})$

Kde A označuje obecnou zkoumanou veličinu (tvrdost kotouče, řeznou sílu, drsnost povrchu broušené plochy, okamžitou teplotu broušení) a C_1 až C_{100} jsou součinitelé charakterizující postupně obráběný materiál, druh brusiva, pojivo, tvrdost a strukturu kotouče, řeznou kapalinu, přesnost a tuhost brusky, kvalitu provedení brusicího kotouče. Dále proces ovlivňuje vzdálenost mezi army brusiva, průměr obrobku a brusicího kotouče, šířka brusicího kotouče, otáčky kotouče a obrobku, hloubka záběru a posuv. Výzkum je orientován na vyhodnocování nejdůležitějších vlastností brusicích kotoučů, zejména na charakterizování pracovního povrchu /3, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 107/, tvrdosti kotouče /18/, na zkoumání vlastností brusicích materiálů /105, 106/ a pojiva /106/. Na základě zjištění, že se kotouč vlivem působení řezných sil při záběru určitým způsobem deformuje, byly vyhodnocovány pružné vlastnosti kotoučů /19, 39, 42, 83/. Řada výzkumných prací je zaměřena na charakterizování kinematických a dynamických poměrů při broušení /20, 21, 22/, teplot a sil /23, 24, 25, 26, 27, 36/ a procesu spotřebování army brusiva /103, 23, 29, 30, 31, 32, 34, 89/ nebo na neopak nabývají otáčkami působení řezné kapaliny /38, 87/ nebo problematikou chvění a tuhosti soustavy stroj - nástroj - obrobek /37, 39, 88, 89, 90/. Další práce

2. POZNATKY O VÝZKUMU PROCESU BROUŠENÍ

Přestože patří technologie broušení mezi nejstarší způsoby obrábění vůbec , vznikají výzkumné práce zaměřené na tuto problematiku až na přelomu 19. a 20. století.

Při studiu výzkumných prací v oblasti broušení lze rozlišit dva směry . První je orientován na zkoumání reálného procesu a druhý směr se zabývá modelováním dějů při broušení .

Výzkumné práce prvního směru , zabývající se zkoumáním reálného procesu , zahrnují vliv široké škály různých faktorů , které Maslov /12/ formuloval v obecné rovnici :

$$A = f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, \ell, d, D, H_1, \eta_k, n_{ob}, h_z, s, C_6, C_7, C_8) \quad (1) ,$$

kde A označuje obecnou zkoumanou veličinu (trvanlivost kotouče , řeznou sílu , drsnost povrchu broušené plochy , okamžitou teplotu broušení) a C_1 až C_8 jsou součinitelé charakterizující postupně obráběný materiál , druh brusiva , pojivo , tvrdost a strukturu kotouče , řeznou kapalinu , přesnost a tuhost brusky , kvalitu orovnění brousicího kotouče . Dále proces ovlivňuje vzdálenost mezi zrny brusiva , průměr obrobku a brousicího kotouče , šířka brousicího kotouče , otáčky kotouče a obrobku , hloubka záběru a posuv . Výzkum je orientován na vyhodnocování nejdůležitějších vlastností brousicích kotoučů , zejména na charakterizování pracovního povrchu /3,13,14,15,16,17,19,107/ , tvrdosti kotouče/18/ , na zkoumání vlastností brousicích materiálů /105,108/ a pojiva /106/ . Na základě zjištění , že se kotouč vlivem působení řezných sil při záběru určitým způsobem deformuje , byly vyhodnocovány pružné vlastnosti kotoučů /19,39,42,83/ . Řada výzkumných prací je zaměřena na charakterizování kinematických a dynamických poměrů při broušení /20,21,22/ , teplot a sil /23,24,25,26,27,36/ a procesu opotřebování zrn brusiva /103,28,29,30,31,32,84,85/ nebo se naopak zabývají otázkami působení řezné kapaliny /38,87/ nebo problematikou chvění a tuhosti soustavy stroj - nástroj - obrobek /37,39,88,89,90/. Další práce

charakterizují proces tvorby třísky při broušení /40,41,42, 43,74/ a poukazují na význam tloušťky třísky . S použitím této veličiny pak lze vyjádřit ekvivalentní tloušťku třísky i jiné parametry broušení v diagramech broušení /43,44/. Stav povrchu obrobku po obrábění , deformace a zbytková pru-
tí byla zkoumána dalšími autory /103,45,46,47,48,49,28,91, 92/ . Stav obrobku je také ovlivněn vzájemným působením a vlivem fyzikálně-chemických vlastností zrn brusiva a opracovávaného materiálu /50/ . Velká skupina prací je orientována přímo pro praktické použití . Jejich cílem je zejména vytvoření objektivních kritérií , pomocí kterých je možno kvalitativně hodnotit brousicí kotouče /51,93,102/ , volit vhodný brousicí kotouč pro daný materiál obrobku /52,1,94, 110,111/ , případně vytvoření databanky řezných podmínek /54,55,56,103/ nebo lze do této skupiny zařadit práce , které charakterizují progresivní metody broušení se zvýšenou řeznou rychlostí /57,58,59,91/ a při použití nově vyvíjených brousících nástrojů a metod broušení /31,60,61,62,63,64,65, 95,96,97,98,99,100,101/ .

Výzkumné práce druhého směru , které se zabývají modelováním procesu broušení , umožňují pronikat hlouběji ke kořenům dané problematiky , protože umožňují názorněji realizovat pohled na oblast a na procesy při vytváření třísky a při vzniku nových povrchů , nebo umožňují matematickou formou popsat děje při broušení . Modelování procesu se ovšem na druhé straně provádí vždy za cenu určitých zjednodušení, kdy výsledky jsou platné pouze za daných podmínek , protože dosud nejsou přesně ujasněny otázky tvaru , polohy a počtu zrn účastnících se procesu obrábění , stejně jako vlivy dalších faktorů , zejména chladicích a mazacích kapalin , chvění stroje nebo vlastností materiálu obrobku . Řada autorů použila pro výzkumy brousicí zrna ve formě zvětšeného modelu /12,53,66,69/ nebo byla použita brousicí zrna skutečná / 45,67,68/ . S modely zrn byly prováděny experimenty , které více či méně simulovaly broušení , a to v reálných podmínkách, tzn. že určitým zrnem byl obráběn skutečný materiál . Proces broušení lze ovšem také simulovat matematicky. Byla vypracována metoda , která při použití prostorové si-

mulační techniky umožňuje uskutečnit proces broušení na číslicovém počítači /10,11,20,70,71,72,73,74,75,76,112/. Je také možné využít statistického přístupu /9/. Matematickou formou lze též popsat teploty a teplotní pole v obrobku při broušení /25,74,78,79/. Na odlišném principu, ovšem s použitím metod matematického modelování procesu broušení, jsou založeny přístupy /80,81,82/ umožňující s použitím výpočetní techniky stanovit hospodárné řezné podmínky, které mohou sloužit jako podklad pro externí optimalizaci broušení.

2.1. Výběr a zdůvodnění daného úkolu

Již v úvodu této práce bylo pojednáno o postavení procesu broušení ve strojírenské výrobě. Lze předpokládat, že v souvislosti s požadavky neustálého zvyšování technické úrovně výroby jeho význam nadále ještě poroste.

Výzkum procesu broušení je proto orientován jak na další vývoj obráběcích strojů, tak na zkoumání dějů, ke kterým dochází při odebírání materiálu obrobku. U moderních brusek bývá konstrukční řešení na takové úrovni, že v současné době již v tomto směru nelze dosáhnout podstatného zlepšení. Další výzkum je proto orientován zejména na problematiku hospodárného využití těchto strojů a stanovení optimálních řezných podmínek, což úzce souvisí s otázkami vzájemného působení brousicího nástroje na obrobek, s principy tvorby třísky ap. Ukazuje se, že pro získání informací o elementárních procesech při broušení jsou vhodné zejména metody modelovací. Experimentální výzkum je však i v tomto případě značně obtížný, neboť oblasti tvorby třísky jsou velmi špatně přístupné.

Byly proto hledány i jiné cesty, které by umožňovaly potvrdit zákonitosti zjištěné teoreticky a navíc získat i řadu dalších informací o procesech, ke kterým při broušení dochází. Jednou z nich je metoda matematického modelování. Tato metoda je založena na vytvoření dynamického stochastického modelu procesu broušení, pomocí kterého lze simulovat děje, ke kterým dochází při reálném broušení. Podstatou modelu je matematický popis probíhající interakce mezi zrný

brusiva a materiálem obrobku . Myšlenka realizovat model broušení simulační metodou pochází od H.Yoshikawy , T.Sata a J.Peklenika . Protože se nepodařilo nalézt žádnou publikaci , patent ap. , ve které by byla základní myšlenka blíže rozpracována , je v rámci úkolu SPZV III-1-5/05-04 "Vývoj metod a prostředků na identifikaci obrobitelnosti při broušení " zpracováváno vlastní řešení .

Cílem práce je vytvoření matematického modelu kinematiky procesu rovinného broušení obvodem kotouče , jehož prostřednictvím bude možno získat bližší údaje potřebné pro stanovení počtu aktivních zrn brusiva , pro vyjádření drsností povrchu obrobku , pro výpočet příčných průřezů nedeformovaných třísek a určení velikosti tangenciální složky síly při broušení .

2.2. Metodika zpracování úkolu

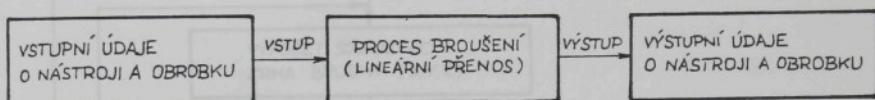
Při vytváření matematického modelu kinematiky procesu broušení je nutno vycházet z dosavadních poznatků a údajů o stavbě broušicího nástroje , o kinematice procesu broušení , z poznatků o procesu tvorby třísky při záběru zrna brusiva ap.

Je však třeba také stanovit určité zjednodušující předpoklady , které musí mít takový charakter , aby u procesu broušení byly zachovány jeho rozhodující znaky .

Z dosavadních poznatků vyplývá , že danou problematiku lze řešit dvěma metodami .

První metoda je založena na statistickém přístupu k problematice geometrie broušicího kotouče a k profilu broušeného povrchu na základě experimentálně nalezené přenosové funkce . Tímto způsobem řešil problematiku modelování procesu broušení J.Peklenik /9/ již v roce 1964 . Proces broušení byl uvažován jako systém vstup - výstup a mezi geometrií kotouče a vznikající drsností povrchu byla experimentálně nalezena přenosová funkce . Princip řešení je vyjádřen blokovým schématem na obr. 2 .

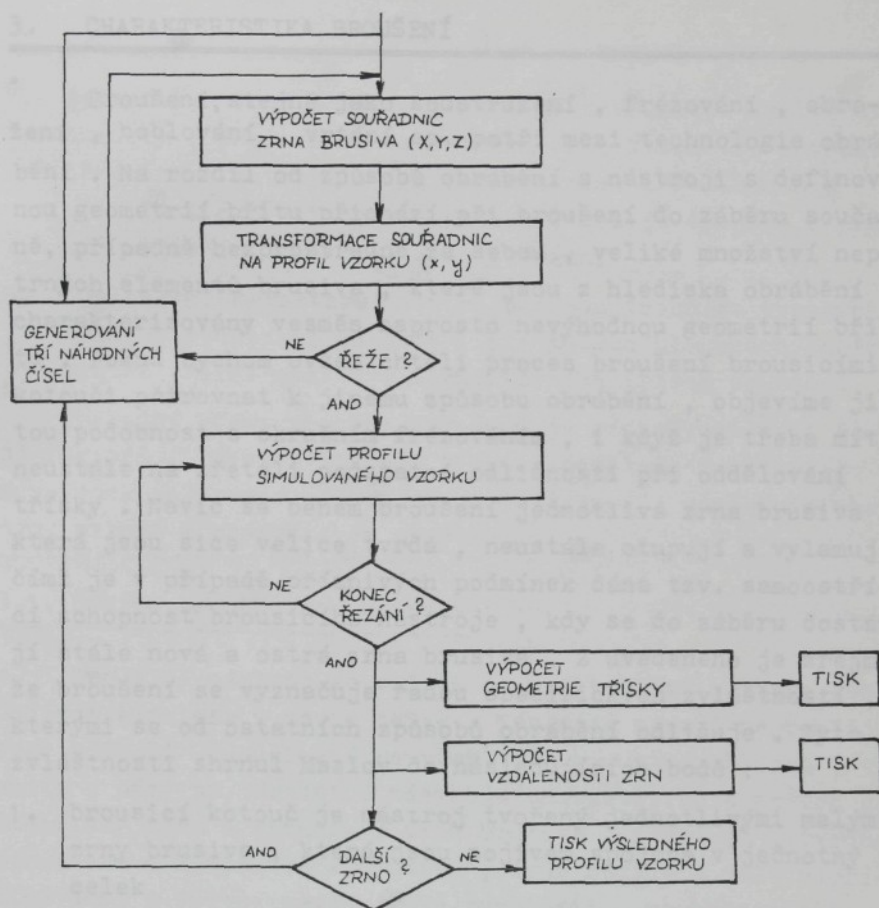
Druhá metoda řešení spočívá v modelování procesu broušení s použitím prostorové simulační techniky . Simulovaný



Obr. 2. Princip modelování procesu broušení statistickou metodou

proces broušení s použitím číslicového počítače popisují H.Yoshikawa a T.Sata /10/. S použitím metody Monte Carlo docílili náhodného rozmístění brousicích zrn na kotouči. Výpočtem určili vzdálenosti brousicích zrn, velikost průřezu třísky a charakterizovali obrobený povrch. Matematickými vztahy také popsali dynamické děje při broušení. Vycházel z poznatku, že simulované broušení je vlastně transformací souřadnic polohy brousicích zrn do souřadného systému vzorku. Na obrázku 3 je uveden obecný vývojový diagram, který charakterizuje princip modelování procesu broušení s použitím prostorové simulační techniky. Uvedený způsob modelování byl H.Yoshikawou a J.Peklenikem /11/ dále aplikován pro získání údajů o průřezu třísky. Byl vyhodnocován příčný průřez třísky, šířka, délka a také objem třísky.

Porovnáme-li obě používané metody, můžeme konstatovat, že první z nich ukazuje způsob, jak lze poměrně jednoduše vyjádřit závislost mezi hodnotami vstupní a výstupní veličiny, tedy např. mezi povrchem brousicího kotouče a povrchem materiálu obrobku. Důsledkem jednoduchoosti je ovšem na druhé straně to, že uvedená metoda nemá žádný vztah k dějům, ke kterým dochází při vlastním broušení, nevyjadřuje ani kinematické poměry při rytí zrn ani procesy, ke kterým dochází při oddělování třísky. Druhá metoda v podstatě matematicky popisuje děje, ke kterým dochází při skutečném - reálném působení jednotlivých zrn brusiva na povrch materiálu obrobku. Metoda umožňuje jednoduše porovnat výsledné hodnoty získané při broušení s použitím prostorové simulační techniky za daných podmínek s údaji o broušení, které realizujeme za stejných podmínek ve skutečnosti.



Obr. 3. Princip modelování procesu broušení s použitím prostorové simulační techniky /10/

Pro zkoumání podstaty dějů , ke kterým při broušení dochází , je proto vhodná metoda modelování s použitím prostorové simulační techniky . Kromě uvedených publikací /10, 11,20/ však nebyly o této metodě nalezeny žádné další prameny , kde by byla problematika konkrétněji rozvedena . Proto bylo na pracovišti autora přistoupeno k vytvoření vlastního modelu . Myšlenky H.Yoshikavy , T.Saty a J.Peklenika byly rozpracovány formou diplomové práce J.Růžičkou /70/ a dalšími /72,71,73/ . Nově vytvořený matematický model procesu broušení shrnuje předložená práce .

3. CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ

Broušení, stejně jako soustružení, frézování, obrábění, hoblování, vrtání ap., patří mezi technologie obrábění. Na rozdíl od způsobů obrábění s nástroji s definovanou geometrií břitu přichází při broušení do záběru současně, případně bezprostředně za sebou, veliké množství nepatrných elementů brusiva, které jsou z hlediska obrábění charakterizovány vesměs naprosto nevýhodnou geometrií břitu. Pokud bychom ovšem chtěli proces broušení brousicími kotouči přirovnat k jinému způsobu obrábění, objevíme jistou podobnost s okružním frézováním, i když je třeba mít neustále na zřeteli podstatné odlišnosti při oddělování třísky. Navíc se během broušení jednotlivá zrna brusiva, která jsou sice velice tvrdá, neustále otupují a vylamují, čímž je v případě příznivých podmínek dána tzv. samoostřicí schopnost brousicího nástroje, kdy se do záběru dostávají stále nová a ostrá zrna brusiva. Z uvedeného je zřejmé, že broušení se vyznačuje řadou specifických zvláštností, kterými se od ostatních způsobů obrábění odlišuje. Tyto zvláštnosti shrnul Maslov do následujících bodů:

1. brousicí kotouč je nástroj tvořený jednotlivými malými zrny brusiva, která jsou pojivem spojena v jednotný celek
2. na pracovní ploše brousicího kotouče jsou zrna brusiva nepravidelně rozložena
3. jednotlivá zrna mají nepravidelný geometrický tvar, na povrchu kotouče jsou nepravidelně výškově rozložena, mají různé zaoblené vrcholy a nejčastěji záporný úhel čela
4. brousicí kotouč nemá souvislý břit
5. existuje určitá závislost mezi tloušťkou a šířkou vrstvy materiálu odebranou jednotlivými zrny brusiva
6. řezné částice - zrna - mají velikou tvrdost, tepelnou odolnost, jsou ostré, křehké a vedle jejich otěru dochází při broušení také k jejich štěpení a vylamování, čímž je dána tzv. samoostřicí schopnost

brousicích nástrojů

7. jednotlivá zrna brusiva působí na povrchovou vrstvu dynamicky , před vlastním záběrem zrno klouže po povrchu obráběného materiálu , k intenzivnímu tření dochází i při plastické deformaci obrobku , což je spojeno s prudkým zvýšením okamžité teploty řezání
8. důsledkem charakteru nástroje pracujícího za vysokých řezných rychlostí je , že i při malých hloubkách záběru vzniká veliké množství elementárních třísek současně

Výsledný efekt procesu broušení je závislý na celé řadě faktorů , které ovlivňují vlastní oddělování materiálu a navenek se projevují vzniklými teplotami , působícími řeznými silami a charakterem povrchu .

3.1. Stavba brousicího nástroje

Brousicí nástroj se skládá ze zrn brusiva , která jsou pojivem stmelena v pevný celek . Nástroje mívají nejčastěji tvar kotoučů , používají se však také brousicí tělíška , segmenty , pásy ap. Brousicí nástroje charakterizuje jejich geometrický tvar a rozměry , druh brusiva , zrnitost , tvrdost , struktura a koncentrace brusiva , druh pojiva a dále například údaj o přípustné obvodové rychlosti , nevyváženosti , provedení ap. /113/ .

3.1.1. Materiál brusiva

Činitelem , který výrazně ovlivňuje vlastnosti brousicího nástroje a tím i jeho použití , je materiál brusiva /5,114,115/ . Jednotlivá zrna brusiva musí mít velmi vysokou tvrdost , aby si bříty zrn po určitou dobu zachovaly svoji řeznou schopnost a aby k odebírání materiálu docházelo především na straně obrobku , protože tvrdost obráběných ocelových součástí se ve stupních podle Mohse pohybuje mezi 5 a 6 , u kalené oceli 7 . Slinuté karbidy dosahují tvrdosti 8 stupňů dle Mohse /1/ . Dále musí být zrna odolná proti působení vysokých teplot a vůči cyklickým změnám

nám teploty při opětovných záběrech, a také musí být chemicky stálá, aby ani za vysokých tlaků a teplot nedocházelo k chemickým reakcím se vzduchem, materiálem obrobku nebo chladicí a mazací kapalinou. Žádné brusivo nevyhovuje plně ve všech hlediscích, proto se v praxi pro různé účely používá více druhů přírodních a zejména umělých brusiv.

Přírodní brusiva, jako například křemen, korund nebo smírek, se používají spíše výjimečně, zejména pro obrábění dřeva, kůže, případně pro leštění skel v optice. Přírodní diamanty, které z důvodu nedostatečné čistoty a nevhodné barvy nelze použít na šperky, jsou používány pro výrobu brousicích nástrojů. Kromě korundu a diamantu mají přírodní brusiva nedostatečnou tvrdost, jejich kvalita nebývá konstantní, a proto jsou v porovnání s umělými brusivy velice málo používána.

Ve strojírenské výrobě jsou nejrozšířenější brusiva umělá. Používá se brusiva z umělého korundu, karbidu křemíku, karbidu boru, kubického nitridu boru a syntetického diamantu.

Umělý korund je krystalický kysličník hlinitý, jeho teplota tání je $2\,050^{\circ}\text{C}$ a hustota v rozsahu od $3\,300$ do $3\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jeho tvrdost ve stupních podle Mohse dosahuje hodnoty 9, podle Knoop $16\,350 - 20\,850\text{ MPa}$ (mikrotvrdost je udávána až $3\,000\text{ HV}/3,12,114/$). Podle stupně čistoty a obsahu příměsí rozlišujeme řadu brousicích materiálů vyrobených z tohoto brusiva $/5,12/$.

Karbid křemíku se k broušení začal používat od konce minulého století. Teplota tání tohoto materiálu je $2\,540^{\circ}\text{C}$ a hustota v rozsahu od $3\,200$ do $3\,950\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jeho tvrdost ve stupních podle Mohse dosahuje $9 - 9,5$, podle Knoop $23\,500 - 26\,500\text{ MPa}$. Mikrotvrdost je oproti umělému korundu vyšší (až $29\,000\text{ MPa}$), stejně jako křehkost $/3,12/$. Brusivo z karbidu boru se i přes svoji značnou tvrdost používá poměrně málo a to zejména ve formě volného brusiva při lapování. Tvrdost malých krystalů dosahuje ve stupních dle Mohse hodnoty $9,5$ i více, dle Knoop $29\,000 - 31\,000\text{ MPa}$ a mikrotvrdost hodnoty $39\,000\text{ MPa}$. Kubický nitrid boru a syntetický diamant patří do skupiny

nejnovějších brusiv . Jejich výroba je značně energeticky a technicky náročná . Tvrdost kub.nitridu boru je v porovnání s dříve uvedenými brusivy výrazně vyšší , dle Knoop 45 000 - 47 000 MPa a mikrotvrdost se uvádí až 91 000 MPa . Tvrdost je pouze o málo nižší než tvrdost diamantu . Kubický nitrid boru má však daleko větší odolnost proti vysokým teplotám . K nejvýznamnějším vlastnostem diamantů patří jejich vysoká tvrdost , která je v porovnání s korundem nebo karbidem křemíku asi dvojnásobná , dle Knoop 50 000-87 000 MPa . Mikrotvrdost dosahuje hodnoty až 98 000 MPa . Tvrdost diamantu se však v různých rovinách výrazně odlišuje . Použití diamantů je omezeno na teploty do 900°C , při vyšších teplotách dochází ke grafitizaci . Diamantové brousicí nástroje používáme zejména pro broušení neželezných kovů , skla, hornin ap. , protože při broušení ocelí za vysokých teplot dochází k difuzi uhlíku a tím k výraznému chemickému opotřebení nástrojů .

3.1.2. Vliv struktury a pojiva na vlastnosti brousicího nástroje

Vlastnosti brousicích nástrojů ovlivňuje vedle materiálu brusiva zejména druh použitého pojiva a struktura nástroje .

Pojivo spojuje jednotlivá zrna brusiva mezi sebou a udržuje tato zrna ve vazbě tak dlouho , než se při broušení otupí . Při správně zvolené technologii broušení potom dochází k uvolnění zrn a tím se dostávají do záběru jiná , ostrá zrna . Na pojivo jsou kladeny následující požadavky /5/ :

- a) Pojivo musí být z dostatečně pevného materiálu
- b) Pojivo musí tvořit můstky s dostatečně velikým příčným průřezem
- c) Mezi zrnem brusiva a pojivem musí vzniknout pevné spojení

Na pojivo jsou kladeny ještě další požadavky . Například musí být odolné vůči působení řezných a chladicích kapalin

i vůči výkyvům teploty při broušení . Zároveň musí také umožňovat vytvoření kotoučů různých struktur . Při výrobě broušicích nástrojů se proto používá řada různých druhů anorganických a organických pojiv /114/ , v závislosti na požadovaných vlastnostech nástrojů a jejich použití .

Další veličinou , která charakterizuje broušicí kotouč je jeho struktura . Struktura udává rozložení broušicích zrn , pojiva a pórů . Hustou - uzavřenou strukturu používáme u kotoučů , kterými dosahujeme velkých řezných sil . Strukturu vysoceporézní - otevřenou používáme pro nástroje pracující za zvláště špatných řezných podmínek při obrábění vysocelegovaných nebo i " měkkých " materiálů . Relativně velké póry umožňují zabalení , transport a vynesení třísky z místa řezu , navíc umožňují vzduchu nebo kapalinám s chladicími účinky dobrý přístup do místa řezu . Při broušení vysoceporézními broušicími kotouči jsou proto řezné teploty poměrně nízké , tyto kotouče mají dlouhou trvanlivost , lehce se ovrňávají a mají dobrou samoostřicí schopnost /1,116,117/ .

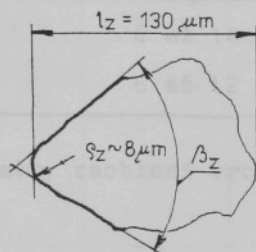
Struktura nástroje a druh použitého pojiva určují též tvrdost broušicího nástroje jako odpor proti silám vytrhávajícím jednotlivá zrna brusiva . Tvrdost nástroje je pouze velmi málo závislá na tvrdosti zrn brusiva .

3.1.3. Tvar zrn brusiva , jejich geometrie a proces opotřebování

Broušicí zrna jsou v podstatě mnohoúhelníky nepravidelného tvaru se zaoblenými vrcholy /122/ . Povrch zrn má vždy určitou drsnost , která je způsobena podmínkami při jejich vzniku a vnitřními nedokonalostmi krystalů /12/ . Profil nepoužitého neotupeného zrna z umělého korundu zrnitosti 80 je uveden na obrázku 4 .

Bylo stanoveno , že veličinou , která určuje velikost zrna , je hodnota šířky zrna /119,120,75/ . Za zrno brusiva považujeme částici broušicí hmoty nebo krystal , jehož šířka nepřevyšuje 4 mm a neklesá pod 0,028 mm . U zkoumaných abrazivních materiálů různých zrnitostí byl stanoven

poměr délky k šířce zrna v intervalu 0,89 - 5,75 a poměr šířky k výšce zrna v intervalu 1,32 - 2,05 . Některé star-



Obr. 4. Profil ostrého zrna brusiva z umělého korundu zrnitosti 80 při 500 násobném zvětšení /12/

ší práce uvažují brousicí zrna ve tvaru rovnoramenného trojúhelníka /20/ . Podrobnější výzkumy však ukázaly , že zrna brusiva mají ve všech případech zaoblený vrchol. Jestliže se při jinak stejných podmínkách zmenší rozměry zrn brusiva , zmenší se i střední velikost poloměru zaoblení vrcholu každého zrna . Střední hodnoty poloměrů zaoblení zrn se však v rozmezí každé skupiny zrnitosti mění pouze málo . Poloměry zaoblení vrcholu brousicích zrn /119/ se zmenšují od $100 \mu\text{m}$ do $0,7 \mu\text{m}$ úměrně se snižováním zrnitosti od 40 do M28 , což dle ČSN 22 40 12 odpovídá rozměru zrn $500/400 \mu\text{m}$ až $28/20 \mu\text{m}$. Střední hodnoty poloměrů v rozmezí jedné skupiny zrnitosti uvádí Maslov /12/ . Z publikovaných výsledků uvedených v tabulce 1 je zřejmé, že zrna karbidu křemíku jsou při stejných podmínkách ostřejší než zrna umělého korundu .

Experimentálním měřením byla zjištěna a vyhodnocena souvislost mezi poloměrem zaoblení vrcholu zrna a velikostí jeho vrcholového úhlu /12,118,119,121/ . Naměřené hodnoty poloměru zaoblení a vrcholového úhlu pro zrna různých zrnitosti jsou uvedeny v tabulce 2 . V tabulce 3 jsou navíc pro korundová a diamantová zrna přibližně stejné velikosti uvedeny hodnoty minimální tloušťky třísky .

Zrnitost	Poloměr zaoblení vrcholů zrn Q_z / μm /	
	Bílý elektrokorund	Černý karbid křemíku
80	8 až 14	6 až 12
40	6 až 12	4 až 9

Tab. 1: Poloměry zaoblení vrcholů zrn /12/

Rozměr zrn / μm /	Vrcholový úhel zrn β_z / $^\circ$ /	Poloměr zaoblení Q_z	
		střední hodnoty / μm /	krajní hodnoty / μm /
400	110	25	6,3-100
250	108,5	19	4,2- 83
160	106	13	2,8- 56
30	100	1	0,4- 15

Tab. 2: Tvar brousicích zrn v závislosti na jejich velikosti /118/

Vrcholový úhel zrn brusiva lze vyhodnotit , jestliže při zvětšení fotografujeme krystaly brusiva , např. v odraženém světle /12/ nebo přímo pozorujeme zvětšená zrna /108/ . Velikost tohoto úhlu lze také odvodit z profilu rýhy vzniklé po rytí zrnem brusiva /20/, i když v tomto případě nebudeme dosahovat dostatečné přesnosti , protože vzniklý profil bude ovlivněn deformacemi . Naměřené hodnoty vrcholových úhlů zrn z umělého korundu zrnitosti 40 se pohybují v rozmezí od 40° do 150° /12/ , u zrn z téhož materiálu zrnitosti 250 byly naměřeny úhly v rozmezí od 70° do 165° /108/ . Vrcholové úhly u směsi zrn karbidu křemíku zrnitosti 160-200 se pohybují v rozmezí od 32° do

148° /108/. Se zmenšením velikostí zrn se průměrná velikost vrcholového úhlu zmenšuje .

Poloměr zaoblení R_z / μm /		Vrcholový úhel β_z /° /		Minimální tloušťka tríscky a_{MIN} / μm /	
Diamant	Al_2O_3	Diamant	Al_2O_3	Diamant	Al_2O_3
1,1	8,5	52	98	0,11-0,5	0,85-4,2
3,2	10	57	101	0,32-1,6	1,0 -5,0
5,4	13	62	106	0,45-2,5	1,3 -6,5
7,8	18	65	108	0,78-3,9	1,8 -9,0

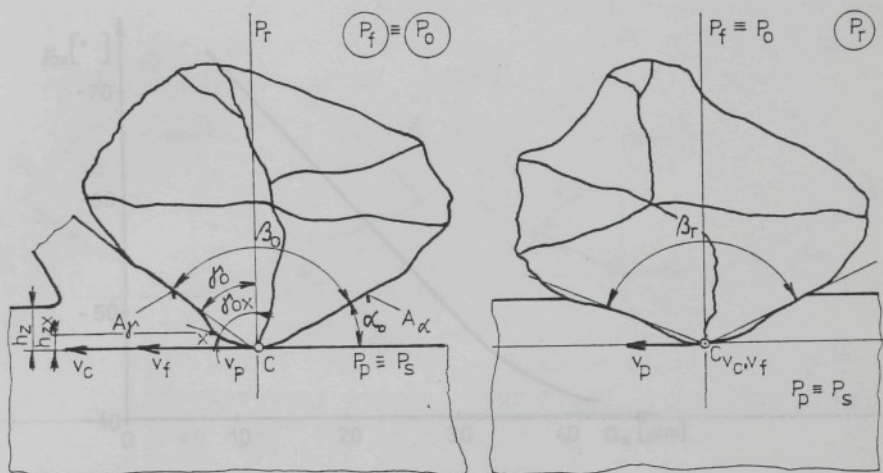
Tab. 3 : Charakteristika zrn brusiva a jejich záběru /121/

Tvar brousicích zrn je také podstatně ovlivněn jejich materiálem /108/. Zrna umělého korundu mají veliký počet ostrých hran , takže mohou dobře odebírat materiál obrobku . Zrna karbidu křemíku mají hladké plochy a menší počet řezných hran . Největší drsnost mají běžné syntetické diamanty /12/. .

Při vlastním broušení je rozhodující poloha , ve které je zrno uloženo v brousicím kotouči . Tato poloha bývá zpravidla náhodná a zrno v této obecné poloze je naznačeno na obrázku 5 . Vrchol brousicího zrna pak tvoří břit , u kterého lze rozlišit plochu čela A_γ a hřbetu A_α . Vrcholový úhel brousicího zrna je zároveň úhel břitu a ten udává spolu s poloměrem zaoblení vrcholu, v závislosti na poloze zrna v tělese nástroje, geometrii brousicího zrna . Budeme - li zrno považovat za elementární řezný nástroj , můžeme v bodě , který je vrcholem zrna , určit soustavu nástrojových rovin . Na obrázku 5 je znázorněna geometrie břitu zrna brusiva , kdy vektory hlavní řezné rychlosti a posuvu jsou orientovány v jednom směru .

U převážné většiny brousicích zrn dosahují úhly čela % záporných hodnot . Velikosti úhlů jsou uváděny od 0° do -45° /123/ nebo jsou střední hodnoty uváděny -45° až -55° /124/. Jiné prameny /118/ uvádějí , že úhly čela mají hodnotu minimálně -30° a jejich průměrná velikost je asi -54°

a dokonce je rozmezí pro úhel čela uváděno od -10° do -85° /23/. Zrna se silně záporným úhlem čela jsou velice



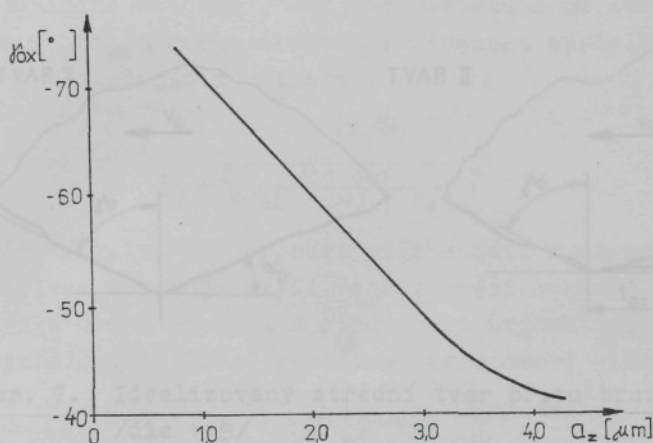
Obr. 5. Geometrie břitu zrna brusiva /7/

pevná a dobře odolávají tlakům , které na ně při broušení působí. U některých zrn však může být úhel α_0 také kladný . Tato zrna nebývají dostatečně pevná a při broušení se obvykle brzy vylamují nebo štěpí . Úhel hřbetu α_0 je při porovnání s nástroji s definovanou geometrií břitu naopak poměrně veliký .

Zaoblený vrchol broušicího zrna způsobuje , že velikost úhlu čela α_0 je závislá na tloušťce třísky. Z obrázku 6 je vidět , že pro minimální tloušťky třísky úhel α_0 roste do záporných hodnot přes -70° /125/. Je tedy zřejmé , že úhel α_0 je závislý nejen na poloze zrna , ale také na poloměru zaoblení vrcholu zrna a na tloušťce třísky.

Při zkoumání povrchů broušicích kotoučů bylo zjištěno , že na vrcholech zrn vznikají otěrové plošky /5, 118, 126/. Tyto plošky mohou vznikat při osovňování broušicího kotouče , avšak zejména vznikají během procesu řezání. Přesto , že zrna brusiva jsou velmi pevná a odolná proti vysoké teplotě , dochází při broušení k otupování zrn vlivem jejich odírání o povrch obráběného materiálu . Důsled-

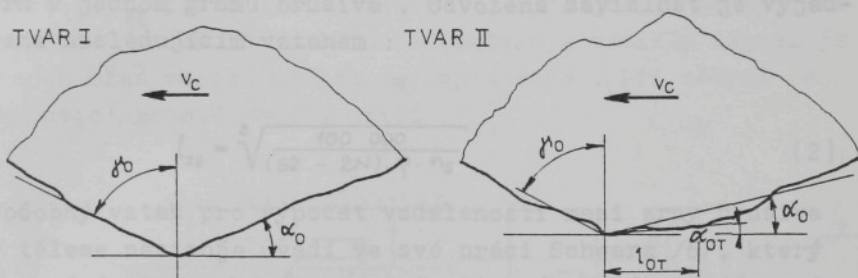
kem působících sil je , že na kontaktní ploše zrna vznikají vysoké tlaky a teploty . Takovéto podmínky ve spojení



Obr. 6. Závislost velikosti úhlu čela γ_{ox} na tloušťce třísky /125/

s difusními a oxidačními procesy způsobují změnu vlastností povrchové vrstvy zrna /127/ . Vzniká měkkší vrstvička , která je mechanickým působením odstraňována . Když je zrno v záběru , dochází k prudkému zvýšení jeho teploty . Následuje velice rychlé ochlazení , když zrno vystoupí z řezu a působí na něj okolní vzduch , případně chladicí a mazací kapalina . Důsledkem opakovaných záběrů je značné napěťové a tepelné namáhání zrna , které vede ke vzniku únavových trhlinek a k odlamování částí zrna . Vedle těchto jevů dochází také k chemickému a tepelnému opotřebení pojiva . Tím jsou jednotlivá zrna v průběhu času uvolňována a mohou se dále oddělit z tělesa nástroje . Opotřebení jednotlivých zrn brusiva způsobuje nárůst třecích sil do takové míry , že po dosažení určité mezní hodnoty je překročena pevnost pojivového mřístku a dojde k jeho zlomení . Uvolňování a odlamování jednotlivých zrn brusiva z tělesa nástroje způsobuje samoostřicí schopnost nástroje . Tvoří se nové břity nebo přicházejí do záběru neopotřebované břity ležící v nižších polohách .

Na obrázku 7 jsou znázorněny dva charakteristické profily brousicích zrn . Tvar I znázorňuje nové , neopotřebované zrno . Tvar II představuje běžné zrno , jaké se při



Obr. 7. Idealizovaný střední tvar břítu brousicího zrna
/dle 118/

broušení nejčastěji vyskytuje . Tato zrna se vyznačují vytvořenou ploškou délky l_{OT} . Délka otěrové plošky /126/ se po orovnnání brousicího kotouče pohybovala od 0,01 do 0,1mm. Střední hodnota byla 0,03 mm. Po odbroušení 500 mm³ materiálu se rozmezí délek zvětšilo od 0,01 do 0,2 mm a střední hodnota se zvětšila na 0,05 mm . Po odbroušení 1 000 mm³ se sice rozmezí délek nezměnilo , avšak střední hodnota se zvětšila na 0,08 mm . Při procesu opotřebování zrn brusiva dochází k tomu , že úhel hřbetu α_{OT} se přibližuje k nulovým hodnotám , přičemž se ovšem zvětšuje tření i řezná síla a zhoršují se poměry při broušení .

3.1.4. Topografie povrchu brousicího nástroje

Charakterizování způsobu uspořádání břitů na povrchu brousicího nástroje byl vždy jeden ze základních problémů při zkoumání procesu broušení . Přitom právě poznatky o rozdělení břitů na povrchu brousicího nástroje jsou východiskem pro simulování procesu broušení .

Střední vzdálenost mezi zrny v tělese brousicího nástroje je dána zejména velikostí zrn , strukturou a druhem pojiva . Pokud budeme předpokládat , že pro daný kotouč je

tato střední vzdálenost stálou veličinou , můžeme její velikost teoreticky určit . Dle Maslova /12/ je střední teoretická vzdálenost mezi zrny brusiva závislá na struktuře brousicího kotouče , na jeho hustotě a na středním počtu zrn v jednom gramu brusiva . Odvozená závislost je vyjádřena následujícím vztahem :

$$l_{zs} = \sqrt[3]{\frac{100 \ 000}{(62 - 2N) \cdot \varphi \cdot n_s}} \quad (2)$$

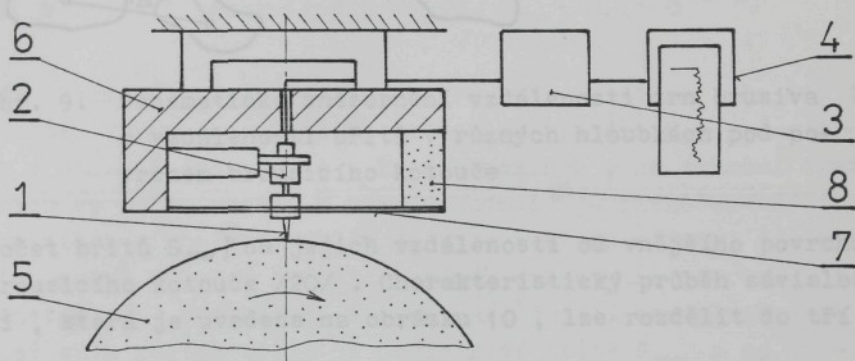
Podobný vztah pro výpočet vzdálenosti mezi zrny brusiva v tělese nástroje uvádí ve své práci Schwarz /6/, který ve své úvaze vychází z poměrů při nejhustším prostorovém uspořádání ve formě krychlové prostorově středěné mřížky:

$$l_{zs} = \sqrt[3]{\frac{1,94 \cdot 10^5}{V_k \cdot \varphi \cdot n_{zk}}}$$

Vzdálenost jednotlivých břitů na povrchu brousicího nástroje je sice na vzdálenosti zrn brusiva v tělese kotouče závislá , ovšem navíc je ovlivněna tvarem zrn a procesem orovnávaní brousicího kotouče . V průběhu broušení se vzdálenost mezi břitů neustále mění , což je důsledkem probíhajícího procesu opotřebení .

Zkoumáním vzdáleností břitů brousicích zrn na povrchu nástroje , tedy vyhodnocováním topografie brousicího kotouče , se zabývala řada autorů (kap.2) .Přístupy různých autorů se s postupem doby značně zdokonalily . Jako pravděpodobně první zkoumal topografii kotoučů Goedicke /129/ metodou vyhodnocování otisků povrchu kotoučů . Podobné přístupy byly založeny na odvalování obarvených kotoučů po papírovém pásu , případně na odvalování kotoučů po skleněné, sazemi začerněné desce . Nedostatkem všech těchto metod bylo , že se počty břitů nedaly většinou jednoznačně určit . Jiné metody byly založeny na použití optických metod např. s použitím rastrovacích elektronových mikroskopů nebo byly založeny na vyhodnocování odražených světelných paprsků . Potíže při použití těchto metod pramení především z členitosti povrchu brousicího nástroje . Nedostatkem těchto metod je , že není možné dostatečně přesně vyhodno-

tit výškové rozložení břitů . Nejvíce se proto osvědčila dotyková metoda Brücknerova /3/ , pomocí které je možno vyhodnotit počet břitů v různých hloubkách vzhledem k povrchu kotouče . Princip metody je zřejmý z obrázku 8 . Vertikální pohyb diamantového snímacího hrotu na povrchu kotouče je indukčním snímačem snímán a vzniklý signál je veden přes měřicí můstek do zapisovače . Při měření se brousicí kotouč pomalu otáčí .

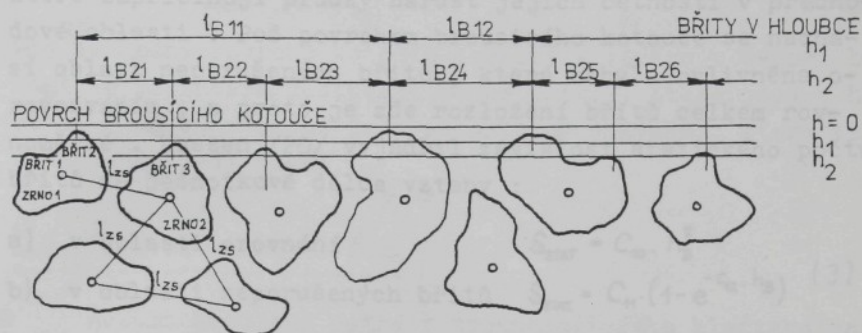


- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1 - diamantový snímací hrot | 5 - brousicí kotouč |
| 2 - indukční snímač | 6 - těleso měřidla |
| 3 - měřicí můstek | 7 - listová pružina |
| 4 - zapisovač | 8 - tlumicí materiál |

Obr. 8. Uspořádání měřicího zařízení pro měření profilu brousicího kotouče /3/

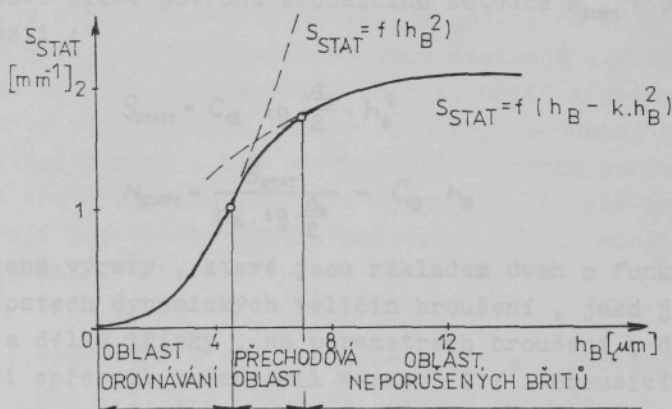
Vzdálenost mezi zrnny v tělese brousicího nástroje a vzdálenost břitů brousících zrn je schematicky znázorněna na obrázku 9 . Z obrázku je zřejmé , že vzdálenosti břitů mohou být větší než vzájemné vzdálenosti zrn brusiva , pokud vyhodnocujeme břity v malé hloubce pod povrchem brousicího kotouče . Tato situace odpovídá způsobu broušení , kdy dochází ke vzniku třísek malé tloušťky . V případě , že vyhodnocujeme břity ve větší hloubce , bývají vzdálenosti břitů menší než vzájemné vzdálenosti zrn , protože každé zrno může tvořit více břitů . Použitím dotykové metody

byly určeny závislosti četnosti výskytu břitů (statický



Obr. 9. Schematické znázornění vzdálenosti zrn brusiva a vzdálenosti břitů v různých hloubkách pod povrchem brousícího kotouče

počet břitů S_{STAT}) na jejich vzdálenosti od vnějšího povrchu brousícího kotouče /20/. Charakteristický průběh závislosti, která je uvedena na obrázku 10, lze rozdělit do tří



Obr. 10. Závislost statického počtu břitů na jejich vzdálenosti od vnějšího povrchu brousícího kotouče /dle 20,21/

oblastí. Oblast orovnávaní je charakterizována tím, že mnoho břitů na povrchu nástroje bylo orovnááním vylomeno.

Tím však těsně pod povrchem vzniklo mnoho nových břitů , které zapříčiňují prudký nárůst jejich četnosti v přechodové oblasti . Pod povrchem brousicího kotouče se nachází oblast neporušených břitů , která nebyla ovlivněna orovnáváním , a proto je zde rozložení břitů celkem rovnoměrné . Kassen /20/ vyjádřil závislost statického počtu břitů na jednotkové délce vztahy :

$$\begin{aligned} \text{a) v oblasti orovnění} \quad S_{\text{STAT}} &= C_{10} \cdot h_B^2 \\ \text{b) v oblasti neporušených břitů} \quad S_{\text{STAT}} &= C_{11} \cdot (1 - e^{-C_{12} \cdot h_B}) \end{aligned} \quad (3)$$

Při zkoumání práce brousicích zrn bylo zjištěno , že i při značném výkonu broušení se do záběru dostávají zejména zrna v oblasti orovnávané . Za předpokladu , že střední tvar břitu ve směru napříč k obvodu kotouče je rovnoramenný trojúhelník s vrcholovým úhlem β_z a že hustota břitů , tj. místní počet břitů v jednotce objemu pracovního povrchu , je konstantní , formuloval Kassen následující závislost mezi statickým počtem břitů na jednotkové délce S_{STAT1} a na jednotkové ploše povrchu brousicího kotouče N_{STAT1} v orovnávané oblasti :

$$S_{\text{STAT1}} = C_{13} \cdot \tan \frac{\beta_z}{2} \cdot h_B^2 \quad (4)$$

$$N_{\text{STAT1}} = \frac{S_{\text{STAT}}}{h_B \cdot \tan \frac{\beta_z}{2}} = C_{13} \cdot h_B \quad (5)$$

Uvedené výrazy , které jsou základem úvah o funkčních závislostech dynamických veličin broušení , jako jsou tloušťka a délka třísky , na parametrech broušení , dále ve své práci zpřesnil a zobecnil Werner /21/ . Brousicí zrna uvažuje se zaoblenými vrcholy a také řeší otázku hustoty břitů v závislosti na hloubce pod základní válcovou plochou brousicího kotouče . Výše uvedené vztahy pro výpočet veličin charakterizujících topografii brousicího kotouče pak vyjádřil následujícím způsobem :

$$S_{\text{STAT1}} = C_{14} \cdot K_S \cdot h_B^{C_{15}} \quad (6)$$

$$N_{STAT1} = C_{14} \cdot h_B^{C_{16}} \quad (7)$$

Při zkoumání povrchů kotoučů dochází k závěru , že při broušení se do záběru dostávají pouze břity , které jsou v hloubce od 2 do 4 μm , což je v oblasti orovnávané , která sahá do hloubky 5 až 8 μm .

3.2. Proces tvorby třísky

Ačkoli broušení patří z technologického hlediska do stejné kategorie obrábění jako metody obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu , je mechanismus oddělování třísky i další procesy s ním související u broušení rozdílný .

Pokud bychom ovšem chtěli proces broušení brousicím kotoučem přirovnat k některému ze způsobů obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu , objevíme jistou podobnost s frézováním válcovou frézou /77,66,5/ . Podobné jsou ovšem pouze kinematické zákonitosti , kdežto geometrie nástroje a proces tvorby třísky je podstatně odlišný . Rozdíly jsou dány především stavbou nástrojů . Fréza má souvislé ostří , konstantní geometrii břitů a jednotlivé zuby jsou od osy nástroje stejně vzdáleny. Brousicí kotouč tyto vlastnosti nemá . Při porovnání záběrových poměrů zubů frézy a zrn brousicího kotouče zjistíme , že při broušení nastávají pro tvorbu třísky podstatně horší podmínky než při frézování .

3.2.1. Trajektorie zrna brusiva a délka stykového oblouku při rovinném broušení obvodem kotouče

Při rovinném broušení obvodem kotouče dochází k vzájemnému pohybu mezi kotoučem a obrobkem. Brousicí kotouč se otáčí rychlostí v_k a obrobek koná rovnoměrný přímočarý pohyb rychlostí v_{ob} . Při určování relativního pohybu brousicího kotouče vzhledem k obrobku předpokládáme, že obrobek je nehybný a brousicí kotouč vykonává jak pohyb rotační, tak pohyb přímočarý /12/. Lze tedy vyšetřit relativní pohyb

souřadnic . Trajektorie bodu A je pak dána následujícími
rovnícemi :

$$V_{A2} = R \cdot (1 - \cos \psi)$$

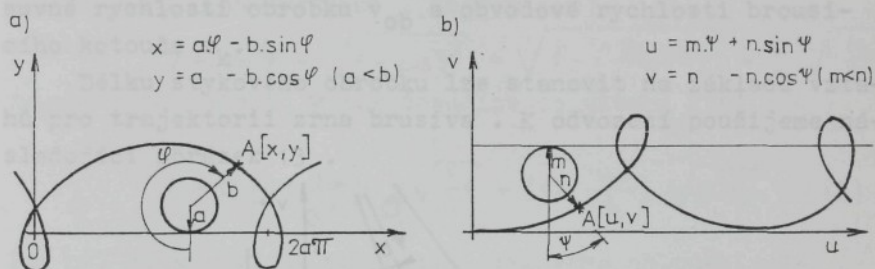
$$\frac{v_{\psi}}{v_0} = \frac{\psi}{2 \cdot \pi} \quad , \quad v_{\psi} = \frac{v_0}{2 \cdot \pi} \cdot \psi$$
$$V_0 = \frac{V_{ob}}{n_K}, \quad V_Y = \frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot n_K} \cdot \psi \quad (9)$$
$$V_T = \frac{V_{ob} \cdot R}{V_k} \cdot \psi$$
$$\begin{aligned} u_{A2} &= R \cdot \left(\sin \psi \pm \frac{v_{ob}}{v_k} \cdot \psi \right) \\ v_{A2} &= R \cdot (1 - \cos \psi) \end{aligned} \quad (10)$$

Znaménka : + platí pro v_{ob} působící proti směru v_k
 - platí pro v_{ob} působící ve směru v_k

Soustava rovnic (10) vyjadřuje relativní pohyb broušícího kotouče vzhledem k obrobku . V literatuře /12,66/ se udává , že trajektorii , kterou bod A opisuje , je prodloužená cykloida - trochoida . Obecné rovnice prodloužené cykloidy charakterizují následující výrazy /132/:

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \varphi - b \cdot \sin \varphi \\ y &= a - b \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (11)$$

Soustavy rovnic (10) a (11) jsou sice podobné , ovšem přesto nelze okamžitě stanovit , že trajektorii bodu A je skutečně trochoida . Je to z toho důvodu , že soustavy rovnic jsou stanoveny v různých souřadných systémech , jak je zřejmé z obr. 12 . Vyšetříme dále, zda obě soustavy rovnic



Obr. 12. Souřadné systémy prodloužené cykloidy
 a) obecný případ
 b) souřadný systém při broušení

popisují tutéž křivku . Pokud budeme předpokládat , že na obrázku 12a je prodloužená cykloida situována v I.kvadrantu souřadného systému x , y , bude ve IV.kvadrantu charakterizována vztahy :

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \varphi - b \cdot \sin \varphi \\ -y &= -a + b \cdot \cos \varphi \end{aligned}$$

Jak je zřejmé z obr. 12 b nestačí ovšem prodlouženou cyklo-
idu otočit okolo osy x , je nutno ji ještě posunout.
Proto zavedeme následující transformace :

$$\varphi = \psi + \pi$$

$$x = u + a \cdot \pi$$

$$y = -v + (a+b)$$

Po dosažení získáme výrazy :

$$u = a \cdot \psi + b \cdot \sin \psi$$

$$v = b - b \cdot \cos \psi$$

(12)

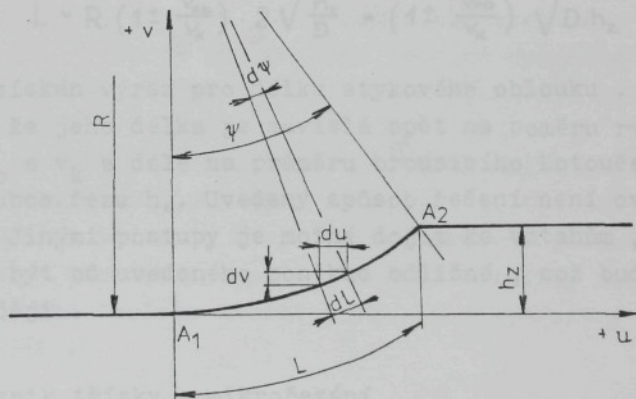
Pokud bude platit, že :

$$a = R \cdot \frac{v_{ob}}{v_k}$$

$$b = R$$

bude soustava rovnic (12) stejná jako soustava rovnic
(10) pro v_{ob} působící proti směru v_k . Trajektorie bodu
A je tedy skutečně trochoida a její tvar bude závislý
na poloměru broušícího kotouče R a zejména na poměru po-
suvné rychlosti obrobku v_{ob} a obvodové rychlosti brouš-
ícího kotouče v_k .

Délku stykového oblouku lze stanovit na základě vzta-
hů pro trajektorii zrna brusiva. K odvození použijeme ná-
sledující obrázek 13.



Obr. 13. Délka stykového oblouku při rovinném broušení
obvodem kotouče

Ze soustavy rovnic (10) vyplývá :

$$du = R \cdot (\cos \Psi \pm \frac{v_{ob}}{v_k}) \cdot d\Psi \quad (13)$$

$$dv = R \cdot \sin \Psi \cdot d\Psi$$

Elementární délku stykového oblouku pak můžeme vyjádřit ve tvaru :

$$dL = \sqrt{du^2 + dv^2} = R \cdot \sqrt{1 \pm 2 \cdot \frac{v_{ob}}{v_k} \cdot \cos \Psi + \left(\frac{v_{ob}}{v_k}\right)^2} \cdot d\Psi$$

Hodnota úhlu Ψ je velmi malá , proto je možno úhel $\cos \Psi$, pro $\Psi \rightarrow 0$, uvažovat přibližně rovný 1 , takže :

$$dL = R \cdot \sqrt{1 \pm 2 \cdot \frac{v_{ob}}{v_k} + \left(\frac{v_{ob}}{v_k}\right)^2} \cdot d\Psi = R \cdot \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{v_k}\right) \cdot d\Psi \quad (14)$$

Nyní lze vyjádřit celkovou délku stykového oblouku :

$$L = \int_0^{\Psi} R \cdot \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{v_k}\right) \cdot d\Psi = R \cdot \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{v_k}\right) \cdot \Psi \quad (15)$$

V získaném vztahu určíme dále hodnotu Ψ , přičemž pro $\Psi \rightarrow 0$, můžeme přibližně uvažovat , že $\Psi \doteq \sin \Psi$

$$\Psi \doteq \sin \Psi = \sqrt{1 - \cos^2 \Psi} = \sqrt{1 - \left(\frac{R - h_z}{R}\right)^2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}}$$

Vypočítanou hodnotu Ψ pak dosadíme do vztahu (15) :

$$L = R \cdot \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{v_k}\right) \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}} = \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{v_k}\right) \cdot \sqrt{D \cdot h_z} \quad (16)$$

Tím byl získán výraz pro délku stykového oblouku . Je zřejmé , že jeho délka je závislá opět na poměru rychlostí v_{ob} a v_k a dále na průměru broušicího kotouče D a na hloubce řezu h_z . Uvedený způsob řešení není ovšem jediný . Jinými postupy je možné dojít ke vztahům , které mohou být od uvedeného poněkud odlišné , což bude uvedeno později .

3.2.2. Vznik třísky - mikrořezání

Pokud zkoumáme proces vzniku třísky při broušení , musíme mít neustále na zřeteli specifické zvláštnosti této operace , musíme uvažovat působení teplotních a rychlostních faktorů i vliv obráběného materiálu .

Největší část energie , která se spotřebovává při broušení je vynaložena na překonání třecích sil , které vznikají mezi zrny brusiva a obráběným povrchem /119/ . Práce vynaložená na plastickou deformaci obrobku představuje asi 20 % celkově vynaložené energie . Zbytek energie je vynaložen na disperzi povrchové vrstvy materiálu. Povrch třísek je totiž v porovnání s povrchem původní vrstvy , ze které třísky vznikly , daleko větší , proto se musí pro jejich vytvoření dodat určitá práce .

Tvorba třísky probíhá za vysokých řezných rychlostí. Brousicí kotouč se otáčí obvodovou rychlostí v_k a obrobku je udělena rychlost v_{ob} . Poměr rychlostí v_k a v_{ob} nazýváme rychlostní poměr q . Protože jeho velikost dosahuje hodnot od 50 do 300 /104,133/ , můžeme považovat za řeznou rychlost jen obvodovou rychlost brousicího kotouče . U běžných způsobů broušení používáme obvodových rychlostí 20 - 40 m.s⁻¹ a u tzv. rychlostního broušení se mohou řezné rychlosti pohybovat až v oblasti 100 - 150 m.s⁻¹ .

Veliká řezná rychlost a třecí síly jsou příčinou značného vývinu teplot v místě řezu , což je průvodním znakem broušení . Při nízkých rychlostech nemůže brousicí kotouč pracovat jako nástroj /134/. Proto mají odřezávané třísky vysokou teplotu 800 - 1 200 °C. Část vyvinutého tepla však přechází také do obrobku . Mikroskopická vrstvička materiálu obrobené plochy je proto velmi tepelně namáhána . Tím vznikají poměrně značná pnutí , která mohou být příčinou vzniku trhlinek na obrobeném povrchu .

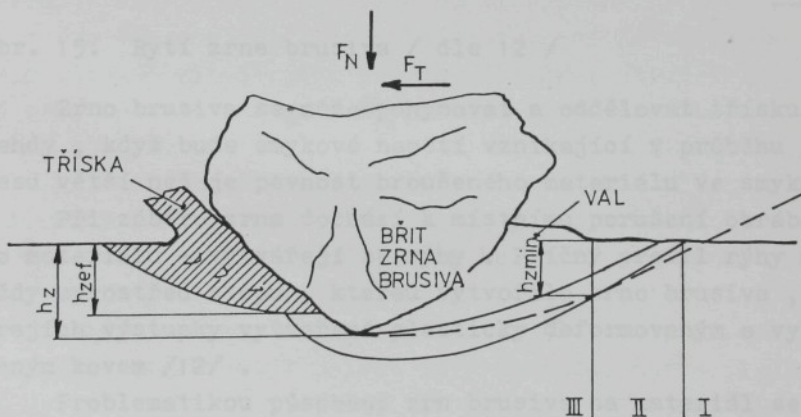
Proces vzniku třísky se odehrává ve velice krátkém časovém intervalu od 0,000 05 s do 0,000 1s , tj. téměř okamžitě . Rozměry třísek , které jsou odebírány jednotlivými zrny brusiva jsou velice malé , nejmenší třísky mohou působením vysoké teploty shořet . Tím jsou vytvořeny jiskry při broušení .

3.2.3. Fáze vzniku třísky

Zrno brusiva začne svoji práci rázem do obráběné plochy. Velikost tohoto rázu je závislá na řezné rychlosti ,

na posuvu , na mechanických vlastnostech obráběného materiálu a na hmotnosti brousicího kotouče . Pokud bude mít zrna malý poloměr zaoblení vrchołu , může dojít v důsledku napěťového výkyvu při rázu k jeho porušení . V první fázi bude zrna brusiva po povrchu materiálu obrobku pouze klouzat , což je důsledkem toho , že břit vniká do obrobku pod velmi malým úhlem a hloubka záběru je velmi malá . Během tohoto pohybu se neustále zvyšuje tlak působící na zrna a třením vzniká teplo . Dochází pouze k pružné deformaci obrobku . Při pokračování pohybu zrna dochází důsledkem působícího tlaku k dalšímu zvyšování teploty a ke vzniku plastické deformace , tedy k rytí zrna . V této fázi je materiál stlačován kolem řezného klínu , ovšem tříška dosud nevzniká .

Teprve v poslední fázi , když se břit zrna dostane do hloubky větší než h_{zmin} , dochází k oddělování materiálu a ke vzniku třísky /5,134/ . Protože při dalším průběhu dochází současně k deformačním procesům i k tvorbě třísky , je pro posouzení procesu rozhodující, jaká část materiálu



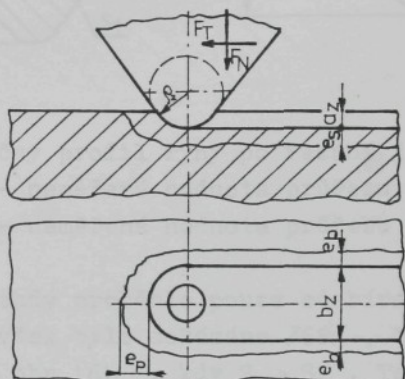
Obr. 14. Fáze vzniku třísky - schematicky / dle 5 /

se při záběru zrna do hloubky h_z skutečně oddělí , jaká tedy bude skutečná , efektivní hloubka záběru h_{zef} . Proto bude v další části pojednáno o deformaci materiálu při

rytí zrnem brusiva .

3.2.4. Deformace materiálu při rytí zrnem brusiva

Při záběru zrna do materiálu obrobku se kov před zrnem brusiva (zóna e_p) , po jeho bocích (zóna e_b) i pod obráběným povrchem (zóna e_s) plasticky deformuje . Čím je odebíraná vrstva silnější , tím je větší rozsah plastické deformace . Proces je znázorněn na obrázku 15 .



Obr. 15. Rytí zrna brusiva / dle 12 /

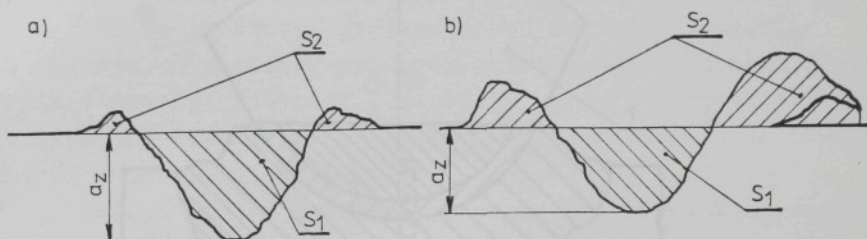
Zrno brusiva se může pohybovat a oddělovat třísku jen tehdy , když bude smykové napětí vznikající v průběhu procesu větší než je pevnost broušeného materiálu ve smyku .

Při záběru zrna dochází k místnímu porušení obráběného materiálu - vytvářejí se rýhy . Příčný profil rýhy má vždy uprostřed stopu , kterou vytvořilo zrno brusiva , a na krajích výstupky vytvořené plasticky deformovaným a vytlačeným kovem /12/ .

Problematickou působení zrn brusiva na materiál se zabývala řada autorů . Dostupné poznatky shrnuje ve své práci J.Gazda /66/ . Byl například zkoumán příčný profil rýhy , která vzniká po rytí jedním zrnem brusiva , jak je zřejmé z obrázku 16 .

Při vytváření rýhy v obrobku mohou dle obrázku 16a nastat tyto případy : plocha průřezu valu je rovna ploše

průřezu rýhy S_1 - tedy $S_1 = S_2$, tehdy proběhla pouze plastická deformace ; nebo $S_1 > S_2$, současně s plastickou deformací došlo také k odebrání materiálu ; a výjimečně ta-



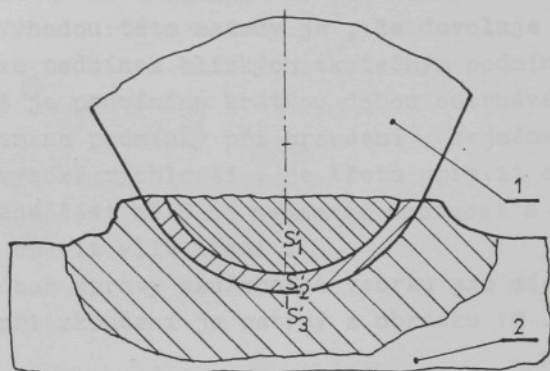
Obr. 16. Příčný profil rýhy po řezání jedním zrnem
 S_1 - naměřená hodnota průřezu rýhy
 S_2 - naměřená hodnota průřezu valu

ké $S_2 = 0$, tehdy proběhlo pouze odebrání materiálu . Experimentálně však bylo dokázáno /68/ , že často nastává i situace dle obr.16b , kdy $S_2 > S_1$. Tento případ charakterizuje stav , kdy jsou valy na okrajích rýhy duté . Z uvedeného lze usoudit , že valy vznikající po okrajích rýhy jsou vlastně vytvářející se mikrotřísky , které se při rytí zrna úplně neoddelily od povrchu obrobku a zůstaly s ním pevně spojeny .

Při rytí zrna dochází vlivem pružných a plastických deformací také k tomu , že průřez třísky bude menší , než by odpovídalo ploše průmětu zrna vniklého do obráběného materiálu /78/ . Tato situace je zřejmá z obrázku 17 . Třísky vzniká z materiálu , který je dán plochou průřezu S'_1 , plocha S'_2 představuje oblast deformovaného materiálu , který vytvoří val , a S'_3 je plocha materiálu obrobku plastic-ky deformovaná .

Deformace materiálu při rytí zrnem brusiva je závislá na řadě faktorů . Například při zvyšování plasticity materiálu obrobku roste podíl kovu , který se vytlačuje po okrajích rýhy a naopak se zmenšuje podíl materiálu , který se odděluje v podobě třísky . Plasticita materiálu

je ovlivněna třecími poměry břitů , velikostí meze kluzu,



Obr. 17. Schema deformování kovu zrnem brusiva
1 - zrnو brusiva ; 2 - povrch obrobku

rychlostí deformace ap. Kromě druhu materiálu obrobku a jeho zpracování se projevuje i vliv druhu brusiva a geometrie zrn brusiva . Při zkoumání rozložení valů bylo zjištěno , že nejsou po okrajích rýhy rozmístěny rovnoměrně /68/ . Z měření dotykovým induktivním snímačem a z pozorování na rastrovacím elektronovém mikroskopu vyplývá , že valy ležící po okrajích rýhy bývají často duté . Tento fakt omezuje do jisté míry platnost vztahu pro výpočet podílu plastických deformací na celkovém procesu řezání :

$$P = \frac{S_2}{S_1} \cdot 100 \quad (17)$$

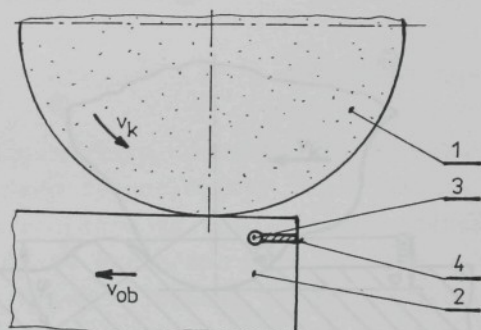
Znamená to , že skutečná hodnota podílu plastických deformací bude v řadě případů menší než hodnota vypočítaná dle vztahu (17) .

3.2.5. Zkoumání kořene třísky

Pokud sledujeme proces utváření třísky , potřebujeme tento děj zafixovat pro další pozorování , tedy získat kořen třísky . Vzhledem k relativně vysokým řezným rychlostem při broušení nelze získat kořen třísky s použitím

těch zařízení , která používáme u ostatních způsobů obrábění . Používá se proto speciální metoda , která spočívá ve vytržení části obráběného materiálu i s kořenem třísky /41/ . Výhodou této metody je , že dovoluje získat kořen třísky za podmínek blízkých skutečným podmínkám řezání zrna , což je podmíněno krátkou dobou odtrhávání vzorku . S ohledem na podmínky při broušení , zejména na malé řezné síly a vysoké rychlosti , je třeba upravit obrobek tak, aby odtrhávaná část měla co nejmenší hmotnost a dále je třeba co nejvíce omezit vliv tření .

Způsob úpravy zkušebního vzorku pro získání kořene třísky při zkoušení je patrný z obrázku 18 . Při broušení

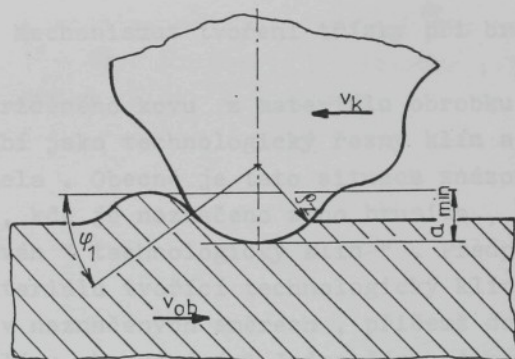


Obr. 18. Vzorek upravený pro získání kořene třísky při broušení . 1 - brousicí kotouč ; 2 - zkušební vzorek ; 3 - vyvrtaný otvor ; 4 - hladká ocelová podložka .

takto upraveného vzorku dojde v určitém okamžiku k odtržení části materiálu obrobku se zafixovaným kořenem třísky . Z metalografických výbrusů získaných kořenů třísky lze usuzovat na orientaci kluzových čar v materiálu i na směry tečení materiálu , je možné posoudit stupeň plastické deformace a zpevnění materiálu .

3.2.6. Schemata vzniku třísky při broušení

Studium mechanismů tvoření třísky při broušení ústí do konstrukcí různých schemat . I.Tretjakov a I.Timofejev /78/ dospěli k závěru , že vytvoření třísky je možné tehdy , když bude úhel φ_1 mezi rovnoběžkou ke směru pohybu a normálou k povrchu v krajním bodě dotyku zrna brusiva roven nebo větší než třecí úhel φ_2 daný součinitelem smykového tření (obr.19) . Pokud bude úhel φ_1 menší než φ_2 , nedojde k vytvoření třísky . Minimální tloušťka třísky a_{min} je tedy závislá na poloměru zaoblení vrcholu zrna ρ_z a na třecím úhlu φ_2 .

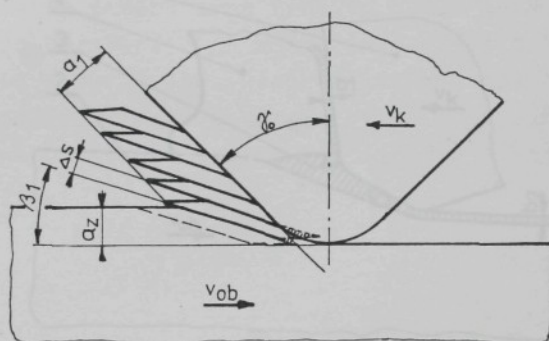


Obr. 19. Mechanismus vzniku třísky při broušení /78/

Samotný mechanismus smykových dějů při růstu třísky se vysvětluje různě . Například J.Buda /124/ nahrazuje složité schema vzniku třísky schematem dle Merchanta s plochami smyku orientovanými pod úhlem β_1 (obr.20) . Možnost tohoto přístupu je dokumentována zkoumáním kořene třísky při broušení . Při vysokých řezných rychlostech obvyklých při broušení splývá poloha úhlu β_1 a β_2 . Vyšrafované trojúhelníky označují materiál , který se před řezným klínem přerозděljuje .

Jiný způsob publikoval K.Vasilko /40/ . Při sledování kořene třísky dospěl k určitým závěrům o způsobu obtékání

řezného klínu brousicího zrna . Uvažuje zde určitou vrst-

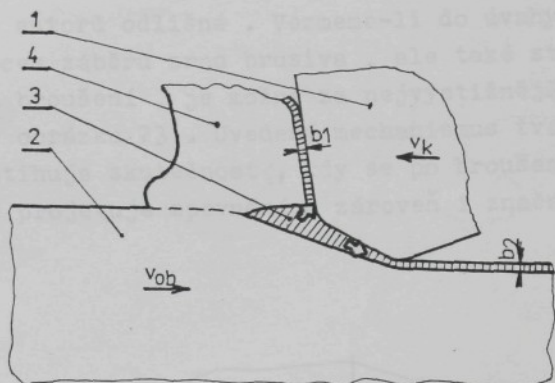


Obr. 20. Mechanismus tvoření třísky při broušení /124/

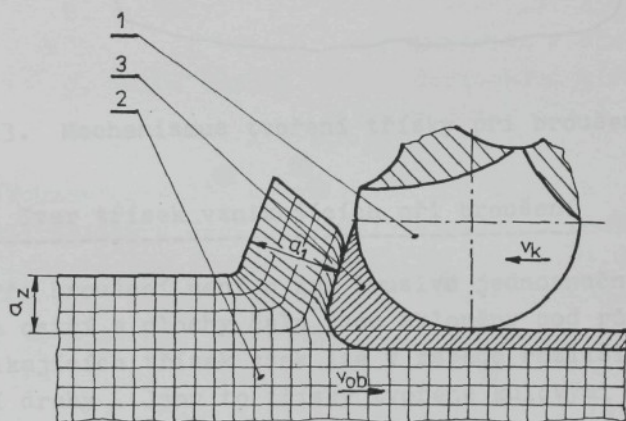
vičku zabržděného kovu z materiálu obrobku , který při rytí působí jako technologický řezný klín a vytváří kladný úhel čela . Obecně je tato situace znázorněna na obrázku 21 , kde je naznačeno zrno brusiva , kořen třísky a vyšrafován " technologický klín " . Předpokládá , že vrstva materiálu tvořící technologický klín se při rytí pohybuje v naznačených směrech , přičemž dochází k jejímu neustálému obnovování . Jedna část odchází s třískou a účastní se na vzniku zabržděné vrstvičky označené rozměrem b_1 . Druhá část materiálu je vtlačována pod řezný klín a způsobuje na obráběném povrchu vznik zpevněné vrstvy označené rozměrem b_2 .

V další práci /124/ je řezná část brousicího zrna nahrazena kulovou plochou . Při rytí vzniká před zrnem vrstva stlačeného materiálu , která připomíná nárustek . Tento přístup je vyjádřen schematem na obrázku 22 . Materiál před řezným klínem je ve stavu plastického tečení a tento stav zasahuje také obrobený povrch .

Model publikovaný F.Neckářem /121/ , který je uveden na obrázku 23 , naznačuje charakter ovlivnění povrchové vrstvy . Oblast primární plastické deformace zasahuje do hloubky a_p pod obrobený povrch a vyvolává v ní zpevnění .



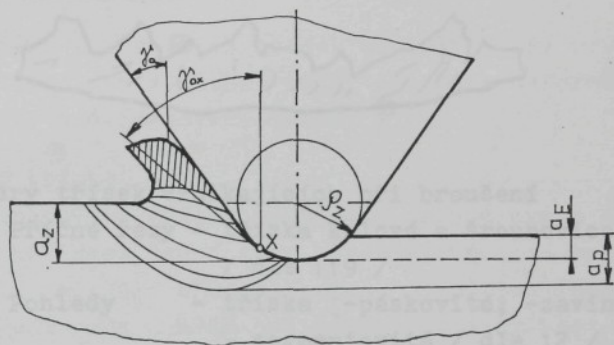
Obr. 21. Mechanismus tvoření třísky při broušení
 1 - zrno brusiva ; 2 - obrobek ; 3 - technologický klín ; 4 - tříska



Obr. 22. Mechanismus tvoření třísky při broušení /124/
 1 - zrno brusiva ; 2 - obráběný materiál ;
 3 - materiál ve stavu plastického tečení

Pružná deformace a_e má vliv na velikost tření hřbetu zrna o obrobený povrch a je tedy jednou z příčin vzniku tepla v obrobeném povrchu .

Jak je zřejmé z uvedeného přehledu , jsou často názory na mechanismus tvorby třísky osamoceného zrna brusiva u různých autorů odlišné . Vezmeme-li do úvahy nejen samotný proces záběru zrna brusiva , ale také stav povrchové vrstvy po broušení , je možné za nejvýstižnější považovat model dle obrázku 23 . Uvedený mechanismus tvorby třísky dobře postihuje skutečnost , kdy se po broušení v povrchové vrstvě projevuje zpevnění a zároveň i značné tahové napětí .



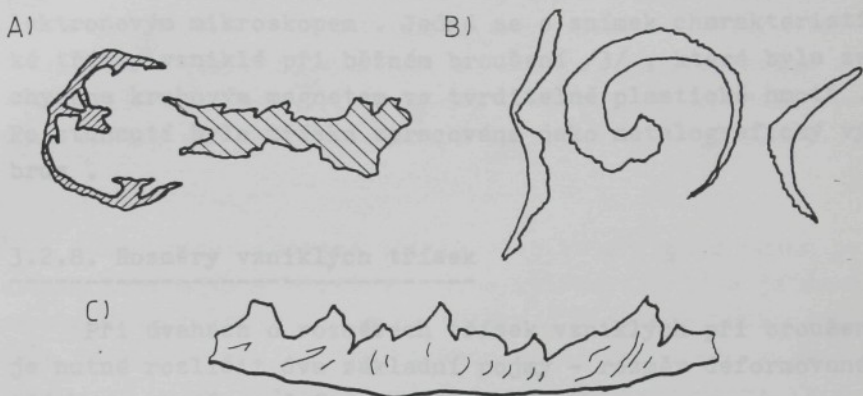
Obr. 23. Mechanismus tvoření třísky při broušení /121/

3.2.7. Tvar třísek vznikajících při broušení

Při broušení není u zrn brusiva jednoznačně určena poloha ostří a plochy čela jsou skloněny pod různými úhly. U vznikajících třísek však lze v zásadě rozlišit dva základní druhy . Jsou to třísky tvořené kulovými a šroubovými plochami /119/ . Relativní četnost obou typů třísek je závislá na fyzikálních podmínkách broušení , zejména na množství vzniklého tepla (obr.24 A) .

Kulové třísky vznikají , pokud v oblasti utváření třísky byly dosaženy teploty tavení broušeného materiálu . Při rytí se v tomto případě před zrnem pohybuje roztavený kov. Po vymrštění tohoto kovu do okolního prostředí dochází k jeho prudkému ochlazení a tuhnutí . V důsledku expanze uzav-

řených plynů a za současného působení okolního vzduchu dochází ke sformování třísky do tvaru duté koule s malou tloušťkou stěny /40/ .



Obr. 24. Tvary třísek vznikajících při broušení

A. Příčné řezy - tříska kulová a šroubovicová
/ dle 119 /

B. Pohledy - tříska -páskovitá; -zavinutá;
- segmentovitá / dle 12 /

C. Skica snímku třísky pořízeného elektronovým
mikroskopem / dle 3 /

Šroubovicové třísky vznikají při nižších teplotách utváření třísky . Jejich profil je určen záběrovými poměry a geometrickým tvarem brousícího zrna . Při dostatečném zvětšení tyto třísky připomínají třísky odebrané při velmi jemném rychlostním frézování .

Jiné dělení třísek vznikajících při broušení uvádí J.Maslov /12/ . Jako typické uvádí tyto tři tvary třísek: páskovité , zavinuté a segmentovité (obr.24B) . Nejčastěji vzniká páskovitá tříska , jejíž tloušťka se postupně zvětšuje . Méně často se vytváří tříska zavinutá , jejíž tloušťka plynule roste a při hrubování může dosáhnout i značné velikosti . Za určitých řezných podmínek může vzniknout i tříska segmentovitá , která je nejsilnější ve své střední části . Za provozních podmínek mívají třísky většinou kombinovaný tvar . I když lze obecně předpokládat , za ja-

kých podmínek jaká tříška vznikne , bude skutečný tvar odebírané třísky podstatně odlišný od teoretického v důsledku vzniklých deformací .

Na obrázku 24C je uvedena skica snímku pořízeného elektronovým mikroskopem . Jedná se o snímek charakteristické třísky vzniklé při běžném broušení /3/ , která byla zachycena kruhovým magnetem ve tvrditelné plastické hmotě . Po ztuhnutí byla tříška zpracována jako metalografický výbrus .

3.2.8. Rozměry vzniklých třísek

Při úvahách o rozměrech třísek vzniklých při broušení je nutné rozlišit dva základní pojmy - rozměr deformované třísky a rozměr nedeformované třísky .

Tloušťka třísky

Hodnota tloušťky třísky odebírané jedním zrnem brusiva ovlivňuje velikost řezné síly působící na toto zrno , dále ovlivňuje velikost otupení zrna , okamžitou teplotu v místě působení zrna a může ovlivňovat také drsnost povrchu obráběné plochy ap.

Konkrétní hodnoty tloušťky třísky udává např. Z.Příkryl /133/ pro kotouč o zrnitosti 32 (dle ČSN 224012) v mezích od 0,8 do 12 μm . Také v další práci /3/ je uveden rozsah naměřených tlouštěk třísky 2,0 - 12 μm . Dále jsou také uvedeny statisticky vyhodnocené orientační hodnoty výsledků měření tlouštěk po broušení kotouči EK 150H a EK 36H (dle ČSN 224010 a ČSN 224012 brousící kotouče z umělého korundu A 99 , velmi měkké , zrnitosti 8 a 40) :

Kotouč	Tloušťka deformované třísky	Tloušťka nedeformované třísky	Rozptyl hodn. nedef.tl.tř.
EK 150H	3,76 μm	0,75 μm	0,2 - 1,6 μm
EK 36H	5,14 μm	1,03 μm	0,2 - 2,8 μm

Tab. 4 : Naměřené hodnoty tloušťky třísky /3/

Pod pojmem tloušťka nedeformované třísky se rozumí tloušťka materiálu odebíraná jedním zrnem brusiva . Je to vzdálenost mezi plochami řezu vytvářenými dvěma následujícími záběry břitů sousedních zrn a měříme ji ve směru kolmém k ploše řezu /12/ . Hodnotu teoretické tloušťky nedeformované třísky lze stanovit ze známých geometrických a kinematických vazeb při broušení . Některé dosud publikované vztahy pro výpočet shrnuje informativní tabulka 5 .

Šířka třísky

Šířka nedeformované třísky odebíraná jedním zrnem je určena tvarem zrna brusiva , jeho velikostí /3/ a je úměrná okamžité hodnotě tloušťky třísky . U malých zrnitostí jsou šířky rýh při stejné hloubce menší než u zrn velkých zrnitostí . Protože se v průběhu rytí mění okamžitá tloušťka třísky , mění se též šířka třísky .

Hodnotu teoretické šířky nedeformované třísky lze odvodit . Některé vztahy pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 6 .

Pokud známe velikost teoretické tloušťky a šířky třísky , můžeme dle vztahu (21) vypočítat hodnotu průřezu řezu pro jedno zrno brusiva .

Délka záběru zrna

Pod pojmem délka záběru zrna rozumíme celkovou délku dráhy , kterou vykoná zrno brusiva od začátku do konce záběru /20/ . Při broušení není vhodné používat výrazu délka třísky , protože hodnotu teoretické délky třísky lze těžko určit /19/ .

Délka záběru zrna brusiva je funkcí vzájemného pohybu broušícího kotouče a obrobku . Tyto pohyby jsou při různých způsobech broušení různé . Příslušné vztahy pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 7 . Shrňme-li vztahy v tabulkách 5 - 7 , je zřejmé , že při výpočtu tloušťky nedeformované třísky při broušení a délky stykového oblouku při záběru zrna brusiva má zřetelný vliv velikost posuvné rychlosti obrobku , obvodová rychlost broušícího kotouče , hloubka záběru , průměr broušícího kotouče , případně průměr ob -

Výpočet tloušťky nedeformované třísky při broušení α_z

Tab. 5

ROK	AUTOR	DRUH BROUŠENÍ	VZTAH	ROZMĚR LIT.
1957	J. PEKLENIK	rovinné broušení obvodem kotouče broušení válcových ploch Pozn.: + vnější válcové plochy - vnitřní válcové plochy	$a_z = 2 \cdot \lambda_k \cdot \frac{V_{ob}}{V_k} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}}$ $a_z = 2 \cdot \lambda_k \cdot \frac{V_{ob}}{V_k} \cdot \sqrt{h_z \cdot \frac{D \pm d}{D \cdot d}}$	mm mm
1966	J. N. MASLOV	broušení vnějších válcových ploch	$a_z = \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k \pm 2 \cdot V_{ob}} \cdot \sqrt{h_z \cdot \rho_s} \cdot \sqrt{\frac{D+d}{D \cdot d}} \cdot \frac{S_o}{H_1}$	mm /135/
1966	Z. PŘÍKRÝL R. MUSÍLKOVÁ	rovinné broušení obvodem kotouče Pozn.: + nesousledné broušení - sousledné broušení	$a_{zs} = \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k \pm V_{ob}} \cdot \rho_t \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}}$	mm /123/
		broušení válcových ploch Pozn.: + vnější válcové plochy - vnitřní válcové plochy	$a_{zs} = \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k \pm V_{ob}} \cdot \rho_t \cdot \sqrt{h_z \cdot \frac{D \pm d}{D \cdot d}}$	mm
1967	V. F. BOBROV	broušení obecné Pozn.: $\alpha_s = 1$ brouš. vnějš. válc. ploch $\alpha_s = -1$ brouš. vnitř. válc. ploch $\alpha_s = 0$ rovinné broušení	$a_z = \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k \pm 2 \cdot V_{ob}} \cdot \sqrt{h_z \cdot \rho_s} \cdot \sqrt{\frac{1}{D} + \frac{\alpha_s}{d}} \cdot \frac{S_o}{H_1}$	mm /119/
(1979	J. N. MASLOV	broušení vnějších válcových ploch	$a_z = \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k \pm 2 \cdot V_{ob}} \cdot \sqrt{h_z \cdot \rho_s} \cdot \sqrt{\frac{1}{D} + \frac{\alpha_s}{d}} \cdot \frac{S_o}{H_1}$	mm /12/1)
1969	G. KASSEN	broušení obecné	$a_z = 0,71 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{ob}}{V_k}} \cdot \sqrt[6]{\frac{h_z}{D} \cdot \frac{d}{D+d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{c_1 \cdot \lg \alpha_s}}$	mm /20/
1971	Z. PŘÍKRÝL R. MUSÍLKOVÁ	rovinné broušení obvodem kotouče broušení vnějších válcových ploch	$a_{zs} = \frac{V_{ob}}{n_k \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}}$ $a_{zs} = \frac{\rho_t}{L} \cdot h_z \cdot \frac{V_{ob}}{60 \cdot V_k}$	mm mm /77/

ROK	AUTOR	DRUH BROUŠENÍ	VZTAH	ROZMĚR	LIT.
1977	K. PRÉGER	rovinné broušení obvodem kotouče broušení rotačních ploch	$\alpha_{zs} = \frac{\lambda_{KE}}{\varrho} \cdot \sqrt{\frac{h_z}{D}}$ $\alpha_{zs} = \frac{\lambda_{KE}}{\varrho} \cdot \sqrt{h_z \cdot \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d}\right)}$	mm mm	/136/
1980	S. A. POPOV R. V. ANAŠAN	broušení obecně	$\alpha_z = 2 \cdot \frac{V_{0b}}{V_K} \cdot S_p \cdot \sqrt{h_z \cdot \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right)}$	-	/96/
1983	J. BUDA	broušení obecně	$\alpha_z = k \cdot \sqrt{\frac{S_z^2 \cdot h_z}{D}}$	mm	/124/

Poznámka : další způsoby výpočtu uvádí R. SNOYES /43/

Výpočet šířky nedeformované třísky při broušení b_z

ROK	AUTOR	POZNÁMKA	VZTAH	ROZMĚR	LIT.
1957	J. PEKLENIK		$b_z = \frac{1}{K_z \cdot L_{ZE}}$	mm	/19/
1966	I. P. TRETJAKOV I. I. TIMOFEJEV		$b_z = k_3 \cdot \alpha_z^{k_4}$	mm	/78/
1971	Z. PŘIKRYL R. MUSÍLKOVÁ	vztah zobecněn	$b_{zs} = \frac{2}{\sin \varphi} \cdot \left[\varrho_z + (\alpha_{zs} - \varrho_z) \cdot \cos \varphi \right]$	mm	/77/
1979	O. LIPTÁK		$b_z = (10 \div 20) \cdot \alpha_z$	mm	/134/
1983	J. BUDA		$b_z = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \varrho_z \cdot \alpha_z}$	mm	/124/

Délka stykového oblouku při záběru zrna brusiwa L

Tab. 7

ROK	AUTOR	DRUH BROUŠENÍ	VZTAH	ROZMĚR	LIT.
1957	J. PEKLENIK	broušení obecně	$L = k_1 \cdot \sqrt{\frac{h_z \cdot D}{1 + \frac{d}{D}}} \cdot \left(1 + \frac{v_{ob}}{v_k}\right)$	mm	/19/
1969	G. KASSEN	broušení obecně	$L = 0,715 \cdot \left(1 + \frac{v_{ob}}{v_k} \cdot \frac{d}{D+d}\right) \cdot \sqrt{h_z \cdot D \cdot \frac{d}{D+d}}$	mm	/20/
1979	J. N. MASLOV	rovinné broušení obvodem kotouče	$L = \left(1 \pm \frac{v_{ob}}{60 \cdot v_k}\right) \cdot \sqrt{D \cdot h_z}$	mm	/12/
		broušení vnějších válcových ploch	$L = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_{ob}}{60 \cdot v_k}\right)^2 + \left(\frac{v_t}{60 \cdot v_k}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot h_z}{D+d}}$	mm	
		broušení vnitřních válcových ploch	$L = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_{ob}}{60 \cdot v_k}\right)^2 + \left(\frac{v_t}{60 \cdot v_k}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot d \cdot h_z}{d-D}}$	mm	
		rovinné broušení čelem kotouče	$L = \frac{D}{2} \cdot \alpha_L \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{v_{ob}}{60 \cdot v_k}\right)^2}$	mm	

robku při broušení rotačních ploch . Z hodnoty tloušťky nedeformované třísky také autoři většinou vycházejí při výpočtu její šířky . Všechny uvedené parametry ovlivňují vypočtené hodnoty , ovšem způsob výpočtu a dále použití řady konstant způsobuje , že výsledné vztahy různých autorů se odlišují .

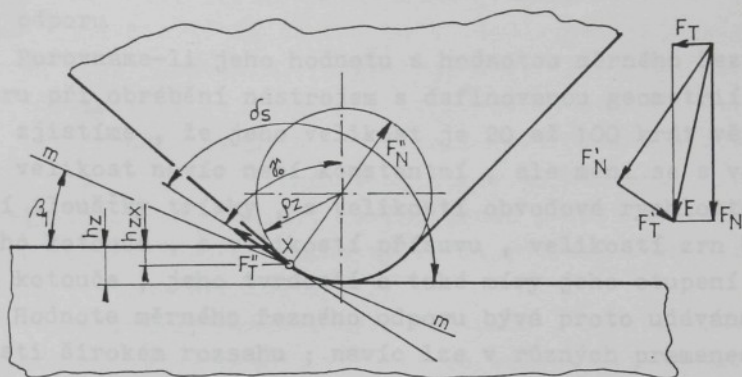
Společnou výhodou všech uvedených vztahů je , že umožňují poměrně velice rychle dospět k celkem přesnému výsledku . Další výhodou je , že není potřeba k výpočtu žádné zvláštní zařízení . Zároveň je však třeba uvést , že ač se snažíme vypočítat hodnoty z průběhu procesu broušení , vycházejí všechny vztahy především z vnějších parametrů tohoto procesu . V této souvislosti vychází do popředí přednost metody matematického modelování , která s použitím výpočetní techniky umožňuje získat požadované údaje během simulace vlastního procesu broušení . Způsobem , který bude dále vysvětlen podrobněji , lze při modelování broušení průběžně vyhodnocovat probíhající děje a vypočítat hodnoty průřezu nedeformované třísky , případně tloušťky třísky ap., pro každé aktivní zrno brusiva zvlášť .

3.2.9. Síla působící na zrno brusiva

Při broušení nelze vypočítat velikost působící síly se stejnou přesností jako při obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu . Je to především z toho důvodu , že geometrie každého zrna je jiná . Důsledkem rozdílné velikosti zrn je , že různá zrna , i když pracují současně, odebírají různě silnou třísku . Navíc jsou průřezy třísek velmi malé a poměrně těžko lze určit celkový počet zrn v záběru .

Při výpočtu velikosti síly působící na zrno brusiva lze vycházet z pevnosti materiálu ve smyku /12/ . Pro určení velikosti síly v daném okamžiku můžeme uvažovat přímočarý pohyb zrna se zaobleným vrcholem, jak je zřejmé z obrázku 25 . Aby mohlo zrno řezat , musí na něj působit vnější síla F , kterou můžeme rozložit na složky F'_N a F'_T . Síla F'_T způsobuje odřezávání třísky a síla F'_N přitlačuje zr-

no brusiva k obráběné ploše . Dalším rozkladem sil ve smě-



Obr. 25. Síla v procesu mikrořezání /dle 12/

ru střižné roviny m-m , která je orientována pod úhlem β_1 , získáme možnost zahrnout do řešení sílu překonávající odpor kovu ve smyku a pomocí určitých úprav pak můžeme získat výsledné vztahy pro dvě složky síly působící na zrno brusiva /12/ :

$$F_T = \frac{S_{TR} \cdot \tau_{STR} \cdot (\cos \delta_o^* - \mu \cdot \sin \delta_o^*)}{\sin \beta_1 \cdot [(1 - \mu \cdot \mu') \cdot \cos(\delta_o^* + \beta_1) - (\mu + \mu') \cdot \sin(\delta_o^* + \beta_1)]} \quad (18)$$

$$F_N = \frac{S_{TR} \cdot \tau_{STR} \cdot (\sin \delta_o^* - \mu \cdot \cos \delta_o^*)}{\sin \beta_1 \cdot [(1 - \mu \cdot \mu') \cdot \cos(\delta_o^* + \beta_1) - (\mu + \mu') \cdot \sin(\delta_o^* + \beta_1)]}$$

V uvedené soustavě rovnic se vyskytuje skutečný úhel čela , a protože jeho velikost závisí na tloušťce odebírané třísky , je v těchto rovnicích vyjádřena i závislost měrného řezného odporu na tloušťce odebírané třísky . Pro praktické použití však není uvedená metoda příliš vhodná , protože při výpočtu vycházíme z řady parametrů , například z průřezu odebírané třísky S_{TR} , smykového namáhání τ_{STR} , úhlu čela zrna brusiva δ_o^* nebo součinitele tření deformovaného kovu ve směru smyku μ' ap. , které běžně neznáme .

Určujeme-li velikost síly působící na zrno brusiva

při matematickém modelování , můžeme proto s výhodou použít postup vycházející z průřezu třísky a z měrného řezného odporu .

Porovnáme-li jeho hodnotu s hodnotou měrného řezného odporu při obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitů , zjistíme , že jeho velikost je 20 až 100 krát větší . Jeho velikost navíc není konstantní , ale mění se s velikostí tloušťky třísky , s velikostí obvodové rychlosti broušícího kotouče , s velikostí přísuvu , velikostí zrn broušícího kotouče , jeho tvrdostí a také míry jeho otupení /123/.

Hodnota měrného řezného odporu bývá proto udávána v dosti širokém rozsahu ; navíc lze v různých pramenech nalézt značné odlišnosti i v uváděných rozsazích . Tyto se pohybují od hodnot 9 800 - 19 600 MPa /12/ , případně 10 000 - 35 000 MPa /77/ až k hodnotám 100 000 - 200 000 MPa /118/ nebo je překrývají 35 000 až 200 000 MPa /124/ , /137/ .

Vysoké hodnoty měrného řezného odporu se vysvětlují tím , že při broušení je průřez a zejména tloušťka odebíraných třísek velice malá . Měrný řezný odpor totiž není prakticky závislý na šířce odebírané vrstvy , závisí však na tloušťce této vrstvy a to zejména u tenkých třísek . Příčina tohoto faktu spočívá v tom , že při odebírání třísky se vrstva kovu , která má být odebrána , musí deformovat . U plastických materiálů je to provázáno značnými plastickými deformacemi . Při deformaci křehkých materiálů vzniká v kovu stav pružné napjatosti , který se vyvíjí až do okamžiku , kdy se oddělí tříska .

Na plasticitu kovu má veliký vliv teplota a deformační rychlost . Proces broušení je vždy doprovázen značným zvýšením teploty , kdy se kov stává plastičtější . Vysoká deformační rychlost ovšem zase naopak zhoršuje plasticitu /125/ . Plastická deformace totiž následuje za pružnou deformací , která se šíří rychlostí zvuku , avšak k průběhu plastické deformace , při které se přemisťují elementy kovu , je třeba delší doby . Při velkých deformačních rychlostech tedy probíhá plastická deformace pouze částečně .

Dále je zřejmé , že na rozložení odporu v obráběném

materiálu má vliv geometrický tvar členu , který deformaci způsobuje . V důsledku zaoblení vrcholu zrna dochází k tomu , že čím tenčí tříška bude odebírána , tím více negativní bude úhel čela . Negativní úhel čela vyžaduje použití dostatečně velké síly , která stlačuje deformovaný kov , tím prudce vzrůstá tření mezi nástrojem a obrobkem a také prudce roste měrný řezný odpor . Chceme-li zlepšit obrobitelnost broušením , musíme proto použít ostřejší zrna a současně pokud možno vytvořit rovinný tvar čela , kolmý k vektoru rychlosti /12/ .

Teoretickými pracemi bylo dokázáno , že velikost řezného odporu nejvýrazněji vzrůstá se zmenšující se tloušťkou třísky . Tuto obecnou závislost vyjadřuje tzv. Kienzleho vztah /136/ :

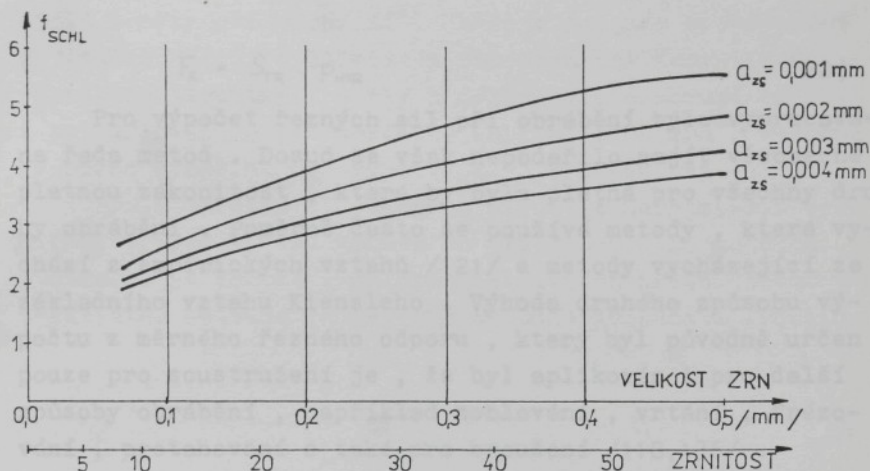
$$P_{HTR} = \frac{k_{S1.1}}{a_z^m} \quad (19)$$

Speciálně pro proces broušení byl Pregerem /136/ tento vztah rozšířen do tvaru :

$$P_{HTR} = \frac{k_{S1.1}}{a_{zs}^m} \cdot f_{SCHL} \cdot K_V \quad (20)$$

Hodnota $k_{S1.1}$ je měrný řezný odpor materiálu , tedy hodnota specifické síly při soustružení třísky průřezu 1 mm^2 . Dále je třeba z tabulek určit hodnotu exponentu m , který je též dán materiálovými vlastnostmi obrobku . Při broušení je velikost řezného odporu dále závislá na tzv. procesovém faktoru f_{SCHL} , který především zohledňuje vlivy silně negativního úhlu čela zrna brusiva a další vlivy jako zrnitost , tvrdost a pojivo brousícího kotouče . Tento faktor lze přibližně určit dle obrázku 26 . Další, tzv. korekční faktor K_V se uplatňuje zejména při rychlostním broušení , kdy nabývá hodnot v rozmezí 0,8 - 0,9 .

Abychom mohli vyjádřit velikost tangenciální složky síly při broušení , musíme kromě měrného řezného odporu



Obr. 26. Vliv zrnitosti a tloušťky třísky na procesový faktor při broušení /136/

znát také průřez třísky . Průřez nedeformované třísky lze dle /77,136/ vypočítat z údajů o tloušťce a šířce třísky odebírané jedním zrnem brusiva :

$$S_{TR} = a_z \cdot b_z$$

Uvedený vztah však nevystihuje s dostatečnou přesností , že zrno brusiva zabírá tak /77/ , že průřez řezu je v podstatě trojúhelníková plocha . Této skutečnosti odpovídá lépe následující výraz :

$$S_{TR} = \frac{a_z \cdot b_z}{2} \quad (21)$$

Při matematickém modelování procesu broušení však nebudeme potřebovat ani vztah (21) , protože , jak bude uvedeno dále , jsme schopni pro výpočet dle vztahu (22) určit průřez třísky S_{TR} pro každé zrno v záběru v libovolné poloze s podstatně větší přesností .

Vypočítáme-li dle vztahu (20) hodnotu řezného odporu a pomocí vztahu (21) , případně s použitím matematického modelu , hodnotu průřezu nedeformované třísky , můžeme ur-

čít velikost složky síly působící na dané zrno brusiva :

$$F_z = S_{TR} \cdot p_{HTR} \quad (22)$$

Pro výpočet řezných sil při obrábění byla vypracována řada metod . Dosud se však nepodařilo najít všeobecně platnou zákonitost , která by byla platná pro všechny druhy obrábění . Poměrně často se používá metody , která vychází z empirických vztahů /121/ a metody vycházející ze základního vztahu Kienzleho . Výhoda druhého způsobu výpočtu z měrného řezného odporu , který byl původně určen pouze pro soustružení je , že byl aplikován i pro další způsoby obrábění , například hoblování , vrtání , frézování , protahování a také pro broušení /118,136/ .

3.3. Drsnost povrchu a aktivní zrna brusiva při broušení

Při posuzování užitných vlastností obráběných součástí má značný význam jejich drsnost povrchu . Hodnota drsnosti povrchu spolu s velikostí zpevnění a zbytkovým pnutím v povrchové vrstvě ovlivňuje kvalitu součástí z hlediska jejich únavové pevnosti , odolnosti proti otěru , proti korozi ap.

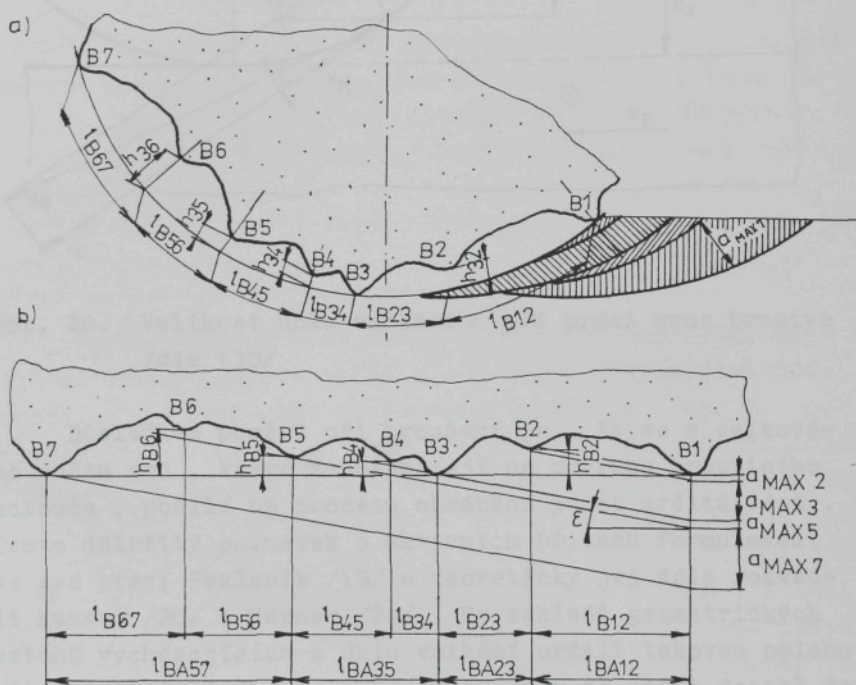
Vytváření povrchu obráběné součásti je proces , při kterém na sebe chemicky a mechanicky působí všechny zúčastněné materiály . V tomto procesu lze mnohé jevy vysvětlit průnikem drah trajektorií pohybu zrn brusiva kotouče s broušenou plochou obrobku /12/ .

3.3.1. Aktivní zrna při broušení

Důsledkem stavby broušícího kotouče a kinematických poměrů při obrábění je , že se do záběru dostávají pouze některá zrna brusiva z povrchu kotouče . Jejich počet je závislý především na struktuře kotouče a na záběrových poměrech . Tato zrna lze obecně nazvat jako aktivní , přičemž každé zrno může mít ještě několik aktivních břitů . Vyhodnocujeme pak počet aktivních břitů (dynamický počet

břítů), což je důležitá veličina charakterizující dynamické poměry při broušení. Ukazuje se, že právě počet aktivních břítů je důležitým faktorem při teoretických výpočtech tloušťky, šířky a délky nedeformované třísky i při určování počtu současně zabírajících zrn, z čehož je možno vycházet při výpočtu síly broušení ap.

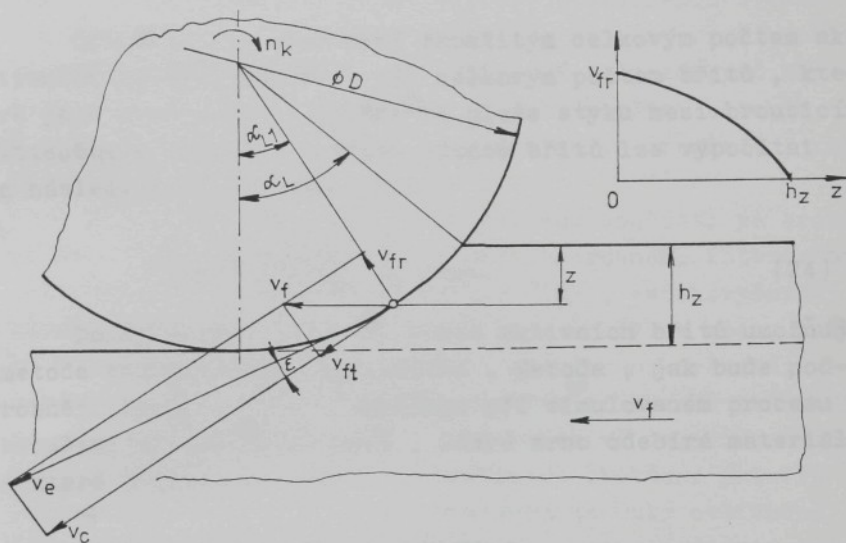
Podle obrázku 27 je možno sledovat mechanismus odbírání třísek v řezu kolmém na osu brousicího kotouče. Z obrázku je zřejmé, že počet aktivních břítů daného brousicího kotouče je závislý na úhlu vnikání ε . Jak je



Obr. 27. Rozdíl mezi statickým a dynamickým počtem břítů /dle 130/

- a) na profilu v řezu kolmém k ose brousicího kotouče
- b) na stejném profilu brousicího kotouče rozvinutém na přímce

zřejmé z následujícího obrázku 28 , jedná se pouze o přibližnou metodu posouzení počtu aktivních břitů , protože úhel vnikání není při práci zrna brusiva konstantní .



Obr. 28. Velikost úhlu vnikání ϵ při práci zrna brusiva /dle 130/

Důsledkem poměrů při broušení je , že se z celkového počtu zrn , které se nacházejí na povrchu brousícího kotouče , podílí na procesu obrábění pouze určitá část . Tento důležitý poznatek o aktivních břitech formuloval ve své práci Peklenik /19/ a teoreticky jej dále rozvedli Kassen /20/ a Werner /21/ . Na základě geometrických vztahů vycházejících z úhlu vnikání určili takovou polohu břitu následujícího zrna brusiva , aby se ještě dostal do záběru . Dále stanovili tzv. "dynamickou náhradní hloubku záběru břitů" , která vyjadřuje závislost na parametrech brousícího kotouče , řezných a geometrických podmínkách při obrábění a je měřítkem vertikální hloubky , do které se mohou dostat zabírající zrna brusiva . Pomocí této veličiny a statického počtu břitů na jednotkové ploše povrchu brousícího kotouče pak odvodili výraz pro dynamický počet břitů na jednotce povrchu brousícího kotouče :

$$N_{\text{dyn}} = C_{\text{FF}} \left[\frac{2 \cdot C_j}{K_s} \right]^{\frac{P_1}{P_1+1}} \cdot \left[\frac{V_{\text{ob}}}{V_k} \right]^{\frac{P_2}{P_1+1}} \cdot \left[\frac{h_z}{D_e} \right]^{\frac{P_2}{2 \cdot (P_1+1)}} \quad (23)$$

Tato hodnota však není okamžitým celkovým počtem aktivních břitů v záběru, tj. celkovým počtem břitů, které jsou momentálně v záběru na ploše styku mezi brousicím kotoučem a obrobkem. Počet těchto břitů lze vypočítat z následujícího výrazu:

$$N_{\text{nom}} = \frac{P_1+1}{P_1+1+P_2} \cdot S_K \cdot N_{\text{dyn}} \quad (24)$$

Další způsob určování počtu aktivních břitů umožňuje metoda matematického modelování. Metoda, jak bude podrobněji uvedeno dále, umožňuje při simulovaném procesu broušení jednoznačně určit, které zrno odebírá materiál a které nikoliv.

3.3.2. Drsnost povrchu po broušení

Drsnost povrchu součásti byla donedávna nejčastějším měřítkem kvality povrchu. Obrobky s minimální drsností byly považovány za součásti s vysokou kvalitou povrchu. Při obrábění se však neovlivňuje pouze makro a mikrogeometrie povrchu, ale určitá povrchová vrstva, jejíž tloušťka je závislá na způsobu obrábění a na řezných podmínkách.

Přesto však zůstává drsnost povrchu jedním z důležitých kritérií pro volbu způsobu obrábění, přičemž právě broušením, které je nejrozšířenějším způsobem dokončovacího obrábění, lze dosáhnout i velmi nízké hodnoty drsnosti. To je důležité zejména u součástí, u kterých požadujeme zvýšenou odolnost proti korozi, opotřebení a zvýšenou únavovou pevnost.

Při broušení se působením aktivních zrn brusiva na povrchu součásti vytváří velmi mnoho mikroskopických rýh, tvořících mikroprofil. Vytváření mikroprofilu je ovlivněno charakterem zrn brusiva, měrným tlakem kotouče na obro-

bek , vzájemným působením brusiva a materiálu obrobku , tuhostí soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek ap . Při měření drsnosti povrchu obrobku bylo zjištěno /2/, že použitím brousicího kotouče s otevřenou strukturou , který má na jednotce povrchu nejméně břitů , vzniká povrch s velkou drsností , přičemž byly zároveň naměřeny malé síly a teploty . Naopak při použití kotouče s hustou strukturou vzniká povrch s malou drsností , při působení velikých sil a teplot .

Podstatný vliv na drsnost povrchu součásti po broušení mají také řezné podmínky , způsob orovnění kotouče ap . Jak uvádí ve své publikaci Maslov /12/ , vede zvyšování hloubky záběru a posuvové rychlosti obrobku k růstu střední tloušťky třísky a tím také ke zvětšování drsnosti broušeného povrchu . Zvyšování řezné rychlosti vede ke zmenšení střední tloušťky třísky , což příznivě ovlivňuje drsnost povrchu , podobně jako podstatné zvětšení průměru brousicího kotouče . Drsnost povrchu je také ovlivněna počtem zdvihů při broušení na čisto , tzv. vyjiskřováním . Také způsobem orovňávání lze ovlivnit hodnotu drsnosti povrchu součásti . V tomto případě záleží jak na typu orovnávače , tak na posuvové rychlosti orovňávání /33,109/ .

Působení nejdůležitějších faktorů shrnul Maslov /12/ do rovnice , která vyjadřuje závislost drsnosti broušeného povrchu na obvodové rychlosti a průměru obrobku , na přísuvu , posuvu , obvodové rychlosti a šířce brousicího kotouče i na složení řezné kapaliny a počtu zdvihů při vyjiskřování .

$$R_a = \frac{C_{Ra} \cdot v_{ob}^{k_1} \cdot h^{k_2} \cdot s^{k_3} \cdot k_z \cdot k_K \cdot k_v}{v_K^{k_4} \cdot a^{k_5} \cdot H^{k_6}} \quad (25)$$

Jiný přístup opět umožňuje metoda matematického modelování . Po simulovaném procesu broušení lze ve zvolené rovině obrobku vyhodnotit hodnoty výšek profilu vzorku a vypočítat požadované parametry drsnosti povrchu . O tomto způsobu řešení bude dále podrobněji pojednáno .

4. METODA MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ KINEMATIKY PROCESU BROUŠENÍ

Podstatou vytvořené metody modelování procesu broušení je matematický popis probíhající interakce mezi zrnem brusiva a materiálem obrobku .

Jak je zřejmé z charakteristiky procesu broušení , je nutné při modelování tento proces uvažovat jako složitý dynamický stochastický systém , ve kterém současně probíhá veliké množství dějů , které se vzájemně ovlivňují . Chování dynamických stochastických systémů lze modelovat simulační metodou . Týká se to i procesu broušení . Ke zpracování modelu je však zapotřebí poměrně výkonná výpočetní technika , protože klasický výpočet by byl v důsledku značného rozsahu nutných operací nereálný .

Modelování procesu broušení simulační metodou umožňuje vytvoření komplexního pohledu na tento způsob obrábění , jehož přesnost je závislá na stupni poznání jednotlivých dílčích jevů a procesů .

4.1. Zjednodušující předpoklady

Jak již bylo uvedeno výše , je proces broušení značně složitý . Při vytváření modelu je proto nutné připustit některá zjednodušení . Tato zjednodušení musí mít ovšem takový charakter a takovou velikost , aby zůstaly zachovány rozhodující znaky procesu .

Pro zjednodušení modelu lze předpokládat :

1. absolutně tuhý brousicí kotouč , který se nedeformuje a ze kterého nemohou být vydrolována zrna
2. absolutně tuhý materiál obrobku , který se pružně nedeformuje a jehož odpor k vnikání zrna je úměrný velikosti tloušťky třísky a má takovou velikost , že zrno neotupí , neopotřebí ani nevylomí
3. absolutně tuhou soustavu stroj - nástroj - obrobek - přípravek
4. umístění zrna na brousícím kotouči dané souřadnicemi vrcholu zrna X, Y, Z ; přičemž souřadnice Z určuje ve-

- likost zrna brusiva
5. tvary zrn brusiva takové , že části zrn vyčnívající z pojiva kotouče mají příčný profil ve směru obrábění tvaru rovnoramenných trojúhelníků s různými vrcholovými úhly a různými poloměry zaoblení vrcholů
 6. rozložení zrn brusiva v radiálním směru závislé pouze na způsobu ocvrnání kotouče
 7. proces broušení časově rozložený , kdy jednotlivá zrna jsou modelována zvlášť a přicházejí do záběru postupně

4.2. Obecný popis matematického modelu

Pro modelování procesu broušení bylo voleno rovinné broušení obvodem kotouče . Proces obrábění začíná tím , že na brousicím kotouči namodelujeme zrno brusiva , které po pootočení kotouče do řezu začne pracovat . Je-li toto zrno aktivní , vytvoří na povrchu obrobku rýhu . Jestliže zrno vyjde ze záběru , nebo když není aktivní , vrátí se brousicí kotouč do výchozí polohy předešlého zrna a modeluje se zrno další . Současně se obrobek pohybuje rychlostí v_{ob} . Tento proces se neustále opakuje až do okamžiku , kdy se celý obrobek přesune za vertikální osu brousicího kotouče , a tím je broušení ukončeno . Obrobek je možné takto přebrousit i několikrát .

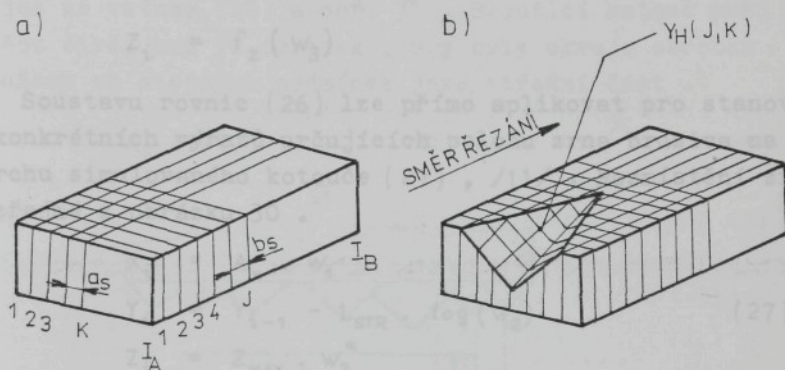
4.3. Základní prvky modelu

4.3.1. Modelovaný obrobek

Modelovaný obrobek má , z hlediska zkoumání procesu broušení s použitím matematického modelu , ideální vlastnosti . Materiál obrobku je dokonale tuhý a nedochází u něj k pružným deformacím . Při mikrořezání zrna vznikají plastické deformace , ovšem rýha , která se vytváří bezprostředně za působícím zrnem brusiva , vzniká jako stopa řezné hrany v materiálu obrobku . Velikost řezného odporu u tohoto materiálu je úměrná tloušťce třísky .

Simulovaný obrobek je znázorněn na obrázku 29 . Je

tvořen mřížkou $I_A \times I_B$ a rozdělen na šířkové úseky a_s a délkové úseky b_s . Jednotlivým bodům mřížky přísluší určitá hodnota $Y_H(J,K)$, která udává výšku profilu v daném bodě mřížky, kdy J označuje obecnou příčnou rovinu a K označuje obecnou podélnou rovinu.



Obr. 29. Mřížka modelovaného obrobku

a) před broušením

b) po průchodu zrna

Na počátku jsou hodnoty výšky profilu všech bodů mřížky stejné (obr.29 a). Dále je na obrázku (obr.29 b) znázorněn povrch obrobku po průchodu jednoho aktivního zrna.

4.3.2. Modelovaný brousicí kotouč

Modelovaný brousicí kotouč musí zajistit obrábění stejně jako brousicí kotouč reálný. Jelikož rozložení zrn na povrchu reálného kotouče je náhodné a zrn, která se účastní na vytváření povrchu obráběné plochy, je velice mnoho, je nemožné popsat povrch kotouče zcela přesně. K vytvoření modelu kotouče proto používáme náhodná čísla a s jejich pomocí udáváme polohu vrcholů zrn na povrchu brousicího kotouče.

Metodu pro vytváření souboru náhodně rozmístěných zrn

na kotouči použili již H.Yoshikawa a T.Sata /10/ .

Polohu vrcholu zrna na kotouči určili souřadnicemi X_i , Y_i , Z_i , přičemž hodnota těchto souřadnic byla určena s použitím náhodných čísel.

$$X_i = f_x(w_1)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + f_y(w_2) \quad (26)$$

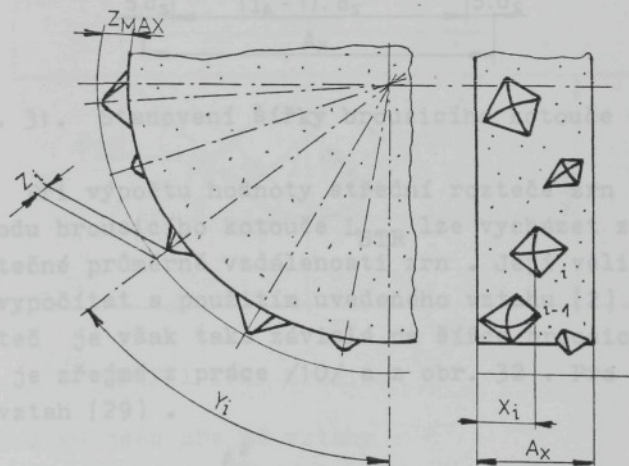
$$Z_i = f_z(w_3)$$

Soustavu rovnic (26) lze přímo aplikovat pro stanovení konkrétních výrazů určujících polohu zrna brusiva na povrchu simulovaného kotouče (27), /11/. Rozmístění zrn je zřejmé z obrázku 30.

$$X_i = A_x \cdot w_1$$

$$Y_i = Y_{i-1} - L_{STR} \cdot \log(w_2) \quad (27)$$

$$Z_i = Z_{MAX} \cdot w_3^\alpha$$



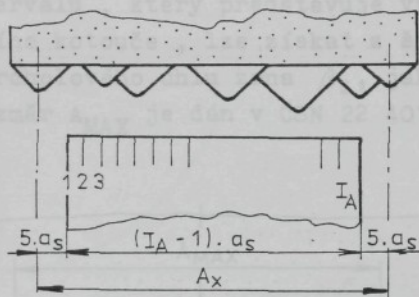
Obr. 30. Souřadnice vrcholů zrn brusiva na povrchu brousícího kotouče

V soustavě rovnic (27) vyjadřuje A_x šířku simulovaného brousícího kotouče, za L_{STR} je třeba dosadit hodnotu

střední vzdálenosti zrn brusiva na obvodu kotouče, Z_{MAX} nám udává výšku aktivní vrstvy brousicího kotouče a $\propto$ je exponent charakterizující rozložení vrcholů zrn brusiva na kotouči. W_1 , W_2 a W_3 jsou náhodná čísla rovnoměrně rozdělená v intervalu od nuly do jedné.

Šířka brousicího kotouče A_x je dána šířkou intervalu, ve kterém se mohou nacházet vrcholy zrn brusiva, jak je zřejmé ze vztahu (28) a obr. 31. Brousicí kotouč musí být o něco širší než je obrobek, aby byly okraje obrobku broušeny za stejných podmínek jako střední část.

$$A_x = (I_A - 1) \cdot a_s + 10 \cdot a_s \quad (28)$$



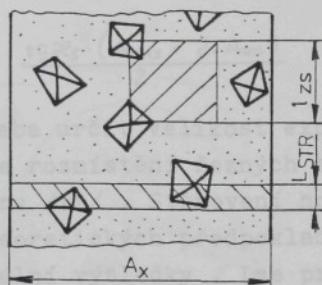
Obr. 31. Stanovení šířky brousicího kotouče

Při výpočtu hodnoty střední rozteče zrn brusiva na obvodu brousicího kotouče L_{STR} lze vycházet z hodnoty skutečné průměrné vzdálenosti zrn. Její velikost je možné vypočítat s použitím uvedeného vztahu (2). Průměrná rozteč je však také závislá na šířce brousicího kotouče, jak je zřejmé z práce /10/ a z obr. 32. Pro výpočet platí vztah (29).

$$L_{STR} = \frac{\rho_{zs}^2}{A_x} \quad (29)$$

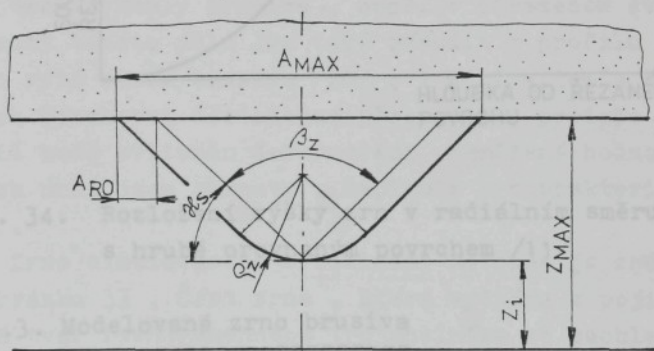
Vrchol zrna brusiva nemusí ležet na obalové ploše brousicího kotouče, ale může se vyskytovat v určitém intervalu hloubek pod povrchem kotouče Z_{MAX} . Velikost

Pro $Z_1 = 0$ bude platit vztah :



Obr. 32. Stanovení střední rozteče zrn brusiva na obvodu brousicího kotouče

tohoto intervalu , který představuje výšku aktivní vrstvy brousicího kotouče , lze získat z šířky zrna brusiva A_{MAX} a z vrcholového úhlu zrna β_z , jak je vidět na obrázku 33 . Rozměr A_{MAX} je dán v ČSN 22 4012 .



Obr. 33. Profil zrna brusiva

Z obrázku jsou zřejmé vztahy :

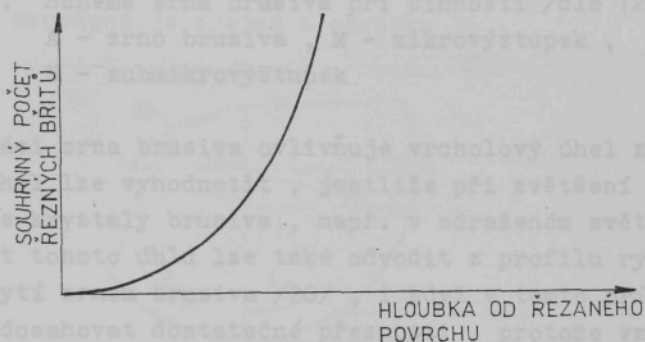
$$\alpha_s = \frac{\pi - \beta_z}{2} \quad (30)$$

$$\tan \alpha_s = \frac{Z_{MAX} - Z_i}{\frac{A_{MAX}}{2} - A_{RO}}$$

Pro $Z_1 = 0$ bude platit vztah :

$$Z_{MAX} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_s \cdot (A_{MAX} - 2 \cdot A_{RO})}{2} \quad (31)$$

Dále je třeba určit velikost exponentu α . Tento exponent vyjadřuje rozmístění řezných elementů zrn brusiva v radiálním směru /11/. Stanovení hodnoty exponentu nelze provést z teoretických předpokladů, ale je nutné využít experimentální výsledky. Lze proto vycházet ze závislostí uvedených Kassenem a Wernerem /20,21/, jak je zřejmé z obr.10 nebo ze závislosti dle obrázku 34, kterou uvádějí H.Yoschikawa a J.Peklenik /11/.

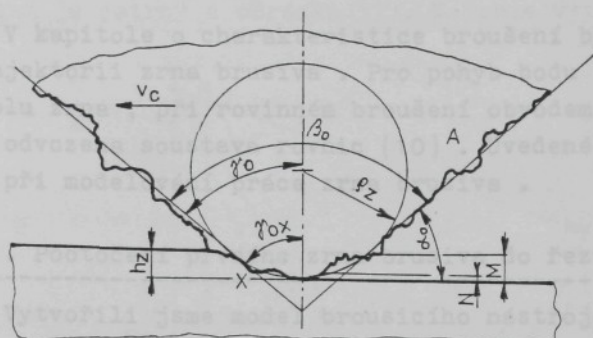


Obr. 34. Rozložení výšky zrn v radiálním směru u kotouče s hrubě ořevnaným povrchem /11/

4.3.3. Modelované zrno brusiva

Zrna brusiva jsou v podstatě mnohoúhelníky nepravidelného tvaru se zaoblenými vrcholy. Pro vytvoření matematického modelu procesu broušení je důležité znát tvary zrn brusiva, protože břity jednotlivých aktivních zrn brusiva se bezprostředně podílejí na vytváření povrchu obrobku.

Břit zrn brusiva je vytvořen dvěma plochami zrna, které tvoří čelo a hřbet. Tvar břitu a řezné úhly závisí na uložení zrna v brousicím kotouči (obr.35).



Obr. 35. Schema zrna brusiva při činnosti /dle 12/

A - zrno brusiva , M - mikrovýstupek ,
N - submikrovýstupek

Práci zrna brusiva ovlivňuje vrcholový úhel zrna . Tento úhel lze vyhodnotit , jestliže při zvětšení fotografujeme krystaly brusiva , např. v odraženém světle /12/. Velikost tohoto úhlu lze také odvodit z profilu rýhy vzniklé po rytí zrnem brusiva /20/ , i když v tomto případě nebudeme dosahovat dostatečné přesnosti , protože vzniklý profil bude ovlivněn deformacemi . Naměřené hodnoty vrcholových úhlů jsou shrnuty v kapitole o charakteristice broušení .

Zrno simulovaného brousíčního kotouče je znázorněno na obrázku 33. Část zrna, která vyčnívá z pojiva kotouče má tvar rovnoramenného trojúhelníka se zaobleným vrcholem. Bylo zjištěno /78/, že rozložení úhlů při vrcholu a poloměry zaoblení se řídí normálním zákonem teorie pravděpodobnosti. Na základě zjištěných skutečností proto vytvoříme simulovaná zrna nekonstantního tvaru, která jsou určena parametry normálního rozdělení pravděpodobnosti jak pro velikost vrcholového úhlu zrna β_z , tak pro poloměr zaoblení vrcholu zrna ρ_z , jak je zřejmé ze vztahů (32):

$$\beta_{zi} \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)_i \quad (32)$$

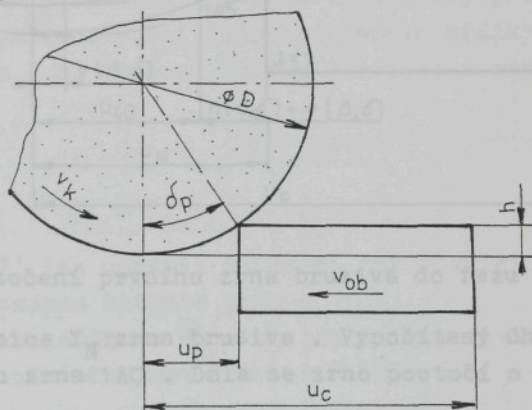
$$\rho_{zi} \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)_i$$

4.4. Kinematické poměry při modelování práce zrna

V kapitole o charakteristice broušení bylo pojednáno o trajektorii zrna brusiva . Pro pohyb bodu , ležícího na vrcholu zrna , při rovinném broušení obvodem kotouče byla již odvozena soustava rovnic (10) . Uvedené vztahy využijeme při modelování práce zrna brusiva .

4.4.1. Pootočení prvního zrna brusiva do řezu

Vytvořili jsme model brousícího nástroje s řezným elementem a model obrobku . Dále musíme realizovat proces jejich vzájemné interakce . Situace na počátku simulovaného procesu broušení je zřejmá z obrázku 36 .



Obr. 36. Počátek procesu broušení

Úhel ϕ_p a hodnoty u_p , u_c lze vyjádřit následujícími rovnicemi :

$$\phi_p = \arccos \frac{D - 2 \cdot H}{D} \quad (33)$$

$$u_p = \frac{D}{2} \cdot \sin \phi_p \quad (34)$$

$$u_c = u_p + (\bar{I}_B - 1) \cdot b_s \quad (35)$$

41)

42

V tomto okamžiku se začne brousicí kotouč otáčet otáčkami n_k a obvodovou rychlostí v_k , obrobek se začne pohybovat rychlostí v_{ob} . Zrno se dostává do polohy 1A10, ve které vrchol prvního zrna prochází rovinou vytvořenou první řadou souřadnic mřížky profilu obrobku. Polohu zrna 1A10,

kterou určuje úhel δ_N , však neznáme . Velikost úhlu δ_N lze určit , vycházíme-li ze soustavy rovnic (10) , kterou aplikujeme pro případ pohybu zrna z polohy 1A5 do polohy 1A10 . Pak lze vypočítat :

- složku pohybu posuvem :

$$v(\beta, \delta) = \frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot n_K} \cdot (\delta_N - \beta_N) \quad (38)$$

- složku pohybu otáčením :

$$n(\beta, \delta) = \left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot (\sin \delta_N - \sin \beta_N) \quad (39)$$

- vzdálenost vrcholu zrna v poloze 1A5
od vertikální osy kotouče :

$$u_{40} = \left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot \sin \beta_N \quad (40)$$

- vzdálenost vrcholu zrna v poloze 1A10 , kdy prochází rovinou vytvořenou první řadou souřadnic mřížky profilu obrobku , od výchozí polohy vertikální osy kotouče :

$$u_N = u_P \quad (41)$$

$$u_N = u_{40} + v(\beta, \delta) + n(\beta, \delta) \quad (42)$$

Vztah (42) lze upravit a získat tak rovnici , ve které je jedinou neznámou hodnota úhlu δ_N .

Požadovanou hodnotu úhlu δ_N lze z této rovnice (43) určit vhodnou iterační metodou .

$$\left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot \sin \delta_N + \frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot n_K} \cdot \delta_N - \left(\frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot n_K} \cdot \beta_N + u_N \right) = 0 \quad (43)$$

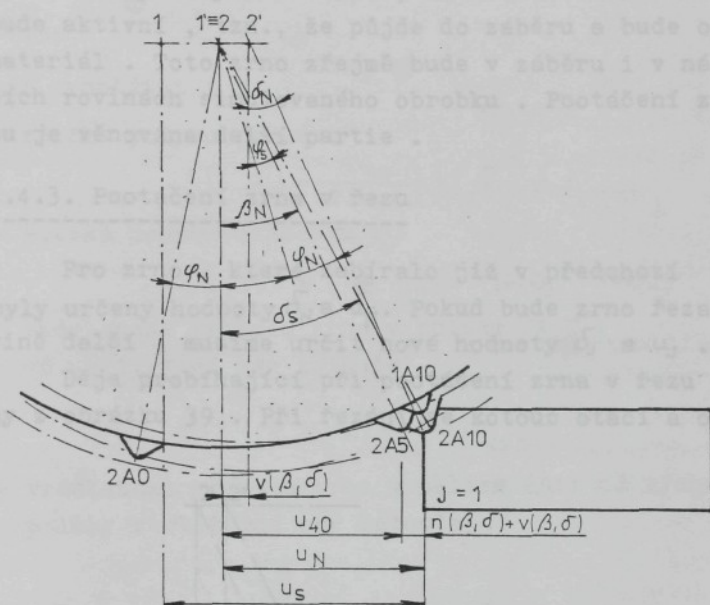
Pro názornost budeme předpokládat , že toto první namodelované zrno není aktivní , tzn. , že zrno se nedostane do záběru a budeme se zabývat modelováním dalšího obecného zrna , které bude aktivní .

4.4.2. Působení obecného zrna brusiva

Obecné zrno brusiva se modeluje stejným způsobem jako zrno předešlé (první) , vždy jeho práce navazuje na zrno předešlé (první) . Pro nové zrno určíme jeho tvar a polohu.

Hodnoty platné pro předešlé (první) zrno φ_N, δ_N, u_N přejmeme pro následující (druhé) zrno na φ_S, δ_S, u_S .

Děje probíhající při pootočení následujícího (druhé) zrna do záběru jsou patrné z obrázku 38.



Obr. 38. Pootočení druhého zrna brusiva do řezu

Opět vypočítáme novou hodnotu úhlu φ_N dle vztahu (36) a určíme tak výchozí polohu zrna 2A0. Dále se zrno pootočí do polohy 2A5, kdy je připraveno k řezání. Polohu zrna určuje nový úhel β_N , jehož velikost určíme dle vztahu (44). V tomto okamžiku se opět začne kotouč otáčet a obrobek posouvat a zrno se dostává do polohy 2A10, ve které vrchol zrna prochází rovinou vytvořenou první řadou

$$\beta_N = \delta_S - \varphi_N - \varphi_S \quad (44)$$

souřadnic mřížky profilu obrobku. Polohu zrna 2A10, určenou novou hodnotou úhlu δ_N , neznáme. Výpočet hodnoty δ_N provádíme dle vztahů (38)-(40) a (42) stejným způsobem jako u prvního zrna. Odlišně však budeme určovat ve-

likost vzdálenosti u_N . Tuto hodnotu vypočítáme dle vzta-
hu (45).

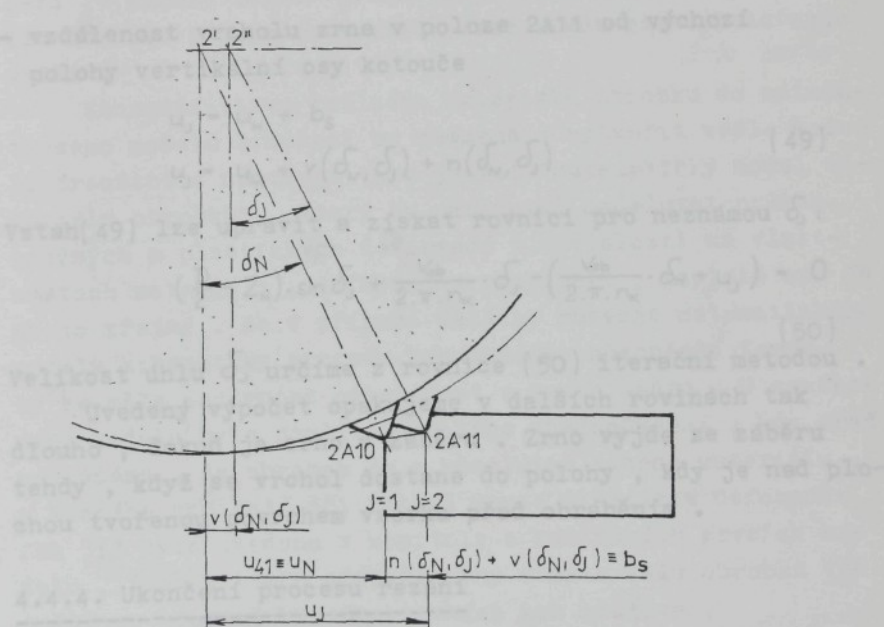
$$u_N = \left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot \sin \delta_N \quad (45)$$

Již výše bylo uvedeno, že druhé namodelované zrno bude aktivní, tzn., že půjde do záběru a bude odebírat materiál. Toto zrno zřejmě bude v záběru i v následujících rovinách simulovaného obrobku. Pootáčení zrna v řezu je věnována další partie.

4.4.3. Pootáčení zrna v řezu

Pro zrno, které zabíralo již v předchozí rovině, byly určeny hodnoty δ_N a u_N . Pokud bude zrno řezat i v rovině další, musíme určit nové hodnoty δ_J a u_J .

Děje probíhající při pootáčení zrna v řezu jsou patrné z obrázku 39. Při řezání se kotouč otáčí a obrobek po-



Obr. 39. Pootáčení druhého brusného zrna v řezu

souvá , zrno se pohybuje z polohy 2A10 do polohy 2A11, kdy vrchol zrna prochází rovinou vytvořenou druhou řadou souřadnic mřížky profilu obrobku . Polohu zrna 2A11 , určenou hodnotou úhlu δ_j neznáme . Velikost úhlu δ_j lze určit podobně jako úhel δ_N při použití rovnic (38)-(40),(42),(43), (45) .

Lze vypočítat :

- složku pohybu posuvem

$$v(\delta_N, \delta_j) = \frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot r_K} \cdot (\delta_j - \delta_N) \quad (46)$$

- složku pohybu otáčením :

$$n(\delta_N, \delta_j) = \left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot (\sin \delta_j - \sin \delta_N) \quad (47)$$

- vzdálenost vrcholu zrna v poloze 2A10 od vertikální osy kotouče

$$u_{N1} = \left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot \sin \delta_N \quad (48)$$

- vzdálenost vrcholu zrna v poloze 2A11 od výchozí polohy vertikální osy kotouče

$$\begin{aligned} u_j &= u_N + b_s \\ u_j &= u_{N1} + v(\delta_N, \delta_j) + n(\delta_N, \delta_j) \end{aligned} \quad (49)$$

Vztah(49) lze upravit a získat rovnici pro neznámou δ_j :

$$\left(\frac{D}{2} - Z_N \right) \cdot \sin \delta_j + \frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot r_K} \cdot \delta_j - \left(\frac{V_{ob}}{2 \cdot \pi \cdot r_K} \cdot \delta_N + u_j \right) = 0 \quad (50)$$

Velikost úhlu δ_j určíme z rovnice (50) iterační metodou .

Uvedený výpočet opakujeme v dalších rovinách tak dlouho , dokud je zrno v záběru . Zrno vyjde ze záběru tehdy , když se vrchol dostane do polohy , kdy je nad plochou tvořenou povrchem vzorku před obráběním .

4.4.4. Ukončení procesu řezání

K ukončení procesu řezání dojde, jestliže vzdálenost , o kterou se brousicí kotouč posunul od počáteční polohy u_{pp} bude větší nebo rovna vzdálenosti u_c , která udává délku zdvihu obrobku, ve které je kotouč v záběru. K ukončení procesu

broušení dojde , je-li splněna následující podmínka :

$$u_{pp} \geq u_c \quad (51)$$

4.5. Mikrořezání zrna

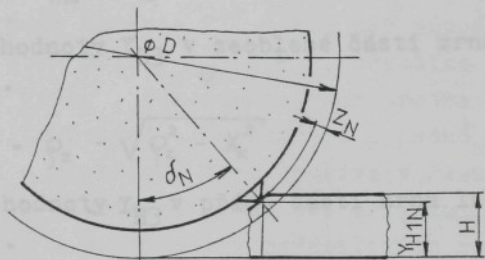
Aktivní částí brousícího nástroje jsou jednotlivá zrna brusiva . Tato zrna působí na povrchovou vrstvu obroběného materiálu dynamicky . Před vlastním záběrem dochází pouze ke kluzu zrna po povrchu obrobku , při zvyšování tlaku zrna vzrůstají plastické deformace , přičemž dochází k rytí zrna a teprve v další fázi dochází k oddělování materiálu , kdy vzniká tříška .

Proces vzniku třísky při broušení je charakterizován vysokou řeznou rychlostí a vznikem velkých třecích sil , které jsou příčinou značného vývinu tepla v místě řezu . Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje vlastnosti materiálu obrobku , zejména v místě řezu , kde je teplota nejvyšší .

Zahrnutí vlivu reálného materiálu obrobku do matematického modelu broušení by znamenalo vytvořit vedle modelu brousícího nástroje také jakýsi "matematický model materiálu obrobku" , který by umožňoval modelovat průběh pružných a plastických deformací v závislosti na vlastnostech materiálu , deformační rychlosti , teplotě ap. Je proto zřejmé , že v případě dalšího rozvoje matematického modelu kinematiky procesu broušení do obecnější formy by se měla pozornost orientovat v tomto směru . U současného modelu bylo použito určitého zjednodušení , kdy předpokládáme , že obrobek je z absolutně tuhého materiálu , u kterého vznikají při řezání pouze plastické deformace . Jak již bylo uvedeno v kapitole o základních prvcích modelu , jsou v tomto případě rýhy v materiálu obrobku to-
tožné se stopami břitů aktivních zrn brusiva .

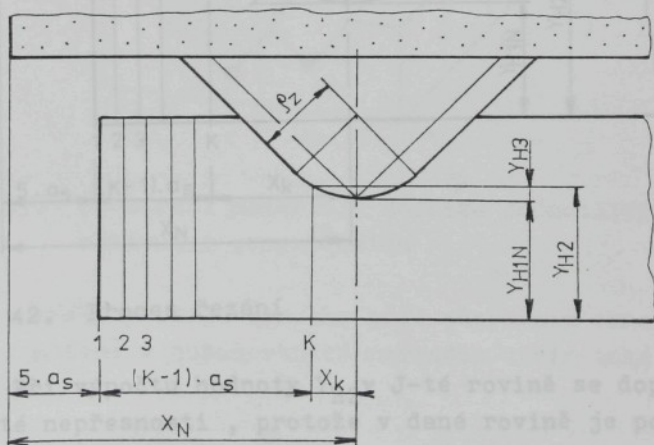
O pohybu zrn brusiva vzhledem k obrobku při simulovaném procesu broušení bylo již pojednáno výše . Dále musíme vypočítat novou výšku profilu v rovině , ve které zrno právě pracuje . V této rovině musíme nejprve určit přes-

nou polohu vrcholu zrna jako vzdálenost Y_{H1N} , která vyjadřuje výšku od základny vzorku k vrcholu zrna brusiva, jak je zřejmé z obrázku 40. K výpočtu dále potřebujeme hodnotu Y_{H2} , která vyjadřuje výšku od základny vzorku



Obr. 40. Určení polohy vrcholu zrna

k zrnům brusiva v konkrétním bodě mřížky. Než začneme počítat tuto hodnotu, musíme stanovit vzdálenost X_K vrcholu zrna od podélné roviny K, ve které provádíme výpočet. Podle této vzdálenosti určíme, zda zrnko pracuje v zaoblené nebo v přímé části. Situace je naznačena na obrázcích 41 a 42.



Obr. 41. Proces řezání

$$X_K = |(K-1) \cdot a_s + 5 \cdot a_s - X_N| \quad (52)$$

K určení vzdálenosti Y_{H2} použijeme další hodnotu Y_{H3} , která udává složku vzdálenosti od vrcholu zrna ke konkrétnímu bodu zrna v radiálním směru, přičemž platí rovnice:

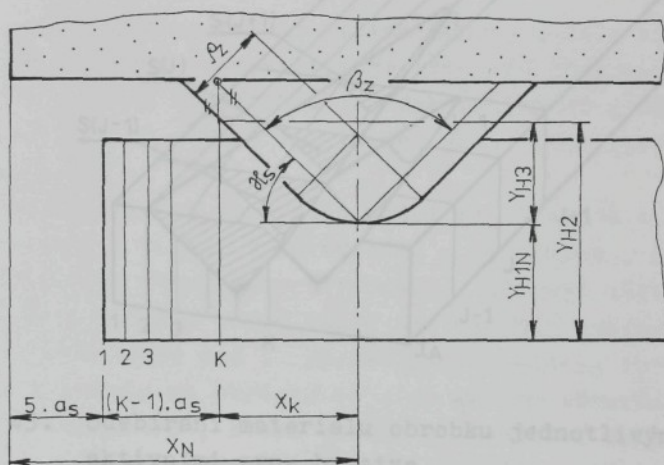
$$Y_{H2} = Y_{H1N} + Y_{H3} \quad (53)$$

Výpočet hodnoty Y_{H3} v zaoblené části zrna je zřejmý z obrázku 41.

$$Y_{H3} = \rho_z - \sqrt{\rho_z^2 - X_K^2} \quad (54)$$

Výpočet hodnoty Y_{H3} v přímé části zrna lze odvodit z obrázku 42.

$$Y_{H3} = X_K \cdot \operatorname{tg} \alpha_s - \left(\frac{\rho_z}{\cos \alpha_s} - \rho_z \right) \quad (55)$$



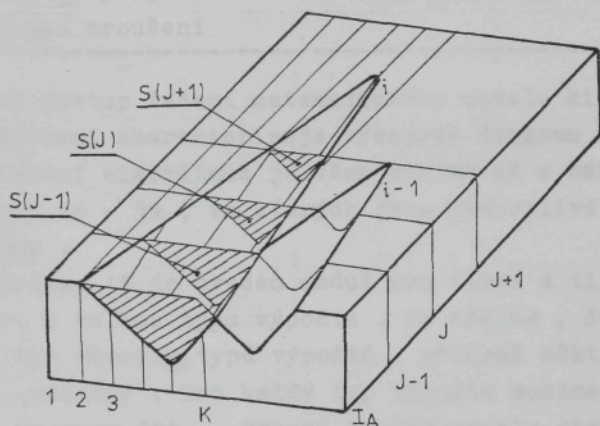
Obr. 42. Proces řezání

Při výpočtu hodnoty Y_{H2} v J-té rovině se dopouštíme určité nepřesnosti, protože v dané rovině je pouze vrchol zrna (obr. 40). Hodnoty ostatních výšek profilu jsou již zatíženy chybou, kterou však lze pro velmi malé úhly α_N zanedbat.

V případě, že bude hodnota Y_{H2} větší než maximální

možná výška od základny obrobku k zrnu brusiva , znamená to , že vzorek není řezán zrnem , ale je odírán pojivem brousicího kotouče . V tomto případě dosadíme za novou hodnotu mřížky po rytí zrna hodnotu maximální možné výšky od základny obrobku k zrnu brusiva .

Jestliže bude hodnota Y_{H2} menší než původní výška profilu v daném bodě mřížky $Y_H(J,K)$, dosadíme hodnotu Y_{H2} místo původní výšky . Tím realizujeme proces odebírání materiálu - mikrořezání . Shrňeme-li popsané děje o mikrořezání zrna a pootáčení zrna brusiva v řezu , můžeme realizovat proces odebírání materiálu obrobku , jak je zřejmé z obrázku 43 . Budeme-li v jednotlivých rovinách obrobku u každého aktivního zrna brusiva registrovat rozdíl



Obr. 43. Odebírání materiálu obrobku jednotlivými aktivními zrny brusiva

hodnot výšky profilu obrobku před působením zrna a po řezání , můžeme v požadovaných rovinách určit také průřezy řezu .

4.6. Realizace modelu

Při vytváření matematického modelu kinematiky procesu broušení musíme nejprve formulovat příslušný algorit-

mus řešení , ze kterého vycházíme při sestavování programu pro číslicový počítač . Vlastní program vytváříme jako soustavu složenou z jednodušších částí - modulů .

O nejdůležitějších částech základního programu bylo již pojednáno dříve . Další moduly základního programu a moduly pro výpočet drsnosti povrchu , počtu aktivních zrn , průřezu nedeformovaných třísek a složky síly při broušení ap. budou vysvětleny pomocí vývojových diagramů . Tyto diagramy umožňují názorně a přehledně popsat celý průběh řešení .

K vytvoření programu byl použit jazyk automatického programování FORTRAN , typ G /138/ a k jeho zpracování byl použit číslicový počítač EC 1033 .

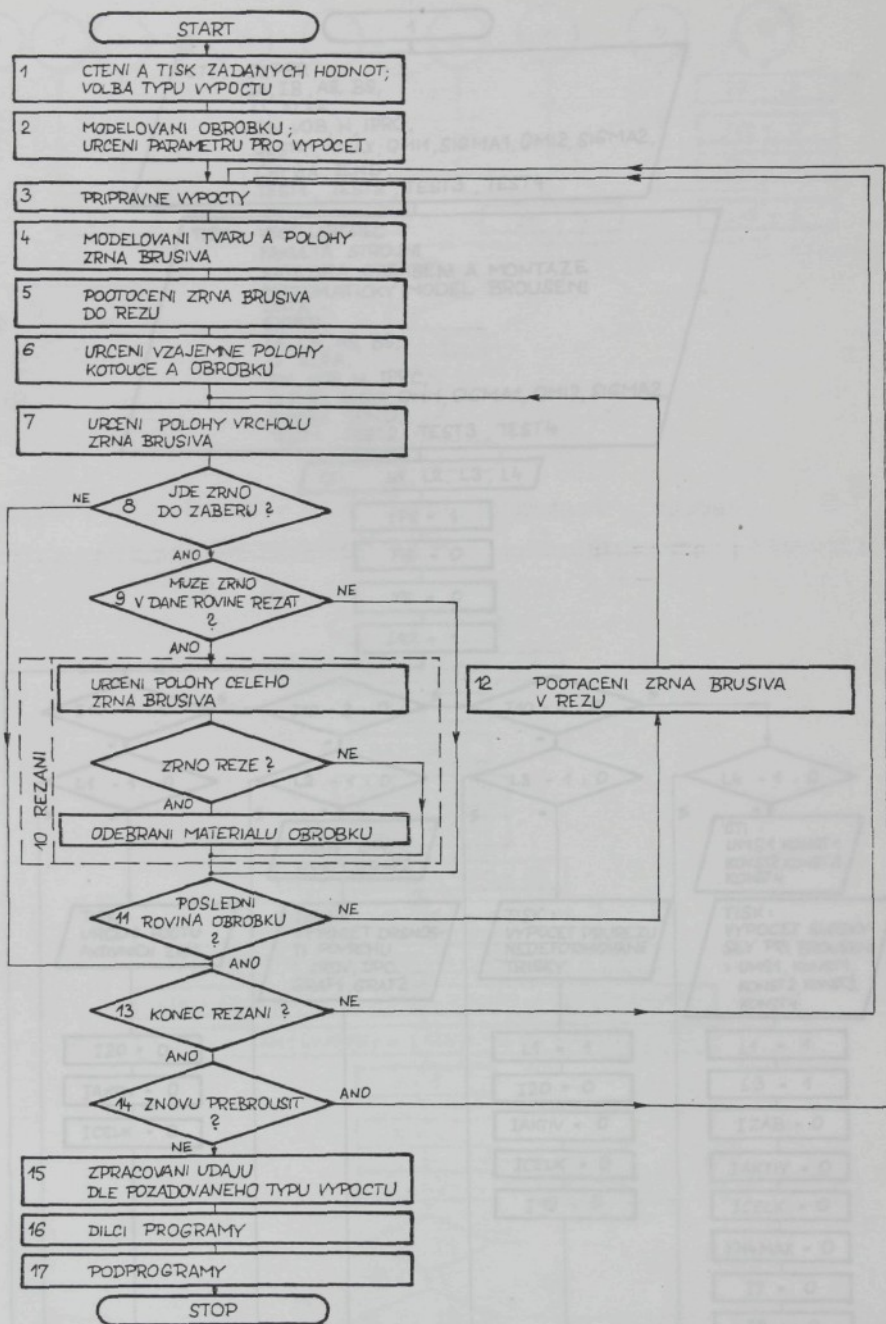
4.6.1. Základní program - matematický model kinematiky procesu broušení

Obecný postup řešení matematického modelu kinematiky procesu broušení charakterizuje vývojový diagram na obrázku 44 . Vlastní algoritmus je však zřejmý až z následujících obrázků 45 - 59 , ve kterých jsou jednotlivé moduly rozpracovány .

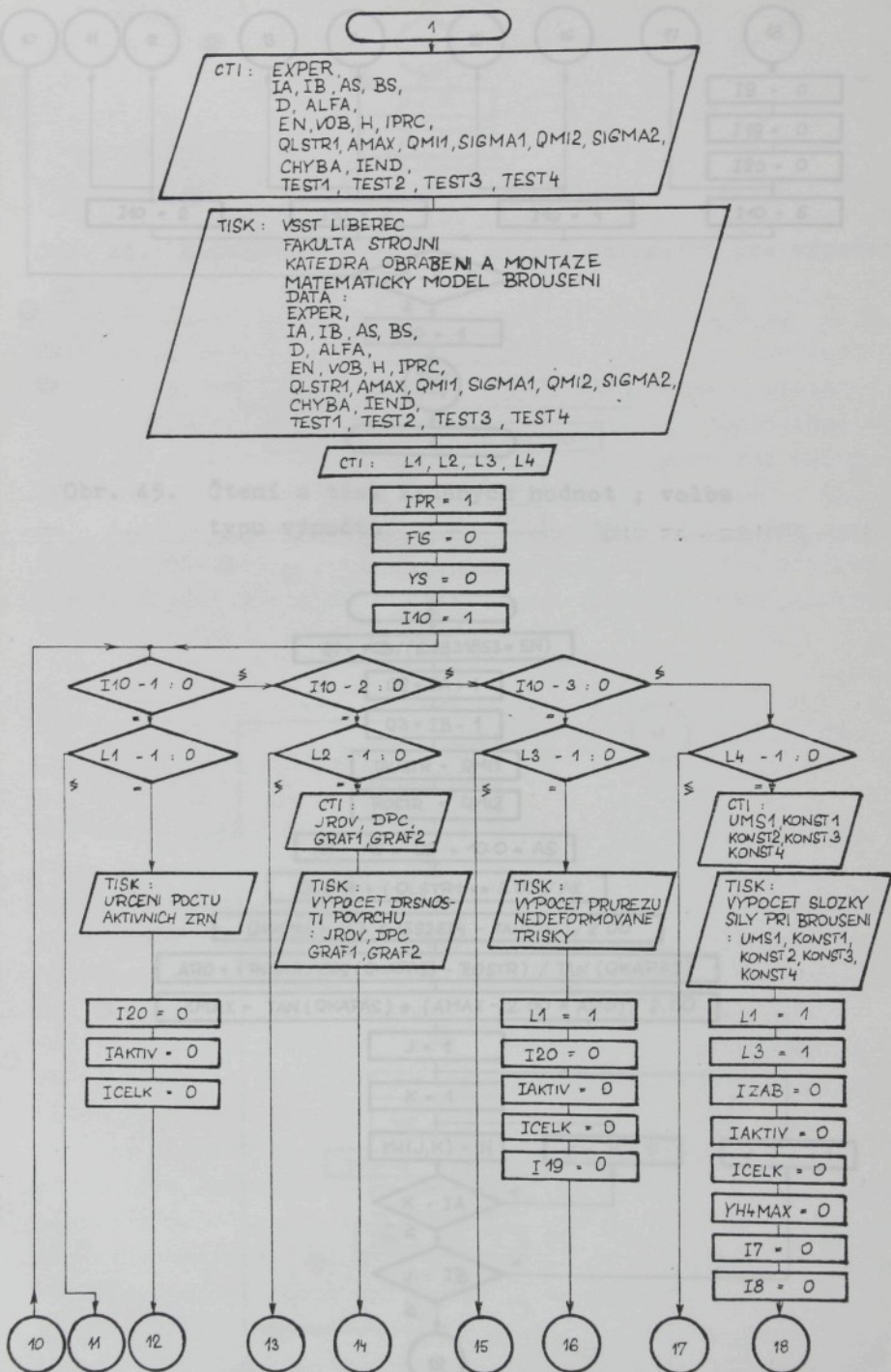
Na obrázku 45 je uveden modul pro čtení a tisk zadaných hodnot a volbou typu výpočtu . Je zřejmé , že můžeme volit ze čtyř různých typů výpočtů , přičemž některé jsou vzájemně podmíněny . Pro každý typ výpočtu musíme dodat příslušné soubory dat . Proces tvorby modelu obrobku je zřejmý z modulu na obrázku 46 , ve kterém zároveň určujeme řadu parametrů , které slouží k urychlení dalších výpočtů . V dalším modulu (obr.47) provádíme přípravné výpočty jejichž cílem je zajištění počátečního stavu , případně uchování hodnot pro pozdější použití . Na obrázku 48 je znázorněno modelování tvaru a polohy zrna brusiva pomocí generátoru náhodných čísel .

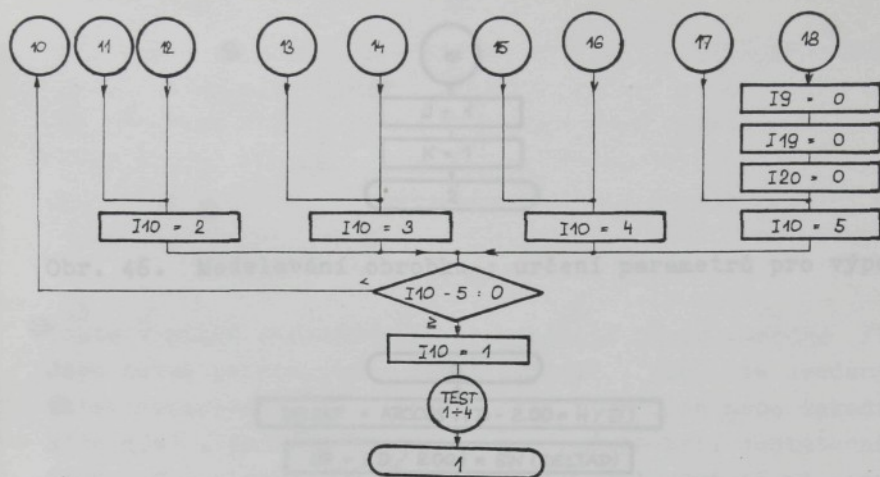
Pro generování náhodných posloupností na číslicovém počítači byly vypracovány metody realizace náhodných posloupností pomocí vztahů typu :

$$W_{n+1} = f(W_n, W_{n-1}, \dots, W_{n-m}) \quad , \quad m \geq 0$$

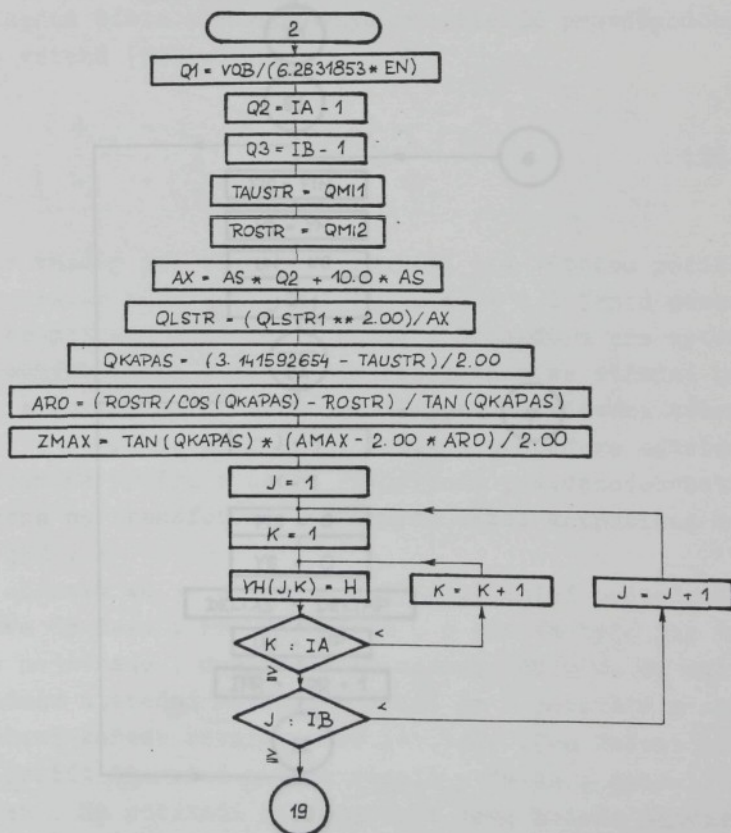


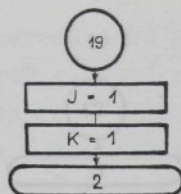
Obr.44. Obecný vývojový diagram matematického modelu kinetiky procesu broušení



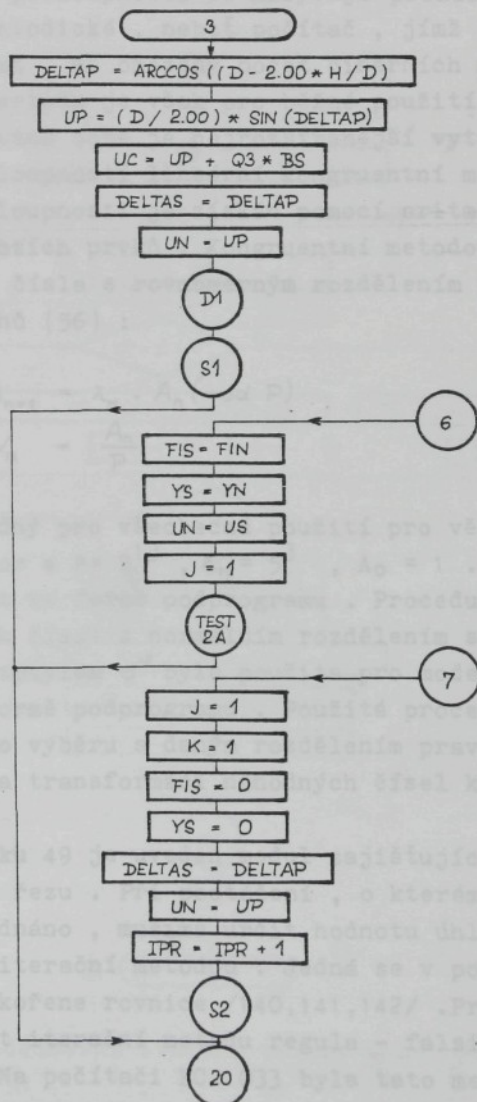


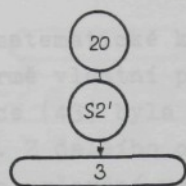
Obr. 45. Čtení a tisk zadanych hodnot ; volba typu výpočtu





Obr. 46. Modelování obrobku ; určení parametrů pro výpočet





Obr. 47. Přípravné výpočty

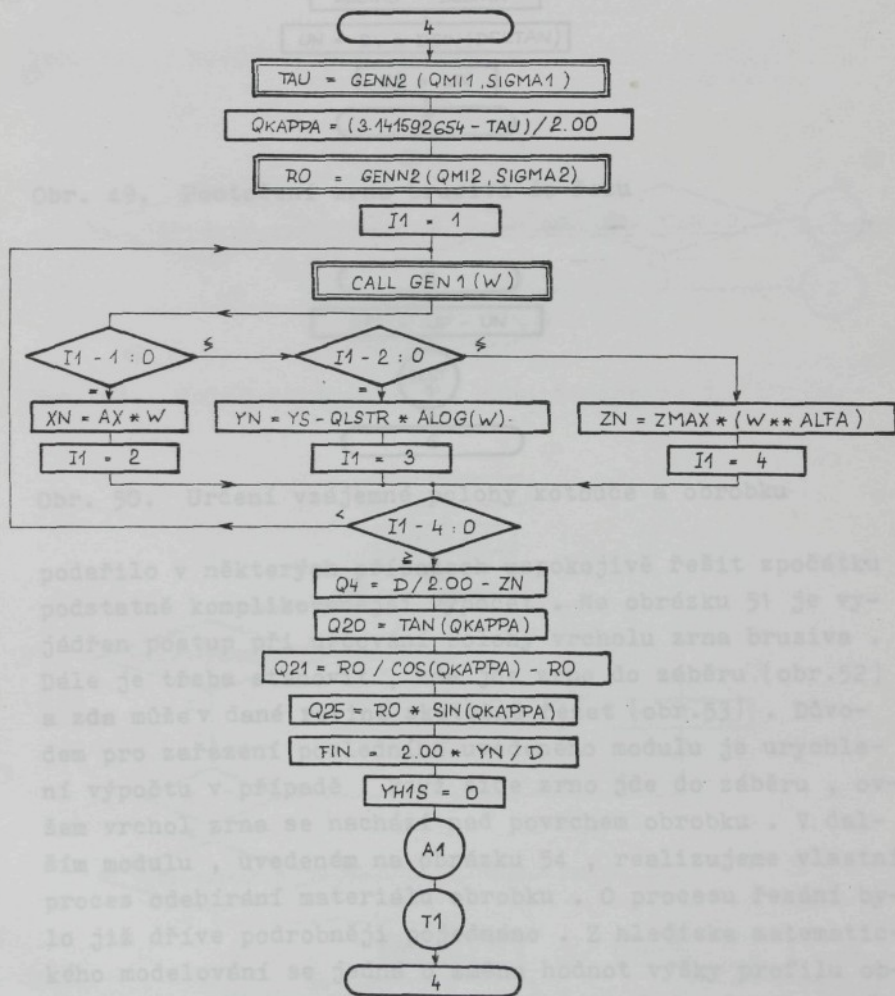
Takto vzniklé posloupnosti se nazývají pseudonáhodné /139/. Jsou nutně periodické, neboť počítač, jímž lze uvedený vztah zpracovat, má omezený počet binárních nebo dekadických míst. Perioda je však pro běžné použití dostatečně velká. V současné době je nejrozšířenější vytváření pseudonáhodných posloupností lineární kongruentní metodou. Každý nový člen posloupnosti je získán pomocí aritmetických operací z předchozích prvků. Kongruentní metodou lze generovat pseudonáhodná čísla s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti podle vztahů (56) :

$$\begin{aligned} A_{n+1} &= \lambda_m \cdot A_n \pmod{P} \\ W_n &= \frac{A_n}{P} \end{aligned} \quad (56)$$

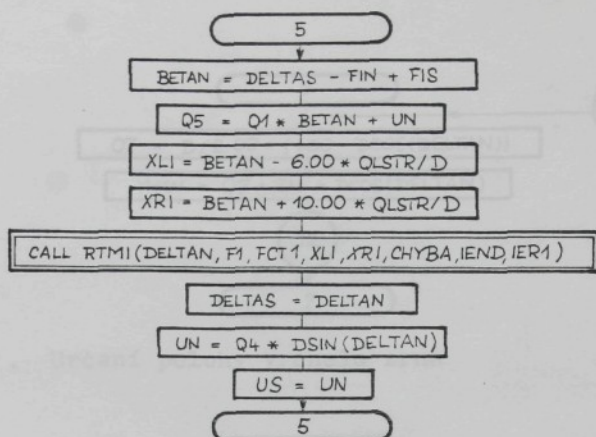
Generátor vhodný pro všeobecné použití pro většinu počítačů je generátor s $P = 2^{13}$, $\lambda_m = 5^3$, $A_0 = 1$. Tento generátor byl použit ve formě podprogramu. Procedura pro vytváření náhodných čísel s normálním rozdělením se střední hodnotou μ a rozptylem σ^2 byla použita pro modelování tvaru zrn také ve formě podprogramu. Použitá procedura modelování náhodného výběru s daným rozdělením pravděpodobnosti je založena na transformaci náhodných čísel kompoziční metodou /139/.

Na obrázku 49 je uveden modul zajišťující pootočení zrna brusiva do řezu. Při pootáčení, o kterém bylo již výše podrobně pojednáno, musíme určit hodnotu úhlu σ_n ze vztahu (43) vhodnou iterační metodou. Jedná se v podstatě o numerické určení kořene rovnice /140,141,142/. Pro řešení lze výhodně použít iterační metodu regula - falsi, nebo-li metodu sečen. Na počítači EC 1033 byla tato metoda nalezena

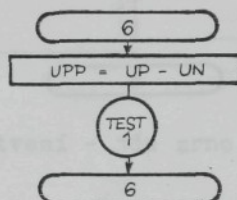
v seznamu programů matematické knihovny a jako programová jednotka byla ve formě vlastní procedury použita při řešení programu . Rovnice (43) byla popsána v dalším programu jako vnější funkce . Z dalšího obrázku 50 je zřejmá konečná podoba modulu pro určování vzájemné polohy kotouče a obrobku .Postupnými úpravami modulu a změnami v programu se



Obr. 48. Modelování tvaru a polohy zrna brusiva

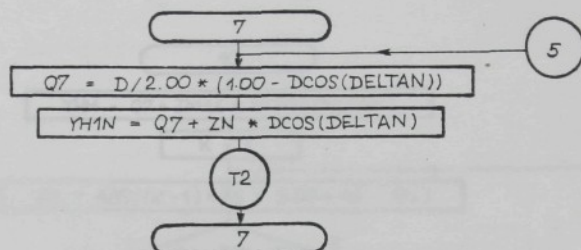


Obr. 49. Pootočení zrna brusiva do řezu

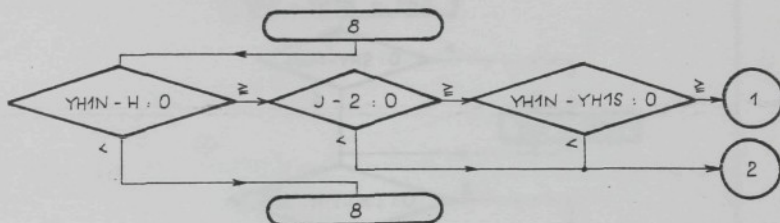


Obr. 50. Určení vzájemné polohy kotouče a obrobku

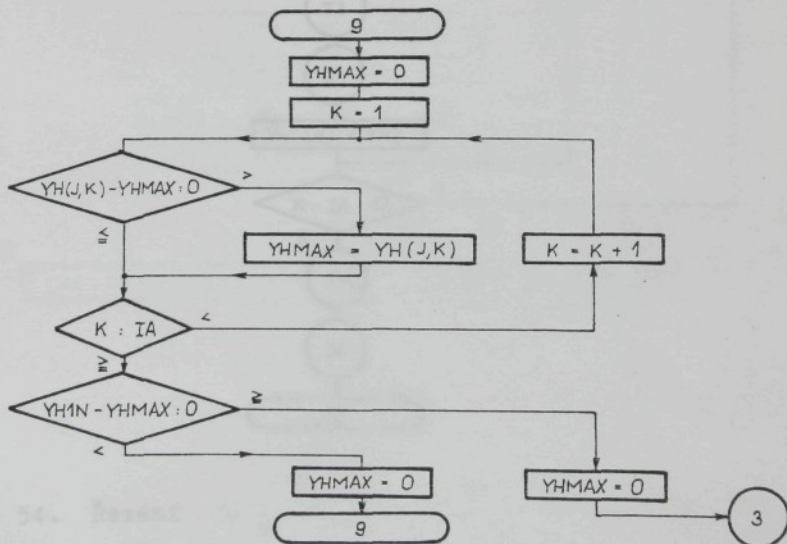
podařilo v některých případech uspokojivě řešit zpočátku podstatně komplikovanější výpočet. Na obrázku 51 je vyjádřen postup při určování polohy vrcholu zrna brusiva. Dále je třeba stanovit, zda jde zrna do záběru (obr.52) a zda může v dané rovině skutečně řezat (obr.53). Důvodem pro zařazení posledního uvedeného modulu je urychlení výpočtu v případě, když sice zrna jde do záběru, ovšem vrchol zrna se nachází nad povrchem obrobku. V dalším modulu, uvedeném na obrázku 54, realizujeme vlastní proces odebírání materiálu obrobku. O procesu řezání bylo již dříve podrobněji pojednáno. Z hlediska matematického modelování se jedná o změnu hodnot výšky profilu obrobku v příslušných bodech a rovinách působením aktivního zrna brusiva. Dále musíme stanovit, zda zrna působí v poslední rovině obrobku (obr.55) a pokud tomu tak není, pootáčíme zrnem brusiva v řezu (obr.56). Proces pootáčení



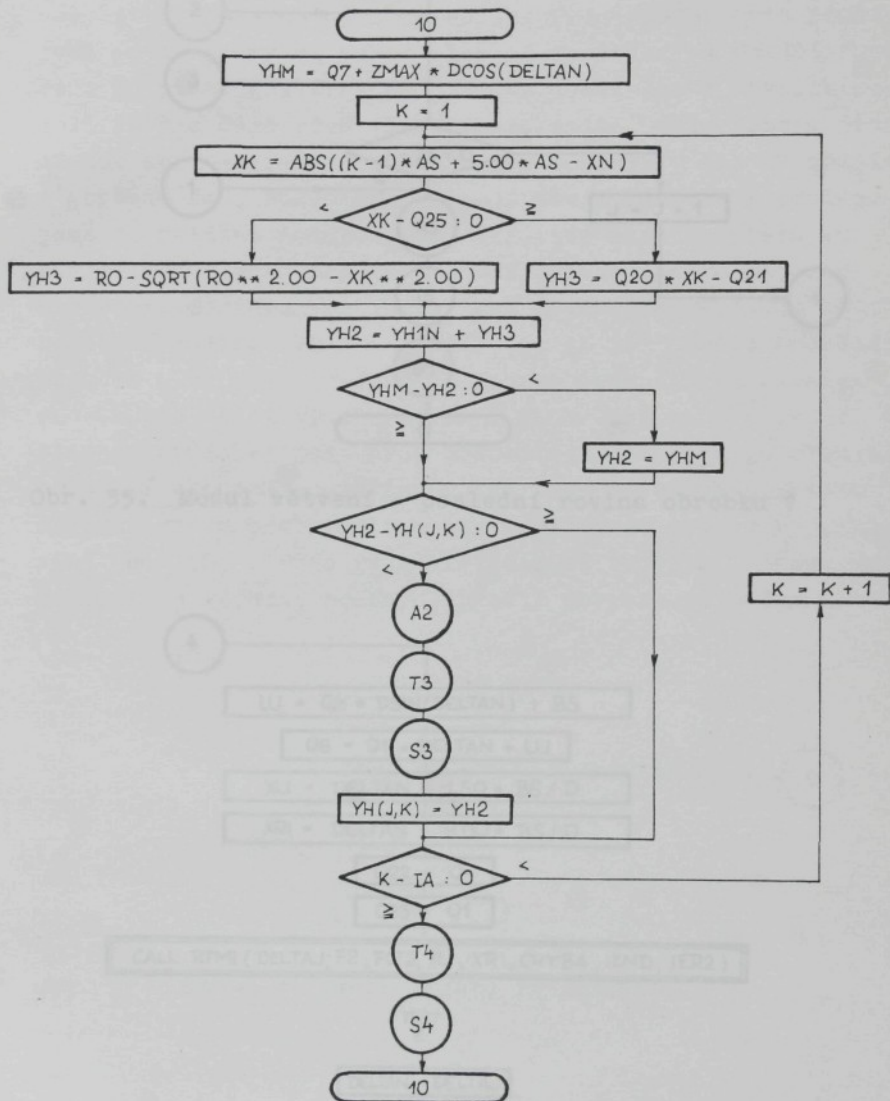
Obr. 51. Určení polohy vrcholu zrna



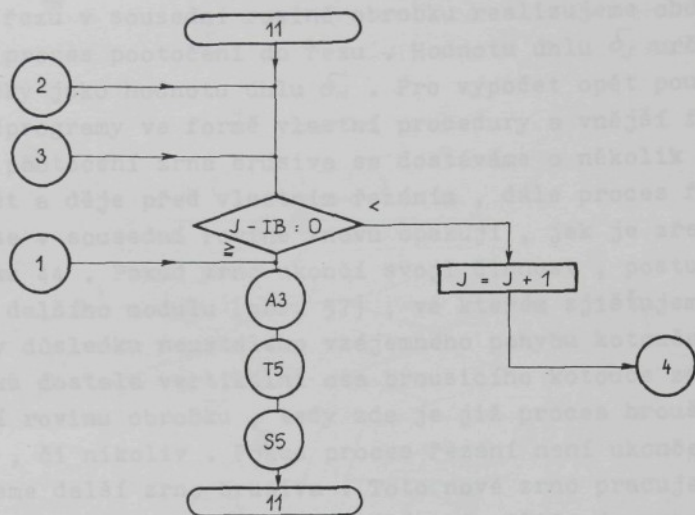
Obr. 52. Modul větvení - jde zrno do záběru ?



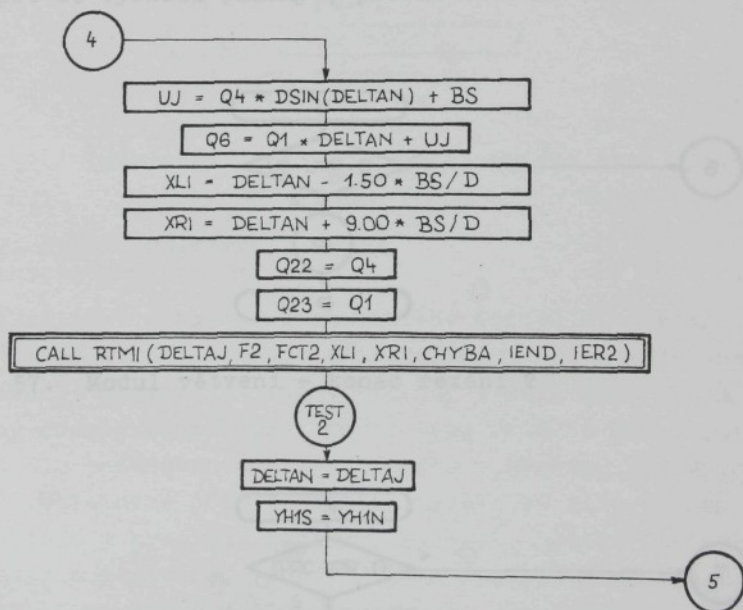
Obr. 53. Modul větvení - může zrno v dané rovině řezat ?



Obr. 54. Řezání

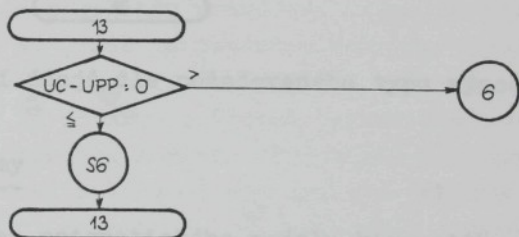


Obr. 55. Modul větvení - poslední rovina obrobku ?

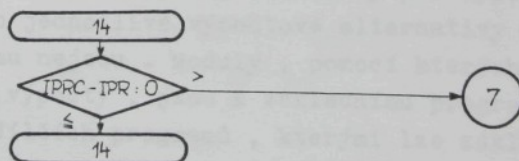


Obr. 56. Modul 12 - pootáčení zrna brusiva v řezu

zrna do řezu v sousední rovině obrobku realizujeme obdobně jako proces pootočení do řezu . Hodnotu úhlu δ_j určíme analogicky jako hodnotu úhlu δ_N . Pro výpočet opět použijeme podprogramy ve formě vlastní procedury a vnější funkce . Po pootočení zrna brusiva se dostáváme o několik modulů zpět a děje před vlastním řezáním , dále proces řezání ap. se v sousední rovině znovu opakuje , jak je zřejmé z obrázku 44 . Pokud zrno ukončí svoji činnost , postupujeme do dalšího modulu (obr. 57) , ve kterém zjišťujeme zda se v důsledku neustálého vzájemného pohybu kotouče a obrobku dostala vertikální osa brousicího kotouče za poslední rovinu obrobku , tedy zda je již proces broušení ukončen , či nikoliv . Pokud proces řezání není ukončen , modelujeme další zrno brusiva . Toto nové zrno pracuje stejným způsobem jako zrno předešlé . Jestliže je proces broušení ukončen , ověříme , zda není požadováno povrch obrobku znovu přebrousit a tak realizovat proces vyjiskřování (obr.58) . Před vyjiskřováním se brousicí kotouč vrací zpět do výchozí polohy , profil obrobku se ovšem nemění.

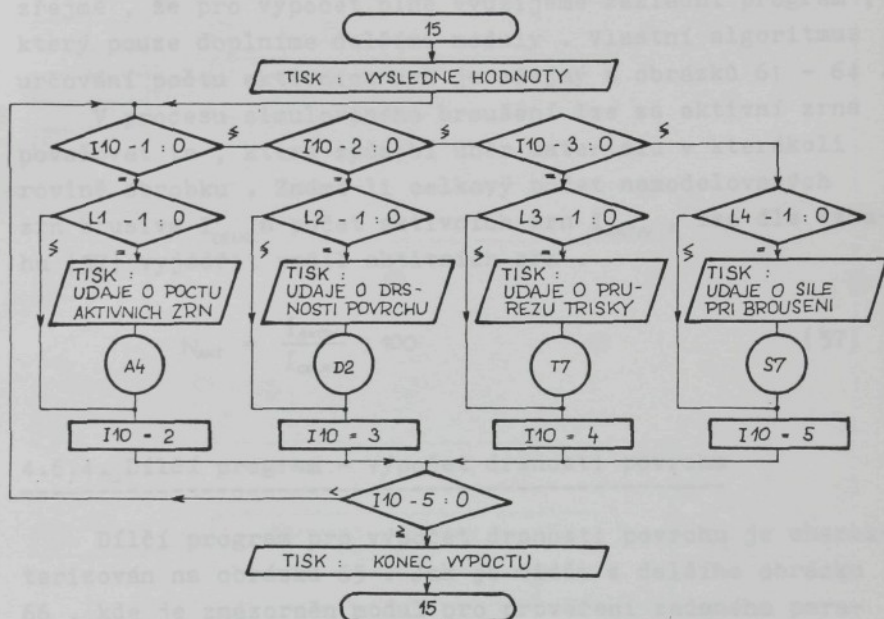


Obr. 57. Modul větvení - konec řezání ?



Obr. 58. Modul větvení - znovu přebrousit ?

Poslední modul základního programu je uveden na obrázku 59. Zajišťuje konečné zpracování a tisk hodnot dle požadovaného typu výpočtu .



Obr. 59. Zpracování údajů dle požadovaného typu výpočtu

4.6.2. Dílčí programy

Základní program matematického modelu kinematiky procesu broušení představuje bázi řešení . Sám o sobě však neumožňuje realizovat žádné výpočty i když jsou v něm zařazeny moduly zajišťující volbu typu výpočtu a zpracování údajů dle požadovaného typu výpočtu . Příkazy pro výpočet údajů potřebných pro jednotlivé výpočtové alternativy v tomto základním programu nejsou . Moduly , pomocí kterých lze provádět požadované výpočty , jsou k základnímu programu připojeny ve formě dílčích programů , kterými lze základní program podle potřeby libovolně rozšiřovat , aniž bychom do něj zasahovali .

4.6.3. Dílčí program - určování počtu aktivních zrn

Vazby dílčího programu pro určování počtu aktivních zrn na základní program jsou vyjádřeny na obrázku 60 . Je zřejmé , že pro výpočet plně využijeme základní program , který pouze doplníme dalšími moduly . Vlastní algoritmus určování počtu aktivních zrn je zřejmý z obrázků 61 - 64 .

V procesu simulovaného broušení lze za aktivní zrna považovat ta , která způsobí úběr materiálu v kterékoli rovině obrobku . Známe-li celkový počet namodelovaných zrn brusiva I_{CELK} a počet aktivních zrn I_{AKTIV} , lze dle vzta-
hu (57) vyjádřit podíl aktivních zrn .

$$N_{\text{AKT}} = \frac{I_{\text{AKTIV}}}{I_{\text{CELK}}} \cdot 100 \quad (57)$$

4.6.4. Dílčí program - výpočet drsnosti povrchu

Dílčí program pro výpočet drsnosti povrchu je charakterizován na obrázku 65 . Jak je vidět z dalšího obrázku 66 , kde je znázorněn modul pro prověření zadaného parametru , a z obrázku 67 , kde je popsán modul pro výpočty , tisk výsledných hodnot a grafické vyjádření výsledku , spočívá těžiště tohoto výpočtu na posledně jmenovaném modulu.

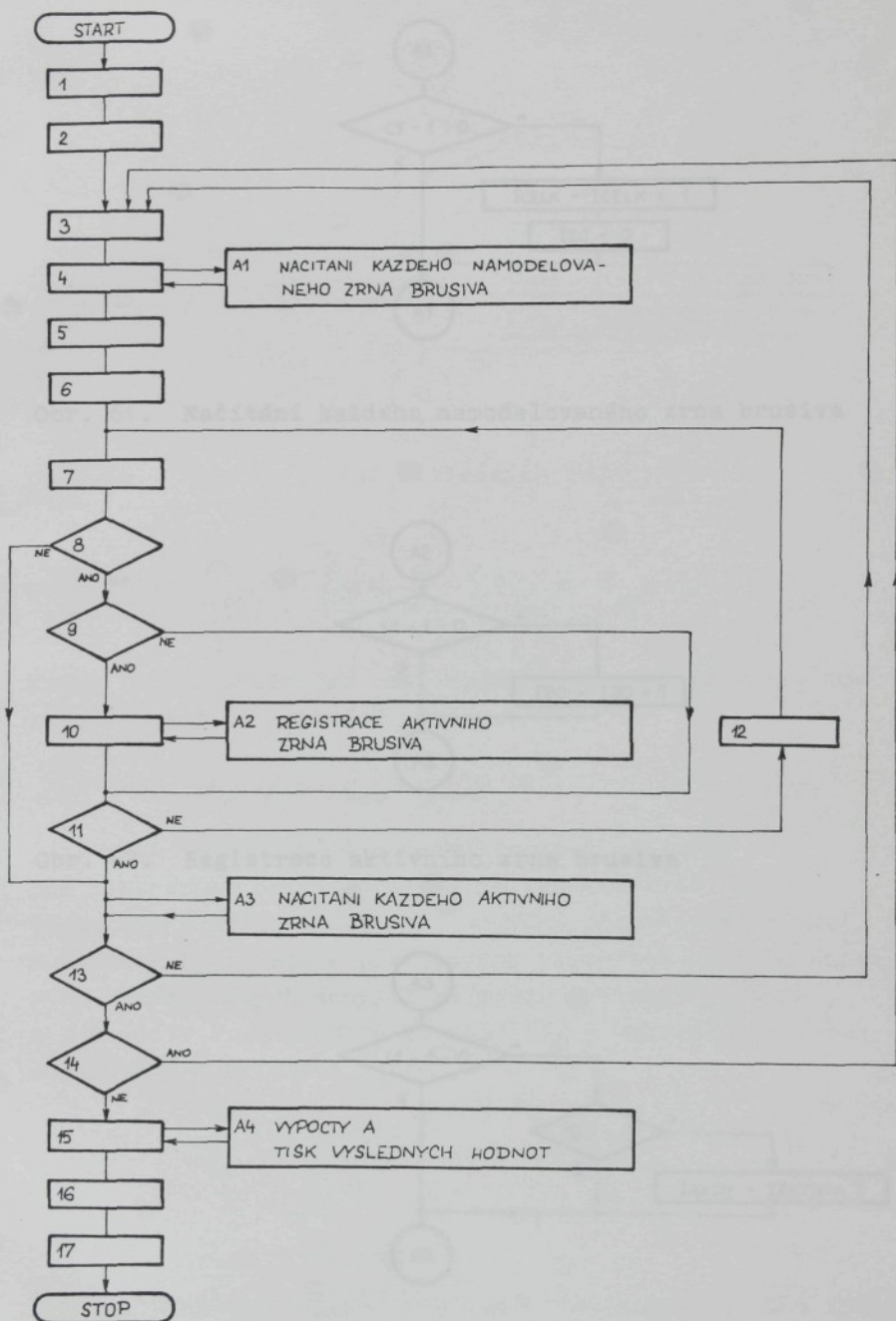
Pro posouzení drsnosti povrchu obrobených součástí používáme nejčastěji údaj o střední aritmetické úchylce nerovnosti povrchu R_a . Hodnota R_a je definována jako střední hodnota vzdálenosti bodů zjištěného profilu od jeho střední čáry , v určité délce měřeného úseku L /143/ .

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y_s| dx$$

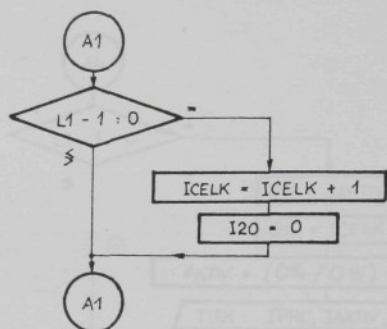
Při modelování procesu broušení musíme nejprve vyjádřit polohu střední čáry profilu v J -té rovině $R_s(J)$.

$$R_s(J) = \frac{\sum_{K=1}^{I_A} Y_H(J,K)}{I_A} \quad (58)$$

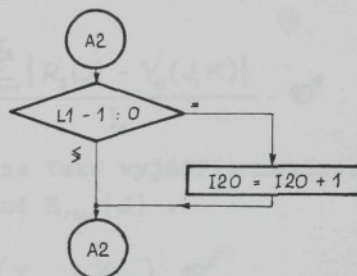
Pak lze vyjádřit velikost střední aritmetické úchytky nerovnosti povrchu v dané rovině $R_a(J)$.



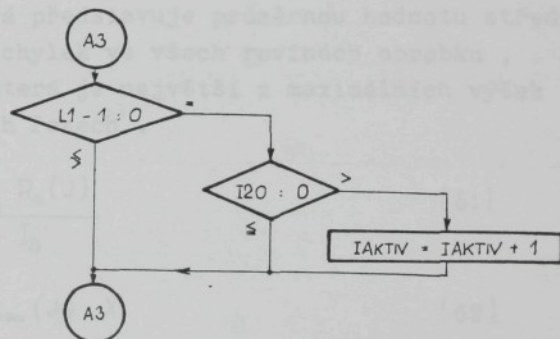
Obr. 60. Vývojový diagram dílčího programu - určování počtu aktivních zrn



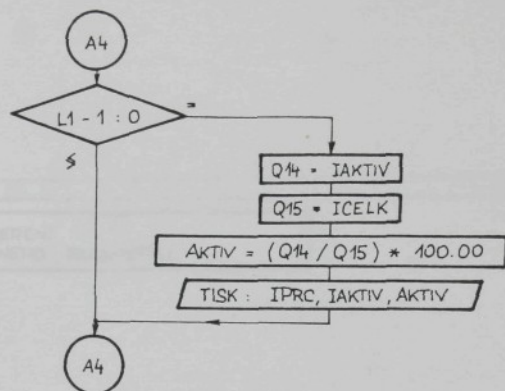
Obr. 61. Načítání každého namodelovaného zrna brusiva



Obr. 62. Registrace aktivního zrna brusiva



Obr. 63. Načítání každého aktivního zrna brusiva



Obr. 64. Výpočty a tisk výsledných hodnot

$$R_a(J) = \frac{\sum_{K=1}^{I_A} |R_s(J) - Y_H(J, K)|}{I_A} \cdot 10^6 \quad (59)$$

Kromě této hodnoty lze také vyjádřit maximální výšku nerovnosti v J-té rovině $R_{MAX}(J)$.

$$R_{MAX}(J) = (Y_{HMAX} - Y_{HMIN}) \cdot 10^6 \quad (60)$$

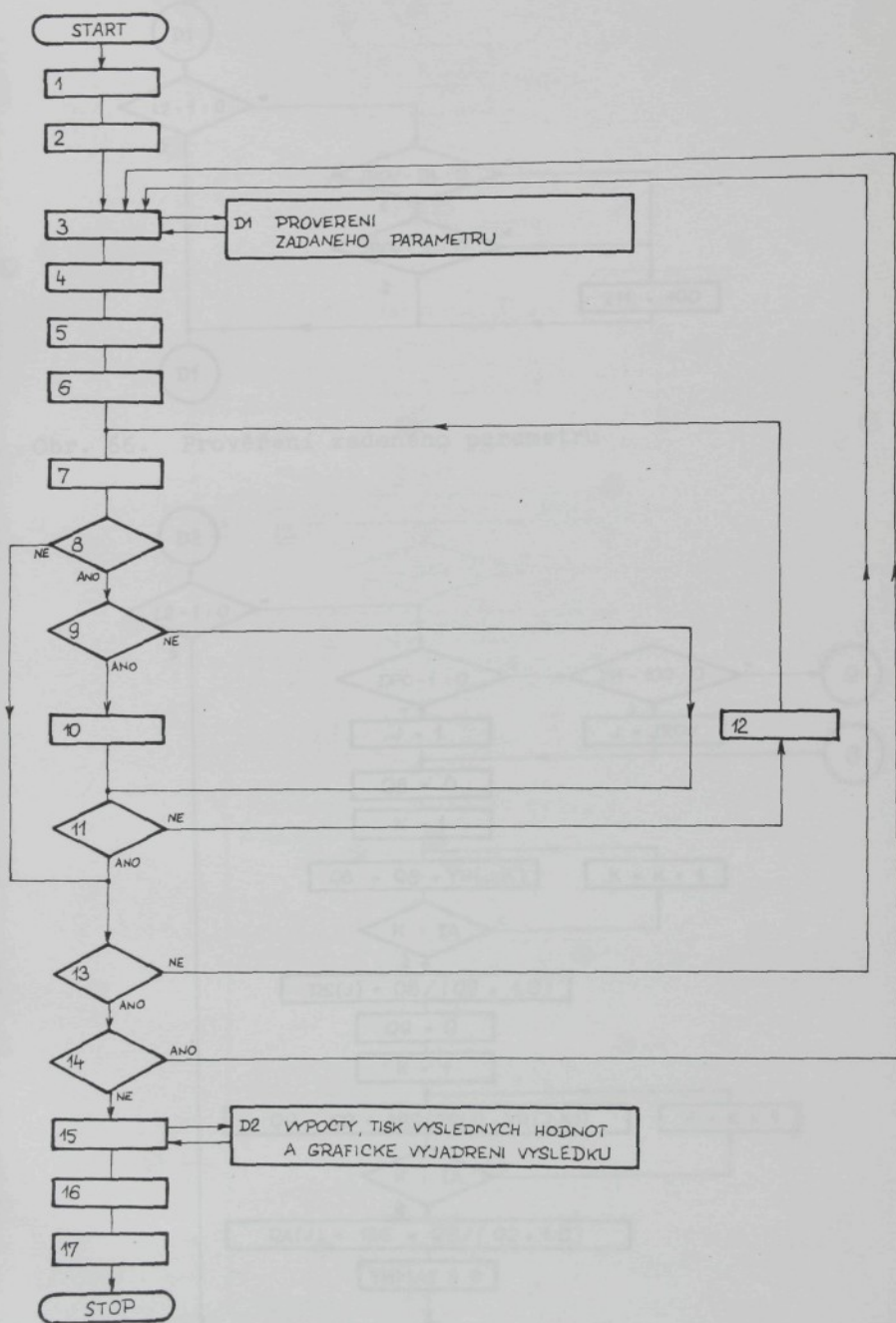
Výše uvedené vztahy charakterizují drsnost vždy v jednom konkrétním příčném řezu - ve zvolené J-té rovině. Představu o celkové drsnosti povrchu obrobku lze získat z hodnoty R_{ac} , která představuje průměrnou hodnotu středních aritmetických úchylek ve všech rovinách obrobku, a z hodnoty R_{maxc} , která je největší z maximálních výšek nerovností v příčných řezech.

$$R_{ac} = \frac{\sum_{J=1}^{I_B} R_a(J)}{I_B} \quad (61)$$

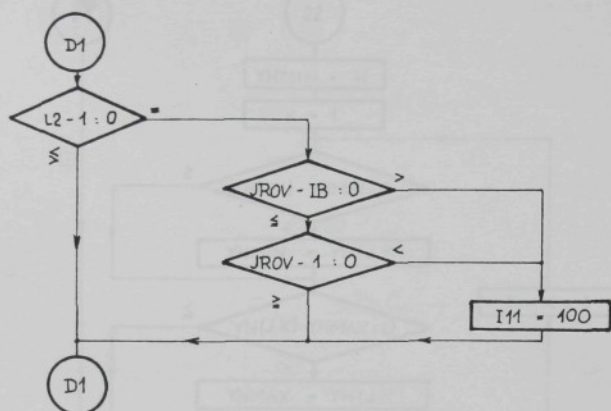
$$R_{maxc} = R_{MAX}(J) \cdot X \quad (62)$$

$X = 0$, jestliže $R_{MAX}(J)$ není největší z maximálních výšek nerovností v příčném řezu

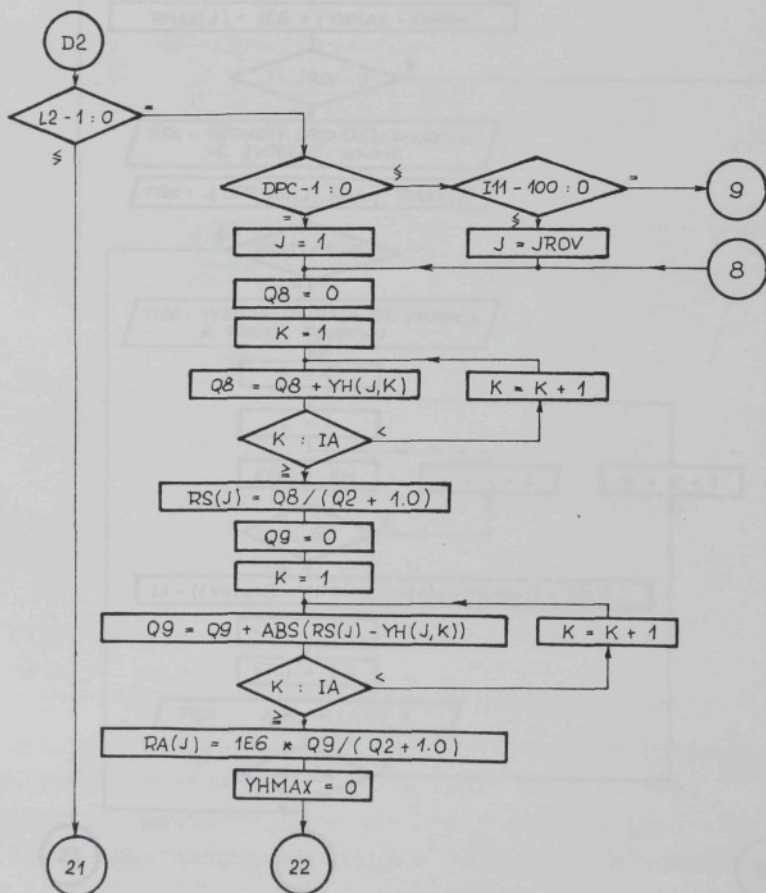
$X = 1$, jestliže $R_{MAX}(J)$ je největší z maximálních výšek nerovností v příčném řezu.

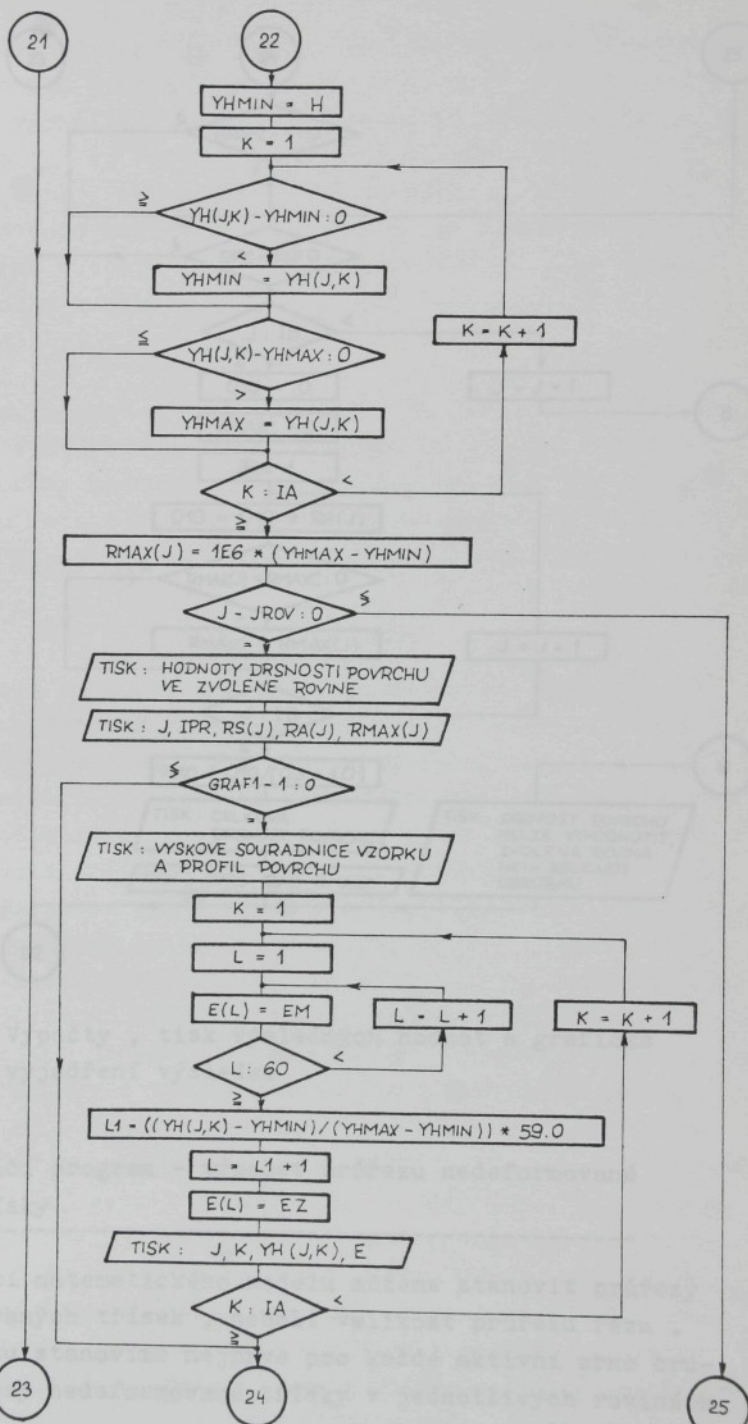


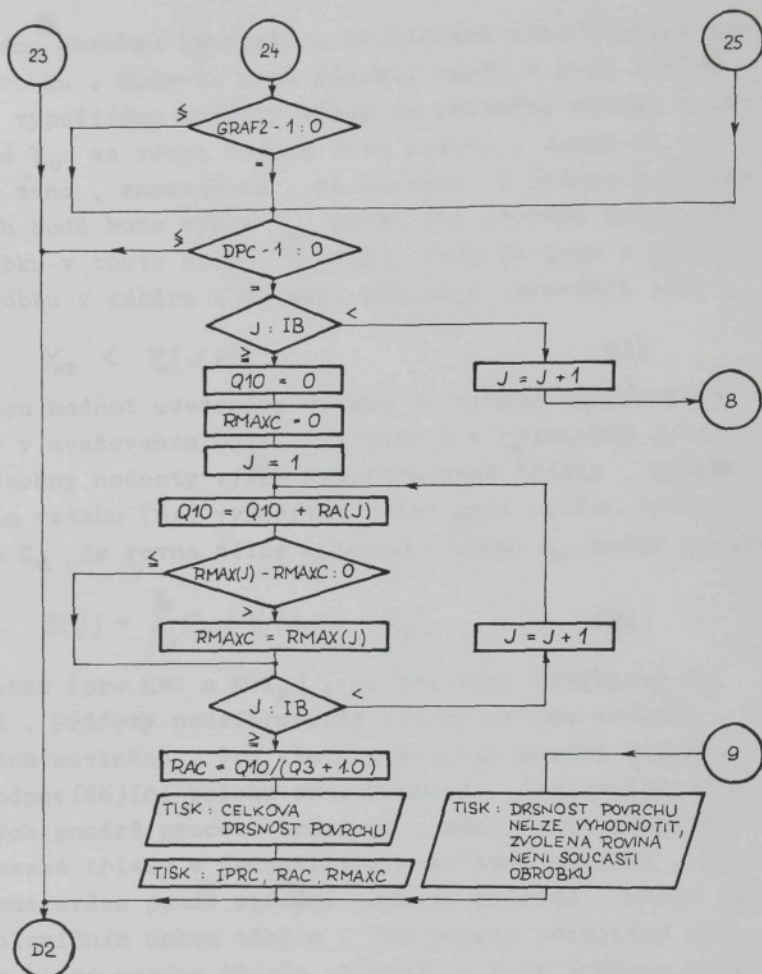
Obr. 65. Vývojový diagram dílčího programu-výpočet drsnosti povrchu



Obr. 66. Prověření zadaného parametru







Obr. 67. Výpočty , tisk výsledných hodnot a grafické vyjádření výsledku

4.6.5. Dílčí program - výpočet průřezu nedeformované třísky

Pomocí matematického modelu můžeme stanovit průřezy nedeformovaných třísek , neboli velikost průřezu řezu . Při výpočtu stanovíme nejprve pro každé aktivní zrno brusiva průřezy nedeformované třísky v jednotlivých rovinách

simulovaného obrobku (obr.43) , ve kterých zrno odebírá materiál obrobku . Bude-li zrno působit např. v J-té rovině obrobku , vypočítáme hodnoty výšek od základny vzorku k zrnu brusiva Y_{H2} ve všech bodech této roviny . Jedná-li se o aktivní zrno , znamená to , že alespoň v jednom z vyhodnocovaných bodů bude výška Y_{H2} menší než původní výška profilu obrobku v tomto bodě $Y_H(J,K)$, tedy je zrno v tomto místě obrobku v záběru . Situaci popisuje nerovnost (63) .

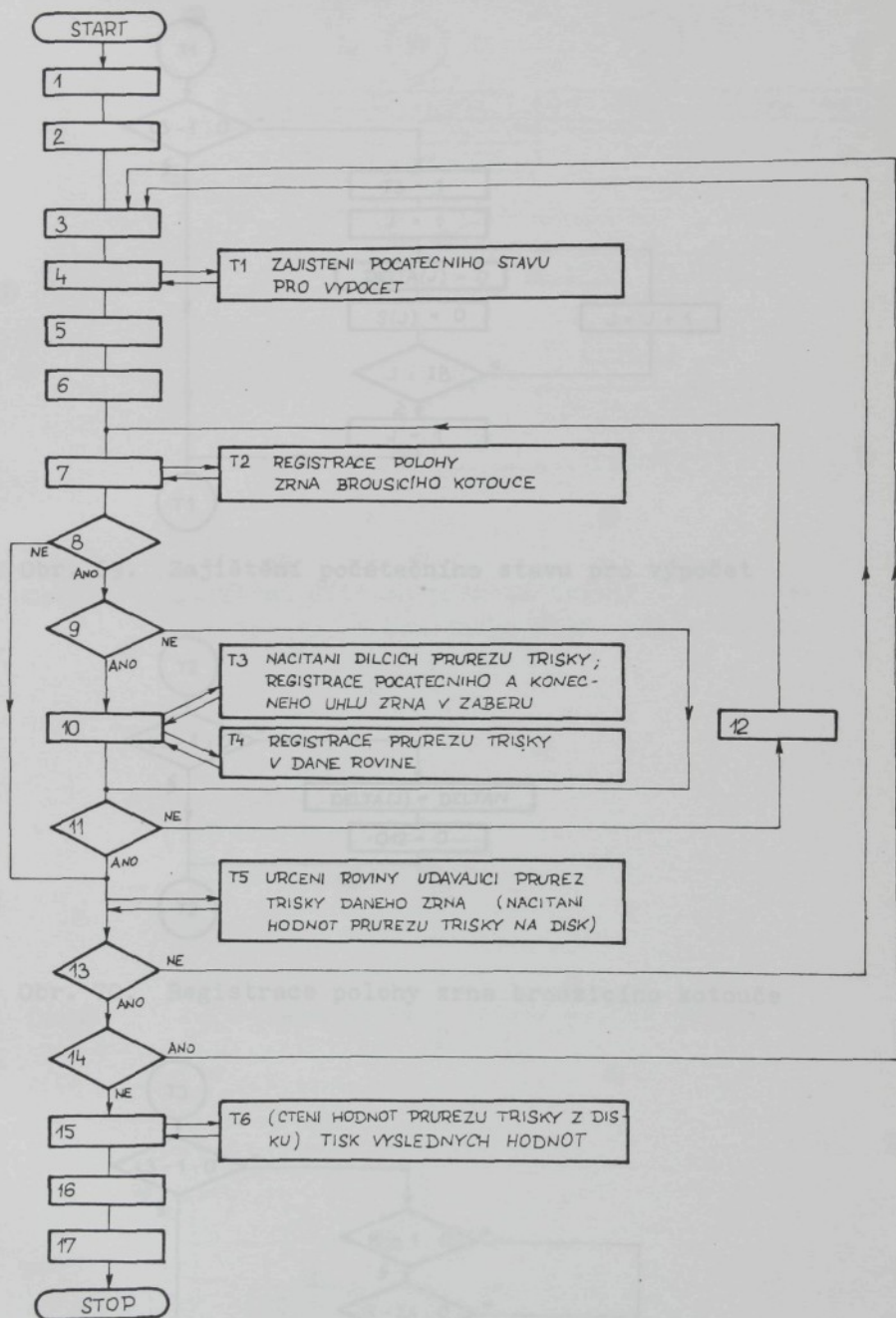
$$Y_{H2} < Y_H(J,K) \quad (63)$$

Rozdíl obou hodnot uvedeného vztahu je výškou nedeformované třísky v uvažovaném bodě . Určíme-li v příslušné J-té rovině všechny hodnoty výšek nedeformované třísky , můžeme s použitím vztahu (64) vypočítat požadovaný průřez třísky. Konstanta C_{12} je rovna délce šířkového úseku a_3 , pouze na kra-

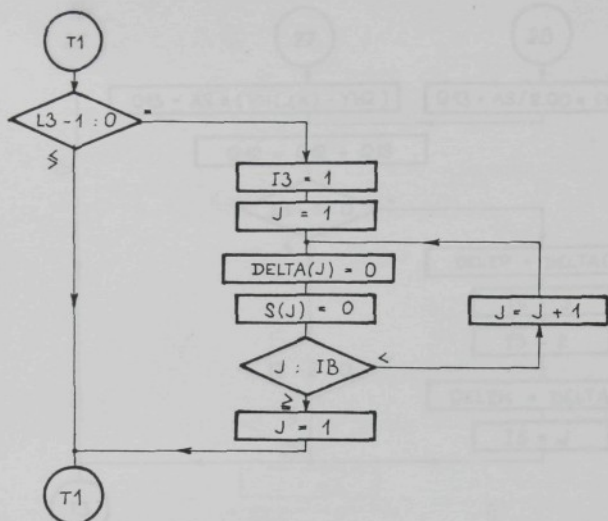
$$S(J) = \sum_{K=1}^{I_A} C_{12} \cdot |Y_H(J,K) - Y_{H2}| \quad (64)$$

jích obrobku (pro $K=1$ a $K=I_A$) , je velikost konstanty C_{12} poloviční . Průřezy nedeformované třísky určíme obdobně i v dalších rovinách . Pro všechny průřezy musíme registrovat i odpovídající polohu zrna brusiva . Jak vyplývá z kinematických poměrů procesu broušení , mění se totiž průřez nedeformované třísky v jednotlivých rovinách obrobku . Vyhodnocujeme ovšem pouze střední hodnotu průřezu , která je určena polovičním úhlem záběru . Pro určení příslušné roviny , ve které nabývá tříska střední hodnoty průřezu, byla použita speciální metoda , jak je zřejmé z algoritmu řešení.

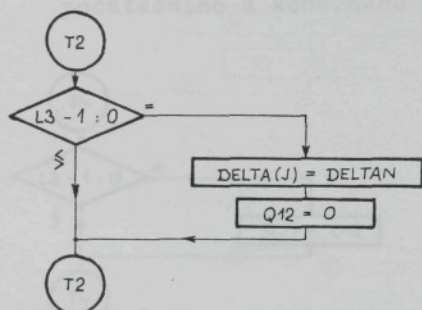
Propojení jednotlivých modulů pro výpočet průřezu nedeformované třísky s moduly základního programu je zřejmé z obrázku 68 . Základní program pro tento typ výpočtu je vázán s dílčím programem pro určování počtu aktivních zrn a doplníme jej moduly naznačenými na obr. 69 - 74 . Z obrázku 69 je zřejmá stavba modulu, pomocí kterého zjišťujeme počáteční podmínky u každého namodelovaného zrna brusiva . Další modul (obr.70) slouží k registraci polohy zrna broušícího kotouče . Pokud dojde k řezání , musíme zajistit načítání dalších průřezů třísky v příslušné J-té rovině a registrovat úhel počátku a konce záběru , což je zřejmé



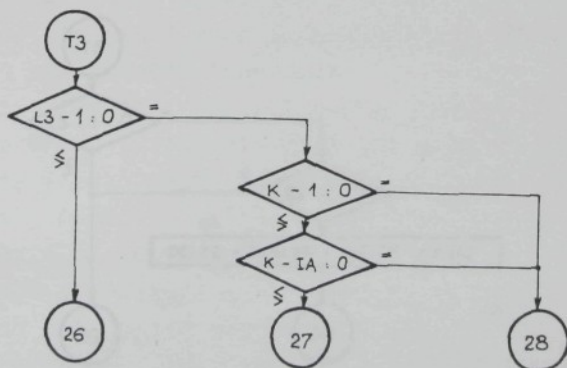
Obr. 68. Vývojový diagram dílčího programu - výpočet průř. nedeformované třísky

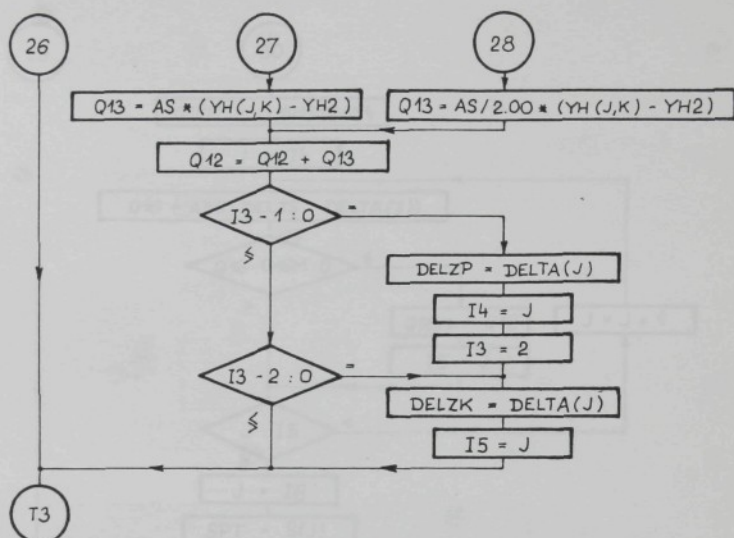


Obr. 69. Zajištění počátečního stavu pro výpočet

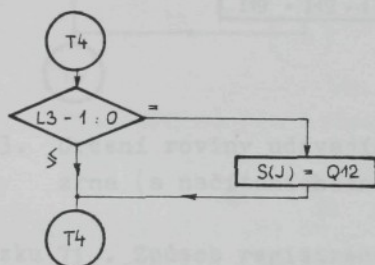


Obr. 70. Registrace polohy zrna brousícího kotouče

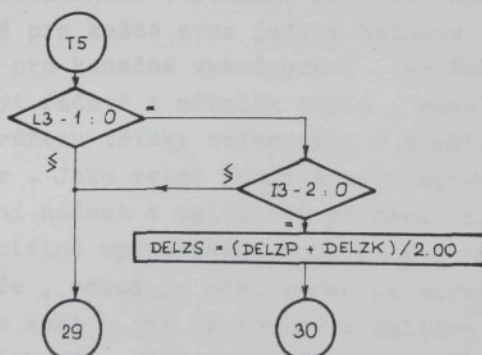


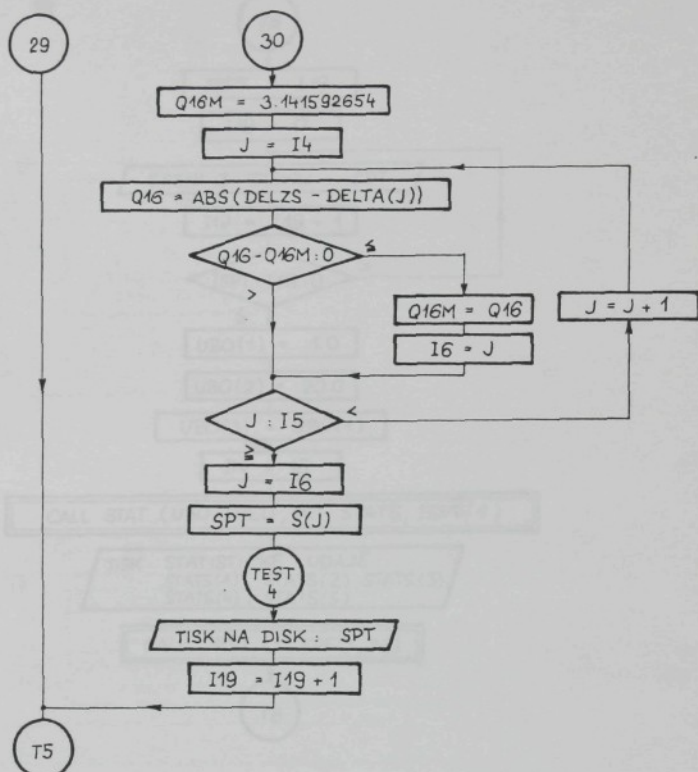


Obr. 71. Načítání dílčích průřezů třísky ; registrace počátečního a konečného úhlu zrna v záběru



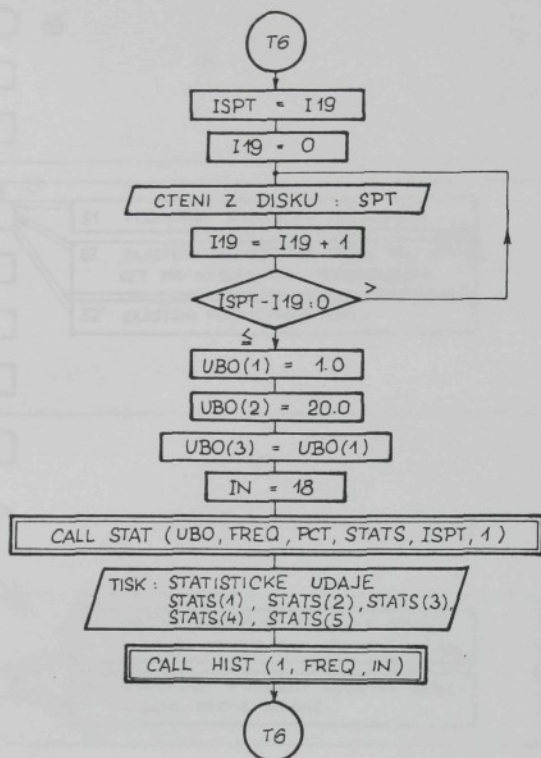
Obr. 72. Registrace průřezu třísky v dané rovině





Obr. 73. Určení roviny udávající průřez třísky daného zrna (a načítání hodnot průřezu třísky na disk)

z obrázku 71 . Způsob registrace průřezu nedeformované třísky je naznačen na obrázku 72 . U aktivních zrn brusiva , která ukončila svoji činnost , musíme stanovit hodnotu příslušného středního průřezu (obr. 73) , což je vlastně pro každé zrno jediná hodnota , kterou musíme uchovat pro konečné vyhodnocení . Protože aktivních zrn může být řádově i několik tisíc , museli bychom pro údaje o průřezu třísky rezervovat v paměti počítače značný prostor . Jako velmi výhodná se nakonec ukázala možnost načítání hodnot o velikosti průřezu nedeformované třísky do speciálně vytvořeného souboru dat na pracovním disku počítače , odkud je před konečným zpracováním údajů opět získáme zpět , jak je zřejmé z dalšího modulu znázorněného na obrázku 74 . Při konečném zpracování údajů použijeme

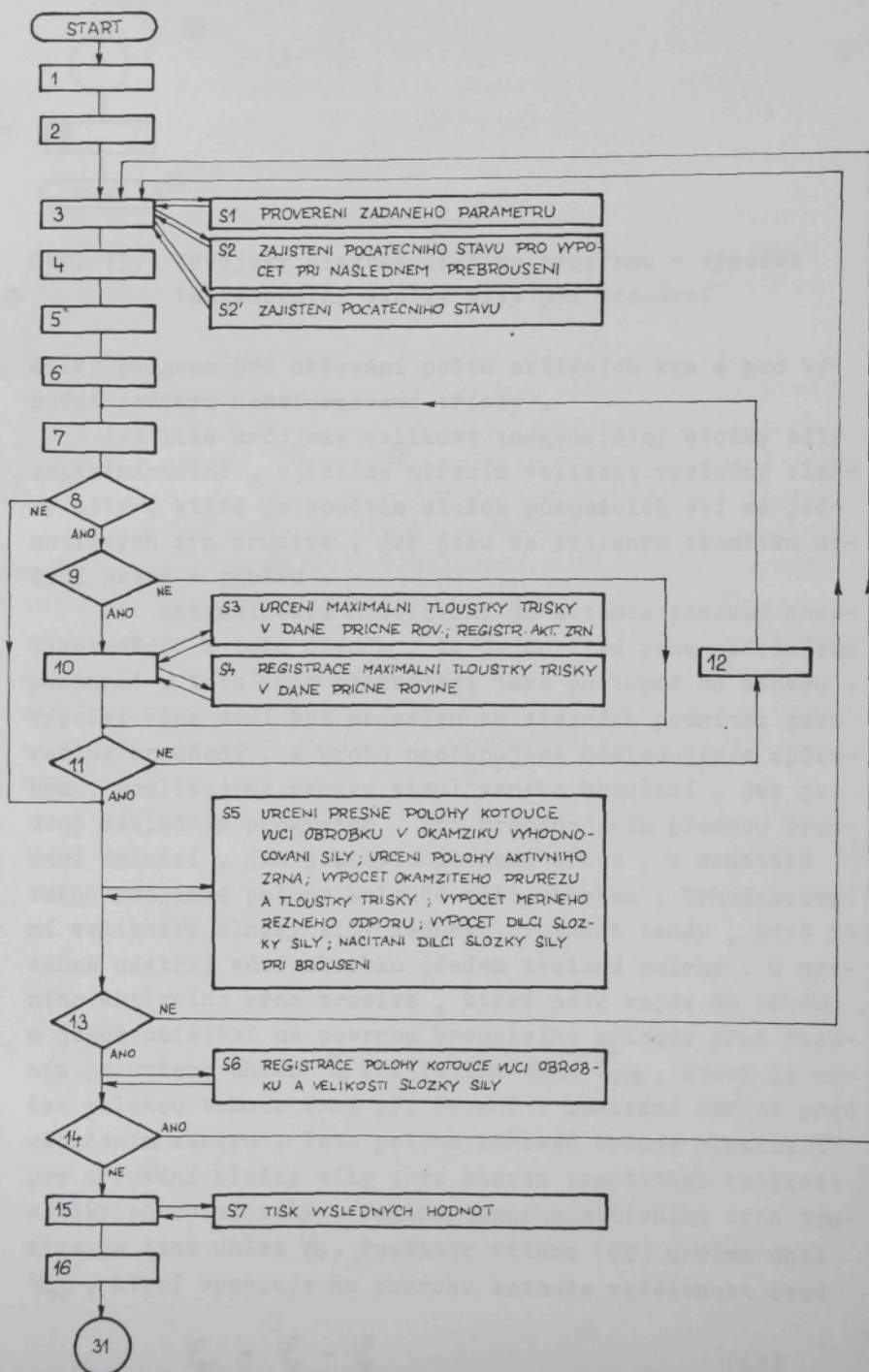


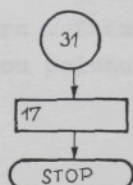
Obr. 74. Tisk výsledných hodnot (a čtení hodnot průřezu třísky z disku)

statistických metod a pro názornější dokumentaci vytvoříme histogram četnosti příčných průřezů nedeformovaných třísek. Program pro statistické zpracování a tvorbu histogramu byl podobně jako iterační metoda nalezen v seznamu podprogramů matematické knihovny počítače. Při řešení byly tyto programové jednotky použity také ve formě vlastní procedury.

4.6.6. Dílčí program = výpočet tangenciální složky síly při broušení

Moduly dílčího programu pro výpočet tangenciální složky síly při broušení jsou připojeny k základnímu programu dle obrázku 75. Při výpočtu současně využijeme také





Obr. 75. Vývojový diagram dílčího programu - výpočet tangenciální složky síly při broušení

dílčí program pro určování počtu aktivních zrn a pro výpočet průřezu nedeformované třísky .

Jestliže určíme velikost tangenciální složky síly experimentálně , zjistíme měřením velikost výsledné složky síly , která je součtem složek působících sil od jednotlivých zrn brusiva , jež jsou ve zvoleném okamžiku měření právě v záběru .

Při matematickém modelování je situace poněkud komplikovanější z toho důvodu , že jednotlivá zrna modelujeme postupně a tato zrna přicházejí také postupně do záběru . Výpočet však musí být proveden za stejných podmínek jako reálné broušení , a proto postupujeme následujícím způsobem . Realizujeme proces simulovaného broušení , jak je dáno základním programem . Při probíhajícímu procesu broušení dochází , jak již bylo uvedeno dříve , k neustálé změně vzájemné polohy kotouče vůči obrobku . Vyhodnocování velikosti složky síly začneme provádět tehdy , když dosáhne nástroj vůči obrobku předem zvolené polohy . U prvního aktivního zrna brusiva , které poté vejde do záběru , a jehož umístění na povrchu broušícího kotouče před řezáním je určeno úhlem φ_P , zjistíme úhel σ_{zKP} , který je určen polohou tohoto zrna při řezání v poslední rovině před ukončením záběru . Tato poloha zároveň určuje okamžik τ pro určování složky síly , ve kterém vypočítáme velikost složky působící síly . Poloha druhého aktivního zrna brusiva je dána úhlem φ_N . Použitím vztahu (65) určíme úhel φ_{DIF} , který vymezuje na povrchu kotouče vzdálenost obou

$$\varphi_{DIF} = \varphi_N - \varphi_P$$

(65)

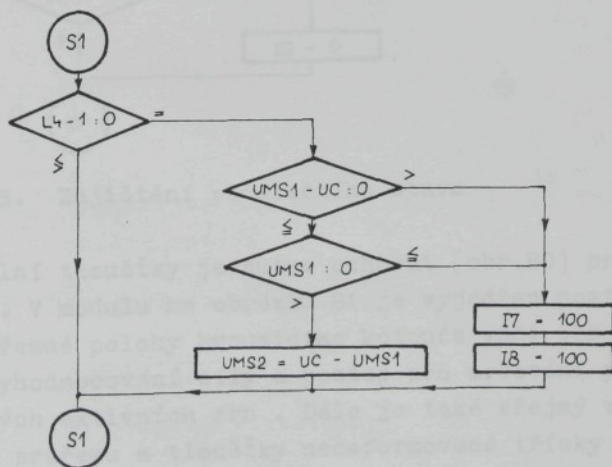
zrn . Známe-li vzdálenost mezi zrny , můžeme stanovit přesnou polohu druhého zrna $\mathcal{J}_{MS}$ v okamžiku τ dle vztahu (66) .

$$\mathcal{J}_{MS} = \mathcal{J}_{ZKP} - \varphi_{DIF} \quad (66)$$

Známe tedy polohu , ve které musíme určit složku síly u druhého zrna . Podobně můžeme z rozdílu polohy mezi prvním a třetím aktivním zrnem opět stanovit příslušnou složku síly v okamžiku τ atd.

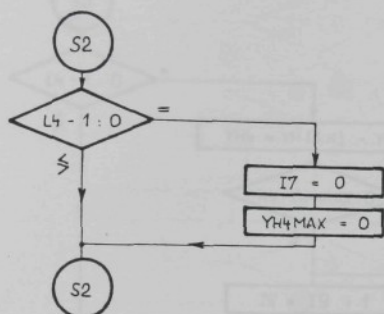
Abychom mohli určit příslušné složky sil , musíme v okamžiku τ kromě polohy u každého aktivního zrna brusiva znát hodnotu tloušťky třísky a hodnotu okamžitého průřezu nedeformované třísky . S vysokou pravděpodobností lze očekávat, že v uvažovaném okamžiku budou následující zrna v mezipoloze mezi dvěma rovinami simulovaného obrobku , ve kterých potřebné hodnoty známe . Požadované hodnoty proto stanovíme pomocí lineární interpolace . Dosazením vypočítaných údajů do vztahů (20) a (22) určíme velikost řezného odporu a složky síly . Sečtením tangenciálních složek sil od všech zrn brusiva , která jsou v okamžiku určování síly v záběru, vypočítáme hodnotu velikosti požadované složky síly při broušení .

Vlastní algoritmus řešení dílčího programu je patrný z obr. 76 - 83 . Na obrázku 76 je uveden modul , kterým pro-



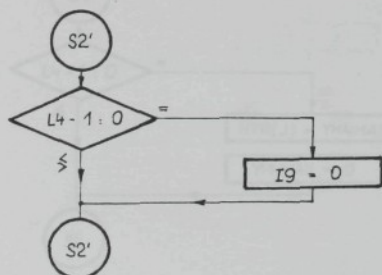
Obr. 76. Prověření zadaného parametru

věřujeme , zda je správně zadán parametr určující vzájemnou polohu brousicího kotouče a obrobku . Pomocí modulů znázorněných na obrázku 77 a 78 zajišťujeme počáteční stav



Obr. 77. Zajištění počátečního stavu pro výpočet při následném přebroušení

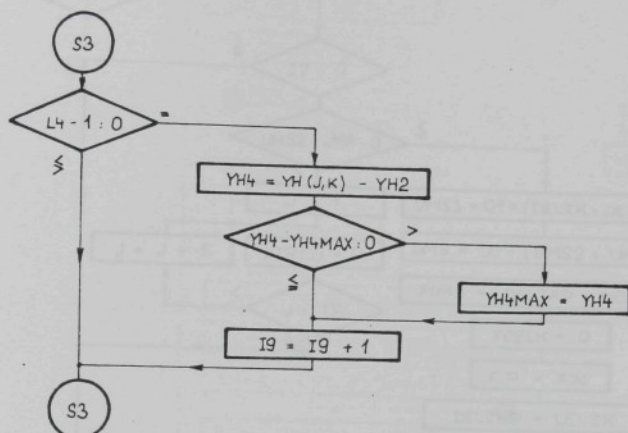
pro výpočty . Další modul (obr.79) slouží k určení maximální tloušťky třísky v každé příčné rovině, ve které zrno řeže a zároveň umožňuje registrovat aktivní zrna . Hodnotu



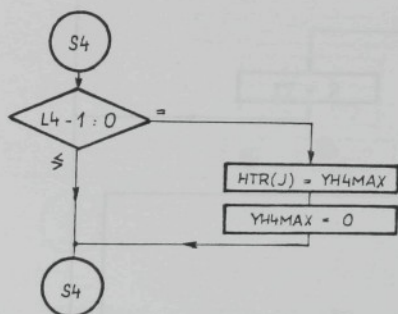
Obr. 78. Zajištění počátečního stavu

maximální tloušťky je nutno uchovat (obr.80) pro další použití . V modulu na obrázku 81 je vyjádřen postup pro určování přesné polohy brousicího kotouče vůči obrobku v okamžiku vyhodnocování síly a postup pro určování poloh jednotlivých aktivních zrn . Dále je také zřejmý výpočet okamžitého průřezu a tloušťky nedeformované třísky i výpočet měrného rezného odporu . Známe-li tyto údaje , můžeme pro každé aktivní zrno vypočítat složku síly . Sečtením pak

získáme velikost výsledné složky tangenciální síly. Další



Obr. 79. Určení maximální tloušťky třísky v dané příčné rovině ; registrace aktivního zrna

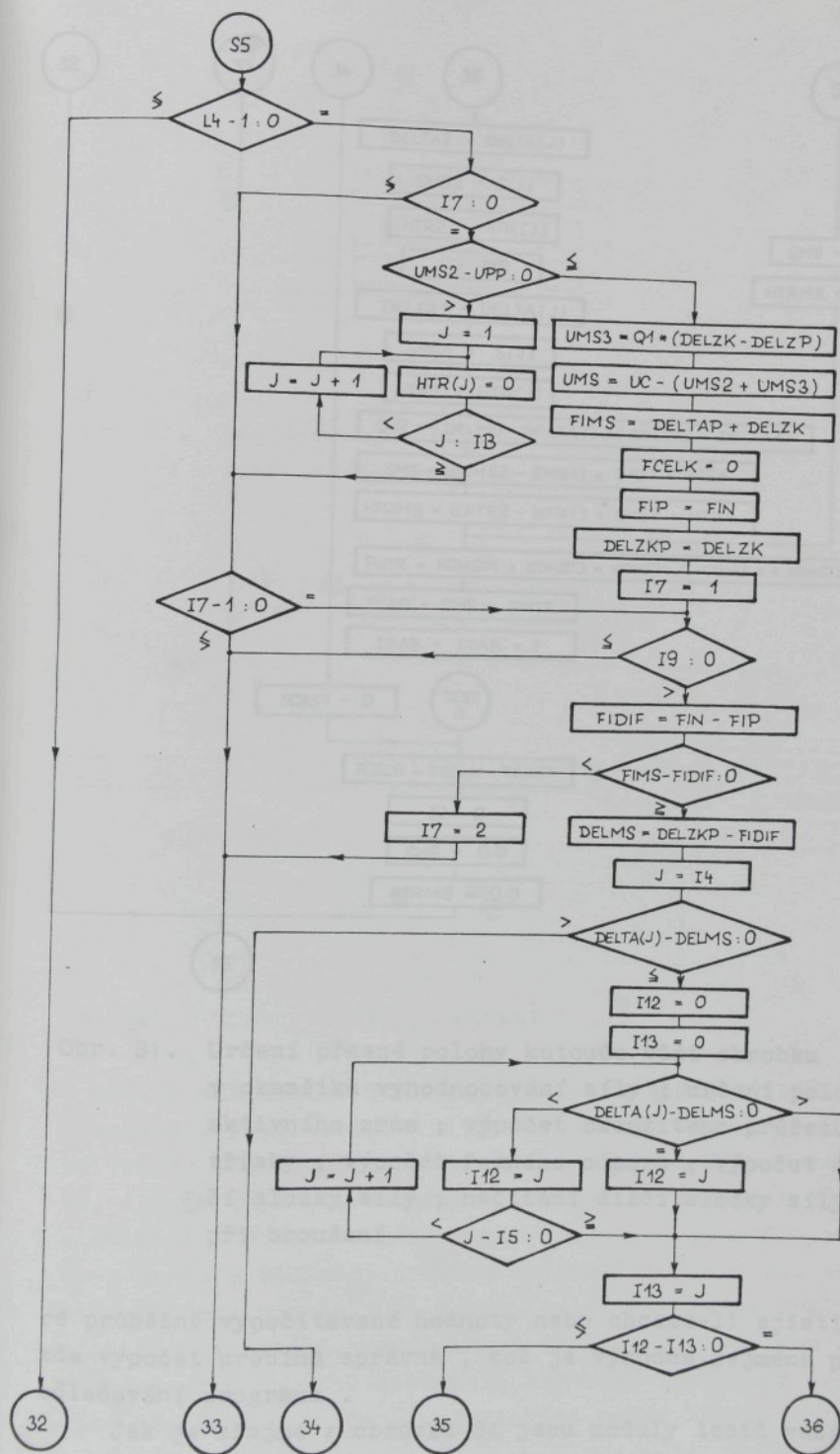


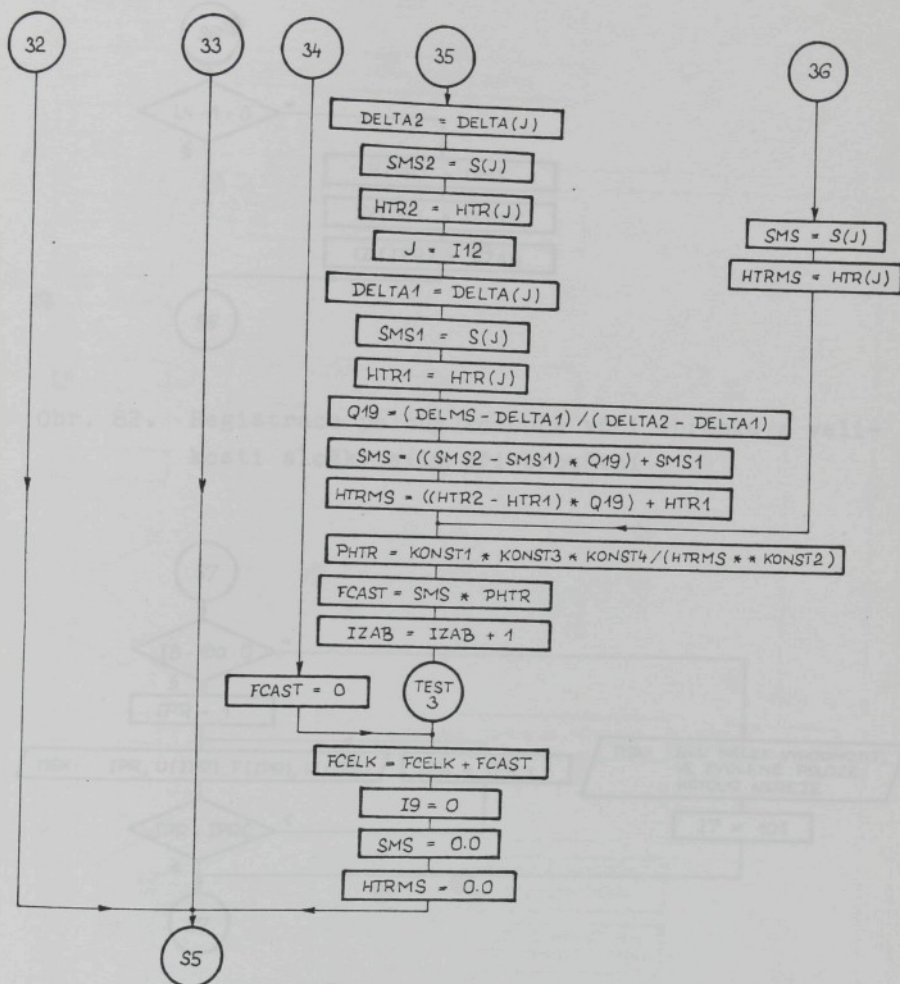
Obr. 80. Registrace maximální tloušťky třísky v dané příčné rovině

obrázek 82 vyjadřuje způsob registrace vypočítaných hodnot a na obrázku 83 je zřejmý modul zajišťující tisk výsledných hodnot .

4.6.7. Dílčí program - testování

Dílčí program testování je složen ze čtyř samostatných testů , které použijeme např. jestliže nás zajímají někte-

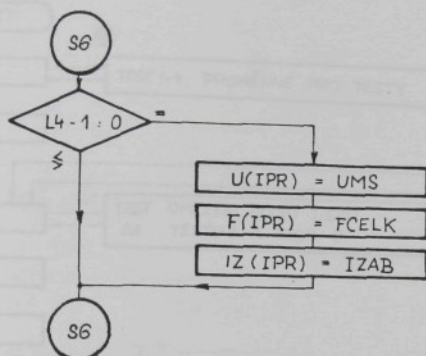




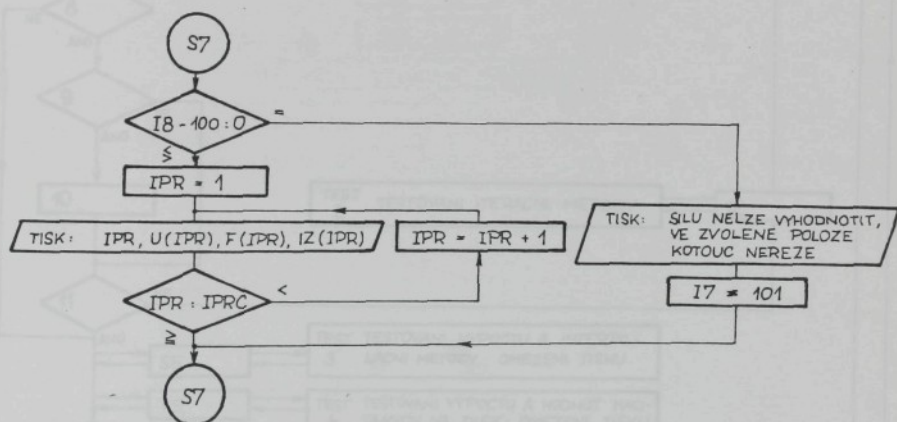
Obr. 81. Určení přesné polohy kotouče vůči obrobku v okamžiku vyhodnocování síly ; určení polohy aktivního zrna ; výpočet okamžitého průřezu třísky ; výpočet řezného odporu ; výpočet dílčí složky síly ; načítání dílčí složky síly při broušení

ré průběžně vypočítávané hodnoty nebo chceme-li zjistit , zda výpočet probíhá správně , což je výhodné zejména při odlaďování programu .

Jak je zřejmé z obrázku 84 jsou moduly testů vázány

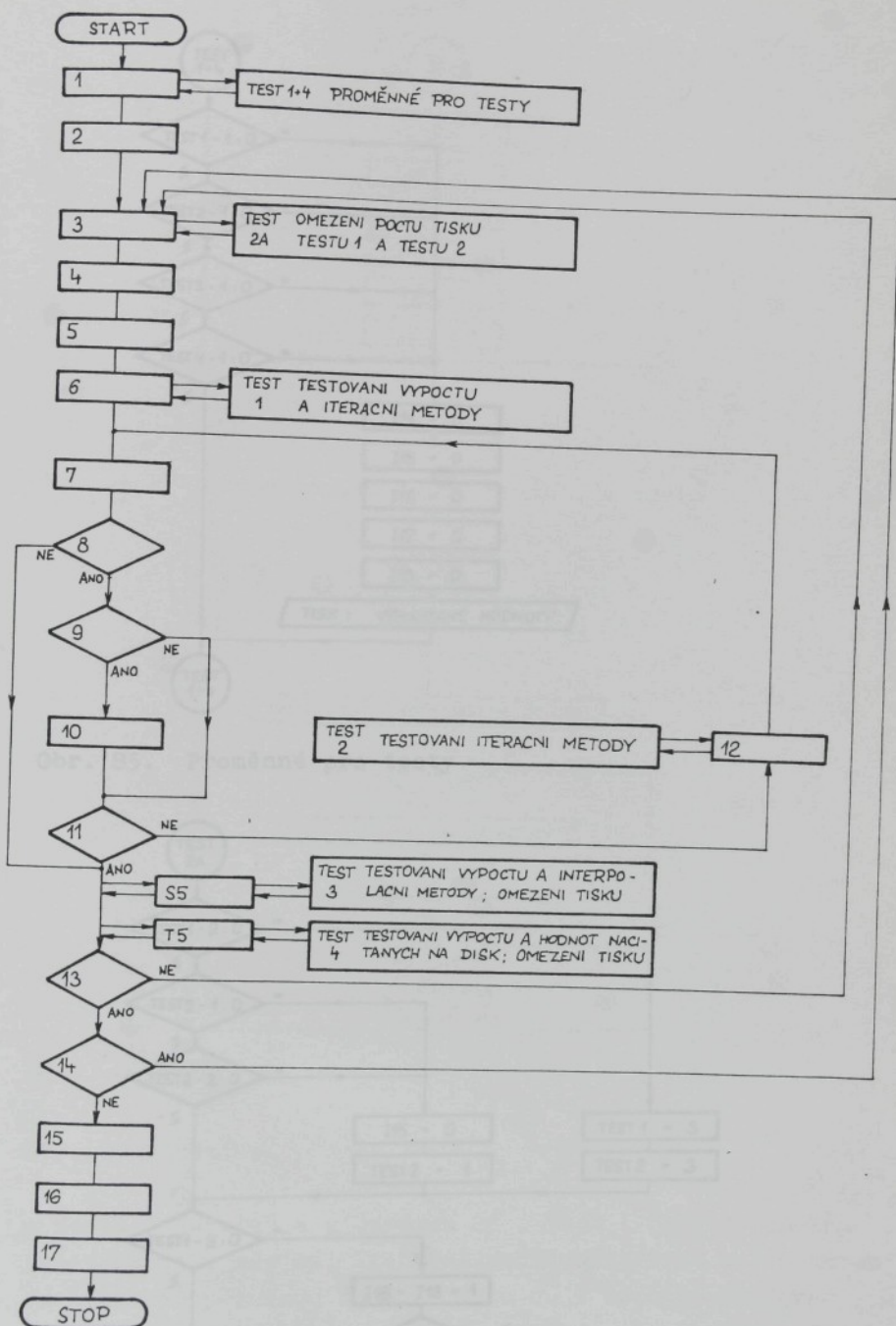


Obr. 82. Registrace polohy kotouče vůči obrobku a velikosti složky síly při broušení

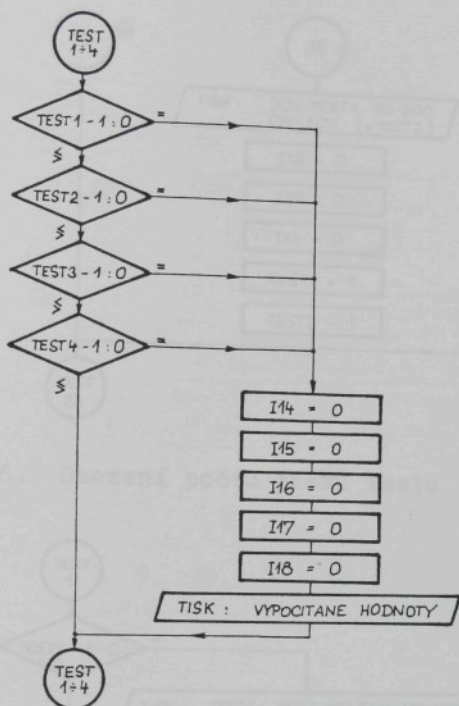


Obr. 83. Tisk výsledných hodnot

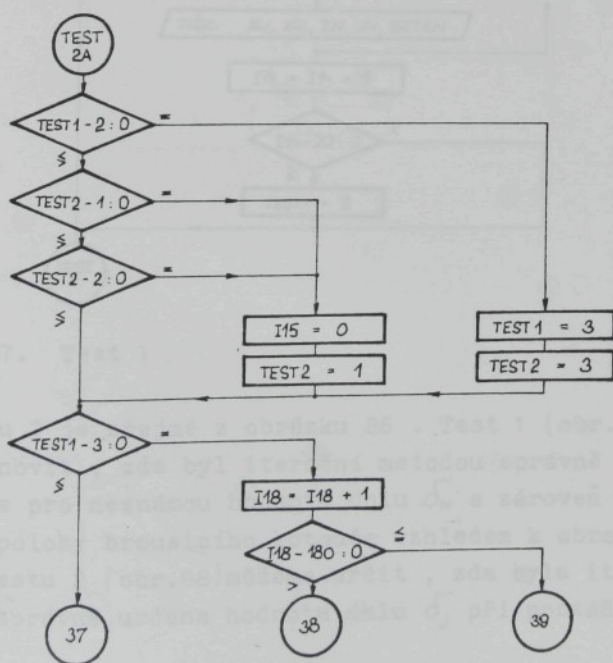
s moduly základního programu nebo s moduly jiných dílčích programů. Před testováním vytvoříme řadu proměnných, které budeme dále využívat (obr.85). Jak již bylo uvedeno výše, slouží jednotlivé testy především k získání představy o chování některé veličiny nebo k ověření správnosti výpočtu. Protože základní program matematického modelu kinematiky procesu broušení je charakteristický řadou cyklů, musíme při testování omezit počet tisků tak, abychom kromě požadované informace nezískali zbytečně tisíce až desetitisíce nepotřebných údajů. Omezování počtu tisků testu 1

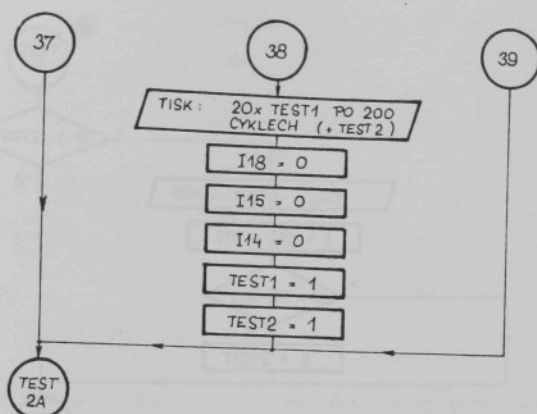


Obr. 84. Vývojový diagram dílčího programu - testování

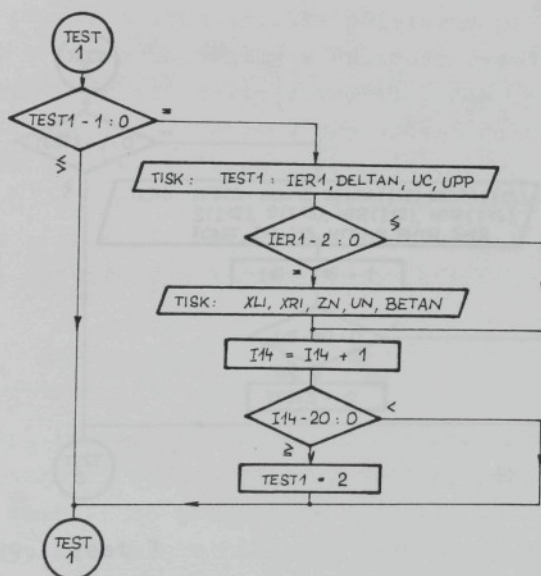


Obr. 85. Proměnné pro testy



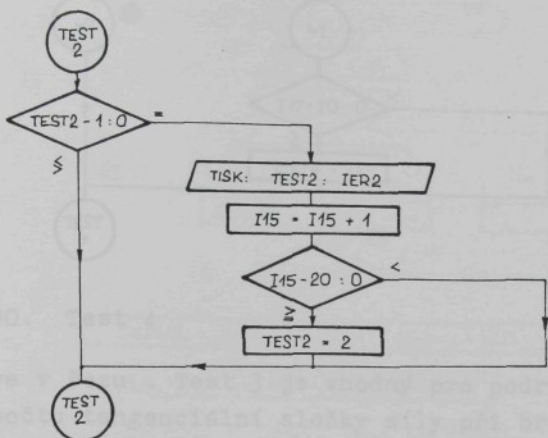


Obr. 86. Omezení počtu tisků testu 1 a testu 2

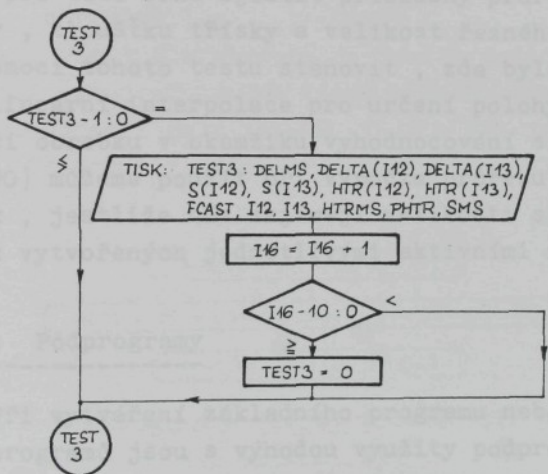


Obr. 87. Test 1

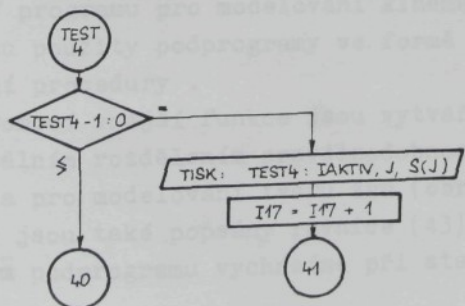
a testu 2 je zřejmé z obrázku 86. Test 1 (obr.87)umožňuje stanovit, zda byl iterační metodou správně určen kořen rovnice pro neznámou hodnotu úhlu δ_N a zároveň sledovat změnu polohy brousicího kotouče vzhledem k obrobku. Pomocí testu 2 (obr.88)můžeme určit, zda byla iterační metodou správně určena hodnota úhlu δ_j při pootáčení zrna

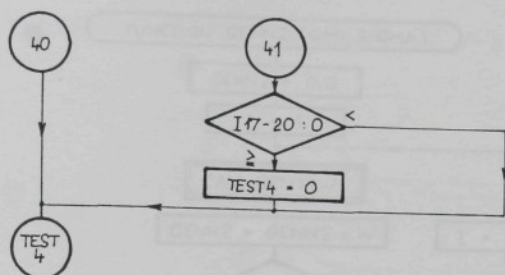


Obr. 88. Test 2



Obr. 89. Test 3





Obr. 90. Test 4

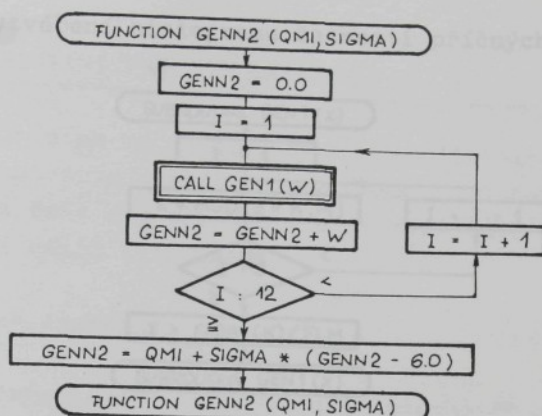
brusiva v řezu . Test 3 je vhodný pro podrobnější sledování výpočtu tangenciální složky síly při broušení (obr.89) . Pomocí něj můžeme určit, jakým dílem se na velikosti výsledné složky síly podílí jednotlivá aktivní zrna brusiva a zároveň pro tato zrna zjistit příslušný průřez nedeformované třísky , tloušťku třísky a velikost řezného odporu . Dále lze pomocí tohoto testu stanovit , zda byla správně provedena lineární interpolace pro určení polohy broušícího zrna vůči obrobku v okamžiku vyhodnocování síly . Test 4 (obr.90) můžeme použít při výpočtu průřezu nedeformovaných třísek , jestliže nás zajímají velikosti středních průřezů třísek vytvořených jednotlivými aktivními zrny brusiva .

4.6.8. Podprogramy

Při vytváření základního programu nebo některých dílčích programů jsou s výhodou využity podprogramy , které tvoří samostatné programové jednotky do nichž lze přejít z libovolného místa hlavního programu a po provedení požadovaných operací se opět vrátit zpět .

V programu pro modelování kinematiky procesu broušení jsou použity podprogramy ve formě vnější funkce nebo vlastní procedury .

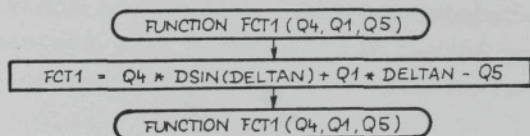
Pomocí vnější funkce jsou vytvářena náhodná čísla s normálním rozdělením pravděpodobnosti /139/ , která jsou použita pro modelování tvaru zrn (obr.91) . Jako vnější funkce jsou také popsány rovnice (43) a (50) , ze kterých v jiném podprogramu vycházíme při stanovení hodnoty úhlu



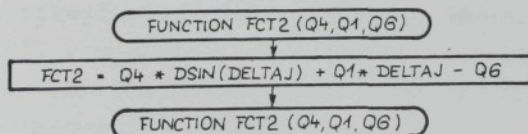
Obr. 91. Podprogram - vnější funkce GENN2 pro vytváření náhodných čísel s normálním rozdělením /139/

σ_N a σ_J (obr.92,93).

Jako vlastní procedura je použit podprogram /139/ pro vytváření pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti (viz vztahy (56)), což je zřejmé z obrázku 94. Ve formě vlastní procedury byly dále použity pod-



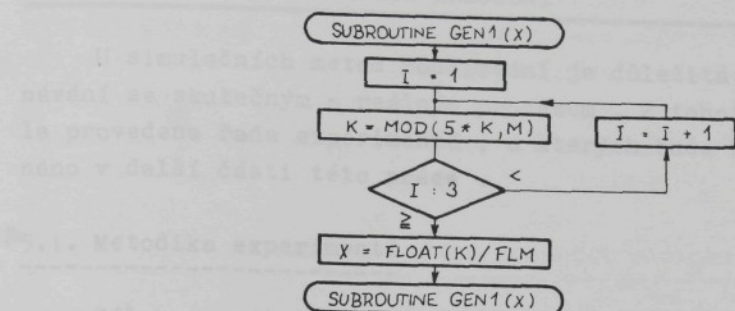
Obr. 92. Podprogram - vnější funkce FCT1 pro určení úhlu σ_N dle vztahu (43)



Obr. 93. Podprogram - vnější funkce FCT2 pro určení úhlu σ_J dle vztahu (50)

programy pro iterační metodu regula-falsi, pro statistické zpracování hodnot středního průřezu nedeformované třísky

ky a pro vytváření histogramu četnosti příčných průřezů



Obr. 94. Podprogram - vlastní procedura GEN1 pro vytváření pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti /139/

třísek . Posledně jmenované podprogramy , jak již bylo uvedeno , byly nalezeny v seznamu podprogramů matematické knihovny počítače EC 1033 a po ověření jsou využívány v hlavním programu matematického modelu kinematiky procesu broušení .

5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ SIMULAČNÍ METODY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROCESU BROUŠENÍ

U simulačních metod modelování je důležitá fáze porovnávání se skutečným - reálným procesem . Z tohoto důvodu byla provedena řada experimentů , o kterých bude blíže pojednáno v další části této práce .

5.1. Metodika experimentů

Cílem experimentů bylo ověření správnosti vytvořeného způsobu matematického modelování kinematiky procesu broušení simulační metodou , pomocí kterého je možné stanovit počet aktivních zrn brusiva , drsnost povrchu obrobku , údaje o příčných průřezích nedeformovaných třísek a vypočítat velikost tangenciální složky síly při broušení .

Kriteriem pro posouzení modelu byla zvolena drsnost povrchu obrobku a velikost tangenciální složky síly při rovinném broušení obvodem kotouče zapichovacím způsobem bez použití chladicí kapaliny . Byly proto realizovány dvě série experimentů , které byly zároveň provedeny jak ve skutečnosti - na rovinné brusce BPH - 20 NA v laboratoři katedry obrábění a montáže VŠST Liberec , tak pomocí matematického modelování - na počítači EC 1033 ve výpočetním středisku VŠST Liberec .

Důležité bylo , aby podmínky při reálném a simulovaném broušení byly v obou případech stejné . Určité odlišnosti však vyplývají z podstaty obou metod . Při modelování uvažujeme některé zjednodušující předpoklady (kap.4.1.) , které se zejména týkají vlastností materiálu obrobku a chování soustavy SPID , u které předpokládáme absolutní tuhost , neuvažujeme chvění , zjednodušujeme tvar zrn brusiva , zanedbáváme jejich opotřebování ap.

Experimenty byly za předem zvolených podmínek realizovány vždy nejprve ve skutečnosti a následně byl proveden výpočet na počítači . Tento postup byl použit z toho důvodu , že podélný posuv stolu brusky BPH - 20NA je hydraulický , plynule regulovatelný . Požadovaná hodnota rychlosti posuvu byla nastavena pouze přibližně a její velikost byla pro si-

mulování procesu z pěti měření vypočítána. Dalším důvodem pro tento postup je, že vlivem nedokonalé tuhosti soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek a vlivem teplotního působení není na brusce nastavená hodnota hloubky záběru rovna skutečné tloušťce odebrané vrstvy. Jak bylo měřením dokázáno, je skutečná tloušťka odebrané vrstvy podstatně menší .

5.1.1. Experimentální určování drsnosti povrchu

Experimenty orientované na určování drsnosti povrchu po broušení byly připraveny tak, aby bylo možno sledovat zejména vliv řezných podmínek a proces vyjiskřování .

Východním předpokladem bylo, že současné zvětšování nastavené hloubky záběru a rychlosti posuvu vede k růstu střední tloušťky třísky a tím také ke zvětšování drsnosti broušeného povrchu /12/. Řezné podmínky byly proto zvoleny tak, že první skupina měření byla realizována při velmi malé hloubce záběru a malé rychlosti posuvu, další skupina měření byla provedena při poměrně velké hloubce záběru a velké rychlosti posuvu, kdy je střední tloušťka třísky veliká, a poslední skupina měření byla realizována za průměrných podmínek. V každé z uvedených skupin měření byl zároveň sledován vliv počtu vyjiskřovacích zdvihů na hodnotu výsledné drsnosti povrchu. Před každou skupinou měření byl brousicí kotouč jemně orovnaný jednozrnným diamantovým orovnávačem.

Program měření byl volen tak, aby byla s co nejmenším počtem měření vyhodnocena co nejširší oblast řezných podmínek. Za účelem dosažení co nejobjektivnějších výsledků bylo měření při reálném broušení za daných podmínek vždy opakováno na pěti vzorcích. Navíc bylo na každém vzorku třikrát opakováno měření hodnot charakterizujících drsnost povrchu $-R_a$ a R_{MAX} . Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny dle ČSN 010250. Aby byly řezné podmínky při simulovaném broušení co nejbližší podmínkám při reálném broušení, byla při každém měření passametrem zjišťována skutečná tloušťka odebrané vrstvy materiálu a dle výsledků tohoto měření byla zadána hodnota hloubky záběru při modelování procesu broušení. Hodnoty na-

měřené tloušťky odebrané vrstvy materiálu byly také statisticky zpracovány .

Pro experimenty bylo zhotoveno 46 vzorků z materiálu 12 O50.4. Po hrubém opracování byly zakaleny a popuštěny na tvrdost 49 - 52 HRC a poté broušeny na rozměry 60x42x16 mm .

Při experimentech byly jednotlivé vzorky broušeny nejprve kotoučem A 9932L7B rozměrů $\varnothing$ 245x10x51 mm a dále kotoučem A 9816J9V rozměrů $\varnothing$ 225x18x76 mm .

Pro měření drsnosti povrchu byl použit přístroj Hommel - Tester , typ T /145/ . Měření drsnosti bylo provedeno s použitím elektroinduktivního relativního snímače TFE 100. Dráha snímače byla ve všech případech 0,63 mm při použité cloně cut off = 0,25 mm .

Na číslicovém počítači EC 1033 byl pro určování drsnosti povrchu použit program P87D a datové soubory D01D až D18D . Použitý program je verzí univerzálního programu P87U od něhož se odlišuje pouze dimenzemi . Rozměry modelovaného obrobku byly voleny tak , aby byl šířkový úsek , na kterém byla vyhodnocována drsnost povrchu , stejně dlouhý , jako při měření přístrojem Hommel - Tester .

Podmínky při experimentálním určování drsnosti povrchu jsou zřejmé z tabulky 8 a 9 , kde jsou také uvedeny výsledné naměřené a vypočtené hodnoty střední aritmetické úchylky nerovnosti profilu R_a a maximální výšky nerovnosti profilu R_{MAX} . Graficky jsou výsledné hodnoty znázorněny na obr. 95 a 96 .

5.1.2. Experimentální určování tangenciální složky síly při broušení

K ověřování matematického modelu pro výpočet tangenciální složky síly při broušení byly připraveny experimenty orientované na vyhodnocování této složky síly v závislosti na hloubce záběru při reálném a simulovaném broušení .

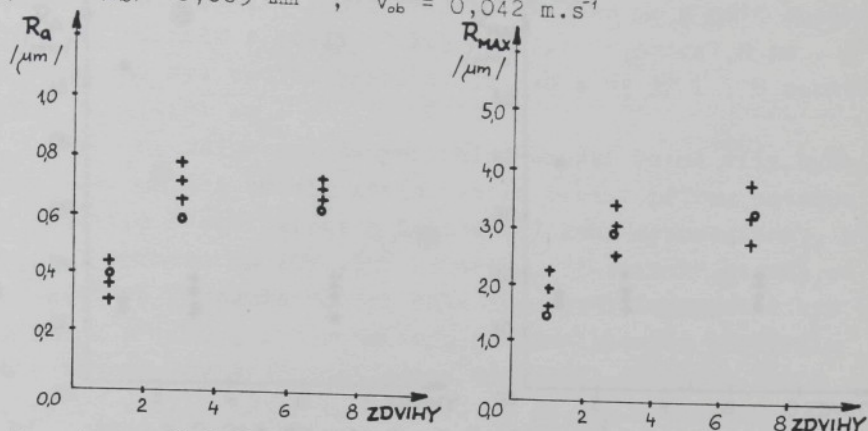
Výchozím předpokladem bylo , že při zvětšování hloubky záběru se zvětšuje velikost tangenciální i radiální složky síly . Pro pokusy byly vybrány dva materiály s navzájem odlišnými vlastnostmi . Experimenty byly provedeny nejprve

Řezné podmínky h_{NAST} v_{ob} v_k	0,005 0,042 32,6			0,015 0,108 32,6			0,025 0,234 32,6		
Závinky /1/	3			7			3		
Broušení reálné Broušení simulované	R	S	R	S	R	S	R	S	R
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Číslo experimentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Datový soubor	D01D	D02D	D03D	D04D	D05D	D06D	D07D	D08D	D09D
Tloušťka odebrané vrstvy	2,2 ^{+1,0}	3,4 ^{+2,1}	5,8 ^{+2,2}	5,6 ^{+1,1}	8,8 ^{+1,8}	11,6 ^{+5,0}	7,8 ^{+4,0}	11,2 ^{+2,8}	15,0 ^{+7,6}
h_{OD}/h_{ODE} / μm /	2,0	3,0	6,0	6,0	9,0	12,0	8,0	11,0	15,0
Střední aritmetická hodnota nerovnosti profilu R_a / μm /	0,37 ^{+0,06}	0,71 ^{+0,06}	0,70 ^{+0,03}	0,41 ^{+0,08}	0,41 ^{+0,03}	0,43 ^{+0,08}	0,40 ^{+0,08}	0,37 ^{+0,06}	0,35 ^{+0,06}
Maximální výška nerovnosti profilu R_{Mkx} / μm /	1,94 ^{+0,30}	3,02 ^{+0,37}	3,23 ^{+0,52}	2,49 ^{+0,54}	2,42 ^{+0,33}	2,48 ^{+0,59}	2,31 ^{+0,64}	2,06 ^{+0,12}	1,99 ^{+0,28}
	1,54	2,99	3,26	5,49	4,50	2,63	7,20	6,46	4,03

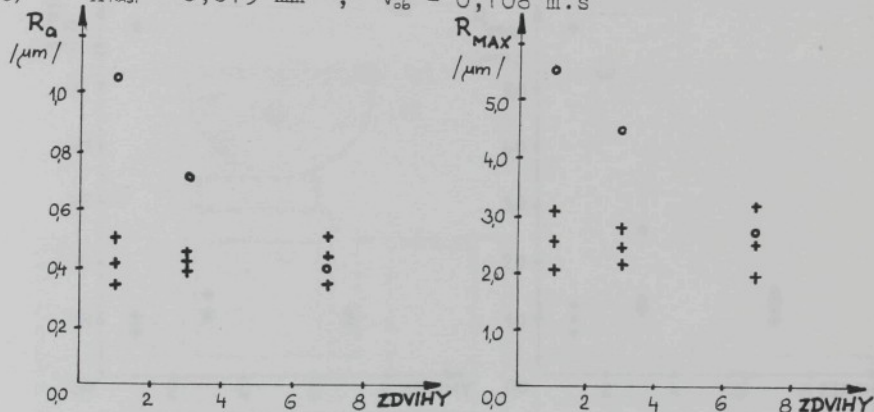
Tab. 8 : Naměřené a vypočtené hodnoty drsnosti povrchu při broušení kotoučem A 99 32 L 7 B

Řezné podmínky h_{HAST} /mm/ v_{ob} /m.s ⁻¹ / v_k /m.s ⁻¹ /	0,005			0,015			0,025																						
	0,050			0,016			0,226																						
	29,6			29,6			29,6																						
Zuvuky /1/	1			3			7			1			3			7													
	1			1			1			1			1			1													
Broušení ředné Broušení simulované	1			3			7			1			3			7													
	1			1			1			1			1			1													
Číslo experimentu Datový sebor	10			11			12			13			14			15			16			17			18				
	10			11			12			13			14			15			16			17			18				
Tloušťka odebrané vrstvy $h_{\text{OY}}/h_{\text{OBS}}$ /mm/	3,0 ^{+0,6}			4,0 ^{+0,9}			4,6 ^{+1,9}			6,2 ^{+1,4}			9,6 ^{+0,7}			12,0 ^{+2,0}			13,0 ^{+5,0}			15,2 ^{+5,7}			18,2 ^{+6,4}				
	4,0			4,0			5,0			5,0			6,0			10,0			13,0			13,0			15,0			18,0	
Střední aritmetická úchylika nerovnosti profilu R_a /μm/	0,27 ^{+0,02}			0,31 ^{+0,04}			0,34 ^{+0,03}			0,17 ^{+0,03}			0,21 ^{+0,01}			0,2 ^{+0,02}			0,20 ^{+0,03}			0,30 ^{+0,04}			0,28 ^{+0,03}				
	1,00			0,26			0,23			0,23			1,31			0,28			0,19			0,75			0,41			0,25	
Maximální výška nerovnosti profilu R_{MAX} /μm/	1,61 ^{+0,00}			1,73 ^{+0,29}			1,88 ^{+0,16}			0,93 ^{+0,21}			1,20 ^{+0,09}			1,15 ^{+0,24}			1,62 ^{+0,23}			1,70 ^{+0,18}			1,69 ^{+0,15}				
	3,99			1,50			1,46			5,97			2,50			1,25			5,14			2,48			1,70				

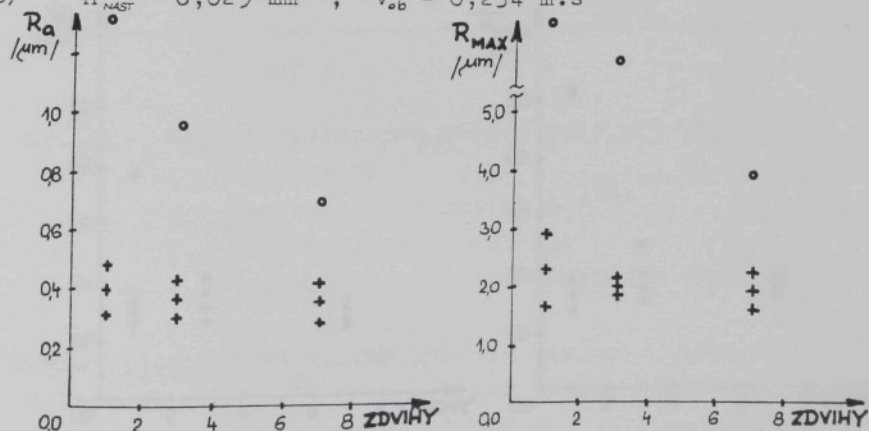
a/ $h_{NAST} = 0,005 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,042 \text{ m.s}^{-1}$



b/ $h_{NAST} = 0,015 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,108 \text{ m.s}^{-1}$

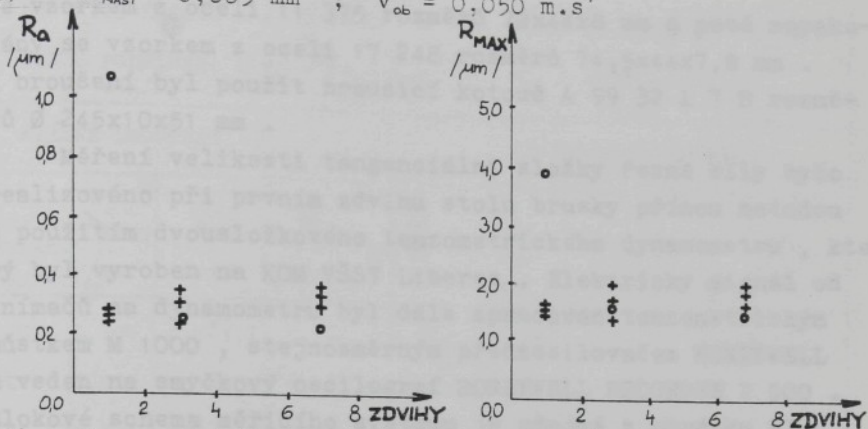


c/ $h_{NAST} = 0,025 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,234 \text{ m.s}^{-1}$

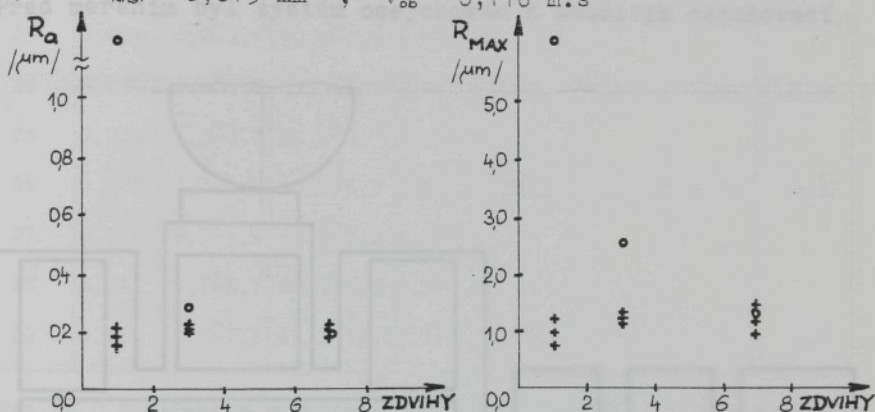


Obr. 95. Závislost R_a, R_{MAX} na počtu zdvihů při daných podm.:
 h_{NAST}, v_{ob} ; $v_K = 32,6 \text{ m.s}^{-1}$; brousicí kotouč A9932L7B ;
 symboly: + reálné broušení, o simulované broušení

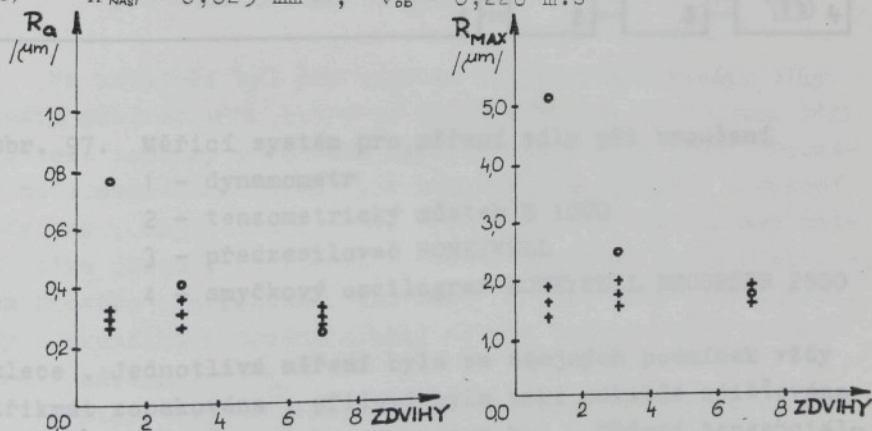
a/ $h_{NAST} = 0,005 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,050 \text{ m.s}^{-1}$



b/ $h_{NAST} = 0,015 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,116 \text{ m.s}^{-1}$



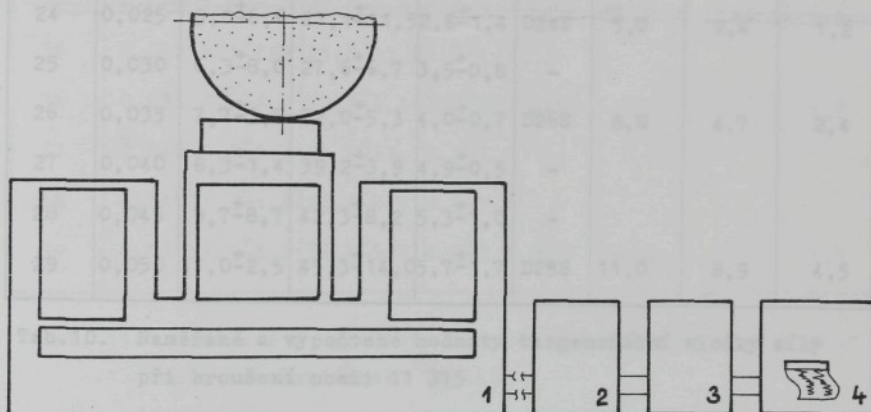
c/ $h_{NAST} = 0,025 \text{ mm}$; $v_{ob} = 0,226 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 96. Závislost R_a, R_{max} na počtu zdvihů při daných podm.:
 h_{NAST}, v_{ob} ; $v_K = 29,6 \text{ m.s}^{-1}$; brousicí kotouč A9S16J9V;
 symboly: + reálné broušení, o simulované broušení

se vzorkem z oceli 11 375 rozměrů 72x44x8 mm a poté zopakovány se vzorkem z oceli 17 248 rozměrů 74,5x44x7,8 mm . K broušení byl použit brousicí kotouč A 99 32 L 7 B rozměrů $\varnothing$ 245x10x51 mm .

Měření velikosti tangenciální složky řezné síly bylo realizováno při prvním zdvihu stolu brusky přímou metodou s použitím dvousložkového tenzometrického dynamometru , který byl vyroben na KOM VŠST Liberec . Elektrický signál od snímačů na dynamometru byl dále zpracován tenzometrickým můstkem M 1000 , stejnosměrným předzesilovačem HONEYWELL a veden na smyčkový oscilograf HONEYWELL RECORDER 2 500 . Blokové schema měřicího systému je zřejmé z obrázku 97 . Před měřením byl systém ocejchován s použitím cejchovací



Obr. 97. Měřicí systém pro měření síly při broušení

- 1 - dynamometr
- 2 - tenzometrický můstek M 1000
- 3 - předzesilovač HONEYWELL
- 4 - smyčkový oscilograf HONEYWELL RECORDER 2500

klece . Jednotlivá měření byla za stejných podmínek vždy třikrát zopakována , přičemž byla také pokaždé zjišťována skutečná tloušťka odebrané vrstvy h_{OD} . Měření tangenciální složky síly i tloušťky odebrané vrstvy bylo statisticky vyhodnocováno /144/ .

BROUSICÍ KOTOUČ : A 99 32 L 7 B					MATERIÁL OBROBKU : 11 375			
ŘEZNÉ PODMÍNKY : $v_k = 44,8 \text{ m.s}^{-1}$, $v_{ob} = 0,1745 \text{ m.s}^{-1}$								
REÁLNÉ BROUŠENÍ					SIMULOVANÉ BROUŠENÍ			
Číslo exper.	h_{NAST} /mm/	h_{OD} /μm/	F_T /N/	F'_T /N/	Dat. sou- bor	h_{ODS} /μm/	F_T /N/	F'_T /N/
20	0,005	$0,7 \pm 1,4$	$5,1 \pm 0$	$0,6 \pm 0$	D20S	1,0	0,2	0,1
21	0,010	$1,3 \pm 1,4$	$7,5 \pm 1,5$	$0,9 \pm 0,2$	-			
22	0,015	$2,7 \pm 2,9$	$16,4 \pm 0$	$2,1 \pm 0$	D22S	3,0	1,1	0,5
23	0,020	$4,0 \pm 2,5$	$20,5 \pm 6,7$	$2,6 \pm 0,8$	-			
24	0,025	$5,0 \pm 6,6$	$21,1 \pm 11,5$	$2,6 \pm 1,4$	D24S	5,0	2,4	1,2
25	0,030	$6,3 \pm 8,0$	$27,6 \pm 6,7$	$3,5 \pm 0,8$	-			
26	0,035	$7,7 \pm 3,8$	$32,0 \pm 5,3$	$4,0 \pm 0,7$	D26S	8,0	4,7	2,4
27	0,040	$8,3 \pm 1,4$	$39,2 \pm 3,9$	$4,9 \pm 0,5$	-			
28	0,045	$9,7 \pm 8,7$	$42,3 \pm 8,2$	$5,3 \pm 1,0$	-			
29	0,050	$11,0 \pm 2,5$	$45,3 \pm 14,0$	$5,7 \pm 1,7$	D29S	11,0	8,9	4,5

Tab.10. Naměřené a vypočtené hodnoty tangenciální složky síly při broušení oceli 11 375

Na počítači byl pro výpočet tangenciální složky síly použit program P87S , který je další modifikací programu P87U a datové soubory v rozsahu experimentů D20S - D39S . Rozměry modelovaného obrobku byly zvoleny dle podmínek broušení vždy tak , aby délka obrobku byla o něco větší než maximální délka úseku , na kterém by mohlo dojít ke styku mezi zrnem brusiva a obrobkem . Velikost obrobku byla vždy taková, aby v okamžiku určování složky síly τ byl brousicí kotouč plně v záběru .

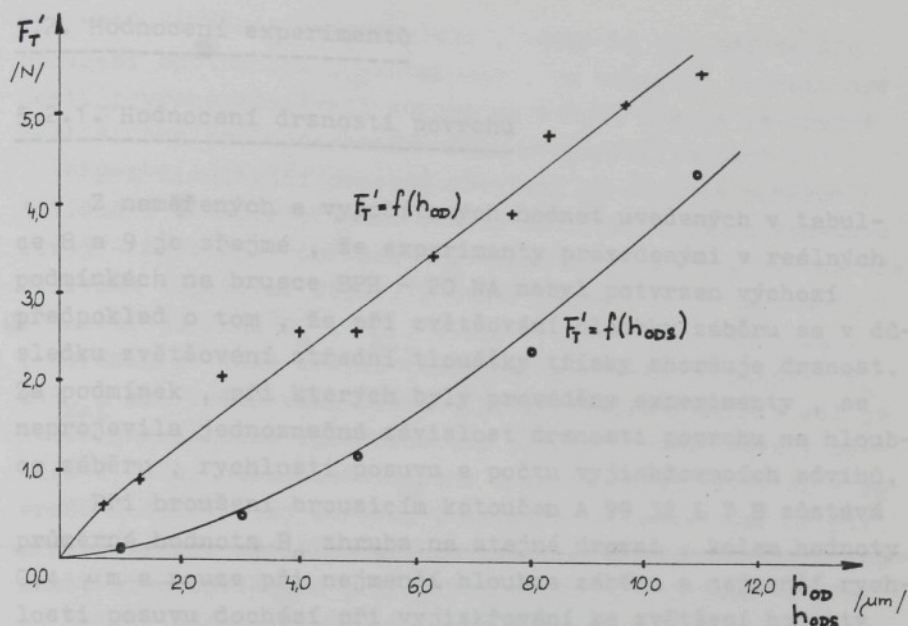
Protože výpočet složky síly vyžaduje podstatně více strojového času , nebyly na počítači realizovány experimenty v celé šíři , ale pouze za podmínek zřejmých z tabulky 10

BROUSICÍ KOTOUČ : A 99 32 L 7 B					MATERIÁL OBROBKU : 17 248			
ŘEZNÉ PODMÍNKY : $v_k = 44,8 \text{ m.s}^{-1}$, $v_{ob} = 0,1745 \text{ m.s}^{-1}$								
REÁLNÉ BROUŠENÍ					SIMULOVANÉ BROUŠENÍ			
Číslo exper.	h_{NAST} /mm/	h_{OD} /μm/	F_T /N/	F'_T /N/	Dat. sou- bor	h_{ODS} /μm/	F_T /N/	F'_T /N/
30	0,005	$1,3 \pm 1,4$	$10,6 \pm 3,9$	$1,4 \pm 0,5$	D30S	1,0	0,2	0,1
31	0,010	$1,7 \pm 1,4$	$16,0 \pm 8,2$	$2,1 \pm 1,0$	-			
32	0,015	$2,7 \pm 1,4$	$16,4 \pm 5,1$	$2,1 \pm 0,7$	D32S	3,0	1,2	0,6
33	0,020	$3,3 \pm 1,4$	$18,8 \pm 1,5$	$2,4 \pm 0,2$	-			
34	0,025	$5,0 \pm 2,5$	$22,5 \pm 7,6$	$2,9 \pm 1,0$	D34S	5,0	2,8	1,4
35	0,030	$6,3 \pm 2,9$	$21,8 \pm 12,0$	$2,8 \pm 1,5$	-			
36	0,035	$7,7 \pm 1,4$	$20,8 \pm 6,4$	$2,7 \pm 0,8$	D36S	8,0	5,4	2,7
37	0,040	$9,3 \pm 8,7$	$25,6 \pm 11,7$	$3,3 \pm 1,5$	-			
38	0,045	$11,3 \pm 1,4$	$28,0 \pm 8,9$	$3,6 \pm 1,1$	-			
39	0,050	$12,3 \pm 3,8$	$34,8 \pm 6,7$	$4,5 \pm 0,9$	D39S	11,0	10,1	5,1

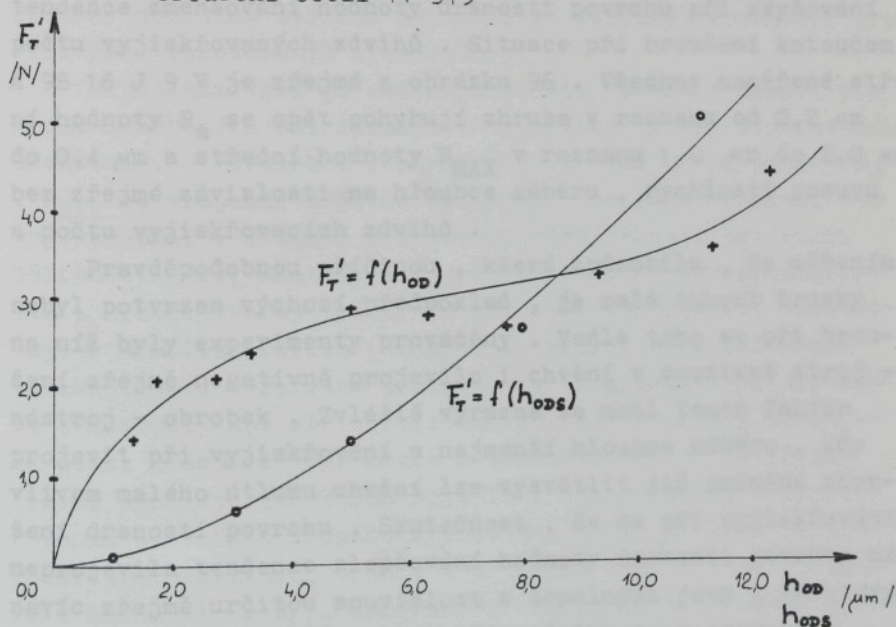
Tab. 11. Naměřené a vypočtené hodnoty tangenciální složky síly při broušení oceli 17 248

a 11 . V těchto tabulkách jsou zároveň uvedeny výsledné hodnoty složky síly při reálném i simulovaném broušení F_T a hodnoty složky síly přepočtené na 1 mm šířky brousicího kotouče F'_T . Výsledky prováděných experimentů jsou vyjádřeny na obr. 98 a 99 . Z obrázků jsou zřejmé průběhy závislostí naměřené jednotkové složky síly F'_T na tloušťce odebrané vrstvy materiálu při broušení h_{OD} a zároveň jsou v nich pro různé tloušťky h_{ODS} uvedeny hodnoty vypočítané jednotkové složky síly F'_T .

Obr. 99. Naměřené a vypočtené hodnoty (+) a vypočtené hodnoty (•) jednotkové tangenciální složky síly při broušení oceli 17 248



Obr. 98. Naměřené střední hodnoty (+) a vypočtené hodnoty (o) jednotkové tangenciální složky síly při broušení oceli 11 375



Obr. 99. Naměřené střední hodnoty (+) a vypočtené hodnoty (o) jednotkové tangenciální složky síly při broušení oceli 17 248

5.2. Hodnocení experimentů

5.2.1. Hodnocení drsnosti povrchu

Z naměřených a vypočítaných hodnot uvedených v tabulce 8 a 9 je zřejmé, že experimenty provedenými v reálných podmínkách na brusce BPH - 20 NA nebyl potvrzen výchozí předpoklad o tom, že při zvětšování hloubky záběru se v důsledku zvětšování střední tloušťky třísky zhoršuje drsnost. Za podmínek, při kterých byly prováděny experimenty, se neprojevila jednoznačná závislost drsnosti povrchu na hloubce záběru, rychlosti posuvu a počtu vyjiskřovacích zdvihů.

Při broušení brousicím kotoučem A 99 32 L 7 B zůstává průměrná hodnota R_a zhruba na stejné úrovni, kolem hodnoty $0,4 \mu\text{m}$ a pouze při nejmenší hloubce záběru a nejmenší rychlosti posuvu dochází při vyjiskřování ke zvětšení hodnoty drsnosti povrchu, kdy střední hodnota R_a stoupá nad $0,6 \mu\text{m}$, jak je zřejmé z obrázku 95. Při broušení se neprojevila tendence zmenšování hodnoty drsnosti povrchu při zvyšování počtu vyjiskřovaných zdvihů. Situace při broušení kotoučem A 98 16 J 9 V je zřejmá z obrázku 96. Všechny naměřené střední hodnoty R_a se opět pohybují zhruba v rozsahu od $0,2 \mu\text{m}$ do $0,4 \mu\text{m}$ a střední hodnoty R_{MAX} v rozsahu $1,0 \mu\text{m}$ do $2,0 \mu\text{m}$ bez zřejmé závislosti na hloubce záběru, rychlosti posuvu a počtu vyjiskřovacích zdvihů.

Pravděpodobnou příčinou, která způsobila, že měřením nebyl potvrzen výchozí předpoklad, je malá tuhost brusky na níž byly experimenty prováděny. Vedle toho se při broušení zřejmě negativně projevilo i chvění v soustavě stroj - nástroj - obrobek. Zvláště výrazně se mohl tento faktor projevit při vyjiskřování a nejmenší hloubce záběru, kdy vlivem malého útlumu chvění lze vysvětlit již zmíněné zhoršení drsnosti povrchu. Skutečnost, že se při vyjiskřování neprojevila tendence zlepšování hodnoty drsnosti povrchu má navíc zřejmě určitou souvislost s tepelnými jevy, ke kterým dochází při broušení. Při každém zdvihu se v povrchové vrstvě převážná část dodané energie mění v teplo, které způsobuje určité zvětšování rozměrů obrobku, čímž se jako-

by zvětšuje tloušťka materiálu , která má být při dalším broušení odstraněna . Skutečnost , že naměřené hodnoty drsnosti povrchu zůstávají zhruba na stejné úrovni je zřejmě zapříčiněna spolupůsobením všech uvedených faktorů .

Při simulování procesu broušení je situace poněkud odlišná . V tomto případě uvažujeme ideálně tuhou soustavu stroj - nástroj - obrobek a ideální materiál , který nebude ovlivněn tepelnými ději . V tomto případě se průběh hodnot drsnosti povrchu R_a i R_{MAX} blíží výchozím předpokladům . Z obrázků je také zřejmá tendence zmenšování velikosti R_a a R_{MAX} při zvětšování počtu vyjiskřovacích zdvihů , což je zcela jednoznačně způsobeno tím , že při přebroušování odbírají další namodelovaná zrna brusiva další materiál z povrchu modelovaného obrobku . Uvedené tendence však nebyly prokázány při vyjiskřování za podmínek , kdy uvažujeme nejmenší hloubku záběru a rychlost posuvu . Příčinou je , že za daných podmínek působí zrna brousícího kotouče v tak malých hloubkách , že značná část povrchu modelovaného obrobku zůstává broušením nedotčena a výsledné hodnoty jsou ovlivněny hodnotou střední aritmetické úchylky nerovnosti profilu před simulovaným broušením .

Nejdůležitější je ovšem porovnání hodnot drsnosti povrchu naměřených při reálném a vypočítaných při simulovaném broušení . Z tabulek i z obrázků je zřejmé , že hodnoty R_a i R_{MAX} se vzájemně nejvíce odlišují v případě broušení bez vyjiskřování . V tomto případě se nejvýrazněji projevují odlišnosti mezi skutečným - reálným a modelovaným materiálem . Proces tvorby třísky se při reálném broušení uskutečňuje v několika fázích , kdy vedle plastických deformací vznikají také deformace pružné , na okrajích vzniklých rýh se tvoří valy ap. Při simulování procesu broušení uvažujeme pouze plastické deformace a tato skutečnost je zřejmě hlavní příčinou vzniklých rozdílů . Při broušení s vyjiskřováním se v řadě případů vypočítaná hodnota velmi blíží intervalu naměřených hodnot , případně leží zcela v intervalu hodnot R_a a R_{MAX} naměřených při reálném broušení .

5.2.2. Hodnocení tangenciální složky síly

V tab. 10 a 11 jsou uvedeny absolutní velikosti tangenciální složky síly při broušení F_T i hodnoty F_T' po přepočtení na jednotkovou šířku broušícího kotouče. Z uvedených hodnot jednoznačně vyplývá, že se jak při reálném, tak při simulovaném broušení při zvětšování hodnoty hloubky záběru složka řezné síly zvětšuje.

Z obrázku 98 je zřejmé, že při broušení oceli 11 375 na brusce BFH - 20NA byla uvedena závislost téměř lineární. Při simulování procesu má závislost zpočátku parabolický charakter, který se při větších hodnotách tloušťky odebrané vrstvy blíží lineárnímu. Jak je zřejmé z tabulky i z obrázku, je v oblasti lineárního průběhu vypočtená hodnota složky síly asi o 50 % menší, než hodnota změřená. Vzniklá odchylka je v tomto případě zřejmě způsobena tím, že v použitém Pregerově vztahu (20) pro výpočet velikosti řezného odporu při broušení známe hodnoty všech koeficientů /136/, kromě hodnoty f_{SCHL} , která je závislá na konkrétních podmínkách broušení a na použitém broušícím kotouči. Proto je důležité, že zejména v oblasti větších hloubek záběru je charakter závislosti vypočtených hodnot při simulovaném broušení stejný, jako charakter závislosti při reálném broušení. Výsledné hodnoty jsou pouze vzájemně posunuty. Mohli bychom proto v případě potřeby upřesnit hodnotu koeficientu f_{SCHL} a výpočty zopakovat s menší odchylkou.

Na obrázku 99 je uvedena závislost jednotkové tangenciální složky síly na tloušťce odebrané vrstvy materiálu při broušení oceli 17 248. Charakter závislosti naměřených hodnot je odlišný od závislosti zjištěné při broušení oceli 11 375. Zvláštní je také skutečnost, že naměřené hodnoty velikosti složky síly se pro hodnoty h_{OD} mezi $5,0 \mu m$ a $8,0 \mu m$ zmenšují a i v dalším úseku jsou síly menší než síly naměřené při broušení již zmíněné oceli 11 375 za stejných podmínek. Příčinou byly zřejmě potíže, způsobené nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, ke kterým docházelo při broušení oceli 17 248. Před každým měřením složky síly bylo vždy nutné vyjiskřením povrchu vzorku dosáhnout nulové hod-

noty hloubky záběru , ke které pak byla vztahována nastavená hloubka záběru pro příslušný experiment . Důsledkem tepla dodávaného do obrobku z místa řezu a malého součinitele tepelné vodivosti oceli 17 248 však bylo , že docházelo ke značnému zvýšení teploty povrchové vrstvy . Běžně se proto tyto oceli brousí za použití chladicí kapaliny , která však při experimentech nebyla použita z toho důvodu , aby byla všechna měření realizována za pokud možno stejných podmínek . Vlivem tepelné roztažnosti se proto zvětšovala výška obrobku v hodnotách srovnatelných s hloubkou záběru . K úplnému vyjiskření docházelo po poměrně dlouhé době . Jelikož se vždy nejvíce ohřívala střední část obrobku , stačila již velmi malá přestávka v broušení k tomu , aby při hloubkách záběru do 0,02 mm byly vlivem chladnutí broušeny pouze okraje vzorku a ve střední části se hloubka záběru zmenšovala až na nulové hodnoty . Tato skutečnost způsobila , že při broušení nebylo možno zcela přesně nastavit hodnotu požadované hloubky záběru a vedla také k tomu , že vlivem poklesu sil při broušení ve střední části obrobku byla zkreslována výsledná hodnota velikosti složky řezné síly . Při modelování procesu broušení má závislost podobný charakter jako měla při broušení oceli 11 375 . Hodnoty tangenciální složky síly však vycházejí větší , což jednoznačně vyplývá z toho , že v porovnání s ocelí 11 375 vykazuje ocel 17 248 větší hodnotu měrného řezného odporu .

5.2.3. Hodnocení výsledků výpočtu aktivních zrn brusiva a příčných průřezů nedeformovaných třísek

Při výpočtu velikosti tangenciální složky síly při broušení pomocí programu P87S byly pro jednotlivé experimenty zároveň získány údaje o počtu aktivních zrn v záběru a údaje o příčných průřezích nedeformovaných třísek . Výpočet složky síly byl proveden nejprve pro materiál 11 375 a dále za stejných podmínek pro materiál 17 248 . Rozdíly ve výpočtu se týkají pouze velikosti řezného odporu . Z tohoto důvodu jsou výsledné hodnoty o počtu aktivních zrn a o příčných průřezích nedeformovaných třísek stejné a v tab. 12 a 13 jsou

proto pro ilustraci uvedeny pouze výsledné hodnoty vypočtené při modelování broušení oceli 11 375 .

V kapitole 3.3 bylo již uvedeno , že procesu řezání se účastní ta zrna , která jsou v aktivní vrstvě a která nejsou " schována " za některým z předešlých aktivních zrn brusiva. Při modelování byl vyhodnocován celkový počet aktivních zrn při broušení za daných podmínek I_{AKTIV} a procentuální podíl aktivních zrn z celkového počtu namodelovaných zrn N_{AKTIV} . Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 12 . Z tabulky je patrné , že podle předpokladů se při zvětšování rozmě-

Datový soubor	h_{NAST} /mm/	h_{ODS} /μm/	Modelovaný obrobek šířka x délka /mm/	Počet zdvihů /1/	Údaje o aktivních zrnech	
					I_{AKTIV} /1/	N_{AKTIV} /%/
D20S	0,005	1,0	2,0 x 1,2	1	142	6,6
D22S	0,015	3,0	2,0 x 2,1	1	483	12,6
D24S	0,025	5,0	2,0 x 2,7	1	721	15,3
D26S	0,035	8,0	2,0 x 3,3	1	1090	18,1
D29S	0,050	11,0	2,0 x 3,6	1	1263	18,9

Tab. 12 : Vypočítané údaje o počtu aktivních zrn v záběru po broušení

rů modelovaného obrobku a nastavené hloubky záběru zvětšuje celkový počet aktivních zrn brusiva . Zároveň se také zvyšuje procento aktivních zrn z celkového počtu namodelovaných zrn . Hlubším rozbořem této závislosti by bylo možné zjistit , zda má na tuto skutečnost vliv především zvětšování hloubky záběru nebo zda existuje také souvislost se zvětšováním rozměrů obrobku .

Poznatky o procesu tvorby třísky i o rozměrech vzniklých třísek byly již uvedeny v kapitole 3.2 . Při matematickém modelování bylo působení každého zrna brusiva , které bylo za daných podmínek broušení v záběru , statisticky vyhodnoceno /144/ . Vypočítané hodnoty shrnuje tab. 13 , ve které jsou uvedeny jak průměrné hodnoty průřezu nedefor-

mované třísky S_{STR} , tak i maximální S_{MAX} a minimální průřezy nedeformovaných třísek S_{MIN} , které byly odebrány při jednotlivých experimentech. Jak již bylo uvedeno, byly experimenty určeny pro výpočet tangenciální složky síly a údaje o průřezu nedeformovaných třísek bylo možné získat navíc

Datový soubor	h_{NAST} /mm/	h_{ODS} /μm/	Modelovaný obrobek šířka x délka /mm/	Počet zdvihů /1/	Údaje o průřezu nedef. třísek		
					S_{STR} /μm ² /	S_{MIN} /μm ² /	S_{MAX} /μm ² /
D20S	0,005	1,0	2,0 x 1,2	1	$3,2 \pm 0,3$	0,06	6,4
D22S	0,015	3,0	2,0 x 2,1	1	$13,7 \pm 0,9$	0,14	104,0
D24S	0,025	5,0	2,0 x 2,7	1	$24,9 \pm 1,4$	0,07	248,0
D26S	0,035	8,0	2,0 x 3,3	1	$36,7 \pm 2,0$	0,00	480,0
D29S	0,050	11,0	2,0 x 3,6	1	$46,0 \pm 2,5$	0,04	702,0

Tab. 13 : Vypočítané údaje o průřezu nedeformovaných třísek po broušení

z toho důvodu, že při určování dílčích složek síly od jednotlivých zrn brusiva, které byly v daném okamžiku v záběru, bylo třeba znát také hodnoty tloušťky a průřezu třísky. Údaje v tabulce 13 jsou tedy pouze určitým přehledem vypočítaných hodnot. Z tabulky je však zřejmé, že při zvětšování hodnoty nastavené hloubky záběru a tedy i tloušťky odebírané vrstvy se zvětšuje také průměrná hodnota průřezu nedeformované třísky, což je dáno tím, že zároveň dochází ke zvětšování objemu materiálu, který při broušení připadá na jedno zrno brusiva. Vypočítaná hodnota je však zřejmě částečně ovlivněna změnami velikosti modelovaných obrobků. Vypočítané hodnoty středních průřezů nedeformovaných třísek se pohybují v rozmezí od $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ do $46 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$. Tato skutečnost velmi dobře odpovídá rozsahu nedeformovaných třísek v literatuře /77/, kde je uveden interval od $1 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2$ do $1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$.

6. ZÁVĚR

Kvalita strojírenských výrobků je úzce vázána zejména s dokončovacími způsoby obrábění . Jednou z nejrozšířenějších dokončovacích technologií je operace broušení .

Broušení je proces značně složitý a odlišný od všech ostatních způsobů obrábění materiálu . Charakterizují jej zejména specifické vlastnosti nástroje , řezné podmínky a vnější vlivy . Pracovní profil nástroje vytvářejí zrna brusiva , jež jsou rozložena zcela nepravidelně , která mají různý tvar , velikost i různé vlastnosti . Během broušení dochází k otupování a vylamování zrn . Nástroj i obrobek se při broušení chová jako pružně a plasticky deformovatelné těleso , přičemž je chování materiálu ovlivněno i vysokými řeznými rychlostmi a teplotami za nichž proces probíhá .

Výzkum v oblasti broušení byl do nedávné doby zaměřen především na vývoj strojů pro broušení a méně byl zkoumán vlastní proces broušení . U moderních brusek , často s automatickým pracovním cyklem , je konstrukční řešení na takové úrovni , že již v tomto směru nelze dosáhnout podstatného zlepšení . Aby bylo možno dále zvyšovat účinnost výrobního procesu , je nutné zaměřit pozornost na práci brousícího kotouče .

Pro poznání jevů , charakteristických pro proces broušení , byly vytvořeny studie orientované buď na zkoumání reálného procesu broušení nebo na modelování tohoto procesu . Největší význam mají v teorii obrábění poznatky o dějích , jež probíhají v oblasti tvorby třísky . Pro získání informací o těchto procesech jsou vhodné zejména metody modelování . Experimentální výzkum je však i v tomto případě spojen s mnohými obtížemi , neboť oblast tvorby třísky je velmi špatně přístupná .

Byly proto hledány i jiné cesty , které by umožňovaly potvrdit zákonitosti zjištěné teoreticky a navíc získat i řadu dalších údajů o procesech , ke kterým při broušení dochází . Jednou z nich je metoda matematického modelování . Tato metoda simuluje děje , ke kterým dochází při reálném broušení . Prostřednictvím poznatků získaných studiem pro-

cesů při vytváření třísky , při vzniku nových povrchů ap., lze navržený matematický model zpětně ověřovat a dále jej prohlubovat .

Myšlenka realizovat model broušení simulační metodou pochází od H.Yoshikavy , T.Sata a J.Peklenika . Protože se nepodařilo nalézt žádnou publikaci , patent ap. , ve které by byla uvedena problematika blíže popsána , byl vytvořen vlastní model procesu broušení jako součást úkolu SPZV III - 1 - 5 / 05 - 04 " Vývoj metod a prostředků na identifikaci obrobitelnosti při broušení " .

Základem vytvořeného modelu jsou obecné poznatky o stavbě broušicího nástroje , o procesu vzniku třísky a o vytváření povrchu při broušení , které jsou uvedeny ve 3.kapitole . Přehled mechanismů vzniku třísky i přehled vztahů pro výpočet rozměrů vzniklých třísek dokumentuje skutečnost, že v současné době se poznatky o broušení u různých autorů vzájemně odlišují . Tato situace je způsobena tím , že během procesu broušení působí v soustavě SPID velký počet různých faktorů .

Princip matematického modelování kinematiky procesu broušení simulační metodou je vysvětlen v kapitole 4 . Při vytváření modelu nebylo možné obsáhnout všechny vlivy a bylo nutno připustit některá zjednodušení . Ta však musela mít takový charakter , aby rozhodující znaky broušení zůstaly zachovány . Řešení modelu je charakterizováno vývojovými diagramy , přičemž nejdůležitější části jsou samostatně rozpracovány . Podstatou modelu je matematický popis probíhající interakce mezi zrnny brusiva a materiálem obrobku . Ke zpracování modelu je zapotřebí výpočetní techniky, protože klasický výpočet by byl v důsledku značného rozsahu nutných operací nerealizovatelný . Pomocí modelu je možno získat údaje o počtu aktivních zrn při broušení , určit hodnoty parametrů R_a a R_{MAX} , které charakterizují drsnost povrchu obrobku , vypočítat údaje o příčných průřezích nedeformovaných třísek a následně také stanovit velikost tangenciální složky síly při broušení . Uvedený matematický model umožňuje v rámci teorie broušení vytvořit určitý nový pohled na tento způsob obrábění , jehož přesnost je závislá na stupni poznání jednotlivých dílčích jevů a procesů . Zámě-

rem při řešení práce bylo vytvořit takový model , jehož vlastnosti se co nejvíce blíží reálnému procesu , neboť i z filosofického hlediska lze považovat podstatu za poznanou , když jsme schopni v praxi vytvořit její hodnověrný model .

Do jaké míry se podařilo tento záměr realizovat vyplývá z řady experimentů , které byly provedeny za účelem ověření správnosti navrženého modelu procesu broušení . Pro ověření byla zvolena dvě kritéria - drsnost povrchu obrobku a velikost tangenciální složky řezné síly . Při reálném a simulovaném broušení pak byly porovnávány výsledné hodnoty . Navíc byly při simulování procesu také sledovány údaje o počtu aktivních zrn a o průřezu nedeformovaných třísek . Z výsledků experimentů vyplývá , že při simulování procesu broušení se výsledné hodnoty pohybují rámcově v rozsahu naměřených hodnot . V řadě případů vznikají sice odchylky mezi vypočítanými a naměřenými hodnotami , ale v řadě případů jsou hodnoty také zcela shodné , případně mají závislosti při reálném a simulovaném broušení stejný charakter . V této souvislosti je třeba uvést , že stávající řešení modelu vychází pouze z kinematických poměrů při broušení a v případě dalšího zdokonalování modelu bude nutné zaměřit pozornost zejména na ty zjednodušující předpoklady , o kterých lze soudit , že nepříznivě ovlivňují proces simulovaného broušení . Jedná se především o materiálové vlastnosti obrobku . Aby bylo dosaženo lepší shody s reálným broušením , bude třeba při modelování uvažovat pružné a plastické deformace broušeného vzorku . Dále bude třeba přihlídnout k působení soustavy stroj - nástroj - obrobek , především z hlediska její tuhosti a působícího chvění . Předpoklady při simulování procesu broušení bude třeba neustále upravovat tak , aby výsledky odpovídaly skutečnosti a tím také zároveň získáme dokonalejší představu o procesech , ke kterým při broušení dochází .

Současná doba se vyznačuje rychlým vývojem výpočetní techniky a metod zpracování dat . Matematický model procesu broušení představuje jednu z aplikací uvedeného trendu v oblasti technologie . Jak je zřejmé z předložené práce , jsou dosud přínosy metody matematického modelování zejmé-

na v oblasti teoretické . Další vývoj metody by měl být orientován na oblast tvorby prognóz o procesu broušení , čímž by byla vytvořena možnost pro využití modelu v praxi . V tomto směru lze s výhodou využít možnosti porovnání výsledků reálného a simulovaného broušení . Pomocí modelu lze například zkoumat , jak se mění hodnoty drsnosti povrchu při změně podmínek broušení . Rozvoj metody matematického modelování v tomto směru by mohl vést k vytvoření metody určování optimálních řezných podmínek při broušení .

Již výše bylo uvedeno , že proces broušení je třeba podrobit důkladnému rozboru . Jedním z možných způsobů přístupu k řešení dané problematiky by mohla být i metoda matematického modelování procesu broušení , která je předmětem této práce .

a	střední hodnoty rychlosti obrábění /mm/min/
b	konstanta
b_1	délkový úsek obrábění /mm/
b_2	šířka nádeformované vrstvy /mm/
b_{2s}	střední šířka nádeformované vrstvy /mm/
C_1	součinitel vlivu obráběného materiálu /1/
C_2	součinitel vlivu brusiva /1/
C_3	součinitel vlivu povlaku /1/
C_4	souč.vlivu tvrdosti brousícího kotouče /1/
C_5	souč.vlivu struktury brousícího kotouče /1/
C_6	souč.vlivu řezné kapaliny /1/
C_7	souč.vlivu přesnosti a tuhosti brusky /1/
C_8	souč.vlivu kvality brus. kotouče /1/
$C_{10}^{C_{11}}$	konstanty /1/
C_9	statistická hustota náh. vztahů na jednotkovou hloubku : mm /mm ³ /
C_{FF}	faktor proporcionality
C_{Ra}	součinitel fyzikálně mechanických vlastností obráběného materiálu /1/
C_{PR}	konstanta /mm ³ /
D	průměr brousícího kotouče /mm/
D_{eq}	ekvivalentní průměr brus. kotouče /mm/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	obecná zkoumaná veličina /1/
A_{MAX}	maximální šířka zrna dané zrnitosti /m/
A_n	náhodné číslo /1/
A_{RO}	šířkový úsek zrna /m/
A_x	šířka simulovaného brousicího kotouče /m/
A_α	plocha hřbetu
A_γ	plocha čela
a	konstanta
a_{MAX}	maximální tloušťka třísky / μ m/
a_{MIN}	minimální tloušťka třísky / μ m/
a_s	šířkový úsek obrobku /m/
a_z	tloušťka nedeformované třísky odebraná jedním zrnem brusiva /mm/ , / μ m/
a_{zs}	střední tloušťka třísky odebraná jedním zrnem brusiva /mm/
b	konstanta
b_s	délkový úsek obrobku /m/
b_z	šířka nedeformované třísky /mm/
b_{zs}	střední šířka nedeformované třísky /mm/
C_1	součinitel vlivu obráběného materiálu /1/
C_2	součinitel vlivu brusiva /1/
C_3	součinitel vlivu pojiva /1/
C_4	souč.vlivu tvrdosti brousicího kotouče /1/
C_5	souč.vlivu struktury brousicího kotouče /1/
C_6	souč.vlivu rezné kapaliny /1/
C_7	souč.vlivu přesnosti a tuhosti brusky /1/
C_8	souč.vlivu kvality brous.kotouče /1/
$C_{10}, C_{11}, \dots$	konstanty /1/
C_J	statistická hustota břitů vztažená na jednotkovou hloubku 1 mm /mm ⁻³ /
C_{PF}	faktor proporcionality
C_{Ra}	součinitel fyzikálně mechanických vlastností obráběného materiálu /1/
c_1	konstanta /mm ⁻³ /
D	průměr brousicího kotouče /m/, /mm/
D_e	ekvivalentní průměr brous.kotouče /m/, /mm/

d	průměr obrobku /m/, /mm/
F_N	normální složka řezné síly /N/ (F_{CN})
F_T	tangenciální složka řezné síly /N/ (F_C)
F_T	tangenciální složka řezné síly přepočtená na 1 mm šířky brousicího kotouče ; jednotková tangenciální složka řezné síly /N/ (F_C')
F_z	síla působící na zrno brusiva /N/
H_1	šířka brousicího kotouče /m/ , /mm/
h	hloubka záběru /mm/
h_B	vzdálenost břitu od vnějšího povrchu brousicího kotouče / μ m/
h_{NAST}	na brusce nastavená hodnota hloubky záběru /mm/
h_{OD}	tloušťka odebrané vrstvy materiálu při broušení / μ m/
h_{ODS}	tloušťka odebrané vrstvy materiálu při simulování procesu broušení / μ m/
h_z	skutečná hloubka záběru /m/, /mm/, / μ m/
I_A	počet příčných dílků obrobku /1/
I_{AKTIV}	počet aktivních zrn brusiva /1/
I_B	počet podélných dílků obrobku /1/
I_{CELK}	počet namodelovaných zrn brusiva /1/
J	obecná příčná rovina obrobku /1/
K	obecná podélná rovina obrobku /1/
K_s	tvarový součinitel břitu /1/
K_z	plošná hustota vrcholů zrn /mm ⁻² /
k	konstanta charakterizující tvar třísky /1/
$k_1, k_2, \dots$	konstanty /1/
k_K	součinitel vlivu složení řezné kapaliny /1/
$k_{s1.1}$	měrný řezný odpor /N.mm ⁻² /
k_v	součinitel vyjadřující vliv vyjiskřovacích zdvihů /1/
k_z	součinitel vlivu zrnitosti brousicího kotouče /1/
L	délka stykového oblouku /m/ , /mm/
L_{STR}	střední rozteč zrn na obvodu brousicího kotouče /m/
L_{ZE}	efektivní vzdálenost zrn brusiva /mm/

l_B	vzdálenost mezi břity $/\mu\text{m}/$
l_{BA}	vzdálenost mezi aktivními břity $/\mu\text{m}/$
l_{OT}	délka otěrové plošky zrna $/\text{m}/$
l_s	střední vzdálenost mezi zrny brusiva $/\text{m}/, / \text{mm}/$
l_t	rozteč zrn brusiva na jedné obvodové kružnici brousicího kotouče $/\text{mm}/$
l_z	délka zrna brusiva $/\mu\text{m}/$
l_{zs}	střední vzdálenost mezi zrný brusiva v tělese brousicího nástroje $/\text{mm}/$
m	exponent v Kienzleho vztahu $/1/$
N	číslo struktury brousicího kotouče $/1/$
N_{AKT}	podíl aktivních zrn při procesu broušení $/\%/$
N_{DYN}	dynamický počet břitů na jednotkové ploše povrchu brousicího kotouče $/1/$
N_{STAT1}	statický počet břitů na jednotkové ploše povrchu brousicího kotouče $/1/$
n_K	otáčky brousicího kotouče $/\text{min}^{-1}/, / \text{s}^{-1}/$
n_{OB}	otáčky obrobku $/\text{s}^{-1}/$
n_S	střední počet zrn v 1 gramu brusiva $/1/$
n_{ZK}	střední počet zrn v jednotce objemu brusiva $/\text{cm}^{-3}/$
$n(\beta, \delta)$	složka pohybu otáčením při pootočení zrna z polohy dané úhlem β do polohy dané úhlem δ $/\text{m}/$
n_ψ	složka pohybu otáčením $/\text{m}/$
P	konstanta $/1/$
P_f	nástrojová boční rovina
P_o	nástrojová ortogonální rovina
P_p	nástrojová zadní rovina
P_r	nástrojová základní rovina
P_s	nástrojová rovina ostří
p	podíl plastických deformací na celkovém procesu řezání $/\%/$
p_1	exponent $/1/$
p_2	exponent $/1/$
p_{HTR}	řezný odpor $/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}/$
q	rychlostní poměr $/1/$
R	poloměr brousicího kotouče $/\text{m}/$
R_a	střední aritmetická úchylna nerovnosti profilu $/\mu\text{m}/$

R_{ac}	průměrná hodnota středních aritmetických úchylek nerovnosti profilu všech rovin obrobku $/\mu m/$
$R_a(J)$	střední aritmetická úchylka nerovnosti profilu v dané rovině $/\mu m/$
R_{MAX}	maximální výška nerovnosti profilu $/\mu m/$
R_{MAXC}	největší z maximálních výšek nerovnosti profilu v příčných řezech $/\mu m/$
$R_{MAX}(J)$	maximální výška nerovnosti profilu v dané rovině $/\mu m/$
$R_s(J)$	poloha střední čáry profilu v dané rovině $/m/$
S_1	plocha průřezu rýhy $/m^2/$
S_2	plocha průřezu valu $/m^2/$
S_K	kontaktní plocha mezi brousicím kotoučem a obrobkem $/mm^2/$
S_{MAX}	maximální hodnota průřezu nedeformované třísky $/\mu m^2/$
S_{MIN}	minimální hodnota průřezu nedeformované třísky $/\mu m^2/$
S_p	poměr kotoučů se zvýšenou a normální pórovitostí
S_{TR}	průřez třísky $/m^2/$, $/mm^2/$
S_{STAT}	statický počet břitů $/mm^{-1}/$
S_{STAT1}	statický počet břitů na jednotkové délce $/1/$
S_{STR}	průměrná hodnota průřezu nedeformované třísky $/\mu m^2/$
s_o	podélný posuv na jednu otáčku kotouče $/mm/$
s_z	posuv na zub $/mm/$
u	osa souřadného systému
u_{40}, u_{41}	vzdálenost vertikální osy brousicího kotouče od vrcholu zrna v dané poloze $/m/$
u_c	část zdvihu obrobku, ve které je kotouč v záběru $/m/$
u_J	vzdálenost vertikální osy brousicího kotouče od roviny obrobku, ve které zkoumáme polohu vrcholu zrna brusiva při pootáčení kotouče v řezu $/m/$
u_N	vzdálenost vertikální osy brousicího kotouče

u_p	od první roviny obrobku, ve které zkoumáme polohu vrcholu zrna brusiva; nová hodnota /m/ vzdálenost vertikální osy brousicího kotouče od obrobku, přičemž je kotouč v poloze, kdy se dotýká okraje obrobku před obráběním /m/
u_{pp}	vzdálenost o kterou se brousicí kotouč posunul od počáteční polohy /m/
u_s	vzdálenost vertikální osy brousicího kotouče od roviny obrobku, ve které zkoumáme polohu vrcholu zrna ; stará hodnota /m/
V_K	objem zrn v jednotce hmotnosti kotouče /cm ³ .g ⁻¹ /
v	osa souřadného systému
v_c	hlavní řezná rychlost /m.s ⁻¹ /
v_e	výsledná řezná rychlost /m.s ⁻¹ /
v_f	rychlost podélného posuvu /m.min ⁻¹ / , /m.s ⁻¹ /
v_k	obvodová rychlost brousicího kotouče /m.s ⁻¹ /
v_o	posuvný pohyb obrobku za jednu otáčku brousicího kotouče /m/
v_{ob}	rychlost posuvu obrobku /m.min. ⁻¹ /, /m.s ⁻¹ /
v_p	rychlost přísuvu /m.s ⁻¹ /
$v(\beta, \delta)$	složka pohybu posuvu při pootočení zrna brusiva z polohy dané úhlem β do polohy dané úhlem δ /m/
v_y	složka pohybu posuvem/m/
W	náhodné číslo rovnoměrně rozdělené v intervalu $\langle 0,1 \rangle$ /1/
X	souřadnice vrcholu zrna brusiva v axiálním směru /m/
X_K	vzdálenost vrcholu zrna brusiva od podélné roviny K v dané příčné rovině /m/
X_N	souřadnice vrcholu zrna brusiva ; nová hodnota /m/
x	osa souřadného systému
Y	vzdálenost vrcholu zrna brusiva od zvoleného počátku - na válcové ploše /m/
$Y_H (J, K)$	výška profilu obrobku v bodě o souřadnicích J, K /m/
Y_{HMAX}	hodnota největší výšky profilu v dané rovině /m/

Y_{HMIN}	hodnota nejmenší výšky profilu v dané rovině /m/
Y_{H1N}	výška od základny obrobku k bodu vrcholu zrna brusiva /m/
Y_{H2}	výška od základny obrobku k zrnu brusiva v konkrétním bodě mřížky /m/
Y_{H3}	vertikální vzdálenost bodu na povrchu zrna od vrcholu zrna nad konkrétním bodem mřížky /m/
Y_N	vzdálenost vrcholu zrna od zvoleného počátku; nová hodnota /m/
y	osa souřadného systému
Z	vzdálenost vrcholu zrna od obalové plochy brousicího kotouče /m/
Z_{MAX}	výška aktivní vrstvy brousicího kotouče /m/
Z_N	vzdálenost vrcholu zrna od obalové plochy brousicího kotouče ; nová hodnota /m/
z	počet zrn brusiva na jedné povrchové kružnici brousicího kotouče /1/
α	exponent charakterizující rozložení zrn brusiva na brousicím kotouči /1/
α_L	úhel záběru $^{\circ}$ /
α_o	ortogonální úhel hřbetu $^{\circ}$ /
α_{OT}	ortogonální úhel hřbetu otupeného zrna $^{\circ}$ /
α_s	součinitel /1/
β_1	úhel střižné roviny $^{\circ}$ /
β_N	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem vrcholu zrna připraveného k řezání /rad/
β_o	ortogonální úhel břitu $^{\circ}$ /
β_z	vrcholový úhel zrna brusiva $^{\circ}$ /
δ	úhel čela $^{\circ}$ /
δ_o	ortogonální úhel čela $^{\circ}$ /
δ_{ox}	ortogonální úhel čela pro minimální hloubky záběru $^{\circ}$ /
δ_j	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna , který se dotýká příčné roviny obrobku /rad/

δ_N	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna , který se dotýká příčné roviny obrobku ; nová hodnota /rad/
δ_P	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem , který leží na obalové ploše kotouče a dotýká se okraje obrobku před obráběním /rad/
δ_S	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna , který se dotýká příčné roviny obrobku ; stará hodnota /rad/
δ_{ZKP}	úhel určený polohou prvního aktivního zrna, u kterého vyhodnocujeme složku síly, při řezání v poslední rovině před ukončením záběru /rad/
ε	úhel vnikání /°/
α_S	úhel sklonu boku zubu /rad/ , /°/
λ_K	konstanta ($\lambda_K = k \cdot p_s$) /mm/
λ_{KE}	efektivní vzdálenost mezi zrny brusiva /mm/
λ_M	multiplikativní konstanta /1/
μ	součinitel tření /1/
μ'	součinitel vnitřního tření deformovaného kotvu ve směru smyku /1/
ρ	hustota brousicího kotouče /g.cm ⁻³ /
ρ_Z	poloměr zaoblení vrcholu zrna /m/ , /μm/
τ_{STR}	smykové namáhání /MPa/ , /Pa/
φ	úhel průvodiče bodu křivky /rad/
φ_{DIF}	úhel daný polohou vyšetřovaného zrna brusiva a prvního zrna, u kterého vyhodnocujeme složku síly /rad/
φ_N	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem namodelovaného zrna brusiva; nová hodnota /rad/
φ_P	hodnota úhlu φ_N pro první aktivní zrno brusiva, u kterého vyhodnocujeme složku síly /rad/
φ_S	úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem vrcholu namodelovaného zrna; stará hodnota /rad/

SEZNAM POUŽITÉ

úhel sevřený vertikální osou brousicího kotouče a průvodičem zrna brusiva /rad/

- 1/ BCKSTEIN, B. - JAHNIS, H. - SCHMIDT, K. : Schleiftechnischer Ratgeber. 4.vyd.VEB Verlag Technik Berlin 1980. - 320 s. - 1. vyd. 1978.
- 2/ DAUDS, O. : Untersuchung des Schleifprozesses./Dissertatni prace/. Aachen 1966. - TH Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- 3/ BRÜCKNER, K. : Der Schleifvorgang und seine Bewertung durch die auftretenden Schnittkräfte./Dissertatni prace/. Aachen 1962. - TH Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- 4/ BLANKENBURG, S. - ZWEINERT, K. : Untersuchung von Kenngrößen des Schleifvorganges und deren Einfluss auf das Arbeitsergebnis beim Einstrichschleifen./Dissertatni prace/. Dresden 1973. - TU Dresden. Fakultät für Maschinenwesen.
- 5/ KÖNIG, W. : Fertigungsverfahren-Band 3 Schleifen, Honen, Läppen. 1.vyd.VEB-Verlag Technik 1981.
- 6/ SCHWAB, K.E. : Verspanungsablauf und Vorschubergebnis beim Ausbrennschleifen./Dissertatni prace/. Aachen 1979. - TH Aachen.
- 7/ THYSSSEN, W. : Komplexe mathematische Modellierung des Schleifprozesses-Schaffung von Grundlagen für die externe Schnittwertoptimierung./Doktorská prace/. Magdeburg 1981. - TU Magdeburg.
- 8/ WAWRZINIAX, W. - HEROLD, V. : Rundschleifen-Genauigkeit und Effektivität.- Bezirkskaderzentrum Gera 1983.
- 9/ PEKLENIK, J. : Contribution to the Correlation Theory of the Grinding Process./Journal of Engineering for Industry.-, 1964, - 3, 23-24.
- 10/ YOSHIKAWA, H. - SAKA, T. : Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method./JEMP article, vol. 16, 1968, 2, 297-302.
- 11/ YOSHIKAWA, H. - PEKLENIK, J. : Three-dimensional Simulation on Techniques of the Grinding Process. In

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ ECKSTEIN, E.-JÄHNIG, H.-WERNER, R. : Schleiftechnischer Ratgeber. 4.vyd.VEB Verlag Technik Berlin 1980.
- /2/ DAUDE, O. : Untersuchung des Schleifprozesses./Disertační práce/. Aachen 1966.-TH Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- /3/ BRÜCKNER, K. : Der Schleifvorgang und seine Bewertung durch die auftretenden Schnittkräfte./Disertační práce/. Aachen 1962.- TH Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- /4/ BLANKENBURG, S.-ZWEINERT, K. : Untersuchung von Kenngrößen des Schleifvorganges und deren Einfluss auf das Arbeitsergebnis beim Umfangs-stirnschleifen./Disertační práce/.Dresden 1973.-TU Dresden.Fakultät für Maschinenwesen.
- /5/ KÖNIG, W. : Fertigungsverfahren-Band 2-Schleifen,Honen, Läppen.1.vyd.VDI-Verlag Düsseldorf 1980.
- /6/ SCHWARZ, K.E. : Zerspanungsablauf und Schleifergebnis beim Aussenrunds Schleifen./Disertační práce/.Aachen 1959,-TH Aachen.
- /7/ THYSSEN, W. : Komplexe mathematische Modellierung des Schleifprozesses-Schaffung von Grundlagen für die externe Schnittwertoptimierung./Doktorská práce/.Magdeburg 1981.-TH Magdeburg.
- /8/ WAWRZINIAK, W.-HEROLD, V. : Rundschleifen-Genauigkeit und Effektivität.-.Bezirksneuererzentrum Gera 1985.
- /9/ PEKLENIK, J. : Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process.Journal of Engineering for Industry,-,1964,-,s.85-94.
- /10/ YOSHIKAWA, H.-SATA, T. : Simulated Grinding Process by Monte Carlo Method.CIRP Annals,vol.16, 1968,s.297-302.
- /11/ YOSHIKAWA, H.-PEKLENIK, J. : Three-dimensional Simulation Techniques of the Grinding Process.In:

Advances in Manufacturing Systems.Oxford
Pergamon Press 1971,s.89.

- /12/ MASLOV,J.N. : Teorie broušení kovů.1.vyd.SNTL Praha
1979.
- /13/ BAUL,R.M.-GRAHAM,D.-SCOTT,W. : Charakterization of
the working surface of abrasive wheels.
Tribology,1972,s.169-176.
- /14/ PRZYBYLSKI,L. : Charakterystyka rozkladu krawedzi
ziarn na powierzchni roboczej ściernicy.
Mechanik 1977,č.8,s.403-404.
- /15/ LORTZ,W. : Schleifscheibentopographie und Spanbil-
dungsmechanismus beim Schleifen./Disertač-
ní práce/. Aachen 1975.-R-WTH Aachen.
- /16/ SAVJOLOVA,T.I. : Funkcii raspredělenija zeren po ori-
entacijam v polikristallach i ich gaussovs-
kije približenija. Zavodskaja laboratorija,
50,1984,č.5,s.48-52.
- /17/ ZAJCEV,A.G. : Rasčot čisla zeren orientirovanno ras-
položennyh na rabočej pověrchnosti šlifo-
vaľnogo kruga.Svërchtvërдыje matėrialy,1982,
č.6,s.41-44.
- /18/ AUTOR NEUVEDEN : Přesná kontrola tvrdosti brusných ko-
toučů - metoda Grindo-Sonic./Návod k obslu-
ze/./B.r./.
- /19/ PEKLENIK,J. : Ermittlung von geometrischen und physi-
kalischen Kenngrössen für die Grundlagen-
forschung des Schleifens./Disertační práce/.
Aachen 1957.-TH Aachen.
- /20/ KASSEN,G. : Beschreibung der elementaren Kinematik
des Schleifvorganges./Disertační práce/.
Aachen 1969.-R-WTH Aachen.
- /21/ WERNER,G. : Kinematik und Mechanik des Schleifprozes-
ses./Disertační práce/.Aachen 1971.-R-WTH
Aachen.
- /22/ SALJÉ,E.-DIETRICH,W.-MEYER,J.: Dynamische Vorgänge
beim Aussenrund-Einsteichschleifen.VDI-Zeit-
schrift,124,1982,č.17,s.623-628.
- /23/ BOKUČAVA,G.V. : Těmperatura rezanija pri šlifovanii.

- Věstník машиностроения, 43, 1963, č. 11, s. 62-66.
- /24/ REZNIKOV, A.N. : Upravljenije teplovymi javlenijami pri šlifovanii. Mašinostrojitel', -, 1982, č. 9, s. 13-15.
- /25/ LOWIN, R. : Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. /Disertační práce/. Aachen 1980. - R-WTH Aachen.
- /26/ IVANOV, O.A. - NGUYEN CONG CHAI - PLECHANOV, N.V. : Eksperimentalnaja ocenka sposobov opredelenija temperaturnykh deformacij pri vreznom šlifovanii valov. Izmeritel'naja tehnika, -, 1983, č. 6, s. 35-37.
- /27/ ANDRIANOVA, I.A. - ŠACHNOVSKIJ, S.S. : Vlijanije tepla, vyděljaemogo pri torcovom šlifovanii, na stabilnost polozhenija krugov. Stanki i instrument, -, 1983, č. 8, s. 30-31.
- /28/ LOCKO, D.V. - MIILMAN, J.V. - TORČUN, N.M. : Mechanizm abrazivnogo iznosa i struktura povérchnosti kristallicheskich materialov posle abrazivnoj obrabotki. Povérchnost', fizika, himija, mehanika, -, 1984, č. 8, s. 136-142.
- /29/ THYSSEN, W. - LIERATH, F. : Verschleissmodell für das Aussenrudschleifen. Fertigungstechnik und Betrieb, 27, 1977, č. 11, s. 672-675.
- /30/ KITAMURA, T. - MIYOSHI, T. - SATO, K. : Estimation of the Grinding Process by Power Spectrum Patterns around Grinding Wheel Surface. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 16, 1982, č. 2, s. 125-126.
- /31/ SHIBATA, J. - INASAKI, I. - YONETSU, S. : On Characteristics of Wheel Wear in Creep Feed Grinding. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 15, 1981, č. 3, s. 193-194.
- /32/ Autorské osvědčení. SSSR 1151438A. - DACENKO, V.A. - DACENKO, O.V. Ustrojstvo dlja nepreryvnogo kontrolja iznosa šlifoval'nogo kruga. 13.5.1983.
- /33/ WAWRZINIAK, W. - IVANOV, V. : Zum Einfluss des Abrichtens von Schleifkörpern auf Schleifkörperwirk-

- fläche und Werkstückrauheit beim Rundschei-
 leifen. Feingerätetechnik, 31, 1982, č. 11, s.
 512-516.
- /34/ MINKE, E. : Verschleiss-verhalten und Wirtschaftlich-
 keit stehender polykristalliner Abricht-
 werkzeuge. Schleifen und Trennen, 108, 1984,
 -, s. 27-31.
- /35/ COMMANDER, M. : Umělé diamanty jako kvalitní orovnáva-
 če brusných kotoučů. Věda a technika v za-
 hraničí, 18, 1982, č. 19, s. 61.
- /36/ POPOV, S.-AJ. : Opređeljane na silovite pokazateli i
 na proizvoditelnosta pri abrazivno otrjaz-
 vaně. Mašinstrojeně, 31, 1982, č. 6, s. 269-271.
- /37/ GAZDA, J.-KORDINA, J. : Einfluss der Steifigkeit des
 Fertigungssystems auf die Schneidfähigkeit
 von Schleifkörpern. In: Konferenz INFERT 82,
 1, TU Dresden 1982, s. 206.
- /38/ JEFIMOV, V.V. : Sravnitělnaja effektivnosť različnych
 sposobov podači SOŽ pri šlifovanii. Věstnik
 mašinstrojenija, -, 1984, č. 11, s. 46-48.
- /39/ SCHIEFER, K.H. : Theoretische und experimentelle Sta-
 bilitätsanalyse des Schleifprocesses. /Di-
 sertační práce /. Aachen 1980. - R-WTH Aachen.
- /40/ VASILKO, K. : Tvorenie triesky pri brúsení. Strojírenst-
 ví, 18, 1968, č. 4, s. 279-282.
- /41/ VASILKO, K.-NOVÁK, S. : Príspevok k objasneniu fyzikál-
 nej podstaty procesu rezania pri brúsení.
 Strojírenství, 21, 1971, č. 11, s. 681-684.
- /42/ HASEGAWA, Y.-OKUYAMA, S.-KAWAMURA, S. : Modell of Cutting
 Mechnism by Abrasive Grains. Bulletin of the
 Japan Society of Precision Engineering, 16,
 1982, č. 2, s. 91-96.
- /43/ SNOEYS, R.-PETERS, J.-DECNEUT, A. : The Significance of
 chip Thickness in Grinding. Annals of the
 CIRP, 23, 1974, č. 2, s. 227-237.
- /44/ BUMBÁLEK, B.-OŠTÁDAL, B. : Metodika sestavování diag-
 ramů broušení. /Výzkumná zpráva/. Brno.
 /B.r./.
- /45/ KRUG, H. : Elektronenoptische Untersuchungen an ge-

- schliffenen Metalloberflächen. Werkstattstechnik, 53, 1963, č. 9, s. 454-462.
- /46/ YOSSFON, S. - RUBENSTEIN, C. : Šerochovatost povérchnosti obrazujuščajasja pri šlifovanii austenitnoj neržavějuščej stali korundovymi kružgami. EI Režuščije instrumenty, 1983, č. 24, s. 26-35.
- /47/ LEVONOVİČ, A. R. : Issledovanije i razrabotka metodiki prognozirovanija šerochovatosti povérchnosti pri lentočnom šlifovanii. /Disertačnı práce/. Jerevan 1979. Naučno-proizvodstvennoe objedinenije ARMSTANOK.
- /48/ YONETANI, S. - NOTOYA, H. - TAKATSUJI, Y. : On the Influence of Grinding Condition on Residual Stress and Distortion in Ground Layer. Journal of the Institute of Japan, 57, 1983, č. 1, s. 72-79.
- /49/ DEGNER, W. - LAURTERLEIN, T. : The Determination of Microhardness and Residual Stress of Machined Ferromagnetic Components by Using the Barkhausen Effect. Annals of the CIRP, 29, 1980, č. 1, s. 403-408.
- /50/ CHUDOBIN, L. V. - POLJANSKOV, J. V. - PRAVIKOV, J. M. : Vlijanie fiziko-chimičeskich svojstv abrazivnych zeren i obrabatyvajemogo materiala na process ich vzaimodějstvija pri šlifovanii. Trenije i iznos, -, 1982, dıl 3, č. 3, s. 537-544.
- /51/ HELBIG, W. : Ein Beitrag zur technologischen Schleifkörperdiagnostik und zur Schleiftheorie. /Disertačnı práce/. Dresden 1983. - TU Dresden.
- /52/ GAZDA, J. : Identifikace pojmu obrobiteľnosti při broušení a metody jeho zkoumání. /Výzkumná zpráva/. VŠST Liberec 1971.
- /53/ LINDENBECK, D. A. : Versuche an Einkornwerkzeugen. Maschinenmarkt, 76, 1970, č. 84, s. 1892-1896.
- /54/ HANKEL, W. - SCHINDLER, D. : Aufbau einer Richtwertmaschine Aussenrundscheifen zur automatisierten Erfassung und Auswertung relewanter Spannungskenngrößen. Wissenschaftliche Zeitschrift

- der TH Magdeburg, 28, 1984, 5, s. 56-60.
- /55/ HANKEL, W.-SCHINDLER, D. : Aufbau einer Richtwertmaschine Aussenrundscheifen mit Automatisierter Erfassung und Auswertung von Spanungskenngrößen im Rahmen des Schnittwertspeichers der DDR./Disertační práce/.Magdeburg 1984.-TH Magdeburg.
 - /56/ LIERATH, F.-THYSSEN, W. : Rechnergestützte Schnittwertoptimierung für eine neue Generation von NILES-Zahnflankenschleifmaschinen. Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Magdeburg, 28, 1984, 5, s. 69-73.
 - /57/ FILIMONOV, L.I. : Primeněníje skorostnogo šlifovanija . Mašinstrojitěl, -, 1982, č. 9, s. 16-18.
 - /58/ SALJÉ, E.-TEIWES, H. : Schleifen mit erhöhter Wirkgeschwindigkeit. Werkstatt und Betrieb, 116, 1983, č. 8, s. 489-490.
 - /59/ REINHOLD, R. : Intensivschleifen-Beispiele für die Bearbeitung ebener Flächen. 1. vyd. VEB Verlag Technik Berlin 1979.
 - /60/ BATIAŠVILI, B.I.-GRDZELIŠVILI, G.J. : Obrabotka tvěrdých splavov metodom nízkotemperaturnogo precizionnogo šlifovanija. Svěrchtvěrdyje materialy, -, 1982, č. 6, s. 48-51.
 - /61/ ROSENFELD, B.-SCHEUER, H. : Anwendung des Tiefschleifverfahrens zum Schärfen geradgenuteter Hartmetall - Schneidwerkzeuge. Industrie Diamanten Rundschau/Sonderdruck/, 7, 1973, č. 1, s. 2-7.
 - /62/ BUCHAR, J. : Uplatnění nových čs. brusných nástrojů s KNB při broušení ložisek. Progres, 15, 1983, č. 6, s. 248-251.
 - /63/ GARŠIN, A.P.-LUPINOVIČ, L.N. : Rabotosposobnost' instrumenta iz abrazivnych materialov s element-oksidnymi pokrytijami. Svěrchtvěrdyje materialy, -, 1984, č. 1, s. 30-35.
 - /64/ GARTNER, W. : Technologische und wirtschaftliche Aspekte bei der Einsatzvorbereitung von hochharten Schleifscheiben. Automobil-Industrie,

- GAZDA, J. -AJ. -, 1982, č. 3, s. 309-316.
- /65/ KRAUSS, E. : Entgraten mit Tyrolit-Elastic.Schleifen und Trennen, 108, 1984, -, s. 14-16.
- /66/ GAZDA, J. : Modelování brusného procesu./Disertační práce/.Liberec 1973.-VŠST Liberec.
- /67/ ŻEBROWSKI, H.-MAZURKIEWICZ, M. : Badania nad zarysowywaniem pojedynczym naturalnym żiarnem ściernym.Mechanik,-, 1967, č. 1, s. 27-30.
- /68/ ŠPILLAR, V. : Hodnocení příčného profilu rýhy vzniklé po rytí jedním zrnem brusiva u různých materiálů ./Diplomová práce/.Liberec 1986.-VŠST Liberec.
- /69/ SAKUMA, K.-TADO, T. : Study on Cutting Process with Abrasive Grain-Observation of Chip Formation in Grinding by Single Simulated Tool. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 16, 1982, č. 4, s. 225-230.
- /70/ RŮŽIČKA, J. : Návrh matematického modelu broušení kotouče./Diplomová práce/.Liberec 1974.VŠST Liberec.Fakulta strojní.
- /71/ VOLDŘICHOVÁ, H. : Výpočet průřezů třísky při simulovaném procesu broušení./Diplomová práce/.Liberec 1984.-VŠST Liberec.Fakulta strojní.
- /72/ JERSÁK, J. : Příspěvek k matematickému modelování procesu broušení./Diplomová práce/.Liberec 1981.-VŠST Liberec.Fakulta strojní.
- /73/ TOGNER, M. : Řezné síly při rovinném broušení obvodem kotouče./Diplomová práce/.Liberec 1985.-VŠST Liberec.Fakulta strojní.
- /74/ GAZDA, J.-AJ. : Mechanismus vytváření povrchu a třísky a obrobitelnost při vysokých rychlostech deformace a gradientech teploty-2.část-Vývoj metod výzkumu vytváření povrchu a třísky při broušení./Výzkumná zpráva/.Liberec, VŠST Liberec 1983.
- /75/ JERSÁK, J. : Výpočet průřezu řezu při broušení./Písemná část odborné kandidátské zkoušky ve vědecké výchově/.Liberec 1984.-VŠST Liberec.Fakulta strojní.

- /76/ GAZDA, J.-AJ. : Vytváření povrchu a obrobitelnost broušením - 1. část-Vytváření povrchu fyzikálním a matematickým modelováním. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST Liberec 1985.
- /77/ PŘIKRYL, Z.-MUSÍLKOVÁ, R. : Teorie obrábění. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1971.
- /78/ TRETJAKOV, I. P.-TIMOFEJEV, I. I. : K razčotu temperatury pri šlifovanii. In: Obrabotka mašinostrojitel'nykh materialov almeznym instrumentom. NAUKA Moskva 1966, s. 56.
- /79/ DRASKÝ, J.-AJ. : Teploty při obrábění. /Výzkumná zpráva/. Liberec, VŠST Liberec 1976.
- /80/ LIERATH, F.-AJ. : Komplexes mathematisches Modell der externen Festwertoptimierung für das Schleifen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 20, 1976, 5, s. 535-545.
- /81/ THYSSEN, W. : Komplexe mathematische Modellierung des Schleifprozesses- Schaffung von Grundlagen für die externe Schnittwertoptimierung. /Disertační práce/. Magdeburg 1982.-TH Magdeburg.
- /82/ LIERATH, F. : Komplexer Informationsgehalt und effektive Nutzungsformen der externen Schnittwertoptimierung. /Disertační práce/. Magdeburg 1980.-TH Magdeburg.
- /83/ TANAKA, Y.-YANO, A.-HIGUCHI, M. : Die elastische verformung an der Kontaktzone bei der Umfangsschleifscheibe. Annals of the CIRP, 24, 1975, č. 1, s. 249-252.
- /84/ PIEGERT, R.-PICKERT, J.-SALZMESSER, CH. : In-Prozessfassung des Schleifkörperverschleisses. In: Forschungsergebnisse zur Technologie der metallverarbeitenden Industrie, -, Friedrich-Schiller-Univesität Jena, 1982, s. 33.
- /85/ LIERATH, F.-THYSSEN, W. : Verschleissmodell für Abspannverfahren mit geometrisch unbestimmter Werkzeugschneide. Wissenschaftliche Zeitschrift

- der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 21, 1977, 8, s. 791-795.
- /86/ WAWRZINIAK, W.-TRAN, M.H.-HEROLD, V. : Abrichten mit synthetischen vielkorn-Diamantwerkzeugen. In: Wissenschaftliche Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt, 14, Karl-Marx-Stadt 1983, s. 141.
- /87/ ŠAJTROCHOVÁ, K. : Rezné kapaliny, sposoby ich použitia, smery a vývoj v této oblasti. In: Pokrokové technologie brúsenia rotačných súčiastok a otvorov, -, DT ČSVTS Bratislava 1986, s. 38.
- /88/ FUKURAWA, Y.-LEE, W.S. : On the Dynamic Grinding Process under Vibrating Condition. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, 16, 1982, č. 3, s. 149-154.
- /89/ INASAKI, T.-YONETSU, S.-SHIMIZU, T. : Selbsterregte Schwingungen beim Aussenrundeinstechschleifen. Annals of the CIRP, 23, 1974, č. 1, s. 117-118.
- /90/ SALJÉ, E.-DIETRICH, W.-MEYER, J. : Dynamische Vorgänge beim Aussenrund-Einstechschleifen. VDI-Zeitschrift, 124, 1982, č. 17, s. 623-628.
- /91/ MILAŠIUS, L.-KAFKA, J. : Vlivanije režimov skorostnogo šlifovanija na ostatočnyje naprjaženija. In: Acta Polytechnica-Práce ČVUT v Praze, Vědecká konference, Příspěvky zahraničních autorů, ČVUT Praha 1982, s. 45.
- /92/ TÖNSHOFF, H.K. : Untersuchungen über den Zustand geschliffener Oberflächen. Annals of the CIRP, 24, 1975, č. 1, s. 503-507.
- /93/ REINHOLD, R.-AJ. : Qualitätsbewertung von Schleifkörpern. In: Konferenz INFERT 82-Industrielle Fertigung auf dem Wege zur Automatisierung, 1, TU Dresden 1982, s. 195.
- /94/ NGUYEN VIET TIEP : Obrobitelnost kovových materiálů broušením. /Disertační práce/. Liberec 1984. - VŠST Liberec.
- /95/ POPKE, H. : Technologische Untersuchungen eines neuen Wirkprinzips beim Fräsen und Schleifen. In:

Konferenz INFERT 82-Industrielle Fertigung
auf dem Wege zur Automatisierung, 1, TU Dres-
den 1982, s.139.

- /96/ POPOV, S.A.-ANAŇAN, R.V. : Šlifovanije vysokoporistymi
krugami. Mašinostrojenije Moskva 1980.
- /97/ REINHOLD, R.-KNÖSEL, E.-NGUYEN, T.D. : Studie zur Tauglich-
keit von Plasmagespritzten Schleifkörpern
im Umfangsflachschliff. In : Sborník prací
VŠST Liberec, Liberec 1979, sv.12, s.231.
- /98/ SITTA, Š.-NEUSTUPA, Z. : Výroba a využití syntetických
diamantů o vysoké pevnosti, vyráběných v n.p.
Pramet Šumperk. In: Syntetické a velmi tvrdé
materiály, -, TST kp. Nářadí Praha 1982, s.19.
- /99/ ŠEPELEV, A.A. : Technologické postupy obrábění nástro-
jů ze slinutého karbidu diamantem. In: Syn-
tetické a velmi tvrdé materiály, -, TST kp.
Nářadí Praha 1982, s.15.
- /100/ ŠVARAL, Š. : Obrábění nástrojmi z diamantu a KNB. 1 vyd.
ALFA Bratislava 1977.
- /101/ ZACHARENKO, I.P. : Oblasti a výhody použití brusiv z vel-
mi tvrdých materiálů ve výrobě nářadí. In:
Syntetické a velmi tvrdé materiály, -, TST
kp. Nářadí Praha 1982, s.29.
- /102/ HELBIG, V.-LAMPERT, R. : Qualitätsbewertung von Schleif-
körpern im technologischen Experiment Aus-
senrund-Einsteichschleifen /Standardversuch-
Schleifkörperdiagnose/. In: Wissenschaftliche
Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt, 14,
Karl-Marx-Stadt 1983, str.136.
- /103/ WAWRZINIAK, W.-LÖHMANN, B. : Umfangsflachschleifen mit
Quervorschub. -. Bezirksneuererzentrum Gera
1982.
- /104/ BÜHRDEL, CH.-FRÖMMER, G. : Schleifen. 2.vyd. VEB Verlag
Technik Berlin 1982.
- /105/ IVAŠINNIKOV, V.T.-BULATOV, M.A. : Teoretičeskije i ekspe-
rimentalnyje issledovanija abrazivnych ma-
terialov. 1.vyd. Sverdlovsk UNC AN SSSR 1982.
- /106/ IVAŠINNIKOV, V.T.-BULATOV, M.A. : Abrazivnyje instrumen-

- ty s polimernými i keramičeskými svjazujuščimi-processy polučeniya i primeneniya. 1.vyd.Sverdlovsk UNC AN SSSR 1982.
- /107/ BENEŠ, J. : Charakteristika rozložení vrcholů zrn na povrchu pracovní plochy brousicího kotouče./Diplomová práce/.Liberec 1986,-VŠST Liberec.
- /108/ KREJČÍKOVÁ, M. : Zkoumání tvaru jednotlivých volných zrn brusiva./Diplomová práce/.Liberec 1986.-VŠST Liberec.
- /109/ BÁRTLOVÁ, Y. : Vliv způsobu orovnnání brousicího kotouče na jeho pracovní schopnost./Diplomová práce/.Liberec 1986.-VŠST Liberec.
- /110/ GAZDA, J.-AJ. : Mechanismus vytváření povrchu a třísky a obrobiteľnosť při vysokých rychlostech deformace a gradientech teploty - 1.část-Identifikace pojmu obrobiteľnosť při broušení a metody jeho zkoumání./Výzkumná zpráva/.Liberec, VŠST Liberec 1982 .
- /111/ ŠUTA, P. : Projekt zařízení pro určování obrobiteľnosti při vnějším válcovém broušení./Diplomová práce/.Liberec 1984.-VŠST Liberec.
- /112/ GAZDA, J.-JERSÁK, J. : Modelování procesu broušení.In: Acta Polytechnica, Práce ČVUT v Praze, 1982, 19, s.33-37.
- /113/ TST kp.Spojené závody na výrobu karborunda a elektritu, Benátky nad Jizerou : Schleifmittel und Schleifen./B.r./.
- /114/ ČSN 22 40 10 Brousicí materiály a pojiva.Klasifikace. 1983.
- /115/ TGL 29-804 Schleifmittel.Feste Schleifkörper, Bezeichnungen, Anwendung, Korngrößen.1972.
- /116/ ČSN 22 40 24 Sloh brusných nástrojů.1960.
- /117/ TGL 29-806 Gefüge.Feste Schleifkörper.1963.
- /118/ GAŠPÁREK, J. : Dokončovacie sposoby obrábania.1.vyd. ALFA Bratislava-SNTL Praha 1979.
- /119/ BOBROV, V.F.-AJ. : Razvitiye nauki o rezanii metallov. 1.vyd.Mašinostrojenie Moskva 1967.
- /120/ ČSN 22 40 12 Zrnitost a velikost drceného brusiva.Bru-

- sivo.1973.
- /121/ VIGNER,M.-PŘIKRYL,Z.-AJ. : Obrábění.1.vyd.SNTL Praha 1984.
- /122/ TYROLIT,Schwaz: Die Schleifmittel./B.r./.
- /123/ PŘIKRYL,Z.-MUSÍLKOVÁ,R. : Teorie obrábění.2.vyd.ČVUT Praha 1966.
- /124/ BUDA,J.-AJ. : Teória obrábania.1.vyd.ALFA Bratislava 1983.
- /125/ BOKUČAVA,G.V. : Šlifovanije metallov s podačej ochlaž-
dajušej židkosti skvoz šlifovaľnyj krug.
MAŠGIZ Moskva 1959.
- /126/ GÜHRING,K. : Hochleistungsschleifen,eine Methode zur
Leistungssteigerung der Schleifverfahren
durch hohe Schnittgeschwindigkeiten./Habi-
litační práce/.Aachen 1967.-R-WTH Aachen.
- /127/ VICTOR,H.R.-AJ. : Spanende Fertigungsverfahren II -
Schleifen.Werkstattstechnik,72,1982;č.3,
s.165-169,č.4,s.233-235,č.5,s.289-293.
- /128/ ROHDE,G. : Einfluss von Abrichtrolle,Abrichtbedingun-
gen und Schleifscheibe auf das Schleifergeb-
nis.In: Jahrbuch-Schleifen,Honen,Läppen
und Polieren,50,Vulkan-Verlag Essen 1981,
s.299.
- /129/ GOEDICKE,H. : Die Vorgänge im schleifenden Gefüge und
deren zahlenmässige Erfassung./Disertační
práce/.Aachen 1936.-TH Aachen.
- /130/ OCZOS,K.-PORZYCKI,J. : Szlifowanie.1.vyd.Wydawnictwa
Naukovo-Techniczne Warszawa 1986.
- /131/ TST Spojené závody na výrobu karborunda a elektritu,
Benátky nad Jizerou : Carborundum Electri-
te./B.r./ .
- /132/ RYVKIN,A.A.-RYVKIN,A.Z.-CHRENOV,L.S. : Spravočnik po
matematike.4.vyd.Moskva "Vysšaja škola"1987.
- /133/ PŘIKRYL,Z. : Nauka o obrábění.1.vyd.SNTL Praha 1959.
- /134/ LIPTÁK,O.-AJ. : Technológia výroby-obrábanie.1.vyd.
Bratislava 1979.
- /135/ MASLOV,J.N. : Teoretičeskije osnovy processa almaznoj
obrabotki matěrialov.In: Obrabotka mašino-

- strojitělných materiálů almazným instrumentem, NAUKA Moskva 1966, s.14.
- /136/ DEGNER, W.-LUTZE, H.-SMEJKAL, E. : Spanende Formung.
10.vyd. Verlag Technik Berlin 1985.
- /137/ BUDA, J.-BÉKÉS, J. : Teoretické základy obrábění kovů.
2.vyd. ALFA Bratislava 1977.
- /138/ OLEHLA, M.-TIŠER, J. : Použití FORTRANU v praxi. 1.vyd.
Liberec, VŠST Liberec 1973. 262 s.
- /139/ OLEHLA, M.-VĚCHET, V.-OLEHLA, J. : Řešení úloh matematické statistiky ve FORTRANU. 1.vyd. NADAS Praha 1982.
- /140/ DĚMIDOVÍČ, B.P.-MARON, I.A. : Základy numerické matematiky. 1.vyd. SNTL Praha 1966.
- /141/ PROSKURJAKOV, S.A.-OLEHLA, M.-TIŠER, J. : Základy numerických metod a programování I. 1.vyd. VŠST Liberec 1982.
- /142/ OLEHLA, M.-TIŠER, J. : FORTRAN IV. 1.vyd. VŠST Liberec 1976.
- /143/ ŠVEJDA, K.-KOCHMAN, J.-POSPÍŠIL, F. : Technické kreslení.
1.vyd. SNTL Praha 1970 .
- /144/ ČSN 01 0250 Statistické metody v průmyslové praxi.
Všeobecné základy. 1973.
- /145/ HOMMELWERKE GmbH, Mannheim-Käfertal: Hommel-Tester
Typ T-Betriebsanleitung./B.r./.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 : Program P87U

- Matematický model kinematiky procesu broušení

Příloha č. 2 : Experimentální určování drsnosti povrchu

- Příklad výsledku výpočtu pro podmínky experimentu č. 6

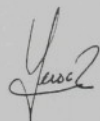
Příloha č. 3 : Experimentální určování tangenciální složky síly při broušení

- Příklad výsledku výpočtu pro podmínky experimentu č. 26 s údaji o počtu aktivních zrn brusiva a o příčných průřezích nedeformovaných třísek

V Liberci 27.3.1988

Na závěr předložené práce bych chtěl poděkovat svému
školiteli Doc. Ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. za vedení
a pomoc při realizaci této práce. Současně děkuji i
svým spolupracovníkům a zejména Ing. V. Gabrielovi
za poskytnutí dlouholetých zkušeností i J. Bacílkovi
a M. Čihulovi za pomoc při realizaci měření. Také dě-
kuji pracovníkům z výpočetního střediska VŠST Liberec.

V Liberci 27.3.1988



Ing. Jan J e r s á k

PŘÍLOHY

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA Č. 1

PROGRAM P87U :

Matematický model kinematiky procesu broušení

PROGRAM : MATEMATICKY MODEL BROUSENÍ

JFENO : P870

VERZE : 24.02.1988
.....

EXTERNÁL FCT1,FCT2

COMMON/T001/Q04,Q1,Q5

COMMON/T002/Q02,Q03,Q6

DIKENSION YH(13,657),RS(13),RA(13),RMAX(13),S(13),
/E(60),PTR(13),U(11),F(11),IZ(11),UBO(3),FREQ(20),PCT(20),
/STATS(5)

DELETE PRECISION DELTAN,DELTAJ,DELTAS,BETAN,XLI,XRI,Q5,Q6,
/DELTA(13),F1,F2

PC20: MAXIMÁLNÍ DIMENZE OHNIZIT DLE POZADOVANÉHO TYPU VÝPOČTU

INTEGER DPG,GRAF1,GRAF2,TEST1,TEST2,TEST3,TEST4

REAL KONST1,KONST2,KONST3,KONST4

DATA EP,EZ/1H,1H*7
.....

OTENÍ A TISK ZADÁNYCH HODNOT :
VOLEA TYPU VÝPOČTU

READ(5,9000)E>PER,IA,IB,AS,BS,D,ALFA,EN,VOR,H,IPRC,QLSTR1,AMAX,
/RH11,SIGMA1,Q1I2,SIGMA2,OHYDA,IEND,TEST1,TEST2,TEST3,TEST4
WRITE(6,9500)E>PER,IA,IB,AS,BS,D,ALFA,EN,VOR,H,IPRC,QLSTR1,AMAX,
/RH11,SIGMA1,Q1I2,SIGMA2,OHYDA,IEND,TEST1,TEST2,TEST3,TEST4
READ(5,9002)L1,L2,L3,L4

IFR=1

FIS=0

YS=0

I10=1

100 IF(I10-1)140,110,140

110 IF(L1-1)150,120,150

120 WRITE(6,9502)

I20=0

IAKTIV=0

ICELK=0

130 I10=2

GO TO 250

140 IF(I10-2)180,150,180

150 IF(L2-1)170,160,170

160 READ(5,9004)JPGV,DPG,GRAF1,GRAF2

WRITE(6,9504)JPGV,DPG,GRAF1,GRAF2

170 I10=3

GO TO 250

180 IF(I10-3)220,190,220

190 IF(L3-1)210,200,210

200 WRITE(6,9506)

L1=1

I20=0

IAKTIV=0

ICELK=0

I15=0

210 I10=4

GO TO 250

220 IF(L4-1)240,230,240

230 READ(5,9006)U1,S1,KONST1,KONST2,KONST3,KONST4

WRITE(6,9510)U1,S1,KONST1,KONST2,KONST3,KONST4

L3F=1
 I2AD=2
 IAKTIV=0
 ICELH=0
 YFAMAX=0
 I7F=0
 I8F=0
 I9F=0
 I19F=0
 I20F=0

240 I10F=5
 250 IF (I10-5) 100, 260, 260
 260 I10=1
 262 IF (TEST1-1) 263, 268, 263
 263 IF (TEST2-1) 264, 268, 264
 264 IF (TEST3-1) 265, 268, 265
 265 IF (TEST4-1) 266, 268, 269
 269 CONTINUE

C
 C HOCELOVANI OEROKU ;
 C URCENI PARAMETRU PRO VYPOCET
 C

Q1=VOF/(6.2831853*FN)
 Q2=IA-1
 Q3=IB-1
 TAUSTR=QMI1
 ROSTR=QMI2
 AX=AS*Q2+10.0*AS
 QLSTR=(QLSTR1-2.00)/AX
 QKAPAS=(3.141592654-TAUSTR)/2.00
 ARO=(ROSTR/COS(QKAPAS)-ROSTR)/TAN(QKAPAS)
 ZMAX=TAN(QKAPAS)*(AMAX-2.00*ARO)/2.00
 DC 270 J=1,JE
 DC 270 K=1,IA
 270 YF(J,K)=H
 J=1
 K=1

C
 C PRIpravNE VYPOCTY
 C

DELTAP=ARCCOS((D-2.000*H)/D)
 UP=(D/2.00)*SIN(DELTAP)
 UC=UP+G3*FS
 DELTAS=DELTAP
 UN=UP
 268 IF (L2-1) 278, 282, 285
 268 CONTINUE
 269 IF (L4-1) 289, 292, 290
 269 CONTINUE
 300 GC TO 330
 300 FISE=FIN
 YSEYH
 UN=US
 J=1
 316 GC TO 302
 316 CONTINUE
 316 GC TO 330
 J=1
 K=1
 FISE0
 YSE0
 DELTAS=DELTAP
 UN=UP
 IFR=IFR+1

326 CONTINUE
330 CONTINUE
IF (L4-1) 326, 334, 336
336 CONTINUE

C
C
C
MODELUVANI TVARU A POLOHY ZRNA BRUSIVA

TALGEMN2 (GM11, SIGMA1)
QKAPPA = (3.141592654 - TAU) / 2.00
RCCELM2 (RM12, SIGMA2)
I1 = 1
340 CALL GEN 1 (H)
IF (I1-1) 360, 350, 360
350 XNFAAX**H
I1 = 2
GO TO 300
360 IF (I1-2) 350, 370, 300
370 YN = YS - CLSTR * ALG (H)

I1 = 3
GO TO 300
380 ZN = ZHAX * (H ** ALFA)
386 I1 = 4
390 IF (I1-4) 340, 400, 400
400 Q4 = D / 2.00 - ZH
Q20 = TAN (QKAPPA)
Q21 = RC / COS (QKAPPA) - R0
Q25 = RC * SIN (QKAPPA)
F1 = 2.00 * YN / D
YF1S = 0
IF (L1-1) 416, 412, 416
416 CONTINUE
IF (L3-1) 426, 422, 426
426 CONTINUE

C
C
C
POCTOCENI ZRNA BRUSIVA DO REZU

BETAN = DELTAS - F11 + FIS
Q5 = Q1 * BETAN + U1
XLI = BETAN - 6.00 * CLSTR / D
XFI = BETAN + 10.00 * CLSTR / D
CALL FTHI (DELTAN, F1, F01, XLI, XRI, CHYBA, IEND, IER1)
DELTAS = DELTAN
UN = Q4 * LSIN (DELTAN)
US = UN

C
C
C
URCENI VZAJEJNE POLOHY KOTOUCE A CEROBKU

UFFEUF = UN
IF (TEST1-1) 440, 432, 440
440 CONTINUE

C
C
C
URCENI POLCHY VROHOLU ZRNA

540 CONTINUE
Q7 = D / 2.00 * (1.00 - DCCS (DELTAN))
YF1N = Q7 + ZN * DCCS (DELTAN)
IF (L3-1) 556, 552, 556
556 CONTINUE

C
C
C
JDE ZRNA DE ZABERU ?

IF (YH1N-4) 600, 560, 550
560 IF (J-2) 580, 572, 570
570 IF (YH1N-YF1S) 580, 592, 590

590 GC TO 770
600 CONTINUE

C
C MUZE ZENO V CANE ROVINE REZAT ?
C

YHMAX=0
DC 620 K=1,1A
IF (YH(J,K)-YHMAX) 620,620,610
610 YHMAX=YH(J,K)
620 CONTINUE
IF (YH1H-YHMAX) 640,630,630
630 YHMAX=0
GC TO 750
640 YHMAX=0

C
C PEZANI
C

YH1=0.7+ZHAX*DCOS(DELTAN)
K=1
645 CONTINUE
XPE=ABS((K-1)*PS+5.00*AS-XN)
IF (XK-0.25) 650,660,660
650 YH3=HC-SQRT(RC**2.00-XK**2.00)
GC TO 670
660 YH3=0.20*XK-0.21
670 YH2=YH1N+YH3
IF (YH1-YH3) 680,690,690
680 YH2=YH1
690 IF (YH2-YH(J,K)) 700,730,730
700 IF (L1-1) 706,702,706
706 CONTINUE
IF (L3-1) 710,711,710
710 CONTINUE
IF (L4-1) 726,722,726
726 CONTINUE
YH(J,K)=YH2
730 CONTINUE
IF (K-1A) 735,739,739
735 K=K+1
GC TO 645
739 CONTINUE
IF (L3-1) 746,742,746
746 CONTINUE
IF (L4-1) 749,746,749
749 CONTINUE

C
C POSLEDNI ROVINA DOBRODKU ?
C

750 CONTINUE
IF (J-1B) 760,760,770
760 J=J+1
GC TO 615
770 CONTINUE
IF (L1-1) 786,782,786
786 CONTINUE
IF (L3-1) 799,799,799
799 CONTINUE
800 IF (L4-1) 802,802,802
802 CONTINUE
GC TO 630

C
C DOCTACENI TRIA BRUSIVA V REZU
C

815 UCF=0.4*(SIN(DELTAN)+0.5

XL1=DELTA-1.50*BS7D
XFI=DELTA+0.20*BS7D
Q22=Q4
Q23=Q1
CALL FIMI (DELTAJ,F2,FCT2,XL1,XRI,CHYBA,IEND,IER2)
IF (TEST2-1/822,822,824
824 CONTINUE
DELTA=DELTAJ
YFIS=YFIN
GC TO 540

C
C KOLEC FEZANI ?

C
830 IF (UC-LPP)840,840,300
840 CONTINUE
IF (L4-1)846,844,846
846 CONTINUE

C
C ZNOVL PŘEBROSIT ?

C
850 IF (IPCC-IFR)860,860,650
860 GC TO 318
CONTINUE

C
C ZPŘADOVÁNÍ UDÁJŮ
C DLE POŽADOVÁNÍHO TYPU VÝPOČTU.

C
WRITE(6,9520)
880 IF (I10-1)930,990,930
890 IF (L1-1)920,900,920
900 WRITE(6,9522)
IF (L1-1)916,912,916
916 CONTINUE
920 I10=2

GC TO 1100
930 IF (I10-2)990,940,990
940 IF (L2-1)970,950,960
950 WRITE(6,9524)
960 IF (L2-1)962,1002,962

962 CONTINUE

970 CONTINUE

980 I10=3

GC TO 1100

990 IF (I10-3)1050,1000,1050

1000 IF (L3-1)1040,1010,1040

1010 WRITE(6,9526)

GC TO 1020

1030 CONTINUE

1040 I10=4

GC TO 1100

1050 IF (L4-1)1090,1060,1090

1060 WRITE(6,9528)

GC TO 1070

1080 CONTINUE

1090 I10=5

1100 IF (I10-5)1080,1110,1110

C
C
C
C DÍLOI PROGRAMŮ ;
C
C
C
C

URČOVÁNÍ PŮČTU AKTIVNÍCH ZRN

```

412 ICELK=ICELK+1
    I20=0
    GOTO 416
C      A2
702 I20=I20+1
    GO TO 706
C      A3
782 IF (I20) 786, 786, 784
784 IAKTIV=IAKTIV+1
    GO TO 786
C      A4
912 Q14=IAKTIV
    Q15=ICELK
    AKTIV=(Q14/Q15)*100.00
    WRITE(6,9530) IPFC,IAKTIV,AKTIV
    GO TO 916
C
C      VYFLOUT DRSCOSTI POVRCHU
C
C      D1
282 IF (JRCV-1) 284, 284, 286
284 IF (JRCV-1) 286, 288, 288
286 I11=I20
    GOTO 288
C      D2
1202 IF (DPC-1) 1204, 1206, 1204
1204 IF (I11-100) 1205, 1202, 1205
1205 J=JRCV
    GOTO 1208
1206 J=1
1208 Q8=0
    DC 1210 K=1, I1
1210 Q8=Q8+YH(J,K)
    RS(J)=Q8/(Q2+1.00)
    Q9=0
    DC 1212 K=1, I1
1212 Q9=Q9+ABS(RS(J)-YH(J,K))
    RA(J)=1E6*Q9/(Q2+1.00)
    YHMAX=0
    YHMIN=0
    DC 1220 K=1, I1
1220 IF (YH(J,K)-YHMIN) 1214, 1216, 1216
1214 YHMIN=YH(J,K)
1216 IF (YH(J,K)-YHMAX) 1220, 1220, 1218
1218 YHMAX=YH(J,K)
1220 CCNTILLE
    RMAX(J)=1E6*(YHMAX-YHMIN)
    IF (J-JRCV) 1242, 1222, 1240
1222 WRITE(6,9534)
    WRITE(6,9536) J, IPFC, RS(J), RA(J), RMAX(J)
    IF (GRAF1-1) 1232, 1204, 1232
1224 WRITE(6,9538)
    DC 1230 K=1, I1
    DC 1230 LE1.60
1228 E(L)=0
    L1=((YH(J,K)-YHMIN)/(YHMAX-YHMIN))*59.00
    L=L1+1
    E(L)=E2
    WRITE(6,9540) E1, YH(J,K), E
1230 CCNTILLE
1232 CCNTILLE
    IF (GRAF2-1) 1240, 1234, 1240
1234 CCNTILLE
    GOTO 1240

```



```

1242 IF (J=1) 1244,1246,1246
1244 J=J+1
      GOTO 1208
1246 Q12=0
      RMAXC=0
      DC 1250 J=1,1
      Q12=Q12+RA(J)
      IF (RMAX(J)-RMAXC) 1250,1250,1246
1248 RMAXC=RMAX(J)
1250 CONTINUE
      RAC=Q12/(03+1.0)
      WRITE(6,9546)
      WRITE(6,9550) IPFC,RAC,RMAXC
      GO TO 1260
1252 WRITE(6,9547)
1260 CONTINUE
      GOTO 162

```

```

C
C      VYPOCET PRUPRZU NEDEFORMOVANE TRISKY
C

```

```

C      T1
422 I2=1
      DC 424 J=1,18
      DELTA(J)=2.0
      S(J)=2.0
424 CONTINUE
      J=1
      GO TO 426
C      T2
552 DELTA(J)=DELTA1
      Q12=0
      GO TO 556
C      T3
711 IF (K=1) 712,715,715
712 IF (K=1) 714,715,714
713 Q12=AS/2.00*(YH(J,K)-YH2)
      GO TO 715
714 Q12=AS*(YH(J,K)-YH2)
715 Q12=Q12+Q13
      IF (I3=1) 717,716,717
716 DELZK=DELTA(J)
      I4=J
      I3=2
      GO TO 718
717 IF (I3=2) 719,718,718
718 DELZK=DELTA(J)
      I5=J
      GO TO 719

```

```

C      T4
742 S(J)=Q12
      GO TO 746

```

```

C      T5
791 IF (I3=2) 799,799,799
792 DELZS=(DELZK+DELZK)/2.00
      Q16H=3.141592654
      DC 794 J=14,15
      Q16=DAES(DELZS-DELTA(J))
      IF (Q16-Q16H) 793,793,794
793 Q16H=Q16
      I6=J
794 CONTINUE
      J=16
      SPTS(J)
795 IF (TEST4-1) 798,796,798

```

```

      117=I17+1
      IF (I17-20) 798,797,797
797  TEST4=0
798  CONTINUE
      WRITE(9)SPT
      I19=I19+1
      GO TO 799
C      T6
1020  ISPT=I19
      I19=0
      REWIND 9
1022  CONTINUE
      READ(9)SPT
      I19=I19+1
      IF (ISPT-I19) 1026,1026,1022
1026  UBC(1)=1.0
      UBC(2)=20.0
      UBC(3)=UBC(1)
      IN=10
      CALL STAT(UBC,FREQ,PCT,STATS,ISPT,1)
      WRITE (6,9570)STATS(1),STATS(2),STATS(3),STATS(4),STATS(5)
      CALL LIST(1,FREQ,IN)
      CONTINUE
      GO TO 1030
C
C      VYPOCET TANGENCIALNI SLOZKY SILY PRI BROUSENI
C
C      S1
292  IF (UMS1-UM) 294,294,296
294  IF (UMS1) 296,296,296
296  I7=100
      IF=100
      GO TO 299
298  UMS2=LC-UMS1
      GO TO 299
C      S2
322  I7=0
      YH4MAX=0
      GO TO 326
C      S2'
334  I9=0
      GO TO 336
C      S3
702  YH4=YH(J,K)-YI2
      IF (YH4-YH4MAX) 725,725,724
724  YH4MAX=YH4
725  I9=I9+1
      GO TO 726
C      S4
748  HTE(J)=YH4MAX
      YH4MAX=0
      GO TO 749
C      S6
844  U(IPR)=UMS
      F(IPR)=FOELK
      IZ(IPR)=IZAP
      GO TO 846
C      S7
1070  IF (I8-100) 1072,1076,1072
1072  DO 1074 IFR=1,IFRC
      WRITE(6,9560)IPR,U(IPR),F(IPR),IZ(IPR)
1074  CONTINUE
      GO TO 1076
1076  WRITE(6,9562)

```

```

1078 GC TITLE
      GC TO 1080
C      S5
1302 IF (I7) 1310, 1304, 1332
1304 IF (UMS2-UMP) 1310, 1310, 1306
1306 DC 1306 J=1, I
      HTR(J)=0
1308 CONTINUE
      GC TO 1312
1310 UMS3=0.1*(DELZ1-DELZP)
      UMS=UC-(UMS2+UMS3)
      FIMS=DELTA P+DELZK
      FCELK=0
      FIP=FIN
      DELZKF=DELZK
      I7=1
      GC TO 1317
1312 IF (I7-1) 1360, 1313, 1360
1313 IF (I9) 1360, 1360, 1314
1314 FIDIF=FIN-FIP
      IF (FIMS-FIDIF) 1316, 1318, 1318
1316 I7=2
      GC TO 1360
1318 DELMS=DELZKF-FIDIF
      J=14
      IF (DELTA(J)-DELPS) 1322, 1322, 1320
1320 FCAST=0
      GC TO 1355
1322 I12=0
      I13=0
1324 IF (DELTA(J)-DELPS) 1326, 1320, 1330
1326 I12=J
      IF (J-15) 1328, 1330, 1330
1328 J=J+1
      GC TO 1324
1329 I12=J
1330 I13=J
      IF (I12-I13) 1332, 1331, 1332
1331 SMS=S(J)
      HTRMS=HTR(J)
      GC TO 1337
1332 DELTA2=DELTA(J)
      SMS2=S(J)
      HTR2=HTR(J)
      J=112
      DELTA1=DELTA(J)
      SMS1=S(J)
      HTR1=HTR(J)
      Q19=(DELMS-DELTA1)/(DELTA2-DELTA1)
      SMS=((SMS2-SMS1)*Q19)+SMS1
      HTRMS=((HTR2-HTR1)*Q19)+HTR1
1333 PHTR=(KONST1*KONST3*KONST4)/(HTRMS**KONST2)
1335 FCAST=SMS*PHTR
      IZAD=IZAB+1
1344 IF (TEST3-1.0) 1347, 1345, 1347
1345 WRITE(6,9556) DELMS, DELTA(I12), DELTA(I13), S(I12), S(I13),
      HTR(I12), HTR(I13), FCAST, I12, HTRMS, I13, PHTR, SMS
      I16=I16+1
      IF (I16-10) 1347, 1346, 1346
1346 TEST3=0
1347 CONTINUE
1355 FCELK=FCELK+FCAST
      IS=0
      SMS=0.0

```


1560 DCN INCE
GC TO 802

C

C

C

C

C

TESTOVANI PROGRAMU
(TEST3 A TEST4 V PRISL. DILCICH PROGR.)

268

TEST1 - TEST4

I14=0

I15=0

I16=0

I17=0

I18=0

WRITE(6,9566)

GC TO 269

C

TEST2A

302

IF (TEST1-2)305,306,303

303

IF (TEST2-1)304,305,304

304

IF (TEST2-2)307,308,307

305

I15=0

TEST2=1

GC TO 307

306

TEST1=3

TEST2=3

307

IF (TEST1-3)310,308,316

308

I18=I18+1

IF (I18-180)310,316,309

309

WRITE(6,9564)

I18=0

I15=0

I14=0

TEST1=1

TEST2=1

GC TO 316

C

TEST1

432

WRITE(6,9552)IEF1,DELTAH,UG,UPP

IF (IEF1-2)436,434,436

434

WRITE(6,9553)XLI,XOI,ZN,UN,DETAH

436

I14=I14+1

IF (I14-20)440,438,438

438

TEST1=2

GC TO 440

C

TEST2

822

WRITE(6,9554)IEF2

I15=I15+1

IF (I15-20)824,823,823

823

TEST2=2

GC TO 824

C

C

C

C

FORMATOVE SPECIFIKACE

9000

FORMAT(I10./

/I10,I10,F10.6,F10.6./

/F10.6,F10.6./

/F10.6,F10.6,F10.6,I10./

/F10.7,F10.7,F10.7,E10.3,F10.7,E10.3./

/E10.3,I10./

/I10,I10,I10,I10)

9002

FORMAT(I10,I10,I10,I10)

9004

FORMAT(I10,I10,I10,I10)

9006

FORMAT(F10.6,F10.3,E10.3,E10.3,E10.3)

9500

FORMAT(1H1.//)

// VSST LIBREC//

// FAKLITA STROJNI//

```

// MATEMATICKÝ MODEL BROUSENÍ //
// ***** //
// DATA: //
// ..... //
// EXPER : ,I10, //
// IAKT : ,I10, //
// AS : ,F10.6, //
// DS : ,F10.6, //
// ENR : ,F10.6, //
// HE : ,F10.6, //
// CLSTR1 : ,F10.7, //
// CM1 : ,F10.7, //
// CM2 : ,F10.7, //
// CHYBA : ,E10.3, //
// TEST1 : ,I10, //
// TEST3 : ,I10, //
// IB : ,I10, //
// BS : ,F10.6, //
// ALFA : ,F10.6, //
// VCB : ,F10.6, //
// IPRC : ,I10, //
// AMAX : ,F10.7, //
// SIGMA1 : ,E10.3, //
// SIGMA2 : ,E10.3, //
// IENC : ,I10, //
// TEST2 : ,I10, //
// TEST4 : ,I10, //
9502 FORMAT(//
// URČENÍ POČTU AKTIVNÍCH ZRN //)
9504 FORMAT(//
// VÝPOČET DRŮZNOSTI POVRCHU //
// JROV : ,I10, //
// GRAF1 : ,I10, //
// DPC : ,I10, //
// GRAF2 : ,I10, //
9508 FORMAT(//
// VÝPOČET PRŮŘEZU TRISKY //)
9510 FORMAT(//
// VÝPOČET SILY PŘI BROUSENÍ //
// LPS1 : ,F10.6, //
// KONST2 : ,E10.3, //
// KONST4 : ,E10.3, //
// KONST1 : ,E10.3, //
// KONST3 : ,E10.3, //
9520 FORMAT(//
// VÝSLEDNE HODNOTY //
// ..... //)
9522 FORMAT(//
// ÚDAJE O POČTU AKTIVNÍCH ZRN //)
9524 FORMAT(//
// ÚDAJE O DRŮZNOSTI POVRCHU //)
9526 FORMAT(//
// ÚDAJE O PRŮŘEZU TRISKY //)
9528 FORMAT(//
// ÚDAJE O SILĚ PŘI BROUSENÍ //)
9530 FORMAT(//
// CELKOVÝ POČET PŘEBROUSENÍ POVRCHU : IFRC = ,I15, //
// CELKOVÝ POČET AKTIVNÍCH ZRN : IAKTIV = ,I15, //
// HNOZSTVÍ AKTIVNÍCH ZRN V PROCENTECH : AKTIV = ,F15.3, //)
9534 FORMAT(//
// HODNOTY DRŮZNOSTI POVRCHU VE ZVOLENE ROVINĚ //)
9536 FORMAT(//
// VOLENÁ ROVINA : J = ,I15, //
// POČET PŘEBROUSENÍ POVRCHU : IPR = ,I15, //
// DĚLKA STŘEDNÍ ČÁRY PROFILU : RS(J) = ,E15.5, //
// STŘEDNÍ ARITMETICKÁ NEROVNOST : RA(J) = ,E15.5, //
// MAXIMÁLNÍ VÝŠKA NEROVNOSTI : RMAX(J) = ,E15.5, //)
9538 FORMAT(//
// VÝŠKOVÉ SOUŘADNICE BODU A PROFIL POVRCHU //)
9540 FORMAT(//
// J = ,I5, //
// K = ,I5, //
// YH(J,K) = ,E15.5, //
// I = ,60A1, //
// I = //)
9547 FORMAT(//
// DRŮZNOST POVRCHU NELZE VYHODNOTIT //
// ZVOLENÁ ROVINA NENÍ SOUČÁSTÍ OBROBKU //)
9548 FORMAT(//
// CELKOVÁ DRŮZNOST POVRCHU //)
9550 FORMAT(//
// CELKOVÝ POČET PŘEBROUSENÍ POVRCHU : IFRC = ,I15, //

```

```

9552  FORMAT( // DELTAVA MAXI=, VYSKA NEROVNOSTI // RAO =',E15.5, //
// TEST 1 - IER1=',I3, DELTAN=',E15.5, UC=',E15.5, UPR=',E
9553  FORMAT( //
// XLI=',E15.5, XRI=',E15.5, /
// ZH=',E15.5, UN=',E15.5, BCTAN=',E15.5
9554  FORMAT( // TEST 2 * IER2=',I3)
9556  FORMAT( // TEST 3 //
// DELMSE=',E15.5, /
// DELTA1=',E15.5, // DELTA2=',E15.5, /
// SMS1=',E15.5, // SMS2=',E15.5, /
// ITR1=',E15.5, // ITR2=',E15.5, /
// FCAST=',E15.5, // I12=',I15, /
// HTRMS=',E15.5, // I13=',I15, /
// FTR=',E15.5, // SMS=',E15.5)
9558  FORMAT( // TEST 4 * IAKTIV=',I5, // J=',I5, // S(J)=',E15.5)
9560  FORMAT( // POČET PŘEBĚHŮ POVRCHU // IPR =',I15, /
// VZDÁL. OSY KOTOUCE OD KONCE OBRŮBKU // U(IPR) =',E15.5, /
// VELIKOST SILY PŘI BROUSENÍ // F(IPR) =',E15.5, /
// POČET AKTIVNÍCH ZRN V ZADERU // IZ(IPR) =',I15)
9562  FORMAT( // SILL NELZE VÝHODNOTIT - //
// VE ZVOLENE PČLOZE KOTOUCE HEREZE //
9564  FORMAT( // 20 KRÁT TEST 1 PO 200 CYKLECH (+TEST2) //
9566  FORMAT( // VÝPOČITANE HODNOTY: //
// ..... //
9570  FORMAT( // STATISTICKÉ LOAŽE //
// CHARAKTERIZUJÍCÍ PRŮCHY PRŮREZ TRÍSEK //
// SOUČET PRŮREZU TRÍSEK //',E15.5, /
// PRŮMĚRNÁ HODNOTA PRŮREZU TRÍSKY //',E15.5, /
// STANDARDNÍ ODCHYLKA //',E15.5, /
// MINIMÁLNÍ HODNOTA PRŮREZU TRÍSKY //',E15.5, /
// MAXIMÁLNÍ HODNOTA PRŮREZU TRÍSKY //',E15.5, /
// HISTOGRAM ČETNOSTI //
// PRŮCHY PRŮREZU TRÍSKY //
// VLEVO MAX. HODN. PR. TRÍSKY //
// VPRÁVO MIN. HODN. PR. TRÍSKY //
9600  FORMAT( // KONEC VÝPOČTU // // // //

```

```

C
C      UKONČENÍ PROGRAMU
C

```

```

1110  CONTINUE
      WRITE(6,9600)
      STOP
      END

```

```

C
C      .....
C      *****
C      .....
C
C      PODPROGRAMY - VNEJŠÍ FUNKCE
C
C      .....
C      FUNCTION GENN2(GMI,SIGMA)
C      GENN2=0.0
C      DO 4 I=1,12

```



```

GENN2=GENN2+W
GENN2=9MI+SIGMA*(GENN2-6.0)
RETURN
END

```

```

.....
DOUBLE PRECISION FUNCTION FCT1(DELTAJ)
DOUBLE PRECISION DELTAJ,Q5
COMMON/TOC1/Q4,Q1,Q5
FCT1=Q4*DSIN(DELTAJ)+Q1*DELTAJ-Q5
RETURN
END

```

```

.....
DOUBLE PRECISION FUNCTION FCT2(DELTAJ)
DOUBLE PRECISION DELTAJ,Q6
COMMON/TOC2/Q22,Q23,Q6
FCT2=Q22*DSIN(DELTAJ)+Q23*DELTAJ-Q6
RETURN
END

```

```

.....
PODPROGRAMY - VLASTNI PROCEDURY
.....

```

```

SUBROUTINE GEN1(X)
.....

```

```

SUBROUTINE GEN1(X)

```

```

DATA P,FLI,K/8192,0192.0,1/
B192=2**17
DC 2 I=1,2
K=MOD(5*K,M)
X=FLOAT(K)/FLI
RETURN
END

```

```

.....
SUBROUTINE RTM1

```

```

PURPOSE
TO SOLVE GENERAL NONLINEAR EQUATIONS OF THE FORM FCT(X)=0
BY MEANS OF MUELLER-S ITERATION METHOD.

```

```

USAGE
CALL RTM1 (X,F,FCT,XLI,XRI,EPS,IEND,IERR)
PARAMETER FCT REQUIRES AN EXTERNAL STATEMENT.

```

```

DESCRIPTION OF PARAMETERS
X      : RESULTANT ROOT OF EQUATION FCT(X)=0.
F      : RESULTANT FUNCTION VALUE AT ROOT X.
FCT    : NAME OF THE EXTERNAL FUNCTION SUBPROGRAM USED.
XLI    : INPUT VALUE WHICH SPECIFIES THE INITIAL LEFT BOUND
        : OF THE ROOT X.
XRI    : INPUT VALUE WHICH SPECIFIES THE INITIAL RIGHT BOUND
        : OF THE ROOT X.
EPS    : INPUT VALUE WHICH SPECIFIES THE UPPER BOUND OF THE
        : ERROR OF RESULT X.
IEND   : MAXIMUM NUMBER OF ITERATION STEPS SPECIFIED.
IERR   : RESULTANT ERROR PARAMETER CODED AS FOLLOWS
        : IERR=0 - NO ERROR.

```

CONVERGENCE AFTER IEND ITERATION STEP
FOLLOWED BY IEND SUCCESSIVE STEPS OF
BISECTION.
IER=2 - BASIC ASSUMPTION $FOT(XLI)*FOT(XRI)$ LESS
THAN OR EQUAL TO ZERO IS NOT SATISFIED.

REMARKS

THE PROCEDURE ASSUMES THAT FUNCTION VALUES AT INITIAL
BOUNDS XLI AND XRI HAVE NOT THE SAME SIGN. IF THIS BASIC
ASSUMPTION IS NOT SATISFIED BY INPUT VALUES XLI AND XRI , THE
PROCEDURE IS BYPASSED AND GIVES THE ERROR MESSAGE IER=2.

SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED
THE EXTERNAL FUNCTION SUBPROGRAM $FOT(X)$ MUST BE FURNISHED
BY THE USER.

METHOD

SOLUTION OF EQUATION $FOT(X)=0$ IS DONE BY MEANS OF MUELLER-
ITERATION METHOD OF SUCCESSIVE BISECTIONS AND INVERSE
PARABOLIC INTERPOLATION, WHICH STARTS AT THE INITIAL BOUNDS
 XLI AND XRI . CONVERGENCE IS QUADRATIC IF THE DERIVATIVE OF
 $FOT(X)$ AT ROOT X IS NOT EQUAL TO ZERO. ONE ITERATION STEP
REQUIRES TWO EVALUATIONS OF $FOT(X)$. FOR TEST ON SATISFACTORY
ACCURACY SEE FORMULAE (3.4) OF MATHEMATICAL DESCRIPTION.
FOR REFERENCE, SEE G. K. KRISTIANSEN, ZERO OF ARBITRARY
FUNCTION, BIT, VOL. 3 (1963), PP.205-226.

.....
SUBROUTINE RTN(X,F,FOT,XLI,XRI,EPS,IEND,IER)

PREPARE ITERATION

DOUBLE PRECISION X,XLI,XRI,XL,XR,TOL,F,FL,FR,A,
DX,XD,FM,FOT

IER=0

XL=XLI

XR=XRI

X=XL

TOL=X

F=FOT(TOL)

IF (F) 1,16,1

1 PL=FL

X=XD

TOL=X

F=FOT(TOL)

IF (F) 2,16,2

2 PR=FR

IF (DSIGN(1.00,FL)+DSIGN(1.00,FR)) 25,3,25

BASIC ASSUMPTION $FL*FR$ LESS THAN 0 IS SATISFIED.

GENERATE TOLERANCE FOR FUNCTION VALUES.

3 I=0

TOL=100.*EPS

START ITERATION LOOP

4 I=I+1

START BISECTION LOOP

DO 13 K=1,IEND

X=.5*(XL+XR)

TOL=X

F=FOT(TOL)

IF (F) 5,16,5

```

C      INTERCHANGE XL AND XR IN ORDER TO GET THE SAME SIGN IN F AND FR
6  TCL=XL
   XL=XR
   XR=TCL
   TCL=FL
   FL=FR
   FR=TCL
7  TCL=FR-FL
   A=F*TCL
   A=A*A
   IF (A-FR*(FR-FL)) 8,9,9
8  IF (I-IEND) 17,17,9
9  X=FX
   F=FF
C
C      TEST ON SATISFACTORY ACCURACY IN BISECTION LOOP
C      TCL=EFS
   A=DABS(XR)
   IF (A-1.) 11,11,10
10  TCL=TCL*A
11  IF (DABS(XR-XL)-TCL) 12,12,13
12  IF (DABS(FR-FL)-TCL) 14,14,13
13  CONTINUE
   END OF BISECTION LOOP
C
C      NO CONVERGENCE AFTER IEND ITERATION STEPS FOLLOWED BY IEND
C      SUCCESSIVE STEPS OF BISECTION OR STEADILY INCREASING FUNCTION
C      VALUES AT RIGHT BOUNDS. ERROR RETURN.
   IER=1
14  IF (DABS(FR)-DABS(FL)) 16,16,15
15  X=XL
   F=FL
16  RETURN
C
C      COMPUTATION OF ITERATED X-VALUE BY INVERSE PARABOLIC INTERPOLATION
17  A=FR-F
   DX=(X-XL)*FL*(1.+F*(A-TCL)/(A*(FR-FL))) / TCL
   XF=X
   F=FF
   X=XL-DX
   TCL=X
   F=FFT(TCL)
   IF (F) 18,16,18
C
C      TEST ON SATISFACTORY ACCURACY IN ITERATION LOOP
18  TCL=EFS
   A=DABS(X)
   IF (A-1.) 20,20,19
19  TCL=TCL*A
20  IF (DABS(DX)-TCL) 21,21,22
21  IF (DABS(F)-TCL) 16,16,22
C
C      PREPARATION OF NEXT BISECTION LOOP
22  IF (DSIGN(1.D0,F)*DSIGN(1.D0,FL)) 24,23,24
23  X=FX
   F=FF
   GO TO 4
24  XL=X
   FL=F
   XR=XM
   FR=FM
   GO TO 4
C      END OF ITERATION LOOP

```


ERROR RETURN IN CASE OF WRONG INPUT DATA
25 IERR=2
RETURN
END

.....
SUBROUTINE STAT (UPRAVENA DLE SUBROUTINE TAB1)
.....

SUBROUTINE TAB1

PURPOSE

TABULATE FOR ONE VARIABLE IN AN OBSERVATION MATRIX (OR A MATRIX SUBSET), THE FREQUENCY AND PERCENT FREQUENCY OVER GIVEN CLASS INTERVALS. IN ADDITION, CALCULATE FOR THE SAME VARIABLE THE TOTAL, AVERAGE, STANDARD DEVIATION, MINIMUM, AND MAXIMUM.

USAGE

CALL STAT(A,S,NOVAR,UBO,FREQ,PCT,STATS,NO,NV)

DESCRIPTION OF PARAMETERS

A - OBSERVATION MATRIX, NO BY NV
S - INPUT VECTOR GIVING SUBSET OF A. ONLY THOSE OBSERVATIONS WITH A CORRESPONDING NON-ZERO S(J) ARE CONSIDERED. VECTOR LENGTH IS NO.
NOVAR - THE VARIABLE TO BE TABULATED. NOVAR MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 1 AND LESS THAN OR EQUAL TO NV.
AND UPPER LIMIT OF VARIABLE TO BE TABULATED
IN UBO(1), UBO(2) AND USC(3) RESPECTIVELY. IF LOWER LIMIT IS EQUAL TO UPPER LIMIT, THE PROGRAM USES THE MINIMUM AND MAXIMUM VALUES OF THE VARIABLE.
NUMBER OF INTERVALS. UBO(2). MUST INCLUDE TWO CELLS FOR VALUES UNDER AND ABOVE LIMITS. VECTOR LENGTH IS 3.
FREQ - OUTPUT VECTOR OF FREQUENCIES. VECTOR LENGTH IS UBO(2).
PCT - OUTPUT VECTOR OF RELATIVE FREQUENCIES. VECTOR LENGTH IS UBO(2).
STATS - OUTPUT VECTOR OF SUMMARY STATISTICS, I.E., TOTAL, AVERAGE, STANDARD DEVIATION, MINIMUM AND MAXIMUM. VECTOR LENGTH IS 5. IF S IS NULL, THEN TOTAL, AVERAGE AND STANDARD DEVIATION = 0, MIN=1.E75 AND MAX=-1.E75.
NO - NUMBER OF OBSERVATIONS. NO MUST BE > OR = TO 1
NV - NUMBER OF VARIABLES FOR EACH OBSERVATION. NV MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 1.

REMARKS
NONE

SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED
NONE

METHOD

THE INTERVAL SIZE IS CALCULATED FROM THE GIVEN INFORMATION OR OPTIONALLY FROM THE MINIMUM AND MAXIMUM VALUES FOR VARIABLE NOVAR. THE FREQUENCIES AND PERCENT FREQUENCIES ARE THEN CALCULATED ALONG WITH SUMMARY STATISTICS.
THE DIVISOR FOR STANDARD DEVIATION IS ONE LESS THAN THE

```

.....
SUBROUTINE STAT(UBO,FREQ,PCT,STATS,NO,NV)
DIMENSION UBO(1),FREQ(1),PCT(1),STATS(1)
DIMENSION WBO(3)
DC 5 I=1,2
5 WBO(I)=UBO(I)

```

CALCULATE MIN AND MAX

```

VMIN=1.0E75
VMAX=-1.0E75
REHIN 9
DC 30 J=1,NO
READ(5)SPT
10 IF(SPT-VMIN) 15,20,20
15 VMIN=SPT
20 IF(SPT-VMAX) 30,30,25
25 VMAX=SPT
30 OCNTITLE
STATS(4)=VMIN
STATS(5)=VMAX

```

DETERMINE LIMITS

```

IF(UBO(1)-UBO(3)) 40,35,40
35 UBO(1)=VMIN
UBO(3)=VMAX
40 INN=UBO(2)

```

CLEAR OUTPUT AREAS

```

DC 45 I=1,INN
FREQ(I)=0.0
45 PCT(I)=0.0
DC 50 I=1,3
50 STATS(I)=0.0

```

CALCULATE INTERVAL SIZE

```

SINT=ABS((UBO(3)-UBO(1))/(UBO(2)-2.0))

```

TEST SUBSET VECTOR

```

SCHT=0.0
REHIN 9
DC 75 J=1,NO
READ(5)SPT
55 SCHT=SCHT+1.0

```

DEVELOP TOTAL AND FREQUENCIES

```

STATS(1)=STATS(1)+SPT
STATS(2)=STATS(2)+SPT*SPT
TEMP=LEO(1)-SINT
INTX=INN-1
DC 60 I=1,INTX
TEMP=TEMP+SINT
IF(SPT-TEMP) 70,60,60
60 OCNTITLE
IF(SPT-TEMP) 75,65,65
65 FREQ(INN)=FREQ(INN)+1.0
GC TO 75

```

75 CONTINUE
IF (SCNT) 79, 105, 79

CALCULATE RELATIVE FREQUENCIES

79 DO 80 I=1, INN
80 PCT(I)=FREQ(I)*100./SCNT

CALCULATE MEAN AND STANDARD DEVIATION

IF (SCNT-1.0) 85, 85, 90
85 STATS(2)=STATS(1)
STATS(3)=0.0
GO TO 95
90 STATS(2)=STATS(1)/SCNT
STATS(3)=SQRT(AES((STATS(3)-STATS(1)*STATS(1)/SCNT)/(SCNT-1.0)))
95 DO 100 I=1, 3
100 UEC(I)=WBC(I)
105 RETURN
END

SUBROUTINE HIST

PURPOSE

PRINT A HISTOGRAM OF FREQUENCIES VERSUS INTERVALS

USAGE

CALL HIST(NU, FREQ, IN)

DESCRIPTION OF PARAMETERS

NU - HISTOGRAM NUMBER (3 DIGITS MAXIMUM)

FREQ - VECTOR OF FREQUENCIES

IN - NUMBER OF INTERVALS AND LENGTH OF FREQ (MAX IS 20)
FORMALLY, FREQ(1) CONTAINS THE FREQUENCY SMALLER THAN
THE LOWER BOUND AND FREQ(IN) CONTAINS THE FREQUENCY
LARGER THAN THE UPPER BOUND

REMARKS

FREQUENCIES MUST BE POSITIVE NUMBERS

SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED

NONE

METHOD

THE LARGEST FREQUENCY IS DETERMINED AND SCALING IS USED
IF REQUIRED

SUBROUTINE HIST(NU, FREQ, IN)
DIMENSION JOUT(20), FREQ(20)

1 FORMAT(6H, EACI, A1, 8H EQUALS, I2, 7H POINTS, /)
2 FORMAT(I6, 4X, 20(4X, A1))
3 FORMAT(9H2 INTERVAL, 4X, 19(I2, 3X), I2)
4 FORMAT(1H1, 479, 11H HISTOGRAM, I3)
5 FORMAT(10H0 FREQUENCY, 20I5)
6 FORMAT(6H CLASS)
7 FORMAT(113H)
1
8 FORMAT(1H)

10 FORMAT(1H*)

DATA K/1H*, FOTH/11 /

PRINT TITLE AND FREQUENCY VECTOR

WRITE(6,4) NO

DC 12 I=1,IN

12 JOUT(I)=FFREQ(I)

WRITE(6,5)(JOUT(I),I=1,IN)

WRITE(6,7)

FIND LARGEST FREQUENCY

FMAX=0.0

DC 20 I=1,IN

IF(FREQ(I)-FMAX) 20,20,15

15 FMAX=FREQ(I)

20 CONTINUE

SCALE IF NECESSARY

JSCALE=1

IF(FMAX-50.0) 40,40,30

30 JSCALE=(FMAX+40.2)/50.0

WRITE(6,1)K,JSCALE

CLEAR OUTPUT AREA TO BLANKS

40 DC 50 I=1,IN

50 JOUT(I)=NCTH

LOCATE FREQUENCIES IN EACH INTERVAL

MAX=FMAX/FLOAT(JSCALE)

DC 80 I=1,MAX

X=MAX-(I-1)

DC 70 J=1,IN

IF(FREQ(J)/FLOAT(JSCALE)-X) 70,60,60

60 JOUT(J)=K

70 CONTINUE

IX=X*FLOAT(JSCALE)

PRINT LINE OF FREQUENCIES

80 WRITE(6,2)IX,(JOUT(J),J=1,IN)

GENERATE CONSTANTS

DC 90 I=1,IN

90 JOUT(I)=I

PRINT INTERVAL NUMBERS

WRITE(6,7)

WRITE(6,3)(JOUT(J),J=1,IN)

WRITE(6,6)

RETURN

END

*** SKIP TO CHANNEL 01 ***

PŘÍLOHA Č. 2

Experimentální určování drsnosti povrchu

VYST. LITEREC
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA OPRÁVENÍ A MONTÁŽE

MATEMATICKÝ MODEL BRUSENÍ

DATA:

EXPER 1. 5

ISE 631
ASE 0.000010
HSE 0.000100

DE 1.243000
ENE 40.66856
HE 0.000100
ZLFE 2.00
V000 0.10000
I000 7

GLSTR 0.000000
O110 1.971904
CH10 0.000000
SIGN00 0.571000

ONVBA 0.1000-04
I000 100

TEST1 3
TEST2 3
TEST3 0

VÝPOČET DEKREŠTÍ POVRCHU

J0000 2
GRAF1 1
J000 1
GRAF2 2

VÝSLEDKOVÉ KONSTANTY:

UDÁNE O DEKREŠTÍ POVRCHU

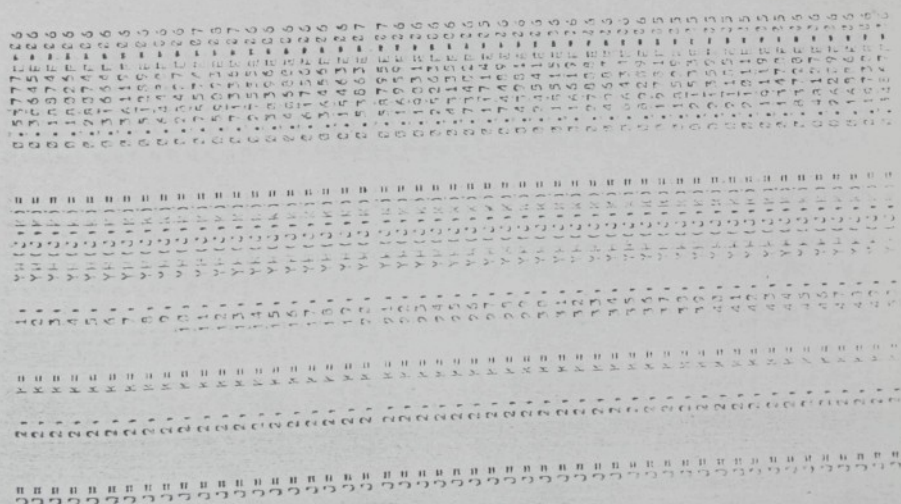
HODNOTY DEKREŠTÍ POVRCHU VE ZVLOHNE POKRIVCE

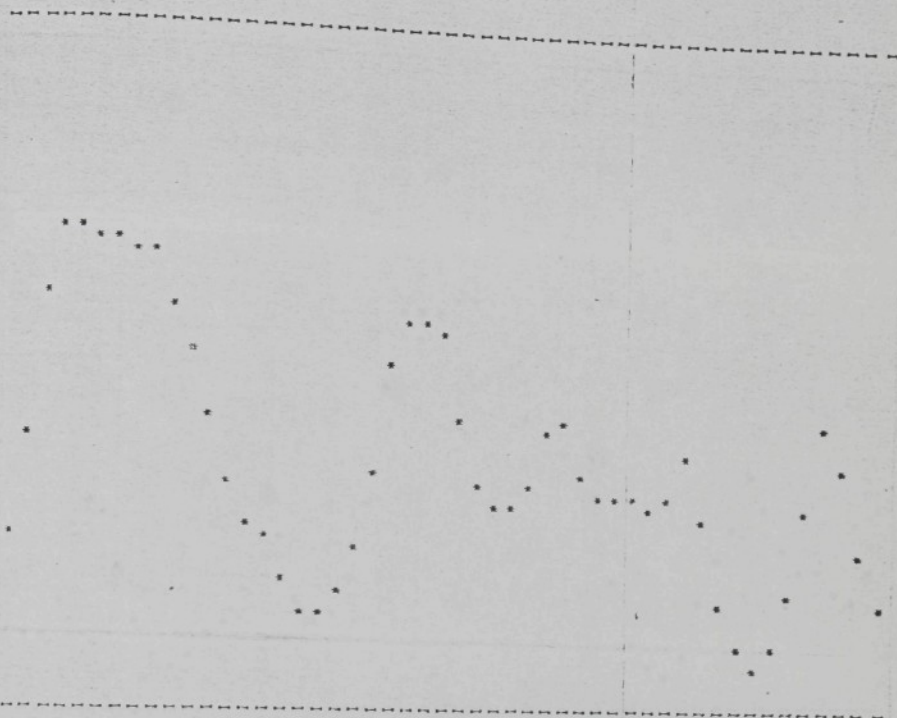
MOLEK. ROVINOVANÍ: POVRCHU
POČTA SPECIFIČNÍ DEKREŠTÍ
STŘEDNÍ KONTAKTÁRNÍ DEKREŠTÍ
MAXIMÁLNÍ VÝŠK DEKREŠTÍ

ISE
ASE
HSE
DE
ENE
HE
ZLFE
V000
I000

0.751780
0.404100
0.000000
0.571000

VYSKOVÉ SLEŽENÍCE ROHU A PROFIL PVRCHU





1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

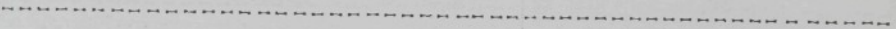
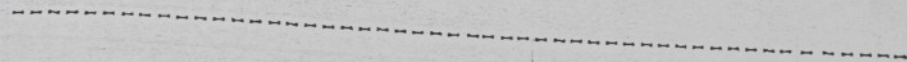
Y-13	Y-14	Y-15	Y-16	Y-17	Y-18	Y-19	Y-20	Y-21	Y-22	Y-23	Y-24	Y-25	Y-26	Y-27	Y-28	Y-29	Y-30	Y-31	Y-32	Y-33	Y-34	Y-35	Y-36	Y-37	Y-38	Y-39	Y-40	Y-41	Y-42	Y-43	Y-44	Y-45	Y-46	Y-47	Y-48	Y-49	Y-50	Y-51	Y-52	Y-53	Y-54	Y-55	Y-56	Y-57	Y-58	Y-59	Y-60	Y-61	Y-62	Y-63	Y-64	Y-65	Y-66	Y-67	Y-68	Y-69	Y-70	Y-71	Y-72	Y-73	Y-74	Y-75	Y-76	Y-77	Y-78	Y-79	Y-80	Y-81	Y-82	Y-83	Y-84	Y-85	Y-86	Y-87	Y-88	Y-89	Y-90	Y-91	Y-92	Y-93	Y-94	Y-95	Y-96	Y-97	Y-98	Y-99	Y-100	Y-101	Y-102	Y-103	Y-104	Y-105	Y-106	Y-107	Y-108	Y-109	Y-110	Y-111	Y-112	Y-113	Y-114	Y-115	Y-116	Y-117	Y-118	Y-119	Y-120	Y-121	Y-122	Y-123	Y-124	Y-125	Y-126	Y-127	Y-128	Y-129	Y-130	Y-131	Y-132	Y-133	Y-134	Y-135	Y-136	Y-137	Y-138	Y-139	Y-140	Y-141	Y-142	Y-143	Y-144	Y-145	Y-146	Y-147	Y-148	Y-149	Y-150	Y-151	Y-152	Y-153	Y-154	Y-155	Y-156	Y-157	Y-158	Y-159	Y-160	Y-161	Y-162	Y-163	Y-164	Y-165	Y-166	Y-167	Y-168	Y-169	Y-170	Y-171	Y-172	Y-173	Y-174	Y-175	Y-176	Y-177	Y-178	Y-179	Y-180	Y-181	Y-182	Y-183	Y-184	Y-185	Y-186	Y-187	Y-188	Y-189	Y-190	Y-191	Y-192	Y-193	Y-194	Y-195	Y-196	Y-197	Y-198	Y-199	Y-200	Y-201	Y-202	Y-203	Y-204	Y-205	Y-206	Y-207	Y-208	Y-209	Y-210	Y-211	Y-212	Y-213	Y-214	Y-215	Y-216	Y-217	Y-218	Y-219	Y-220	Y-221	Y-222	Y-223	Y-224	Y-225	Y-226	Y-227	Y-228	Y-229	Y-230	Y-231	Y-232	Y-233	Y-234	Y-235	Y-236	Y-237	Y-238	Y-239	Y-240	Y-241	Y-242	Y-243	Y-244	Y-245	Y-246	Y-247	Y-248	Y-249	Y-250	Y-251	Y-252	Y-253	Y-254	Y-255	Y-256	Y-257	Y-258	Y-259	Y-260	Y-261	Y-262	Y-263	Y-264	Y-265	Y-266	Y-267	Y-268	Y-269	Y-270	Y-271	Y-272	Y-273	Y-274	Y-275	Y-276	Y-277	Y-278	Y-279	Y-280	Y-281	Y-282	Y-283	Y-284	Y-285	Y-286	Y-287	Y-288	Y-289	Y-290	Y-291	Y-292	Y-293	Y-294	Y-295	Y-296	Y-297	Y-298	Y-299	Y-300	Y-301	Y-302	Y-303	Y-304	Y-305	Y-306	Y-307	Y-308	Y-309	Y-310	Y-311	Y-312	Y-313	Y-314	Y-315	Y-316	Y-317	Y-318	Y-319	Y-320	Y-321	Y-322	Y-323	Y-324	Y-325	Y-326	Y-327	Y-328	Y-329	Y-330	Y-331	Y-332	Y-333	Y-334	Y-335	Y-336	Y-337	Y-338	Y-339	Y-340	Y-341	Y-342	Y-343	Y-344	Y-345	Y-346	Y-347	Y-348	Y-349	Y-350	Y-351	Y-352	Y-353	Y-354	Y-355	Y-356	Y-357	Y-358	Y-359	Y-360	Y-361	Y-362	Y-363	Y-364	Y-365	Y-366	Y-367	Y-368	Y-369	Y-370	Y-371	Y-372	Y-373	Y-374	Y-375	Y-376	Y-377	Y-378	Y-379	Y-380	Y-381	Y-382	Y-383	Y-384	Y-385	Y-386	Y-387	Y-388	Y-389	Y-390	Y-391	Y-392	Y-393	Y-394	Y-395	Y-396	Y-397	Y-398	Y-399	Y-400	Y-401	Y-402	Y-403	Y-404	Y-405	Y-406	Y-407	Y-408	Y-409	Y-410	Y-411	Y-412	Y-413	Y-414	Y-415	Y-416	Y-417	Y-418	Y-419	Y-420	Y-421	Y-422	Y-423	Y-424	Y-425	Y-426	Y-427	Y-428	Y-429	Y-
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

[illegible][illegible]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]



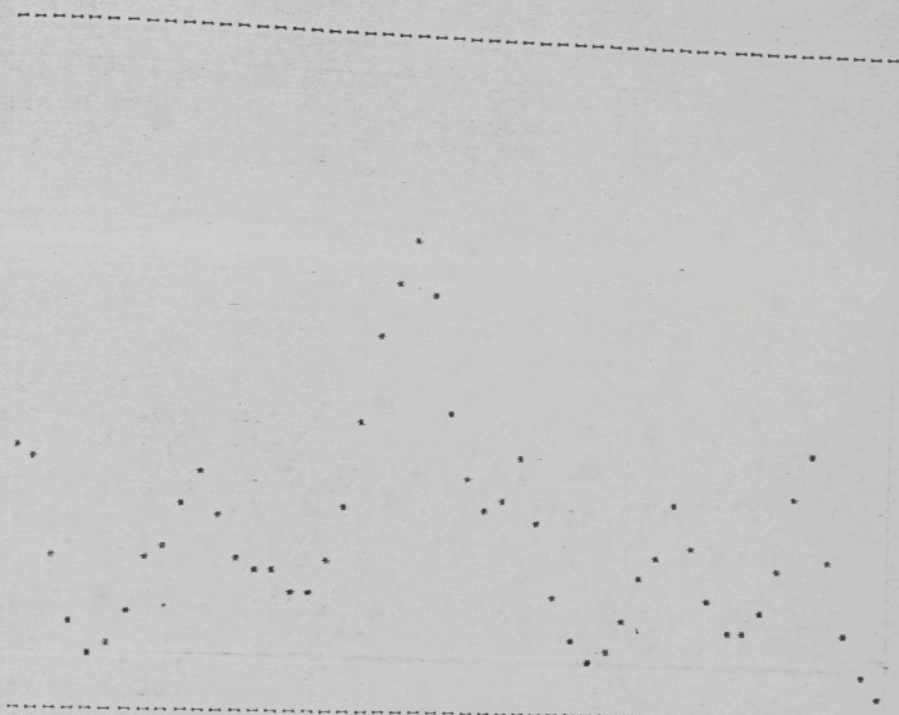
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85															

[illegible]

0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100
 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200
 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300
 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400
 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500
 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600
 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700
 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800
 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900
 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000
 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 103

[illegible][illegible]

[illegible]

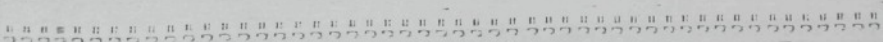
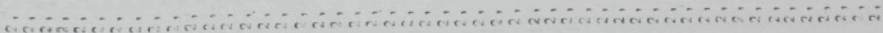
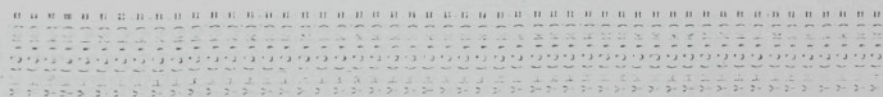
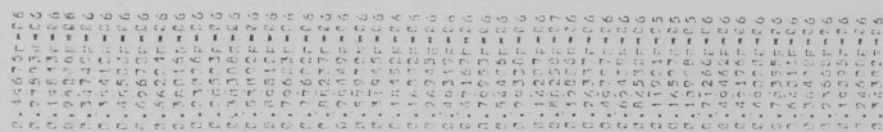
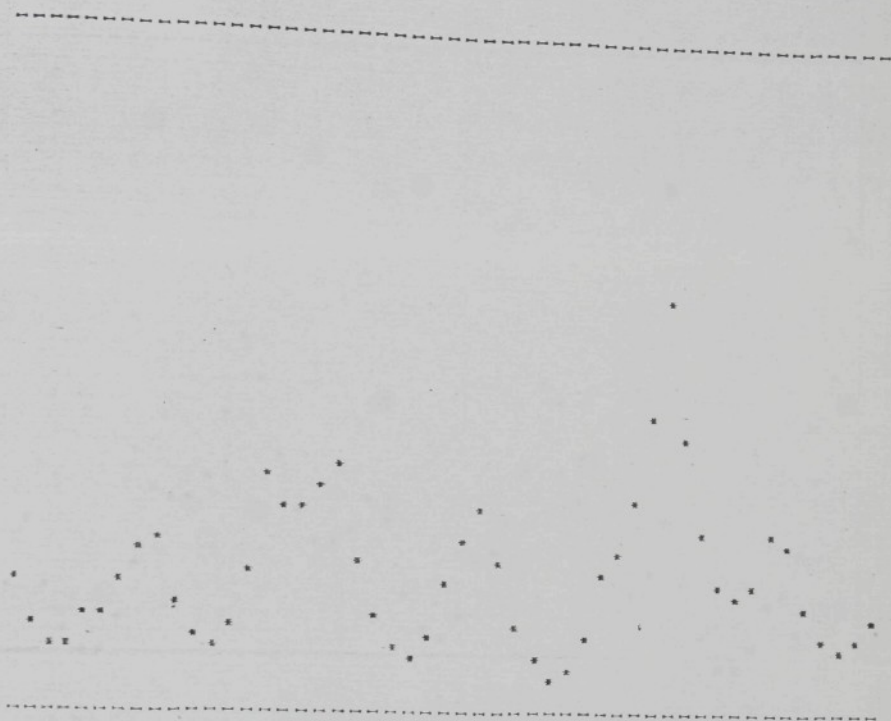
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

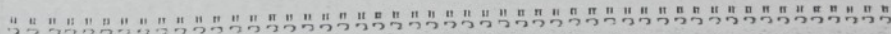
331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350.

[illegible]

01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 10

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100





| | |
|-----------------------------------|-------|
| CELKOVÁ DEJINOST POUVEČHU | |
| CELKOVÝ PŮST PŘEDPOUŠENÍ POUVEČHU | : PPO |
| CELKOVÁ STŘEDNÍ ARITH. NEPOUŠENÍ | : RAO |
| CELKOVÁ MAX. VÝSKA NEPOUŠENÍ | : MAX |

PŘÍLOHA Č. 3

Experimentální určování tangenciální složky síly
při broušení

*SST LIBRNIC
 *ALULTA STICOMI
 *ATERA OPIABENI A MOUTPE

 *ATENATICKY MOPEL PCUSRNI

DATA:

EXTER : 26

| | | | |
|--------|----------|--------|---------|
| IAE | 401 | IN | 12 |
| AS | 0.00005 | BS | 0.00050 |
| DE | 0.26000 | ALFA | 2.00000 |
| EN | 50.00000 | VOD | 0.17450 |
| MS | 0.00000 | IPRO | 1 |
| ALSTIA | 0.00000 | AMAL | 0.00000 |
| ENIL | 1.02100 | SIGMA1 | 0.3900 |

| | | | |
|-------|-----------|--------|-----------|
| GM12 | 0.00000 | SIGMA2 | 0.9710-06 |
| OPYDA | 0.1000-04 | IEND | 100 |
| TEST1 | 0 | TEST2 | 0 |
| TEST3 | 0 | TEST4 | 0 |

VYPOCEY SILY PFI BFOLSENI

| | | | |
|--------|-----------|--------|-----------|
| UNSI | 0.00170 | KONST1 | 0.1700 10 |
| KONST2 | 0.1700 00 | KONST3 | 0.2000 01 |
| KONST4 | 0.1000 01 | | |

VÝSLEDNÉ PŘEHLEDY:
.....

UDAJE C PŮTU AKTIVNÍCH ŽEN

| | | |
|------------------------------------|--------|---|
| CELKOVÝ POČET ŽEN PŮLEŽÍ DOVOZU : | HERC | 1 |
| CELKOVÝ POČET AKTIVNÍCH ŽEN : | 1000 | |
| POČET AKTIVNÍCH ŽEN V PROTENTECH : | 10.139 | |

UDAJE C PŮLEŽU TRISKY

STATISTICKÉ UDÁJE
CHARAKTERIZUJÍCÍ PŮLEŽU TRISKY

| | |
|-----------------------|-------------|
| POČET PŮLEŽU TRISKY : | 0.400000-07 |
| POČET PŮLEŽU TRISKY : | 0.207000-10 |
| STANDARDNÍ ODOLNOST : | 0.300000-10 |
| MINIMÁLNÍ ODOLNOST : | 0.2 |
| MAXIMÁLNÍ ODOLNOST : | 0.400000-09 |

HISTOGRAM PŮLEŽU TRISKY

VLEVO PAV. POH. P. TRISKY
VPRÁVO LÍN. POH. P. TRISKY

***** SKIP TO CHANNEL 01 *****

LOAD C SILE PFI PROLEST

PORT FORTICUSMI PAFPUJ : IPP R
AZIAL, CUY POTAGE DE MOYCE ONROCKU : U(IPP) R
VELIMOST SILY PFI PROLEST : F(IPP) R
PORT APINIVIO TFI V ZAFPU : IZ(IPP) R

1
0.1568E+02
0.4722E+01

MOLEO VYCCU

* * * * * SHIP TO CHANNEL 01 * * * * *

* * * * *