

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Habilitační práce

SIMULACE PROCESU ROVINNÉHO BROUŠENÍ

SIMULATION OF PLANE GRINDING PROCESS

Ing. Jan Jersák, CSc.

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



Počet stran : 147

Počet příloh : 3

Počet obrázků : 56

Počet tabulek : 16

září 2002

KOH

U362

SIMULACE PROCESU ROVINNÉHO BROUŠENÍ

ANOTACE :

V habilitační práci je prezentován původní simulační model procesu rovinného broušení. Interakce mezi nástrojem a obrobkem je nahrazena otevřeným výpočtovým algoritmem, který se zpracovává na osobním počítači. Validita navrženého matematického modelu byla podrobně experimentálně ověřována. Zejména při vyšetřování vlivu řezných podmínek na řezné síly bylo dosaženo příznivé míry shody mezi výsledky reálného a simulovaného broušení. Hlavním přínosem metody simulace technologie broušení je, že umožňuje komplexní sledování vlivu různých technologických veličin na proces obrábění, aniž by bylo třeba reálně brousit.

Klíčová slova : Obrábění, broušení, modelování, simulace

SIMULATION OF PLANE GRINDING PROCESS

ANNOTATION :

In this habilitation work there is presented original simulation model of the plane grinding process. Interaction among tools and work piece is substituted by an open computational algorithm, which is processed on personal computer. Validity of that suggested mathematical model was in detail experimentally checked. Especially during an investigation of the influence of cutting conditions on cutting force were favourable conformity reached according to real and simulated grinding. Main contribution of the method of simulation of grinding technology is, that it enables complex following of the influence of different technological quantity on the cutting process, without need of real grinding.

Key words : Machining, grinding, modelling, simulation

Počet stran : 147

Počet obrázků : 56

Počet příloh : 3

Počet tabulek : 16

Řešitel práce : Ing. Jan Jersák, CSc.

Dokončeno : září 2002

	str.
Seznam použitých symbolů a zkratk	5
1. ÚVOD	8
2. MODELOVÁNÍ REÁLNÝCH SYSTÉMŮ	11
2.1. Fyzikální (materiální) modely a jejich specifické rysy	12
2.2. Matematické (výpočtové) modely a jejich specifické rysy	14
3. VÝZKUM A MODELOVÁNÍ PROCESU BROUŠENÍ	20
3.1. Broušení a jeho postavení v současné strojírenské výrobě	20
3.2. Poznatky o vývoji a výzkumu v oblasti obrábění broušením	20
3.3. Zkoumání reálného procesu broušení a trendy vývoje	22
3.4. Modelování procesu broušení a trendy vývoje	30
3.4.1. Fyzikální modely procesu broušení	30
3.4.2. Matematické modely procesu broušení	34
4. SIMULAČNÍ MODEL PROCESU BROUŠENÍ	39
4.1. Princip metody prostorové simulace	39
4.2. Realizace simulačního modelu procesu broušení	46
4.2.1. Struktura obecných částí programu	46
4.2.2. Popis programu	50
4.2.3. Základní program - hlavní část	50
4.2.4. Základní program - varianty výpočtu	54
4.3. Obsluha programu	75
4.3.1. Zadávané veličiny	75
4.3.2. Fáze výpočtu	76
4.3.3. Výstupní soubory	78
5. METODIKA OVĚŘOVÁNÍ SIMULAČNÍHO MODELU	79
5.1. Metodika ověřování prostorové simulace procesu broušení	79
5.1.1. Úplný faktorový experiment	81
5.1.2. Statistické vyhodnocování experimentů	85
5.1.3. Porovnání výsledků experimentů při reálném a simulovaném broušení	86
5.2. Experimentální pracoviště	89
5.2.1. Rovinná bruska	89
5.2.2. Měření sil a parametrů drsnosti povrchu	90
5.3. Výpočetní technika	93
5.4. Postup výpočtů při ověřování modelu	93

6.	VÝSLEDKY A HODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	99
6.1.	Metoda postupné změny nezávisle proměnné	99
6.1.1.	Řezná síla při broušení oceli 11 375	99
6.1.2.	Drsnost povrchu při broušení oceli 12 050.4	101
6.2.	Metoda vícefaktorového experimentu	104
6.2.1.	Řezná síla při broušení duralu, oceli 12 050 a oceli 14 109.4	104
6.2.2.	Drsnost povrchu oceli 14 109. 4 po broušení kotoučem 99BA80L8V a 99BA46K8V	114
6.3.	Další vypočítané údaje	128
7.	ZÁVĚR	131
7.1.	Shrnutí výsledků a další směry rozvoje matematického modelu	131
7.2.	Přínosy simulace procesu broušení	135
	Seznam použité literatury	139
	Seznam příloh	147

Seznam použitých symbolů a zkratek

a	obecná konstanta - parametr	[...]
$a_1, b_1, c_1,$	konstanta empirického vztahu	[1]
$a_2, a_3, b_2, b_3,$		
$C_2, C_3,$	exponenty empirického vztahu	[1]
a_d	radiální záběr oronávacího nástroje	[mm]
a_e	pracovní radiální záběr	[mm]
a_{eNAST}	nastavený pracovní radiální záběr	[mm]
a_{ob}	teplotní vodivost materiálu obrobku	[$m^2.s^{-1}$]
a_s	šířkový úsek vzorku	[m], [mm]
a_{STR}	tloušťka třísky	[mm]
A	obecná poloha zrna brusiva	-
A_D	průřez nedeformované třísky	[mm^2]
A_X	šířka simulovaného brousícího kotouče	[mm]
b	neznámé parametry - řezné podmínky (faktory)	[...]
b_s	délkový úsek vzorku	[m]
B	obecná veličina	[...]
C	tuhost dynamometru	[$N/\mu m$]
C_1	konstanta související s délkou šířkového úseku vzorku	[mm]
D, d_s	průměr brousícího kotouče	[m], [mm]
f	vlastní frekvence dynamometru	[Hz]
f_{BROU}	faktor procesu broušení	[1]
F_a	aktivní složka síly	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_{c1}	řezná síla připadající na jedno zrno brusiva	[N]
F_c'	řezná síla na jednotku šířky řezu	[N]
F_{cN}	kolmá řezná síla	[N]
F_f	síla posuvu; tangenciální složka síly	[N]
F_{fN}	síla kolmá na sílu posuvu	[N]
i	počet vyjiskřovacích zdvihů	[1]
I_A	počet podélných rovin simulovaného obrobku	[1]
I_B	počet příčných rovin simulovaného obrobku	[1]
J	obecná příčná rovina	[1]
k	počet faktorů (řezných podmínek)	[1]
k_c	měrná řezná síla (řezná síla na jednotku plochy řezu)	[MPa]
$k_{c1.1}$	měrná řezná síla pro jednotkovou tloušťku třísky	[MPa]
K	obecná podélná rovina	[1]
K_{BROU}	korekční faktor rychlosti broušení	[1]
l	délka broušené součásti	[mm]
l	základní délka	[mm]
L_{STR}	střední vzdálenost zrn na obvodu kotouče	[mm]
m	počet neznámých konstant – parametrů	[1]
n	celkový počet měření (pokusů)	[1]
n, n_S	otáčky brousícího kotouče	[s^{-1}]
n_{aktiv}	celkový počet aktivních zrn	[1]
n_{celk}	celkový počet namodelovaných zrn	[1]

n_d	frekvence otáčení orovnávacího nástroje	[s ⁻¹]
$n (\beta, \delta)$	složka pohybu	[m], [mm]
N_{aktiv}	procentuální podíl aktivních zrn	[%]
q	plošná intenzita tepla	[W.m ⁻²]
r	výběrový korelační koeficient	[1]
R_a	průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu	[μm]
R_s	poloha střední čáry profilu drsnosti	[m]
R_t	celková výška profilu	[μm]
R_z	největší výška profilu	[μm]
s	výběrová směrodatná odchylka	[...]
S_1	naměřená hodnota průřezu rýhy	[mm ²]
S_2	naměřená hodnota průřezu valu	[mm ²]
$t_{0,n-1}$	hodnota kritického rozdělení	[1]
u	vzdálenost vertikální osy brousícího kotouče od dané příčné roviny obrobku	[m]
u	exponent Kienzleho vztahu	[1]
v_c	řezná rychlost	[m.s ⁻¹]
v_{frd}	rychlost přísuvu orovnávacího nástroje	[mm.s ⁻¹]
v_{ft}	tangenciální rychlost posuvu stolu brusky	[m.min ⁻¹], [m.s ⁻¹]
$v (\beta, \delta)$	složka pohybu	[m], [mm]
W	náhodné číslo s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti v intervalu < 0,1 >	[1]
x	hodnoty nezávisle proměnné	[...]
X	souřadnice vrcholu zrna brusiva na povrchu brousícího kotouče v axiálním směru	[mm]
y	hodnoty závisle proměnné získané měřením	[...]
Y	souřadnice polohy vrcholu zrna brusiva na povrchu brousícího kotouče	[mm]
Y_H	výška profilu vzorku v daném bodě	[m], [mm]
Y_{H2}	výška od základny vzorku k zrnu brusiva nad konkrétním bodem	[m], [mm]
z	hloubka pod povrchem obrobku	[m], [mm]
Z	souřadnice vrcholu zrna brusiva od povrchu brousícího kotouče v radiálním směru	[mm]
Z_{MAX}	výška aktivní vrstvy brousícího kotouče	[mm]
α	exponent charakterizující rozložení zrn brusiva	[1]
α	kritická hodnota určitého rozdělení pravděpodobnosti	[1]
β	úhel, který svírá vertikální osa brousícího kotouče a průvodič vrcholu zrna připraveného k řezání	[rad]
δ	úhel sevřený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna, který se dotýká příčné roviny obrobku	[rad]
Θ	nárůst teploty v obrobku	[°C]
κ_s	vrcholový úhel břitu zrna brusiva	[rad]
λ_{ob}	tepelná vodivost materiálu obrobku	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	poloměr zaoblení břitu zrna brusiva	[mm]
τ	časový okamžik pro určování složky síly	[s]
T	vyšetřovaný čas při určování teploty	[s]
T_0	doba tepelného zatížení	[s]
φ	úhel sevřený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem vrcholu zrna brusiva	[rad]

1. Úvod

Využívání modelů a modelování je člověku vlastní již od starověku. První modely vytvářeli pravděpodobně dávní umělci, kteří pro svá díla, dříve než je vytvořili ve skutečnosti, zhotovovali řadu miniaturních předloh a variantních návrhů, z nichž ty nejlepší se staly vzorem pro skutečné dílo. Tomu odpovídá i původ slova model, který pochází z latinských slov „modus“, jež značí kopii, vzor, a „modulus“, což vyjadřuje míru, takt, rytmus (Janiček, 1998).

V oblasti techniky začaly být pomocné objekty - modely používány ve větším rozsahu přibližně od počátku 18. století. Tyto modely často sloužily k funkčním zkouškám a ověřování technických řešení, které byly z nejrůznějších důvodů prakticky realizovány až podstatně později. Tak byl např. již v roce 1709 třiaadvacetiletým brazilským jezuitským páterem B. L. de Gusmao v paláci portugalského krále předveden vzlet modelu balónu naplněného horkým vzduchem, což bylo o více než sedmdesát let dříve, než se pomocí velkého balónu z plátna a papíru totéž podařilo živým tvorům a člověku (Paturi, 1993). Dalším příkladem technického díla, kterému předcházelo vytvoření modelu, je návrh železničního mostu Britania v Anglii v roce 1840. S použitím modelu byly zjištěny vážné nedostatky původně navrhované konstrukce, které byly odstraněny zvýšením tuhosti horní části průřezu a svislými žebry na bočních stěnách mostu. Následně se podařilo opět s použitím jiného modelu nálezt zcela odlišné řešení se žebry skloněnými pod úhlem 45° , čímž se únosnost konstrukce mostu zvýšila o 70% oproti případu s vertikálními žebry.

V současnosti se modely uplatňují různých oblastech vědy a techniky. Důležitým aspektem modelování je zpravidla požadavek, aby se s modelem dalo experimentovat. Proces experimentování, ve kterém zkoumáme vlastnosti modelu, případně jeho interakci s okolním prostředím, je často jediný možný způsob, jak získat alespoň kvalitativně nové poznatky o chování analyzovaného reálného nebo projektovaného systému (Neuschl, 1988). Modelování se uplatňuje například v případech zkoumání struktur a systémů, které nelze rozebrat a přímo vyhodnocovat (průběh parametrů jaderného reaktoru, zkoumání složitých biologických struktur ap.).

Významná etapa rozvoje modelování je spojena s rozvojem teorie systémů, kybernetiky a počítačů, je to etapa výpočtového, počítačově orientovaného modelování. Sestrojováním počítačích strojů se matematikové zabývali již stovky let, ale te-

prve v období po roce 1930, kdy byl postaven první velký elektromechanický analogový počítač, a následně v roce 1943, kdy byl na pensylvánské univerzitě uveden do provozu první samočinný elektronický počítač ENIAC, byly vytvořeny podmínky pro rozvoj nových přístupů k řešení problémů s použitím výpočetní techniky. Nové metody řešení matematických úloh se rychle uplatnily v různých oborech výzkumu, projektování i řízení. Jejich rozšíření souvisí nejen s rychlým rozvojem výpočetní techniky, ale i programového vybavení počítačů. Nezanedbatelnou předností použití výpočetní techniky při modelování je bezchybné provádění i složitých výpočtů mnohonásobně větší rychlostí, než jakou je schopen člověk dosáhnout při použití klasických výpočtových postupů.

Postupně se metody počítačového modelování uplatnily též v technických vědách. Oborem, v němž počítačové modely a simulace sehrály historicky rozhodující a nezastupitelnou roli, je kosmonautika. Lety všech typů umělých satelitů bylo nemyslitelné připravovat bez jejich dokonalého zvládnutí na počítačovém modelu, protože vzhledem k vysokým nákladům na kosmické projekty a možnosti ohrožení lidských životů nepřipadalo zde klasické experimentování vůbec v úvahu.

Po zveřejnění prvních úspěchů v kosmonautice vzrostl velmi rychle zájem o využití těchto metod v dalších oborech vědy a technologie. Jednou z oblastí výzkumu, kde se jeví použití výše uvedených metod přínosné, je také dokončovací obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu. Podíl dokončovacích operací vykazuje vzestupnou tendenci. Příčinou je zejména to, že se ve strojírenské výrobě zvyšuje četnost strojních součástí s vysokou přesností tvaru a rozměrů, jakostí povrchu, s vyššími požadavky na trvanlivost a odolnost proti opotřebení. Nejrozšířenějším způsobem dokončovacího obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu je broušení brousicími kotouči. Význam procesu broušení je především v tom, že představuje závěrečnou fázi výroby strojních součástí. Technologie dokončovacích operací určují nejen jakost součástí, ale důležitou měrou ovlivňují též výrobní náklady. Proto je velmi důležité, aby se v této fázi výroby snížila zmetkovitost na minimum. Uplatnění metod modelování v tomto oboru je přínosné zejména proto, že při obrábění brousicími nástroji jsou podmínky při vnikání břitu nástroje do materiálu obrobku, během oddělování třísky a při vytváření nového povrchu obráběné součásti ovlivňovány velkým množstvím náhodných veličin. Použití výpočetní techniky umožňuje využívat kvantitativně odlišné přístupy pro zkoumání a analýzu těchto procesů.

Aby bylo možno využít potenciál, který skýtají metody modelování, je třeba zpracovat odpovídající matematický model. Autorem byl originální matematický model procesu broušení v jazyku automatického programování FORTRAN vytvořen již dříve (Jersák, 1988). K realizaci výpočtových algoritmů bylo v dřívější fázi řešení třeba použít sálový počítač, např. EC 1033. Prezentovaná práce navazuje na dřívější výsledky a její cíle lze shrnout do následujících bodů:

1. Navrhnout a vytvořit nový, moderně pojatý simulační model procesu rovinného broušení obvodem kotouče vhodný pro aplikaci na osobním počítači.
2. Vyjádřit obecné závislosti mezi rozhodujícími faktory procesu broušení a prověřit výpočtové algoritmy s cílem určit pro různé vstupní veličiny vybrané výstupní parametry.
3. Experimentálně ověřit správnost koncepce simulačního modelu pro konkrétní případy rovinného broušení a s pomocí statistických metod vhodným způsobem porovnat výsledky simulovaného a reálného broušení.
4. Vytvořit předpoklady pro teoretické využití metody simulace procesu broušení a vyšetřit podmínky pro praktickou aplikaci metody simulace procesu broušení.

V předložené práci bude originální matematický model procesu broušení prezentován spolu s výsledky experimentů prováděných na rovinné brusce BPH 20 a s výsledky simulace procesu broušení na číslicovém počítači. V závěrečné části práce budou naznačeny další směry rozvoje matematického modelu.

2. Modelování reálných systémů

Pod pojmem modelování rozumíme cílevědomou činnost, která slouží k získání informací o jednom systému (originál) pomocí jiného systému (modelu). Originálem, reálným objektem, bývá určitá část přírody, která je předmětem zkoumání. Při studiu reálných objektů se většinou zajímáme pouze o jisté vztahy. Objekty totiž velmi často není možné popsat v celé složitosti, a proto bývá pozornost zaměřena pouze na některé jejich vlastnosti. Tím na určitém reálném objektu definujeme určitý systém (Douša, 1990).

Systém je tvořen účelově definovaným souborem prvků, mezi nimiž existují určité vztahy. Soubor prvků, které tvoří základní nedělitelnou část systému, se může v průběhu času měnit. Systémy je možno třídit podle různých hledisek, nejčastěji na:

- a) otevřené nebo uzavřené v závislosti na tom, zda u nich dochází ke změně struktury, tj. zda nějaké prvky během dynamického děje vznikají nebo zanikají,
- b) deterministické nebo stochastické v závislosti na tom, zda lze, resp. nelze určit jednoznačné pravidlo pro chování prvků systému,
- c) dynamické nebo statické v závislosti na tom, zda obsahují nebo neobsahují prvky, jejichž chování závisí na dřívějších stavech či nikoliv,
- e) diskrétní nebo spojitý, resp. kombinované v závislosti na tom, zda je systém možno popsat prostřednictvím diskrétních nebo spojitých, resp. diskrétních a spojitých procesů.

Rozvoj lidského poznání a nutnost řešit složité problémy vedl ke vzniku teorie systémů a systémového přístupu, který má dnes nezastupitelné místo prakticky ve všem, co člověk činí. Teorie systémů je teoreticko-filozofická vědní disciplína, která se na obecné úrovni a komplexně zabývá vším, co souvisí s existencí, strukturou, vlastnostmi, ovlivňováním a chováním strukturovaných reálných a abstraktních objektů. Teorie systémů dnes představuje strukturovanou vědní disciplínu, jejímiž prvky jsou: kybernetika, operační analýza, systémová analýza, systémové inženýrství, morfologická analýza, inženýrská psychologie a logistika (Janíček, 1998).

Při modelování reálných systémů se používají metody a nástroje, které zprostředkovávají věrný opis reality v tom směru, který je důležitý pro řešení dané úlohy. Model nesmí být příliš složitý, ale je žádoucí, aby postihoval všechny rozhodující čini-

tele reálného systému. Modely v používané v technické praxi lze rozdělit do dvou základních skupin. Modely fyzikální (materiální), které jsou založené především na fyzikální a geometrické analogii s reálným objektem, tvoří první skupinu a druhou skupinu tvoří modely matematické (výpočtové), které vztahy a chování reálného objektu vyjadřují s použitím prostředků matematického aparátu.

2.1. Fyzikální (materiální) modely a jejich specifické rysy

Uvedené modely lze výhodně použít například při vyšetřování vlastností nově navrhované konstrukce, při zkoušení vlastností technologického zařízení nebo při zkoušení modelu letadla v aerodynamickém tunelu. Při přípravě těchto modelů je důležité respektovat zejména požadavky fyzikální a geometrické podobnosti. Existuje několik základních přístupů k tvorbě fyzikálních modelů a nejsou vyloučeny ani kombinace těchto způsobů.

Podobnostní modelování, metoda rozměrové (dimenzionální) analýzy

Ke zkoumání reálných objektů lze využít tzv. teorie podobnosti. Základním zákonem podobnostního modelování je existence tzv. invariantů podobnosti (Janiček, 1998). Vychází se z předpokladu, že fyzikální proces lze vyjádřit jako funkci bezrozměrných parametrů, jejichž počet je roven počtu všech fyzikálních veličin, jež do procesu vstupují. K odvození invariantů podobnosti stačí znát podstatné fyzikální veličiny, na nichž zkoumaný děj závisí. Závislosti těchto podstatných veličin se vyjádří fyzikálními rovnicemi ve formě rozměrové matice. Pokud jsou dva procesy fyzikálně podobné, pak mají společný bezrozměrový popis a jejich odpovídající komplexy invariantů podobnosti jsou stejně veliké. Velkou předností fyzikálních modelů je, že při jejich použití experimentujeme s jevy téže fyzikální podstaty jako ve skutečnosti. Model má shodnou materiální strukturu a je zpravidla geometrickou zmenšeninou zkoumaného objektu. S pomocí modelu se realizuje tzv. podobnostní experiment, jehož cílem je nalezení řešení problému reálného objektu. Obtíže mohou nastat tehdy, když se musí rozhodnout o důležitosti jednotlivých veličin pro sledovaný děj. Nedostatečná znalost modelovaného děje může vést k opomenutí veličiny, jež má pro zkoumaný proces zásadní význam. Nevýhodou je i to, že mnohé fyzikální děje lze touto metodou zpracovat velmi obtížně. Proto má ve složitých případech dimenzionální analýza pouze omezený význam (Gazda, 1973).

Analogové modelování

K modelování v technické praxi se dále používá tzv. materiální analogie. Ta vychází z předpokladu, že fyzikální děje jsou analogické, jestliže mezi nimi existuje matematická podobnost spočívající v tom, že jsou matematicky vyjádřeny stejnou operátorovou rovnicí a stejnými okrajovými podmínkami (Janíček, 1998). Studované procesy je nutno popsat obyčejnými nebo parciálními diferenciálními rovnicemi. Analogické fyzikální děje jsou matematicky izomorfní, tedy lze z chování jednoho fyzikálního děje usuzovat na chování jiného fyzikálního děje a opačně. Důvodem ke vzniku materiální analogie byla ta skutečnost, že operátorové rovnice bývají u některých fyzikálních dějů obtížně řešitelné nebo dokonce neřešitelné. Jestliže u některého z analogických fyzikálních dějů přispěje k řešení operátorové rovnice experiment, pak s využitím izomorfismu lze výsledky experimentu převést na každý další analogický děj. Pro modelování s využitím materiální analogie je charakteristické, že se k popisu problému vybere vhodná teorie a dále se matematicky formuluje operátorová rovnice. Následně se vybere vhodná analogie, tj. vybere se vhodný materiální modelový objekt, který bude sloužit k realizaci experimentů. I když má model oproti zkoumanému objektu odlišnou materiální a strukturní část, musí být splněny podmínky analogie. Pokud jsou tyto podmínky splněny, znamená to, že ačkoliv mají fyzikální procesy, které probíhají u modelu a zkoumaného objektu různou fyzikální podstatu, mají shodný matematický popis. Jsou tedy shodné operátorové rovnice a je shodná i matematická formulace problému. V tomto případě je pak možno z chování modelu jednoznačně usoudit na chování zkoumaného objektu. S pomocí modelu lze pak realizovat tzv. analogový experiment a nalézt řešení problému reálného zkoumaného objektu. Samozřejmě má tato metoda modelování smysl pouze v tom případě, pokud je experimentální určení veličin na modelovém objektu, které jsou potřebné k řešení problémů reálného zkoumaného objektu, snazší než přímé matematické řešení operátorové rovnice popisující problém zkoumaného objektu.

Experimentální modelování

Fyzikální (materiální) modelování, při kterém se nevyužívá teorie podobnosti ani materiální analogie bývá označováno jako modelování experimentální. Uplatnění nachází zejména tehdy, pokud se nedaří matematicky popsat reálný zkoumaný objekt nebo v tom případě, kdy teorie existuje, ale není matematicky řešitelná, není k dispozici dostatečně výkonný hardware nebo odpovídající software, případně se

mohou při určování vstupních a okrajových podmínek do výpočtového algoritmu vyskytovat nepřekonatelné obtíže. Experimentální modelování bývá také používáno v těch případech, kdy jsou ostatní způsoby modelování pro řešitele méně efektivní (Janiček, 1998). Charakteristickým rysem tohoto způsobu modelování je, že modelový objekt je totožný s reálným zkoumaným objektem. Výpočet není v tomto případě hlavním prostředkem při řešení problému, používané výpočty slouží především k plánování a vyhodnocování měření. Cílem experimentů je určení podstatných prvků a vazeb ve zkoumaném objektu. Experimentální modelování začíná tzv. vstupním experimentem, jehož cílem je získání základních informací o objektu z hlediska řešeného problému. Informace jsou podkladem pro další postup při řešení. Může nastat situace, že získané informace jsou pro řešení problému postačující, pak je experimentální modelování ukončeno. Nebo je možno v řešení problému pokračovat metodou matematického (výpočtového) modelování. Nejčastějším případem však bývá opakování experimentů za jiných podmínek, čímž jsou o zkoumaném objektu získány obsažnější informace. Vstupní experiment přechází v tomto případě v informační experiment. Poznatky o řešení problému získané předchozími typy experimentů je někdy nutné ověřit - verifikovat. K tomu slouží experiment verifikační, který se provádí v jiném čase, případně jiným řešitelem, jinými měřicími metodami, přístupy, při použití jiného experimentálního zařízení. Je také možno použít jiný model.

Dříve, než je možno určitý model použít, je třeba posoudit, do jaké míry odpovídá vzoru a za jakých podmínek budou výsledky modelování uspokojivě charakterizovat skutečný proces (Gazda, 1973).

2.2. Matematické (výpočtové) modely a jejich specifické rysy

Modely, které s použitím prostředků matematického aparátu vyjadřují vztahy a chování reálného objektu, označujeme jako modely matematické. Někteří autoři ještě dále rozlišují pojmy v tom smyslu, že jako matematický model označují pouze soustavu rovnic, jež matematicky popisuje řešený problém. Kromě této soustavy rovnic je pro vlastní modelování navíc nutná správná teorie a příslušné vstupní údaje. Souhrn všech nástrojů pak označují jako výpočtový model (Janiček, 1998). V praxi se rozdíl mezi pojmy matematický model a výpočtový model zpravidla nerozlišují.

Při tvorbě matematických modelů se uplatňují dva základní přístupy, analytický a simulační. Převládají-li poznatky o modelovaném systému, pak bývá použita zpravidla analytická metoda a naopak, jestliže není k dispozici dostatečné množství informací o modelovaném systému, pak je výhodnější použití simulační metody.

Analytické modely

Analytické modely představují takovou formu realizace určité teorie, kdy převládají poznatky o modelovaném systému a model je stavěn spíše deduktivně. Tyto metody poskytují výsledky obvykle ve formě funkčních vztahů, v nichž jako proměnné vystupují parametry modelů, takže řešení konkrétního modelu získáme dosazením konkrétních hodnot do zmíněných vztahů (Hušek, 1987).

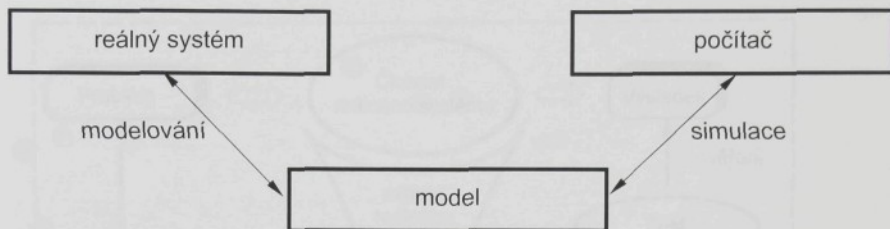
Simulační modely

U simulačních modelů je prvotní modelové zobrazení vlastností zkoumaného systému. Simulační modely představují takovou formu realizace určité teorie, kdy je modelovaný systém považován za „černou schránku“ a model je stavěn induktivní metodou. Řešení se získává určitou transformací hodnot, které byly „napozorovány“ z chodu modelu (chodu programu), přičemž toto „pozorování“ je obvykle zahrnuto do samotného simulačního modelu. Simulační metody patří mezi numerické metody a ty poskytují výsledky v ryze numerické podobě, takže pro nepatrně pozměněný model (např. při změně hodnoty jednoho parametru) je třeba zpravidla postup řešení opakovat (Hušek, 1987).

Pojem simulace lze obecně chápat jako napodobování dějů, procesů, soustav nebo chování (Barták, 1993). Základní myšlenka simulačních metod je poměrně jednoduchá, neboť vychází z přímého napodobení studovaného systému. Poněkud složitější je vlastní realizace simulace, pro kterou je typické vytváření jedinečných, na míru šitých modelů, jež umožňují vystihnout specifické rysy modelovaných systémů. Přístupy k řešení problémů jsou založeny na poznatcích matematiky, teorie pravděpodobnosti a statistiky, teorie systémů, výpočetní techniky a programování.

Pro experimentování s počítačovým modelem, jehož cílem je získat nové poznatky o reálném systému, se vžil pojem simulace (Zítek, 1990). Termín simulace není možno přesně a jednoznačně vymezit, protože různí autoři jej charakterizují různým způsobem.

S použitím tří elementů - reálný systém, model, počítač - a dvou vztahů - modelový a simulační, charakterizoval simulaci Zeigler (Hušek, 1987). Jeho přístup je schématicky naznačen na obr. 1.



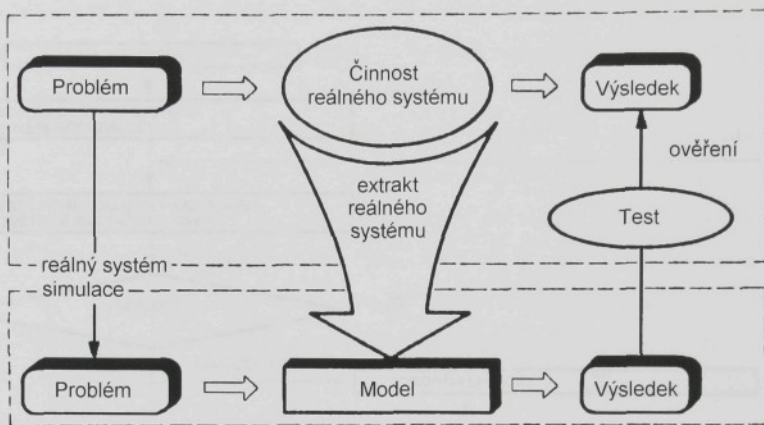
Obr. 1 Charakteristika simulace podle Zeiglera (Hušek, 1987)

Reálný systém je určitou částí vnějšího světa, která je předmětem zájmu. Tento systém může být přirozený nebo umělý, již existující nebo projektovaný. Reálný systém má určité vlastnosti, které v této koncepci tvoří zdroj dat o jeho chování. Model je v podstatě jednoznačným návodem na vytváření dat stejného charakteru, jako jsou data poskytovaná reálným systémem. Prostředkem pro realizaci návodu na vytváření požadovaných dat je zpravidla počítač. Ve vztahu mezi reálným systémem a modelem je rozhodujícím hlediskem otázka validity modelu, tj. jak dobře model reprezentuje reálný systém. Validita je posuzována podle toho, do jaké míry dochází ke shodě mezi daty získanými na reálném systému s daty, jež jsou generovány modelem. Ve vztahu mezi modelem a počítačem jde o věrohodnost, s jakou počítač realizuje návod na produkci dat, který je vytvářen modelem. V tomto vztahu jde především o správnost programu.

Jednoduše, ale výstižně definoval simulaci Shannon (Hušek, 1987), který uvedl, že simulace je proces tvorby modelu reálného systému a provádění experimentů s tímto modelem za účelem dosažení lepšího pochopení chování studovaného systému, či za účelem posouzení různých variant činnosti systému. Model zobrazuje závislosti mezi vstupními a výstupními veličinami u reálného systému, simulací se napodobují děje a procesy u reálného systému, jak je zřejmé z obr. 2.

Realizace simulačních modelů je principiálně možná pouze s využitím číslicových počítačů, protože manuální výpočet by byl zpravidla příliš náročný jak z hlediska nároků na spolehlivost výpočtů, tak i z hlediska rozsahu výpočtů a potřebného času.

Pro počítač je třeba vytvořit příslušný simulační program. Tento program musí být vytvořen tak, aby co nejpřesněji vyjádřil změny stavu reálného systému v průběhu vyšetřovaného procesu, což v případě diskrétních systémů znamená realizaci určité posloupnosti událostí v čase.



Obr. 2 Modelování a simulace (podle (Tönshoff aj., 1992))

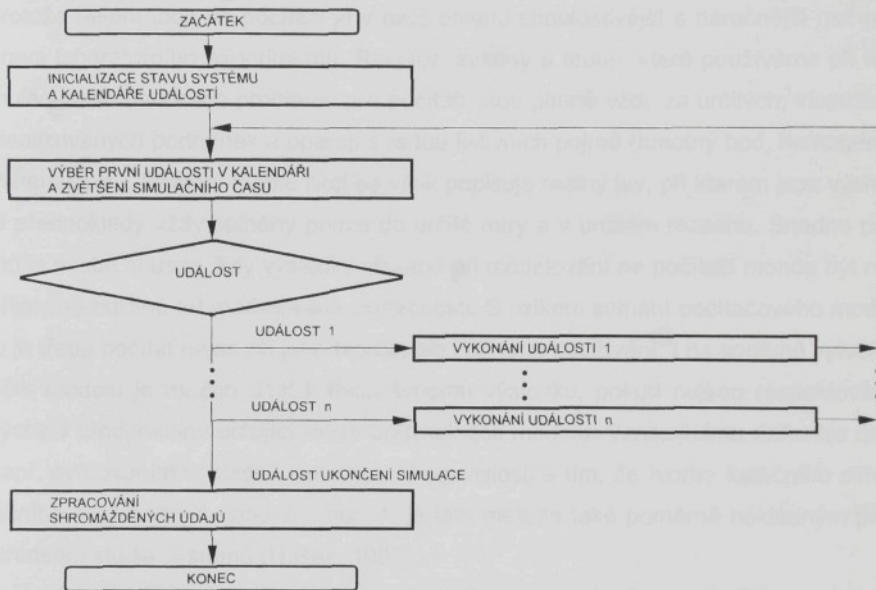
V simulačním programu pak má důležitou roli jednak čas a dále sled událostí. Postupným vykonáváním vždy nejbližší budoucí události, tedy události, která je jako následující naplánovaná, se realizuje posloupnost událostí v systému, což je úlohou simulace. Je tedy zřejmé, že pro tvorbu simulačního programu je velmi výhodné, jestliže je chování reálného vyšetřovaného systému popsáno jako posloupnost událostí (Neuschl, 1988). Obecná struktura simulačního programu, který popisuje posloupnost událostí v systému, je uvedena na obr. 3.

Jestliže rozvoj přírodních věd je výsledkem dvou základních metod získávání poznatků:

- a) experimentu a induktivního zobecňování jeho výsledků,
- b) dedukce dalších závěrů vyplývajících z teoreticky formulovaných zákonitostí,

pak počítačové modelování vede ke vzniku určité syntézy obou těchto přístupů (Zítek, 1990). Tento jev je důsledkem neustálého zdokonalování technického a programového vybavení počítačů. Zvláště tam, kde výsledkem výpočtů je průběh určitého procesu, postup technologie, příp. jakýkoliv pohyb, vzniká při dostatečně názorném a

pohotovém výstupu výsledků u řešitele postupně dojem, že nesleduje průběh výpočtu, ale je účastníkem pokusu s objektem, který byl řešenými rovnicemi popsán. S takto názorným a pohotově ovladatelným výpočtem pak může řešitel experimentovat velmi podobně jako s laboratorním pokusným zařízením.



Obr. 3 Struktura simulačního programu (Neuschl, 1988)

Hlavním důvodem používání simulačních metod je to, že umožňují poměrně snadno překonat potíže při řešení složitých modelů. Obecně má pouze malá část modelů, k jejichž tvorbě vedou praktické potřeby, takovou strukturu, že potřebné informace je možné získat analytickou nebo jinou nesimulační cestou. S pomocí simulačních metod lze např. vyhodnocovat varianty teprve projektovaných zařízení nebo strojů, aniž by bylo třeba vyrábět nebo upravovat jejich prototypy. Tyto metody se také mohou použít pro ověřování reálnosti navrhovaných charakteristik pružného výrobního systému (Vytačil aj., 1991). Pomocí modelů lze také provádět pokusy, které by ve skutečnosti byly nepřipustně riskantní (modely průběhu epidemii, ničivých účinků zbraní ap.), nepřijatelně nákladné nebo zdlouhavé (modely ekologických důsledků činnosti člověka). Další výhody spočívají v tom, že simulace umožňuje chování systémů v reálném, zrychleném nebo zpomaleném čase, simulace může ověřit

řešení získané jinou nezávislou cestou nebo může být použita tehdy, když je analytické řešení příliš složité. Simulace obvykle umožňuje vytvoření komplexního pohledu na zkoumaný systém a pozorování činnosti simulačního modelu může vést k lepšímu pochopení reálného systému.

Naopak je třeba při použití simulačních metod počítat s řadou potíží a úskalí, protože řešení úloh na počítači je v řadě ohledů choulostivější a náročnější než příprava laboratorního experimentu. Rovnice, zákony a teorie, které používáme při formulaci matematického problému pro počítač, jsou platné vždy za určitých, víceméně idealizovaných podmínek a operují s řadou fiktivních pojmů (hmotný bod, homogenní materiál, ap.). Pomocí těchto fikcí se však popisuje reálný jev, při kterém jsou výchozí předpoklady vždy splněny pouze do určité míry a v určitém rozsahu. Snadno pak může nastat situace, kdy výsledky získané při modelování na počítači mohou být nepřijatelně odlišné od modelované skutečnosti. S rizikem selhání počítačového modelu je třeba počítat nejen při jeho tvorbě, ale i při jeho používání. I na správně vytvořeném modelu je možno dojít k nesprávnému výsledku, pokud nejsou respektovány výchozí předpoklady určující meze použitelnosti modelu. Vznikajícímu riziku lze čelit např. ověřováním výsledků simulace. V souvislosti s tím, že tvorba funkčního simulačního modelu bývá časově náročná, je tato metoda také poměrně nákladným prostředkem studia systémů (Hušek, 1987).

Z uvedeného je zřejmé, že na simulační metodu je třeba pohlížet pouze jako na jednu z variant, kterou je možno využít při řešení daného problému. Předpokladem pro úspěšnou aplikaci počítačového modelu je dostatečně hluboké poznání podstaty zkoumaného reálného systému.

3. Výzkum a modelování procesu broušení

Broušení je proces hromadného rychlostního mikrořezání povrchové vrstvy obrobku značným počtem nevelkých zrn brusiva, zpravidla vázaných pojivem do tvaru brousicího nástroje, jemuž jsou vhodným strojem umožněny potřebné hlavní a vedlejší řezné pohyby a kde je v nutném upínacím zařízení přidržován obráběný předmět (Gazda, 1979), (Maslov, 1979). Řadou charakteristických znaků se broušení odlišuje od ostatních způsobů obrábění nástroji s tzv. definovanou geometrií břitů (Oczoš aj., 1986), (Jersák, 1988).

3.1. Broušení a jeho postavení v současné strojírenské výrobě

Broušení je základní dokončovací obráběcí operací. Ve strojírenské výrobě se nejčastěji uplatňuje při opracování součástí na přesný geometrický tvar a rozměry s vysokou jakostí povrchové vrstvy. Používá se téměř pro všechny funkční plochy v sériové i hromadné výrobě. Další aplikací je broušení součástí a materiálů, které lze jiným způsobem obrábět pouze velmi obtížně nebo vůbec. Jedná se zejména o obrábění kalených materiálů, součástí z kovových i nekovových slitin se ztíženou obrobiteľností, skla ap. Třetí oblast použití broušení představují ty případy, kdy je broušení ze všech případů obrábění nejhospodárnější. Zde se s výhodou využívá toho, že řezné síly při broušení jsou poměrně malé a obráběné díly lze proto upínat jednoduchým způsobem, případně se nemusí upínat vůbec, např. při bezhrotém broušení. Úspory času a nákladů vyplývají z nižších nároků na upínání a manipulaci s obrobkem, na výměnu a údržbu nástrojů, na odvod třísek i z toho, že hrubovací i dokončovací fázi výroby je možno provést na jednom stroji a při jednom upnutí. Tyto okolnosti jsou příčinou toho, že se broušení uplatňuje také při hrubovacích operacích (Vlach, 1990).

3.2. Poznatky o vývoji a výzkumu v oblasti obrábění broušením

Obecně se technika rozvíjela ve zdánlivě nekonečné řadě pokusů a vylepšování výsledků, epochální inovační skoky jsou ve vývoji techniky spíše výjimkou a nikoliv pravidlem. Velké technické novinky historicky vznikaly v době, kdy pro ně dozrál

čas a kdy se pro jejich vytvoření na základě předchozího vývoje vytvořily příhodné podmínky (Paturi, 1993).

Již v období kolem roku 40 tis. př. n. l. zvládl tehdejší člověk výrobu nástrojů s ostrými kamennými čepelemi (Ocozš aj., 1986). Významným mezníkem rozvoje technologie broušení se však stala zejména druhá polovina 19. stol. n. l., kdy rychlý rozvoj železniční a lodní dopravy, význačné objevy v oboru elektřiny a magnetizmu a následně i vynález spalovacího motoru postavil tehdejší strojírenskou výrobu před úkol vyrobit rychle a hospodárně velké množství vzájemně vyměnitelných součástí. Důležitým požadavkem se stalo dosažení přesných rozměrů a malé drsnosti povrchu. Použitím technologie broušení se nové požadavky dařilo úspěšně plnit. Broušící kotouče z přírodních brusiv, které byly v té době používány zejména pro ruční broušení skla, však při strojním broušení oceli nedosahovaly uspokojivou stálost vlastností a trvanlivost. Po vynalezení keramického pojiva a broušících nástrojů s umělými brusivy z karbidu křemíku a později z oxidu hlinitého se podařilo odstranit i tento nedostatek. Charakteristickým rysem broušících kotoučů je, že pracují efektivně za podstatně vyšších řezných rychlostí oproti ostatním obráběcím nástrojům s tzv. definovanou geometrií břítu. Tato skutečnost se stala jedním z hlavních důvodů, proč byla následně pozornost směřována především na zdokonalování brusek a méně na práci broušícího kotouče (Gazda, 1973).

V současné době se řešení broušících strojů z hlediska pohonných jednotek, požadavků přesnosti i aplikace elektronických prvků pro řízení procesu obrábění dostalo na tak vysokou úroveň, že pouhými konstrukčními úpravami nelze dosáhnout podstatného zvýšení výkonu, zlepšení geometrické přesnosti a jakosti povrchu broušené součásti. Rezervy pro další zdokonalování tohoto procesu obrábění se proto ve zvýšené míře hledají také v oblasti vlastního procesu řezání, v oblasti práce broušícího nástroje. V podmínkách České republiky je v tomto směru vyvíjena snaha o vybudování „Výzkumného centra“ (Bumbálek, 2000) zaměřeného na komplexní zkoumání problematiky procesu broušení.

Výzkum technologie broušení je komplikován tím, že se jedná o proces charakteristický řadou náhodných veličin, kde je popis časových závislostí probíhajících dějů značně obtížný. Jako všechny ostatní metody obrábění, tak se intenzivně zkoumá i proces broušení, s cílem tento proces diagnostikovat, monitorovat a následně optimalizovat. Do jaké míry je možno probíhající děje matematicky popsat, jak spolehlivě je možno vyjádřit působící fyzikální vlivy, jak přínosné budou výsledky vý-

zkumu pro praktické použití, to záleží na mnoha vlivech, kdy určitou roli hrají také charakteristické zvláštnosti tohoto způsobu obrábění (Reinhold aj., 1988).

Obecně lze ovšem pozorovat některé tendence, které charakterizují výzkum a vývoj v oblasti obrábění broušením. Jedná se zejména o následující směry:

- zvyšování produktivity a trvanlivosti brousicích nástrojů,
- zvyšování kvality obráběných součástí,
- vytváření báze znalostí o procesu broušení a její aplikace,
- zvyšování flexibility technologického procesu broušení,
- realizace ekologicky orientovaných zásahů do technologického procesu broušení.

U výzkumných prací zaměřených na problematiku broušení lze rozlišit dva směry. První je orientován na zkoumání reálného procesu a druhý směr se zabývá modelováním dějů při broušení.

3.3. Zkoumání reálného procesu broušení a trendy vývoje

Výzkumné práce, jež se zabývají zkoumáním reálného procesu broušení, zahrnují širokou škálu různých faktorů. Velmi často jsou zaměřeny na zkoumání vlivu jednotlivých parametrů soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek, přičemž největší pozornost je věnována brousicímu nástroji, jeho vlastnostem, odolnosti proti opotřebení nebo způsobu orovnění. U obrobku se vyhodnocuje nejen jeho vliv na vlastní proces obrábění, ale zejména jeho stav po ukončení procesu obrábění z hlediska rozměrů, tvaru, drsnosti povrchu a vlastností povrchové vrstvy. Poznatky o stavbě brousicího nástroje, o vzájemném pohybu nástroje a obrobku a o procesu tvorby třísky, které jsou důležité z hlediska modelování procesu broušení, byly již autorem shrnuty v dřívějších publikacích (Jersák, 1988). Další oblast výzkumu reprezentují práce orientované na vyhodnocování technologických parametrů. Je vyšetřován vliv řezných podmínek na tvorbu třísky, řezné síly, teploty nebo trvanlivost nástroje. Samostatnou skupinu tvoří práce, jež se zabývají zkoumáním nových metod broušení za nestandardních podmínek, s novými druhy nástrojů ap. Jiné výzkumné práce jsou zaměřeny na hodnocení procesu broušení a zejména na porovnávání vlastností nástrojů.

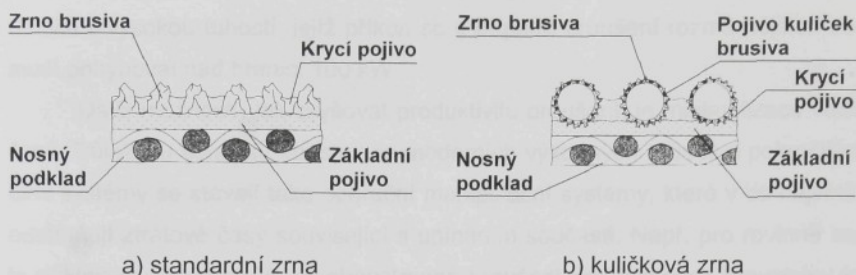
Poznatky získané při zkoumání reálného procesu broušení jsou využity při

zdokonalování procesu broušení. Základním rysem vývoje v oblasti obrábění broušením je trvalé zvyšování produktivity a trvanlivosti brousicích nástrojů. Jsou vyvíjeny nové druhy brusiva, které mají lepší stálost za vysokých teplot, případně lepší vlastnosti z hlediska opotřebení. Příkladem z posledních let jsou např. zrna brusiva typu SG z keramizovaného umělého korundu, vyrobená chemickou cestou. Zrna se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí a ve srovnání s běžnými zrny z umělého korundu také vysokou houževnatostí. Tyto příznivé vlastnosti byly dosaženy specifickou strukturou brousicího materiálu. Krystaly zrn mají velikost menší než 1 mikrometr. Při vy-lamování mikročástic zrn se neustále odkrývají nové ostré hrany a dochází tak k samoostření jednotlivých zrn brusiva (NORTON, -), (TYROLIT, 1997). Přitom jsou dosaženy také relativně nízké teploty při řezání. Současně se zrna brusiva vyznačují vysokou odolností proti opotřebení při optimálním využití jednotlivých zrn.

Vývoj nových druhů pojiv, které umožňují lépe využít vlastnosti různých druhů brusiv, reprezentuje další oblast zvyšování produktivity brousicích nástrojů. Do této kategorie lze např. zařadit supertvrdé nástroje z kubického nitridu boru (CBN) s keramickým pojivem. Výhodou tohoto pojiva je zejména vysoká teplotní odolnost, možnost vytvoření porézní struktury nástroje a následné snadné orovnávání a tvarování. Póry zlepšují odvod třísek a umožňují přívod řezné kapaliny. Důležitou předností keramicky pojených CBN kotoučů je i to, že při broušení těmito nástroji vznikají podstatně nižší řezné síly ve srovnání s konvenčními keramickými brousicími kotouči. Optimální záběr zrn brusiva vede opět k dosažení vysokého výkonu obrábění.

Vysokou produktivitu broušení při současném dodržení vysoké kvality povrchové vrstvy lze dosáhnout brousicími pásy. Šířka pásu může přesáhnout 1 metr, a proto lze brousit na jeden průchod i široké plochy. Zrna brusiva jsou na nosném podkladu uložena zpravidla pouze v jedné vrstvě a jejich upevnění na povrchu pásu je oproti konvenčním brousícím kotoučům podstatně pružnější. Při broušení se pás deformuje a tím je zajištěno zvětšení počtu aktivních zrn brusiva v oblasti záběru nástroje, přičemž se působící zatížení rovnoměrněji rozděluje mezi jednotlivá zrna. Při výrobě pásů je možno zrna brusiva na podkladový materiál nanášet v elektrostatickém poli. Jednotlivá zrna se v tomto případě ustaví tak, že podélná osa zrna je vždy kolmá na pás. Tímto způsobem lze zajistit rovnoměrné rozdělení zrn. Speciálním případem brusiva jsou tzv. kuličková zrna (HERMES, -). Jedná se o malé duté kuličky, jejichž stěny se skládají ze zrn brusiva a z pojiva. Předností tohoto brusiva je výborná řezivost při postupném opotřebovávání kuličkových zrn v průběhu broušení. Rozdily

ve stavbě brousicích pásů se standardními a s kuličkovými zrna jsou patrné z obr. 4.



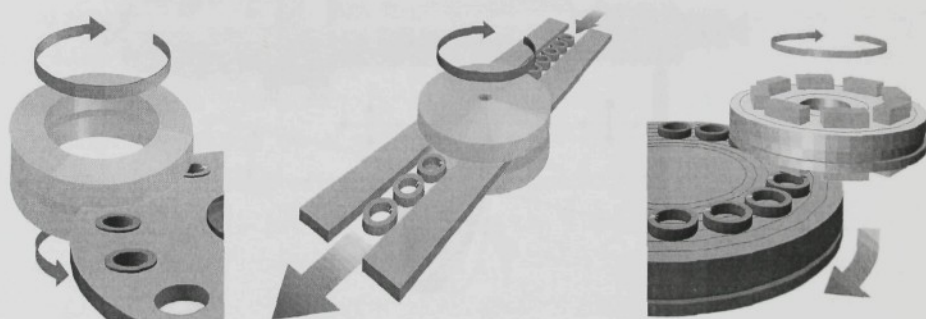
Obr. 4 Stavba brousicího pásu se standardními a kuličkovými zrna

Vysokou řezivost a trvanlivost nástrojů charakterizuje koeficient broušení (ČSN ISO 3002-5) dosahující hodnot 300 až 400. Další zvýšení produktivity souvisí s tím, že brousicí pás není třeba orovnávat ani vyvažovat. Při broušení pásy se používají nižší řezné rychlosti, které jsou spolu s orientovanými zrna příčinou nízkých teplot broušení. Tím se u obrobků dosahuje vysoká kvalita povrchové vrstvy s tlakovým zbytkovým napětím.

Při broušení supertvrdými brousicími kotouči lze výrazné zvýšení produktivity také dosáhnout změnou řezných podmínek, především zvýšením obvodové rychlosti nástroje. Jestliže se za intenzivního chlazení brousí běžné materiály rychlostmi vysoko nad hranicí 100 m/s a při posuvech 1 až 4 m/min, lze nalézt určité optimální podmínky, při kterých je vysokým posuvem docíleno velkého snížení teploty, jež je v protikladu s poměrně menším nárůstem teploty způsobeným zvýšením výkonu. Tím dochází k eliminaci negativního teplotního ovlivnění obrobku způsobeného vysokou řeznou rychlostí (Malle, 1988). Za těchto podmínek se snižuje velikost řezných sil, opotřebením nástroje i práce spotřebovaná na řezání. Přitom se výrazně zvyšuje objemový úběr, koeficient broušení a také kvalita povrchu a přesnost broušené součásti. Při rychlostním broušení se dosahují objemové výkony až 1000 mm³/s na šířku 1 mm brousicího kotouče (Malle, 1988), což jsou výkony, které značně překračují parametry při běžném soustružení a frézování. Pro tzv. rychlostní broušení se používají speciální vyztužené kotouče (Gašpárek, 1979) nejčastěji z CBN. Osvědčily se také brousicí kotouče, které mají supertvrdá zrna na povrchu kovového kotouče upevněna galvanicky pouze v jediné vrstvě. Existuje řada různých aplikací rychlostního broušení: hloubkové broušení, axiální broušení zplna, zápichové broušení nebo

broušení šroubovic a šneků. Rozhodující význam pro rychlostní broušení má druh, množství, tlak a způsob přívodu řezné kapaliny. Dalším základním předpokladem je bruska s vysokou tuhostí, jejíž příkon se v případě broušení rozměrnějších součástí musí pohybovat nad hranicí 100 kW.

Další možností, jak zvyšovat produktivitu broušení, je minimalizace vedlejších časů. Důležitou součástí konstrukce moderních výkonných brusek s pokročilými řídicími systémy se stávají také operační manipulační systémy, které v co největší míře odstraňují ztrátové časy související s upínáním součástí. Např. pro rovinné součásti je příkladem těchto způsobů oboustranné broušení prstencovými brousicími kotouči s obrobky v transportním kotouči nebo oboustranné broušení plochými brousicími kotouči s obrobky unášenými transportními pásy. Úspory času jsou dosaženy především automatickým podáváním obrobků. Ke způsobům hromadného broušení rovinných součástí lze přiřadit také jednostranné broušení segmentovým brousicím kotoučem s obrobky na kruhovém magnetickém stole. Schématické znázornění uvedených způsobů broušení je naznačeno na obr. 5.



a)

b)

c)

a) oboustranné br. s kruhovým posuvem obrobků v transportním kotouči

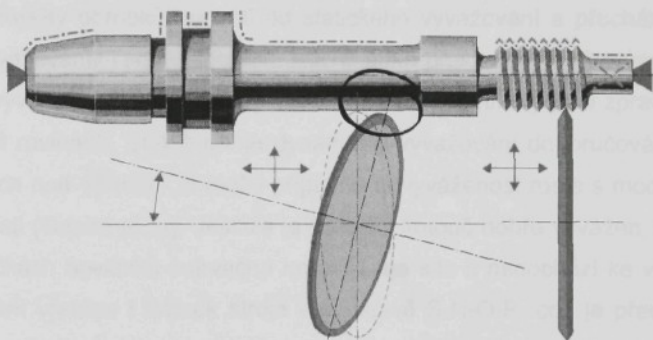
b) oboustranné br. s přímočarým posuvem obrobků transportním pásem

c) jednostranné broušení s obrobky na kruhovém magnetickém stole

Obr. 5 Schémata operačních manipulačních systémů pro broušení

Pro broušení válcových, kuželových, čelních a tvarových ploch, dále pro zápi-
chy, záuty a dokonce také n-hrany byla vyvinuta velmi produktivní metoda QUICK-

POINT. Ztrátové časy související s upínáním obrobků jsou minimalizovány tím, že se součásti upínají pouze mezi hroty, nepoužívá se unášec. To je možné z toho důvodu, že pro broušení touto metodou je použito diskového brousícího kotouče z CBN nebo diamantu o šířce pouze několika milimetrů. Osa nástroje, jehož posuv a přísuv je zajištěn systémem CNC řízení, je vůči obrobku mimoběžná. Tím dochází mezi nástrojem a obrobkem pouze k bodovému dotyku a k působení minimálních sil, jež lze přenést při upnutí mezi hroty. Zároveň je zajištěn snadný přístup chladicí kapaliny do místa řezu. Metoda QUICKPOINT se také vyznačuje vysokou flexibilitou nástroje, který umožňuje brousit různé plochy s velkým objemovým výkonem při trvalém upnutí součásti. Brousící kotouč přitom dosahuje velmi vysoké trvanlivosti a odolnosti proti opotřebení (koeficient broušení až 60 000 (JUNKER MASCHINEN, -), (ČSN ISO 3002-5)) a tak jsou docíleny i dlouhé intervaly mezi orovnáváním brousícího kotouče. Princip broušení s použitím metody QUICKPOINT je uveden na obr. 6.



Obr. 6 Schematické znázornění principu metody QUICKPOINT

Vývoj v oblasti obrábění broušením je také zaměřen na zlepšování vlastního procesu broušení s cílem dosáhnout co nejvyšší kvality obráběných součástí. Kvalita je kromě rozměrové a tvarové přesnosti dána tzv. integritou povrchu, která kromě mikrogeometrie obrobeného povrchu zahrnuje také stupeň a hloubku zpevnění povrchové vrstvy broušené součástí, strukturní, fázové a chemické změny v této vrstvě i smysl, velikost a gradient zbytkových napětí (Neckář aj., 1991). Při broušení je stav povrchové vrstvy zvláště důležitý, protože se zpravidla jedná o finální operaci. Inte-

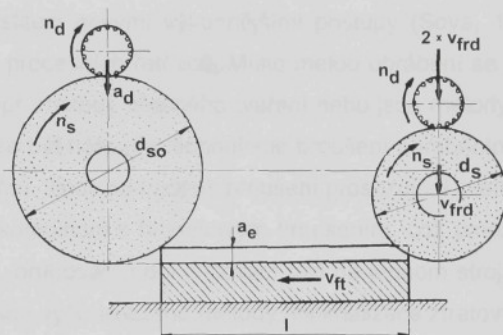
grita povrchu je ovlivněna řadou parametrů řezného procesu a to jak základními řeznými podmínkami, tak i druhem řezné kapaliny, vyvážením broušícího kotouče, způsobem jeho orovnávaní, stavem broušícího stroje ap.

V oblasti řezných kapalin pro broušení vysokými rychlostmi je trendem použití speciálních vysoceaditivních minerálních olejů s nízkou viskozitou, dosaženou přidávanými syntetickými látkami. Tyto kapaliny mají vysokou teplotní odolnost a zásadním způsobem snižují velikost řezných sil i teploty v oblasti řezání. Tím příznivě ovlivňují vlastnosti povrchové vrstvy broušené součásti. Přitom nezáleží pouze na druhu řezné kapaliny, ale také na způsobu přívodu, množství a tlaku kapaliny. Předpokladem je dostatečně velká zásoba kapaliny a speciální filtrační systémy pro její čištění v průběhu broušení (Malle, 1988).

Zvýšená pozornost se také věnuje přípravě broušícího nástroje k práci, např. v oblasti vyvažování broušících kotoučů. Pro dosažení vysoké přesnosti a jakosti povrchu při současné vysoké trvanlivosti nástroje se ve stále větší míře používají broušící kotouče větších průměrů a šířek. U kotoučů větších hmotností a průměrů se pro zajištění kvality obrobků upouští od statického vyvažování a přechází se na dynamické vyvažování. Také u kotoučů, jejichž šířka překračuje 1/10 průměru kotouče je statické vyvážení nedostačující, protože nevyvážené hmoty jsou zpravidla rozloženy v různých rovinách. Stejně tak je dynamické vyvažování doporučováno při řezných rychlostech nad 45 m.s^{-1} , protože případná nevyváženost roste s mocninou obvodové rychlosti (Gazda aj., -). Jestliže je broušící kotouč dobře vyvážen, pak i při vysokých otáčkách nevzniká setrvačná nevyvážená síla a nedochází ke vzniku chvění a k namáhání vřetena i ložisek stroje v soustavě S-N-O-P, což je předpokladem pro zajištění požadovaných vlastností broušené součásti. Moderní brusky jsou často vybaveny automatickým zařízením pro dynamické vyvažování kotouče při provozních otáčkách nástroje.

Povrchová vrstva broušených součástí je významnou měrou ovlivňována stavem mikroprofilu řezné plochy broušícího nástroje, která vzniká při orovnávaní kotouče. Protože při orovnávaní se vlastně broušící nástroj stává obrobkem, který je opracováván orovnávacím nástrojem, je také proces orovnávaní velmi důležitou oblastí pro realizaci různých zlepšení. Jak při orovnávaní konvenčních broušících kotoučů, tak zejména u supertvrdých broušících kotoučů se objevují nová zdokonalení a nové přístupy vedoucí k zefektivnění tohoto procesu. V kategorii nepohyblivých orovnávačů pro konvenční kotouče byly např. vyvinuty nástroje z polykrystalického diamantu

dodávané pod obchodním názvem „Formset“ nebo nové druhy vícekamenových diamantových orovnávačů. V kategorii pohyblivých orovnávačů se neustále zdokonalují způsoby vzájemného polohování obrobku, brousicího nástroje a orovnávacích kladek, což na druhé straně vyžaduje neustále komplikovanější polohování jednotlivých elementů na brusce. Rozvoj CNC metod, které se aplikují také na řízení pohybu orovnávače, vedl ke vzniku zajímavé metody trvalého orovnávání konvenčních kotoučů v průběhu procesu broušení (CD Grinding). Orovnávací nástroj je během broušení trvale v záběru s brousícím nástrojem a jeho působením dochází k plynulému zmenšování průměru kotouče. Současně probíhá jak proces orovnávání kotouče, tak i proces broušení součásti. Tato metoda je vhodná především pro brousicí nástroje používané pro hloubkové tvarové broušení materiálů se ztíženou obrobiteľností (Lang aj., 1989). Princip orovnávání je naznačen na obr. 7.



Obr. 7 Princip trvalého orovnávání brousicího kotouče v průběhu procesu broušení

Hlavní výhodou je eliminace vedlejších časů na orovnávání brousicího nástroje při současné minimalizaci geometrických úchylek u obráběné součásti. Při kontinuálním orovnávání jsou podmínky broušení stále z hlediska řezných sil, specifické energie broušení, teploty v kontaktní oblasti i parametrů drsnosti povrchu broušené součásti. Nevýhodou tohoto způsobu broušení je velmi nízká životnost brousicího nástroje.

Mnoho nových způsobů orovnávání se objevuje u brousících kotoučů z diamantu nebo CBN. Vlastnosti těchto nejtvrdějších brusiv i používaných pojiv jsou příčinou toho, že se tyto nástroje orovnávaly zpravidla velmi obtížně. Další obtíž při orovnávání supertvrдых kotoučů souvisí s tím, že se jejich povrchová vrstva při orovná-

vání vyhlazuje. V tomto případě se pak orovnávací proces zpravidla musí realizovat ve dvou fázích. V první fázi orovnávání probíhá tzv. tvarování, kdy se obnovuje geometrický tvar nástroje, a následně ve druhé fázi je nutno brousící kotouče ostřit a vytvořit tak požadovanou topografii povrchu činné části nástroje a obnovit řezivost nástroje. Kromě postupů podobných těm, jež se uplatňují při orovnávání konvenčních brousících kotoučů, se pro tvarování a ostření supertvrdých brousících nástrojů používá také řada speciálních způsobů. Např. se jedná o orovnávání paprskem abrazivního média nebo metodu ponorného leptání, případně o metodu s použitím elektrolytické řezné kapaliny (Gazda aj., -) ap.

Zlepšování vlastního procesu broušení může být také zaměřeno na dosažení dalších cílů, jako např. vysoké flexibility technologického procesu nebo realizaci ekologicky orientovaných zásahů do technologického procesu. Řešením mohou být nové technologické postupy, které vedou ke snižování počtu prováděných operací nebo k jejich substituci novými výkonnějšími postupy (Sova, 1997). Tím dochází k tzv. komprimaci procesních řetězců. Místo metod obrábění se tak v některých případech uplatňují např. metody přesného tváření nebo jsou metody obrábění zaměněny. Příkladem může být náhrada technologie broušení obráběním nástrojem s definovanou geometrií břitu. Jindy se naopak broušení prosazuje. Uplatňuje se zejména rychlostní broušení v kombinaci s hloubkovým broušením, což umožňuje realizovat kompletní obrábění, tj. hrubovací i dokončovací fázi na jednom stroji při jednom upnutí. Jiným příkladem jsou výše uvedené metody minimalizace ztrátových časů související s upínáním rovinných součástí nebo použití metody QUICKPOINT při broušení rotačních součástí.

Rozhodujícími zdroji ekologických a ekonomických problémů jsou ve výrobním procesu řezné kapaliny (Mádl, 1997). Redukce pomocných technologických látek, až jejich úplná eliminace na obrábění bez použití řezné kapaliny, vede v mnoha technologických procesech, kromě ekologických aspektů, též k jejich celkovému zlepšení. Zajištění ekologických požadavků v oblasti obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu je však velmi obtížné. Tyto procesy se vyznačují značným vývinem tepla v oblasti řezání, které se eliminuje dostatečným množstvím řezné kapaliny, jež se však v důsledku opotřebování nástrojů a vznikajícími trískami velmi rychle znečišťuje. Proto představují všechny systémy, které umožňují cílené nasazení redukovaného množství řezné kapaliny v technologicky nezbytném množství, určitý prostředek pro zlepšení ekologie broušení. Při broušení s redukovaným množstvím řezné kapaliny

se jako výhodné ukazuje použití CBN z důvodu jeho větší tepelné vodivosti oproti umělému korundu. Za uvedených podmínek je též výhodné obrábění vysokou rychlostí, příp. použití vhodného pojiva kotouče, např. hliníku. Při malých objemových výkonech, při krátkých časech broušení je možné s ohledem na tepelné ovlivnění obrobku použít také broušení bez použití řezné kapaliny. V ostatních případech však dochází k intenzivnímu ohřevu obrobku a může dojít k poškození struktury obrobe-
ného povrchu, proto je broušení bez použití řezné kapaliny značně omezeno. Eliminace řezných kapalin při broušení je pak možno dosáhnout jedině změnou technologie, např. obráběním nástroji s definovanou geometrií břítu.

3.4. Modelování procesu broušení a trendy vývoje

Broušení je poměrně složitá výrobní metoda s velkým počtem faktorů, které se v průběhu procesu vzájemně ovlivňují, proto je také opakovatelnost tohoto procesu problematická a broušení se stalo předmětem intenzivního technologického výzkumu. K pochopení podstaty broušení významnou měrou přispívají různé modely.

3.4.1. Fyzikální modely procesu broušení

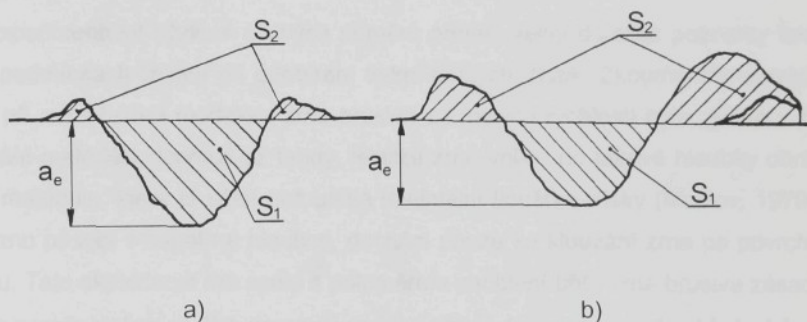
Při fyzikálním modelování procesu broušení je zkoumání reálného procesu nahrazeno zkoumáním dějů probíhajících při působení diskrétního fyzikálního modelu zrna brusiva s jednoznačně určeným geometrickým tvarem. Pro experimenty se používají buď běžná zrna brusiva větších rozměrů nebo speciálně zhotovené řezné elementy. Základem modelování je teorie podobnosti uvedená v předešlé části práce. Tato teorie určuje okolnosti, za kterých jsou dva procesy fyzikálně podobné. U modelů broušení se jedná o geometrickou podobnost modelu a reálných zrn brusiva, o podobnost teplotních, napěťových, příp. deformačních polí a okrajově také o podobnost chemických dějů, chvění ap. (Gazda aj., 1985).

Fyzikální modely broušení se uplatňují při zkoumání mikrořezání zrn brusiva v různých oblastech. Zejména při výzkumu :

- plastických deformací obráběného materiálu,
- silových poměrů u zrn brusiva v záběru,
- součinitele tření při klouzání a mikrořezání,

- podmínek obrábění při vysokých řezných rychlostech.

Nejčastěji je fyzikální modelování používáno pro zkoumání plastických deformací obráběného materiálu při vytváření povrchu broušené součásti (Žebrowski aj., 1967). V procesu mikrořezání dochází k místnímu porušení obráběného materiálu, vznikají rýhy. Dodávaná energie se spotřebuje na plastickou deformaci kovu a na práci tření. Během experimentů je třeba zajistit odpovídající přítlak a pohyb modelu zrna brusiva vůči obráběné součásti. Měřením se vyhodnocuje příčný profil vytvořené rýhy. Ten se často skládá z několika drobnějších rýh, jejichž množství vzrůstá s hloubkou proniknutí zrna do materiálu, což potvrzuje skutečnost, že má zrno brusiva několik mikroostřích (Špillar, 1986). V obrobnku mohou podle obr. 8 a) nastat tyto případy: plocha průřezu valů S_2 je rovna ploše průřezu rýhy S_1 , tedy $S_1 = S_2$, pak proběhla pouze plastická deformace a v daném průřezu nedošlo k odebrání materiálu, nebo $S_1 > S_2$, tzn. že současně s plastickou deformací byl také odebrán materiál obrobnku, výjimečně také může nastat situace, kdy $S_2 = 0$, což znamená, že proběhlo pouze odebrání materiálu.



S_1 - naměřená hodnota průřezu rýhy

S_2 - naměřená hodnota průřezu valu

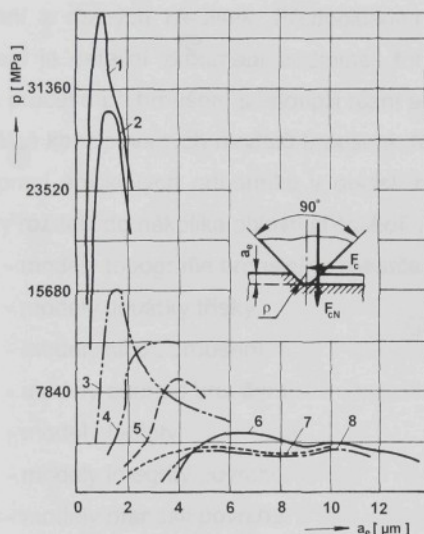
Obr. 8 Příčný profil rýhy po řezání osamoceným zrnem brusiva

Při experimentech však bylo doloženo, že v některých případech nastává také situace podle obr. 8 b), pak $S_1 < S_2$. 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 mikrotržsky, které se při rytí zrna úplně neoddelily od povrchu obrobnku a zůstaly s ním pevně spojeny (Jersák, 1988). Z příčného profilu rýhy lze

usuzovat i na řadu dalších faktorů, které deformační poměry ovlivňují. Např. 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. Vysoké rychlosti, vysoké stupně plastických deformací a velké gradienty teplotních a mechanických napětíových polí při broušení se mohou projevit ve změnách fyzikálně-mechanických vlastností materiálu součástí a to zejména v povrchové vrstvě (Neckář aj., 1991). Kromě druhu materiálu obrobku a jeho zpracování ovlivňuje mikrořezání také druh brusiva a geometrie zrn brusiva. Vedle profilu rýhy se vyšetřuje také oblast tzv. kořene třísky (Gazda, 1973). To je oblast, ve které tříska vzniká a kde lze sledovat, jaké změny probíhají v oddělovaném materiálu a stanovit charakteristické veličiny tvorby třísky. Např. je možno určit úhel roviny stříhu, úhel textury, směr tažení materiálu nebo stupeň zpevnění materiálu v jednotlivých oblastech vznikající třísky. Kořen třísky při broušení se však získává poměrně obtížně (Vasilko aj., 1988). Musí se použít speciálně upravený obrobek, který umožní přerušení řezu. V důsledku napětí vyvolaného řeznými silami se u tohoto obrobku vytrhne část materiálu přesně v oblasti řezání.

Experimentální výzkum silových poměrů přináší velmi důležité poznatky také např. o podmínkách řezání při odebírání velmi tenkých třísek. Zkoumáním silových poměrů při mikrořezání modelem zrna brusiva za malých rychlostí bylo zjištěno, že k odebírání materiálu dochází až tehdy, jestliže zrno vniklo do takové hloubky obráběného materiálu, která je větší než určitá minimální tloušťka třísky (Maslov, 1979). Pokud zrno působí v nepatrné hloubce, dochází pouze ke klouzání zrna po povrchu materiálu. Tato skutečnost má spolu s poloměrem zaoblení břitu zrna brusiva zásadní vliv na poměr složek sil. Pro pracovní radiální záběr do $1\text{ }\mu\text{m}$ je velikost kolmé řezné síly F_{cN} mnohonásobně větší oproti řezné síle F_c . Pro větší pracovní radiální záběry se poměr velikosti kolmé řezné síly F_{cN} vůči řezné síle F_c postupně zmenšuje. Spolu s tloušťkou třísky se také mění velikost měrné řezné síly, jejíž velikost je pro obrábění konkrétního materiálu největší právě tehdy, kdy klouzání zrna brusiva přechází na plastickou deformaci, jak je zřejmé z obr. 9. Z výzkumů součinitele tření ve fázi klouzání a ve fázi mikrořezání plyne, že při záběru je hodnota součinitele tření vždy podstatně větší než při malém měrném zatížení, kdy nedochází k rozrušení povrchu obrobku. Tento jev souvisí s deformačními procesy povrchové vrstvy obrobku při velmi malých pracovních radiálních záběrech. Součinitel tření má při malé rychlosti do $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ složitý průběh, při velkých rychlostech se jeho velikost snižuje, což způ-

sobuje zmenšení řezné síly. Uvedené poznatky však slouží pouze pro ilustraci, protože reálné broušení probíhá při podstatně větších rychlostech deformace a větších teplotách.



1 ... kalená ocel 14 109

5 ... ocel 12 041 normalizačně žíhaná

2 ... kalená ocel 12 041

6 ... slitina 80% Pb a 40% Sb

3 ... bronz

7 ... silumin

4 ... litina

8 ... měď

Obr. 9 Závislost měrné řezné síly k_c (p) na tloušťce třísky a_e stanovená fyzikálním modelováním; podle (Maslov, 1979)

Metodou fyzikálního modelování se také zkoumají podmínky mikrořezání při vysokých řezných rychlostech. Vysoké rychlosti řezání jsou doprovázeny značným zvýšením teploty deformovaného materiálu. Za těchto podmínek se výrazně mění plastické vlastnosti kovů. Vliv je složitý, protože rychlostní a teplotní činitele deformace mají protichůdné účinky. Jestliže zvyšování deformační rychlosti není provázeno zvýšením teploty, kov se zpevňuje a pozbývá plastičnosti. Naopak, jestliže je růst deformační rychlosti provázen vývinem velkého množství tepla, klesá pevnost kovu a jeho plastičnost se zvyšuje. Výsledný účinek vlivu velké deformační rychlosti na plasticitu kovu závisí na tom, zda převažuje činitel rychlosti nebo teploty.

3.4.2. Matematické modely procesu broušení

Matematickými rovnicemi je možno popsat závislosti, které charakterizují broušení z různých hledisek. Předpokladem pro tvorbu různých modelů procesu broušení je detailní zkoumání podmínek tohoto způsobu obrábění. K napodobení dějů a procesů při broušení přistoupili různí autoři různými způsoby. Vznikla tak řada originálně koncipovaných modelů broušení. Na základě rozsáhlého rozboru výzkumných prací špičkových odborníků v oblasti broušení lze vypracované matematické modely rozdělit do několika oblastí (Tönshoff aj., 1992):

- modely topografie brousícího kotouče,
- modely tloušťky třísky,
- modely sil při broušení,
- modely energie broušení,
- modely teploty,
- modely integrity povrchu.
- modely drsnosti povrchu.

K porozumění mechanismu působení jednotlivých ostří, které jsou náhodně rozloženy na brousícím nástroji, k vysvětlení vlivu působících sil, procesu tvorby třísky a stavu povrchové vrstvy obrobku, byl podrobně zkoumán pracovní povrch brousícího kotouče (Baul aj., 1972), (Przybylski, 1977) a následně vypracovány matematické modely topografie nástroje. Modelováním byly ověřovány podmínky řezání jednotlivých zrn brusiva umístěných na pracovní ploše brousícího kotouče, kde počet tzv. aktivních zrn je podstatně menší než celkový počet zrn na povrchu nástroje. Také byl zkoumán tvar bříty zrn brusiva ap. Dřívější práce byly zaměřeny na brousící kotouče z konvenčních brusiv, nově byly vypracovány modely také pro kotouče s brusivem z CBN a diamantu.

Modely pro určení tloušťky třísky vycházejí z rovnice kontinuity při broušení a vyjadřují vliv důležitých veličin, které při broušení působí - poměr rychlosti, pracovní radiální záběr a ekvivalentní průměr kotouče. Při určování poměrů v oblasti řezání vznikla veličina „ekvivalentní tloušťka třísky“ (ČSN ISO 3002-5). Vliv kinematických pracovních podmínek na základní parametry procesu broušení, jako jsou síly při broušení, kvalita povrchu obráběné součásti, koeficient broušení, rychlost odebrání

materiálu (objemový výkon) a trvanlivost nástroje při broušení byl graficky vyjádřen v tzv. „diagramu broušení“ (Snoeys aj., 1974), (Bumbálek aj., 1981), který představuje uznávaný a respektovaný způsob hodnocení procesu broušení.

Řezné síly jsou veličinou, která velmi citlivě charakterizuje poměry při broušení. Proto se tvorbou modelů zaměřených na silové poměry zabývalo velmi mnoho autorů. Některé modely vyjadřují také vliv řezné kapaliny a způsobu orovnění broušícího kotouče na velikost řezných sil. Praktická aplikace modelů řezných sil je poměrně pracná, protože je pro výpočty nutno stanovit značné množství konstant a exponentů.

Při broušení se procesy, které se odehrávají ve stykové ploše, tj. plastická deformace, tření a děje související s tvorbou nového povrchu odrážejí ve většině komplexních přeměn mechanické energie na teplo. Rozhodující podíl tepla se následně šíří do obrobku. Proto byly vytvořeny modely, které umožňují stanovit měrnou práci řezání při broušení (ČSN ISO 3002-4) a zkoumat vliv teplot na vlastnosti podpovrchové vrstvy broušené součásti.

Většina modelů teplot uvedených v literatuře je založena na předpokladu, že se tepelný zdroj, u kterého známe jeho intenzitu, rovnoměrně pohybuje po povrchu broušené součástky. Obrobek, který je vystaven účinkům tepla, je rozměrově omezen pouze z jedné strany. Protože má obrobek často největší vodivost tepla ze všech elementů, které se účastní procesu tvorby třísky, zpravidla se předpokládá, že dodané teplo v obrobku také zůstává. Výsledkem výpočtových modelů je rozložení teplot v podpovrchové vrstvě broušeného obrobku. Přesnější výpočtové modely, které umožňují rozdělení tepelného toku do obrobku, třísky, broušícího nástroje a chladicí kapaliny jsou založeny na aplikaci metody konečných prvků. Přes značné úsilí řady výzkumníků se dosud nepodařilo vytvořit takový univerzální matematický model, který by umožňoval stanovit teplotu s dostatečnou spolehlivostí (Tönshoff aj., 1992).

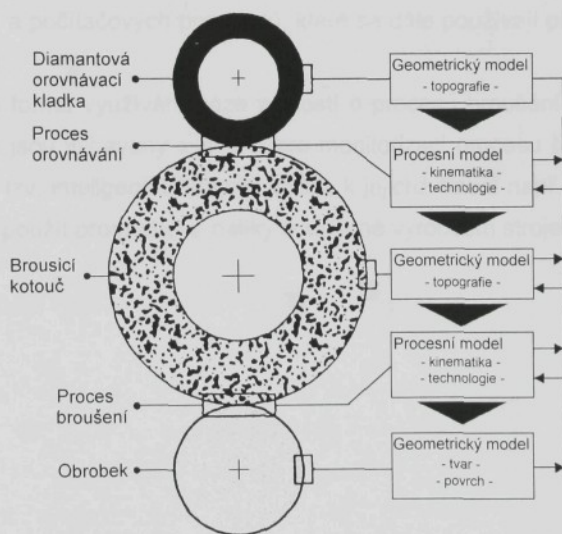
Mechanické a tepelné procesy, případně i strukturní změny, zásadním způsobem ovlivňují vlastnosti materiálu broušené součásti. Uvedené mechanismy lze popsat pomocí modelů integrity povrchu a vyjádřit tak změny mikrotvrdosti a velikost zbytkových napětí v tenké vrstvě pod povrchem. Některé modely integrity povrchu také využívají metodu konečných prvků. Základem pro tvorbu těchto modelů jsou výše zmíněné modely teploty doplněné údaji o působících silách, příp. dalšími materiálovými parametry. Z důvodu velkého množství působících veličin a omezujících podmínek opět vznikají nepřesnosti mezi vypočítanými a skutečnými hodnotami.

Drsnost povrchu je charakteristickou veličinou, která spolu s integritou povrchu určuje kvalitu obrobku. Většina matematických modelů drsnosti povrchu vychází z modelů topografie brousicího kotouče, ale nezahrnuje v dostatečné míře materiálové vlastnosti obrobku. Někteří autoři také uvažují vliv doby broušení a vliv probíhající změn topografie kotouče způsobených opotřebáváním nástroje v průběhu obrábění.

Rozšířením matematického modelu, který zobrazuje závislosti mezi vstupními a výstupními veličinami tak, aby bylo možno napodobit děje a procesy, které probíhají u reálného systému, vzniká simulační model. Matematické závislosti jsou pak sestaveny do určitého algoritmu a zpravidla rozsáhlé výpočty se řeší s použitím výpočetní techniky. Byly zpracovány simulační modely vycházející z matematického modelu topografie brousicího kotouče, u kterých základem simulace jsou kinematické poměry brousicí operace (Gazda aj., 1985). Výsledkem pak mohou být např. údaje o počtu aktivních zrn, údaje o délce a tloušťce třísky ap. (Kassen, 1969). Další skupina simulačních modelů vychází z měření mikrostruktury povrchu brousicího kotouče. Kromě toho se zadávají např. fyzikální charakteristiky systému, řídicí parametry obráběcího stroje a tepelné charakteristiky obrobku. Simulace se provádí metodou uzavřených smyčky opakovanými výpočty. Výstupními veličinami jsou složky sil, teploty obrobku a drsnost povrchu broušené součásti. Měření topografie povrchu kotouče nelze provádět v podmínkách průmyslové výroby, proto je použití uvedených simulačních modelů omezeno na laboratorní podmínky. Třetí typ simulačního modelu představuje řešení, kdy simulace probíhá postupně, po jednotlivých krocích (Tönshoff aj., 1992). Nejprve se řeší vliv řídicích parametrů stroje na základní technologické veličiny procesu. Výsledky jsou základem pro následné určení teplotních poměrů v oblasti řezání. Ve třetím kroku se vyhodnocují zbytková napětí v povrchové vrstvě broušené součásti způsobená plastickými deformacemi v důsledku teplotních vlivů (Neckář aj., 1991). Další typ simulačního modelu je určen pro optimalizaci řídicích procesů brusky. Systém obsahuje dvě optimalizační strategie, pro hrubovací a dokončovací broušení. Cílem je stanovit takovou kombinaci řídicích parametrů obráběcího stroje, aby bylo při broušení dosaženo minimálního času a nákladů a současně zajištěna požadovaná kvalita obrobku. Pro omezení počtu brousicích testů, které musí být pro chod simulačního programu k dispozici, se využívají informace z databáze, která obsahuje základní parametry modelu pro specifické kombinace materiálu a brousicích kotoučů. Velice zajímavý je také simulační model, který spoju-

je model topografie orovnávacího nástroje, model kinematiky procesu orovnávání, model topografie brousícího nástroje, model kinematiky procesu broušení a geometrický model drsnosti povrchu obrobku do jediného celku (Warnecke aj., 1994). Simulační model, jehož schéma je uvedeno na obr. 10, umožňuje zkoumat vzájemné vazby v procesním řetězci zahrnujícím jak orovnávání brousícího nástroje, tak následné broušení.

Přínosy metod modelování a simulace procesu broušení jsou zejména v oblasti teoretického výzkumu obrábění a to především proto, že jsou významným nástrojem poznávání tohoto komplikovaného způsobu obrábění. Na druhé straně je třeba uvést, že se modelování vždy provádí za určitých zjednodušujících předpokladů a vytvořené modely platí pouze pro přesně vymezený úsek s omezenými podmínkami (Tönshof aj., 1992). I když dosud nebyl vytvořen obecný a univerzální model procesu broušení, jsou výzkumné práce základem pro vytváření báze znalostí o procesu broušení i pro jejich následné aplikace.



Obr. 10 Modelování a simulace procesního řetězce orovnávání a broušení (Warnecke aj., 1994)

Při opakovaném používání existujících technologických procesů i při návrhu nových postupů je nutné mít k dispozici aktuální technologické údaje. Pro shromaž-

dování a zpracovávání všech dostupných informací o jednotlivých technologických procesech se osvědčilo vytváření středisek technických informací. Ta střediska, která již ve světě vznikla, mají obvykle celostátní působnost a úzce spolupracují s velkými výrobními podniky, s vysokými školami a výzkumnými ústavy, od nichž také získávají část informací. Vznikají pak tzv. banky dat, ze kterých mohou všichni uživatelé technologií získávat potřebné informace. Tvorba a provozování databank úzce navazuje také na poznatky získané modelováním technologických procesů. Jejich budování bylo započato v roce 1963 v USA. V současnosti jsou vytvořeny i v řadě dalších zemí, např. v Japonsku, ve Velké Británii nebo v Německu. Některá střediska se omezují pouze na soustřeďování informací o procesech obrábění, jiná střediska, jako např. INFOS v SRN, zajišťují uživatelům také zpracování libovolného případu obrábění (Gazda aj.,-). Ve středisku INFOS, které bylo založeno při TU Aachen, jsou vyhodnocovány také informace o procesu broušení. Následným zpracováním údajů jsou stanoveny matematické závislosti (modely procesů) mezi řeznými podmínkami, parametry procesu a výsledky obrábění. Ty pak slouží pro zpracování normativů, nomogramů a počítačových programů, které se dále používají při optimalizaci procesu broušení.

Jinou formu využívání báze znalostí o procesu broušení představují brousící stroje, které jsou vybaveny systémy pro monitorizaci procesu broušení (Gabriel aj., 1998) nebo tzv. inteligentní brousící stroje, k jejichž řízení např. při výrobě a ostření nástrojů lze použít programové balíky dodávané výrobcem stroje (WALTER, -).

4. Simulační model procesu broušení

Pracoviště Katedry obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci se zabývá zkoumáním procesu broušení již dlouhodobě. Kromě teoretických poznatků o principech a metodách hodnocení procesu broušení a značného objemu výsledků experimentálního charakteru disponuje pracoviště katedry obrábění navíc širokou bází poznatků o modelování procesů broušení jak metodami fyzikálními, tak i matematickými. Při řešení modelu bylo tedy možno s výhodou použít informace, které jsou na pracovišti již shromážděny především ve formě výzkumných zpráv a diplomových prací.

Prezentovaný simulační model procesu broušení představuje originální řešení, které bylo vytvořeno na pracovišti autora. V jazyku FORTRAN, typ G a pro zpracování na sálovém číslicovém počítači EC 1033 byl autorem vytvořen podobný model procesu broušení již dříve. V rámci řešení grantů „Laboratoř pro matematické modelování technologických procesů“ a „Základní výzkum progresivních a vysoce přesných technologií“, byl simulační model zcela přepracován a program upraven pro použití na osobním počítači. Byly doplněny a rozšířeny možnosti výpočtu a v souvislosti s použitím programovacího jazyka Turbo Pascal byla též změněna struktura programu. V této kapitole bude princip simulačního modelu stručně prezentován.

4.1. Princip metody prostorové simulace

Dokončovací technologie obrábění broušením se vyznačuje řadou charakteristických rysů, jež vyplývají z geometrických, kinematických i technologických podmínek, za kterých tento proces probíhá. Podstatou vytvořené metody modelování procesu broušení je matematický popis probíhající interakce mezi zrny brusiva na broušicím kotouči a materiálem obrobku.

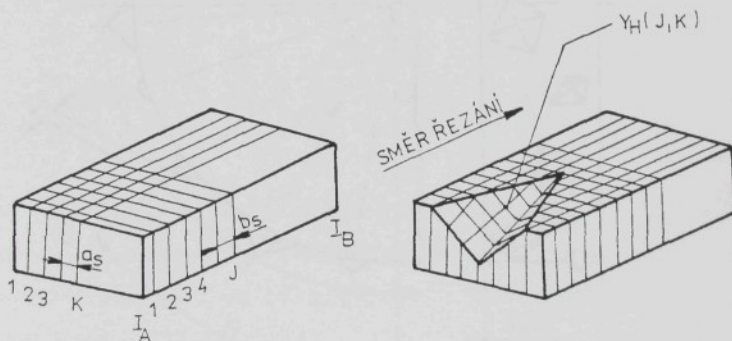
Pro modelování procesu broušení bylo zvoleno rovinné broušení obvodem kotouče. Broušení je z řady hledisek poměrně složitý technologický proces, a proto bylo nutné při vytváření simulačního modelu připustit některá zjednodušení (Jersák, 1988). Tato zjednodušení musí mít takový charakter, aby rozhodující znaky modelovaného procesu zůstaly zachovány. Při realizaci simulačního modelu procesu brou-

šení se předpokládá :

- absolutně tuhá soustava stroj - nástroj - obrobek - přípravek,
- že poloha zrna na brousicím kotouči je určena souřadnicemi vrcholu zrna X, Y, Z, přičemž souřadnice Z určuje velikost zrna brusiva,
- takový tvar zrna brusiva, kdy část zrna, jež vyčnívá z pojiva kotouče, má příčný profil ke směru obrábění ve tvaru rovnoramenného trojúhelníka s náhodně velikým vrcholovým úhlem a náhodně velikým poloměrem zaoblení vrcholu,
- že rozložení zrn brusiva v radiálním směru je závislé pouze na způsobu orovnění brousicího kotouče,
- že proces broušení je časově rozložený a jednotlivá zrna jsou modelována zvlášť a do záběru přicházejí postupně.

Základní prvky simulačního modelu procesu broušení tvoří model obrobku a model brousicího kotouče.

Obrobek je tvořen mřížkou a rozdělen na šířkové a délkové úseky. Jednotlivým bodům mřížky přísluší určitá hodnota, která udává výšku profilu v daném bodě mřížky. Na počátku simulovaného broušení jsou hodnoty výšky profilu všech bodů mřížky stejné. Při průchodu jednotlivých aktivních zrn brusiva se výšky profilu mění, jak je zřejmé z obr. 11.



Obr. 11 Modelovaný obrobek před broušením a po průchodu zrna brusiva

Brousicí kotouč je charakterizován vrcholy zrn brusiva, jež se nacházejí na jeho pracovním povrchu. Pro určení polohy jednotlivých modelovaných zrn brusiva

byla použita metoda využívající náhodných čísel, kterou prezentovali H. Yoshikawa a T. Sata (Yoshikawa aj., 1968).

$$X_i = f_x(W_1)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + f_y(W_2)$$

$$Z_i = f_z(W_3)$$

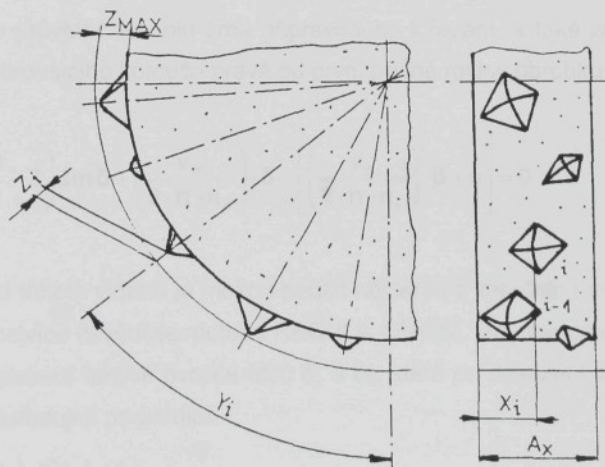
Výše uvedenou soustavu rovnic lze přímo aplikovat pro stanovení konkrétních matematických výrazů určujících polohu zrna brusiva na povrchu simulovaného kotouče (Yoshikawa aj., 1971).

$$X_i = A_x \cdot (W_1)$$

$$Y_i = Y_{i-1} - L_{STR} \cdot \log(W_2)$$

$$Z_i = Z_{MAX} \cdot (W_3)^a$$

Veličina A_x vyjadřuje šířku simulovaného brouscího kotouče, za L_{STR} je třeba dosadit hodnotu střední vzdálenosti zrn na obvodu kotouče, Z_{MAX} udává výšku aktivní vrstvy brouscího kotouče a a je exponent charakterizující rozložení zrn brusiva.



Obr. 12 Souřadnice vrcholů zrn brusiva na povrchu modelovaného brouscího kotouče

Veličiny W_1 , W_2 a W_3 jsou náhodná čísla s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti v intervalu od nuly do jedné. Způsob, jakým je určena poloha vrcholu zrna na modelovaném brousicím kotouči je zřejmý z obr. 12.

S pomocí náhodných čísel se určuje nejen poloha vrcholu zrna brusiva a jeho velikost, ale současně se náhodná čísla používají ke stanovení hodnoty vrcholového úhlu a poloměru zaoblení vrcholu zrna brusiva.

Simulace procesu rovinného broušení obvodem kotouče začíná tím, že se na brousicím kotouči namodeluje první zrna brusiva. Poté, co se vyhodnotí souřadnice vrcholu zrna vůči první příčné rovině obrobku, lze toto zrna brusiva otočit do polohy, kdy je připraveno k řezání. Vrchol zrna je pak těsně před modelovaným obrobkem. V tomto okamžiku se zahájí simulace otáčení brousicího kotouče řeznou rychlostí v_c a pohybu obrobku tangenciální rychlostí posuvu stolu brusky v_{ft} . Polohu, ve které vrchol vyšetřovaného zrna prochází první příčnou rovinou obrobku, určuje úhel δ , který svírá vertikální osa brousicího kotouče a průvodič bodu vrcholu zrna, jež se dotýká právě této příčné roviny obrobku. Neznámý úhel δ lze určit s použitím následující rovnice z průměru brousicího kotouče D , souřadnice vrcholu zrna brusiva na povrchu brousicího kotouče v radiálním směru Z , tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky v_{ft} , otáček brousicího kotouče n_s a dále z úhlu β , který svírá vertikální osa brousicího kotouče a průvodič vrcholu zrna připraveného k řezání, a také ze vzdálenosti vertikální osy brousicího kotouče právě od první příčné roviny obrobku u :

$$\left(\frac{D}{2} - Z\right) \sin \delta + \left(\frac{v_{ft}}{2 \cdot n \cdot n_s}\right) \cdot \delta - \left[\left(\frac{v_{ft}}{2 \cdot n \cdot n_s}\right) \cdot \beta + u\right] = 0$$

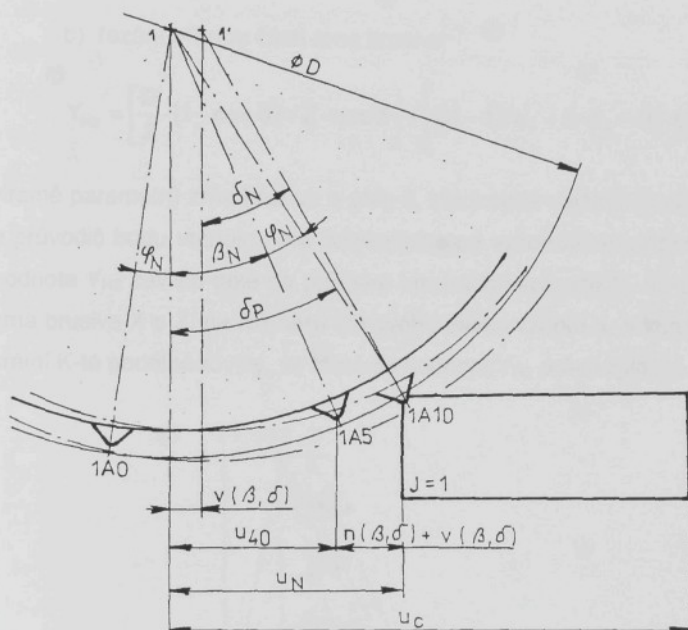
Pro řešení tohoto vztahu je možno použít některou z iteračních metod. V daném případě se nejvíce osvědčila metoda REGULA - FALS, tedy metoda sečen. Předpokladem je nalezení takové dvojice úhlů δ_1 a δ_2 , která po dosazení do řešeného vztahu splňuje následující podmínku:

$$f(\delta_1) \cdot f(\delta_2) < 0 .$$

Je-li tato podmínka splněna, pak lze stanovit úhel δ_3 :

$$\delta_3 = \delta_2 - \frac{f(\delta_2)}{f(\delta_2) - f(\delta_1)} \cdot (\delta_2 - \delta_1) .$$

Vypočítaný úhel δ_3 se vyznačuje tím, že se blíží kořenu rovnice pro výpočet neznámého úhlu δ s menší chybou, než tomu bylo pro úhly δ_1 a δ_2 . Opakováním iteračních kroků lze postupně nalézt takový úhel δ_i , který vyhovuje řešení rovnice pro výpočet neznámého úhlu δ s chybou přípustné velikosti (např. 10^{-8} až 10^{-12} rad). Situace při pootáčení brousicího kotouče s prvním zrnem brusiva do řezu je zřejmá z obr. 13.



Obr. 13 Pootáčení brousicího kotouče s prvním zrnem brusiva do řezu

Podobným způsobem se následně vyhodnotí poloha namodelovaného zrna v dalších příčných rovinách obrobku. Pokud je během vzájemného pohybu zrna brusiva jednotlivými příčnými rovinami obrobku zjištěno, že v jakémkoliv místě je vzdálenost od základny obrobku k odpovídajícímu bodu na povrchu zrna Y_{H2} menší, než původní hodnota výšky profilu obrobku v tomto bodě mřížky simulovaného obrobku Y_H , pak zde zrno brusiva právě odebírá materiál obrobku, tj. dochází zde k řezání. Původní hodnota Y_H je v tomto bodě nahrazena novou hodnotou Y_{H2} . Protože část zrna vyčnívající z pojiva kotouče má příčný profil ke směru obrábění ve tvaru rovno-ramenného trojúhelníka s náhodně velikým vrcholovým úhlem κ_s a poloměrem zaoblení vrcholu ρ , je třeba při výpočtu vzdálenosti Y_{H2} vždy rozlišit, zda zrno řeže

v zaoblené nebo v přímé části (Jersák, 1988). V níže uvedených vztazích je uvedeno, jak se tato okolnost projeví při výpočtu hodnoty Y_{H2} v jednotlivých bodech (daných K-tými podélnými rovinami) vyšetřované J-té příčné roviny:

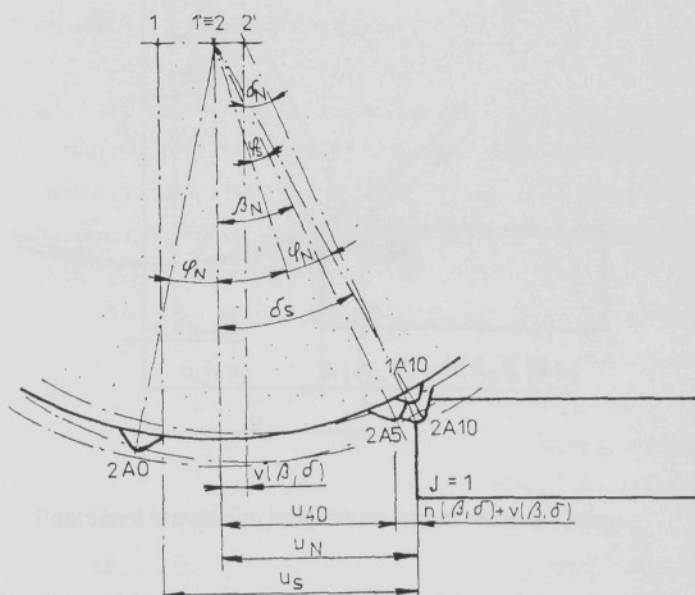
a) řezání zaoblenou částí zrna brusiva

$$Y_{H2} = \left[\frac{D}{2} \cdot (1 - \cos \delta) + Z \cdot \cos \delta \right] + \left[\rho - \sqrt{\rho^2 - [(K-1) \cdot a_s + 5 \cdot a_s - X]^2} \right],$$

b) řezání přímou částí zrna brusiva

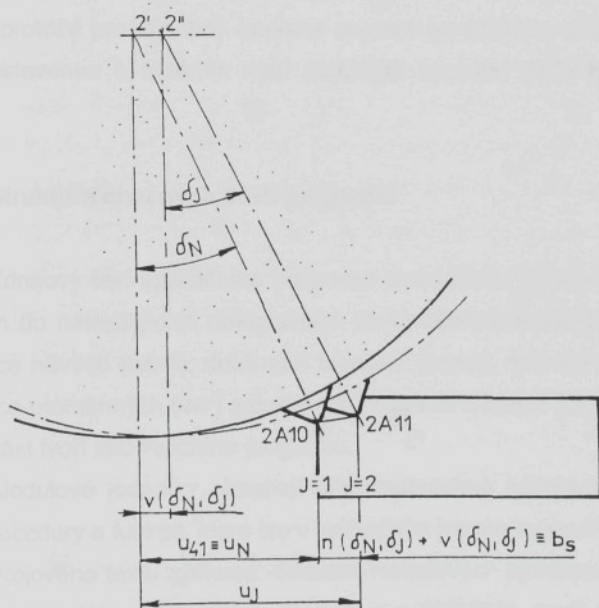
$$Y_{H2} = \left[\frac{D}{2} \cdot (1 - \cos \delta) + Z \cdot \cos \delta \right] + \left[[(K-1) \cdot a_s + 5 \cdot a_s - X] \cdot \operatorname{tg} \kappa_s - \left(\frac{\rho}{\cos \kappa_s} - \rho \right) \right]$$

Kromě parametrů zrna brusiva a úhlu δ , který svírá vertikální osa brousícího kotouče a průvodič bodu vrcholu zrna dotýkajícího se vyšetřované příčné roviny obrobku, je hodnota Y_{H2} závislá také na průměru brousícího kotouče D , na souřadnicích vrcholu zrna brusiva X a Z , na rozměru šířkového úseku vzorku a_s a konečně na poloze konkrétní K-té podélné roviny, ve které se hodnota Y_{H2} právě zjišťuje.



Obr. 14 Pootočení brousícího kotouče s druhým zrnem brusiva do řezu

Jestliže zrna brusiva odebralo materiál modelovaného obrobku, stává se tzv. aktivním zrnem. Postupným odebráním materiálu v jednotlivých podélných a příčných rovinách se na povrchu obrobku vytvoří rýha. V případě, že je vzdálenost k vrcholu zrna v jednotlivých bodech vždy větší než odpovídající hodnota výšky profilu obrobku v příslušných bodech mřížky, znamená to, že zrna brusiva pouze prochází nad materiálem modelovaného obrobku. Jestliže ani v jedné příčné a podélné rovině zrna neodebere materiál modelovaného obrobku, pak toto zrna nebude vyhodnoceno jako zrna aktivní. Poté co zrna vyjde ze záběru, vrátí se brousící kotouč do výchozí polohy a modeluje se zrna další. Pootočení brousícího kotouče s druhým (obecným) zrnem brusiva do řezu je znázorněno na obr. 14 a na dalším obrázku 15 je znázorněno pootáčení tohoto zrna v řezu.



Obr. 15 Pootáčení brousícího kotouče se zrnem brusiva v řezu

Oproti prvnímu zrně bude u dalších modelovaných zrn odlišná hodnota velikosti úhlu pootočení do řezu. Velikost difference polohy jednotlivých zrn odpovídá změně polohy modelovaného obrobku, který se rychlostí v_R posouvá do místa záběru. Celý postup se neustále opakuje až do okamžiku, kdy se celý obrobek posune za

vertikální osu modelovaného broušícího kotouče. Tím je broušení v daném zdvihu ukončeno. Takto lze obrobek brousit opakovaně a realizovat tak proces, který lze označit jako simulované vyjiskřování. Matematické vyjádření kinematických poměrů při záběru zrna brusiva bylo již autorem publikováno (Jersák, 1988).

4.2. Realizace simulačního modelu procesu broušení

Pro vytvoření aplikačního programu simulačního modelu procesu broušení na osobním počítači byl použit programovací jazyk Borland Pascal, verze 7.0, od firmy Borland International, Inc. Integrované prostředí Borland Pascal se skládá z editoru, překladače, sestavovacího programu (linkeru) a ladicího programu (debuggeru). Výhodou uvedené koncepce je, že umožňuje snadno vytvářet aplikační programy, protože pro všechny operace spojené se zápisem programu, jeho přeložením, sestavením a laděním není zapotřebí spouštět další programy (Mikula aj., 1994).

4.2.1. Struktura obecných částí programu

Zdrojový text aplikačního programu simulačního modelu procesu broušení je rozdělen do následujících deklaračních částí: definice modulových jednotek (uses), deklarace návěští (label), deklarace konstant (const), definice datových typů (type), deklarace proměnných (var) a deklarace procedur a funkcí (procedure, function). Poslední část tvoří tělo vlastního programu.

Modulové jednotky obsahují předdeklarované konstanty, proměnné, datové typy, procedury a funkce, které lze v aplikačním programu využívat, aniž by byly součástí zdrojového textu aplikace. Seznam modulových jednotek uvádí klauzule uses. V programu byla použita standardní jednotka SYSTEM, která je základní knihovnou Borland Pascalu a obsahuje všechny standardní aritmetické procedury a některé goniometrické funkce, dále obsahuje základní rutiny pro řešení operací vstupu a výstupu ap. Při překladu programu se tato jednotka jako jediná automaticky připojí k programu, aniž by bylo třeba použít klauzuli uses. Pro řízení systému zobrazení, vstupu z klávesnice a pro podporu práce s okny je v programu dále použita jednotka CRT. Velkou předností užívání této jednotky je zvýšená rychlost výstupních operací.

Programy, které jednotku nepoužívají, posílají svůj obrazový výstup na monitor prostřednictvím operačního systému, kdežto programy s CRT spolupracují přímo s obrazovou pamětí monitoru. Kromě standardních jednotek lze v programu použít také jednotky, které si uživatel vytvoří sám, tzv. vlastní jednotky. Aplikační program simulačního modelu procesu broušení byl rozdělen na několik vlastních jednotek. V přeloženém programu má každý modul, tzn. hlavní program a každá jednotka, svůj vlastní segment pro kód, jehož velikost nemůže překročit 64 KB a podobně nemůže překročit hranici 64 KB datový segment, který obsahuje všechny konstanty a globální proměnné (Mikula aj., 1994). S ohledem na tuto maximální kapacitu segmentů bylo nutné aplikační program simulačního modelu procesu broušení rozdělit na základní programovou jednotkou P2000U a další jednotky PU1PROM, PU2PROM, PU3DATA, PU4PODP. Aby bylo možno zadávat rozměry simulovaného obrobku co největší při současně velké hustotě bodů mřížky, která udává výšku profilu obrobku, byla celá jednotka PU1PROM využita pouze pro proměnnou vyjadřující výšku profilu vzorku v daném bodě obrobku. Všechny ostatní konstanty a proměnné, kterých je, jak je zřejmé z přílohy 1, celkem přes 290, byly definovány v jednotce PU2PROM. Načítání vstupních údajů a volbu typu výpočtu zajišťuje programová jednotka PU3DATA. Aby bylo možno zajistit zadávání vstupních parametrů jak z klávesnice počítače, tak z předem připravených datových souborů, byla tato jednotka koncipována tak, že načítání údajů i volba typu výpočtu probíhá v dialogovém režimu. Při odlaďování programu se však dialogový režim především z důvodu časové náročnosti neosvědčil. Proto byl program navíc doplněn programovou jednotkou PU3TEST, která umožňuje souhrnné načtení vstupních údajů i volbu typu výpočtu z jediného předem připraveného datového souboru. Podle charakteru práce lze pak použít jednotku PU3DATA nebo PU3TEST. Poslední a z hlediska rozsahu největší programová jednotka PU4PODP obsahuje všechny dílčí programy pro zajištění jednotlivých variant výpočtu, které jsou u aplikačního programu simulačního modelu procesu broušení k dispozici.

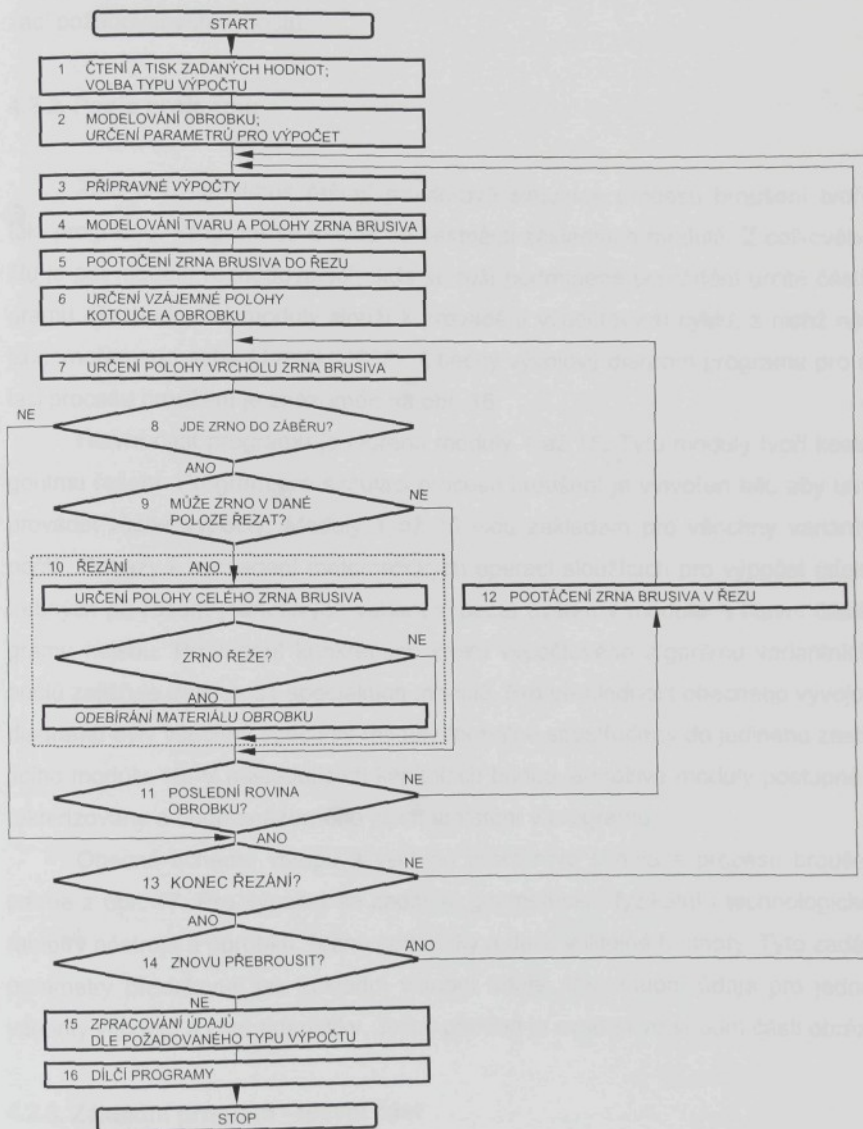
Další část programu tvoří deklarace návěští a konstant. Deklaraci návěští uvádí klíčové slovo label. Návěští definuje místo programu, na které se provádí tzv. skok. Z důvodu přehlednosti programu bylo snahou autora používat skoky pouze v nezbytných případech. Konstanty jsou prvky programu, které v průběhu výpočtu nemění svoji hodnotu. Jsou uvedeny klíčovým slovem const. Také konstanty byly v programu používány pouze v omezené míře.

Veškeré nestandardní datové typy se definují v sekci type. Zejména je nutné definovat strukturované typy, identifikátory jednoduchých typů ap.

Každou proměnnou použitou v aplikačním programu je třeba deklarovat. Deklarace proměnných se uvádí klíčovým slovem var. V simulačním programu procesu broušení byl pro celočíselné veličiny běžné velikosti použit základní jednoduchý datový typ „integer“ a pro veličiny, jež nabývají číselných hodnot s desetinnou částí byl použit datový typ „real“. Některé veličiny dosahují v průběhu výpočtu zvláště velkých hodnot, pro ně pak byly použity datové typy „longint“, příp. typ „extended“. Pro jednotlivé znaky byl použit typ „char“ a pro řetězce znaků typ „string“. Pokud bylo v programu třeba vyjádřit logické hodnoty (stav pravda nebo nepravda), byl použit datový typ „boolean“. Vedle jednoduchých datových typů byly dále použity tzv. strukturované datové typy. Pro definování souřadnic mřížky simulovaného obrobku, pro vymezení maximálního počtu příčných a podélných rovin obrobku a maximálního počtu přebroušení povrchu obrobku, pro určení maximální velikosti histogramu příčných průřezů třísek a vymezení maximálního počtu záznamů sil bylo použito typu pole „array“. Současně bylo nutno stanovit největší počet prvků, který se může do pole vložit, a typ veličiny. Při vytváření aplikačního programu simulačního modelu procesu broušení se ukázalo, že výše uvedená hranice datového segmentu není dostačující. Východiskem se stalo použití tzv. dynamické proměnné. Ta využívá tzv. haldu, která tvoří fond volné paměti, jehož velikost je pro Borland Pascal maximálně 640 KB (Mikula aj., 1994). Halda je svou organizací podobná zásobníku, který roste od nižších adres. Pokud se v haldě alokuje nová dynamická proměnná, posune se ukazatel haldy, ve kterém je uložen aktuální vrchol haldy. Jedna dynamická proměnná se tak ukládá za druhou a dohromady vytvářejí určitou hromadu proměnných. Tím se rozšiřují možnosti ukládání dat.

Procedury a funkce tvoří posloupnost instrukcí, které potřebujeme v programu provádět na různých místech programu. Rozdíl mezi procedurou a funkcí je v tom, že funkce vrací hodnotu a může být použita přímo v matematických výrazech. Procedura se vyvolá voláním procedury a slouží k provedení jedné nebo více operací. Jak bylo již výše uvedeno, je většina základních aritmetických procedur a goniometrických funkcí obsažena v jednotce SYSTEM. V programu simulačního modelu procesu broušení bylo třeba definovat pouze ty funkce, které v této základní jednotce nebyly k dispozici. Konkrétně byl deklarován výpočet funkce tangens, výpočet dekadického logaritmu, výpočet funkce X na Y -tou, transformace velikosti úhlu z radiánů na stup-

ně a vyčíslení Gaussova integrálu pomocí rozkladu funkce do Taylorovy řady. Jako procedura bylo deklarováno generování náhodných čísel s normálním rozdělením



Obr. 16 Obecný vývojový diagram programu pro simulaci procesu broušení

pravděpodobnosti, testování velikosti zadávaných veličin, dále byla deklarována iterační metoda regula - falsi (metoda sečen) a tímto způsobem byly také definovány všechny dílčí části programu, které tvoří speciální výpočtové moduly a slouží k realizaci požadovaných výpočtů.

4.2.2. Popis programu

Základní algoritmus řešení prostorové simulace procesu broušení tvoří tzv. tělo programu. Program se skládá ze šestnácti základních modulů. Z celkového počtu je pět modulů rozhodovacích, kde se řeší podmíněné provádění určité části programu. Rozhodovací moduly slouží k provádění výpočtových cyklů, z nichž některé jsou vnořeny do sebe (Jersák, 1988). Obecný vývojový diagram programu pro simulaci procesu broušení je znázorněn na obr. 16.

Hlavní část programu je tvořena moduly 1 až 15. Tyto moduly tvoří kostru algoritmu řešení. Program pro simulaci procesu broušení je vytvořen tak, aby umožnil provádět různé výpočty. Moduly 1 až 15 jsou základem pro všechny varianty výpočtů. Příkazy k provedení matematických operací sloužících pro výpočet údajů potřebných při řešení jednotlivých variant výpočtů ovšem v modulech hlavní části programu nejsou. Provedení konkrétních kroků výpočtového algoritmu variantních výpočtů zajišťuje dalších 31 speciálních modulů. Pro přehlednost obecného vývojového diagramu byly všechny speciální moduly formálně soustředěny do jediného zastřešujícího modulu 16. V následujících kapitolách budou jednotlivé moduly postupně charakterizovány a bude znázorněno jejich umístění v programu.

Obecné schéma vstupu a výstupů prostorové simulace procesu broušení je patrné z obr. 17. Pro výpočet se zadávají geometrické, fyzikální i technologické parametry nástroje a obrobku, řezné podmínky a další volitelné hodnoty. Tyto zadávané parametry představují jak základní vstupní údaje, tak vstupní údaje pro jednotlivé varianty výpočtu a charakteristiky. Jejich přehled je uveden ve spodní části obrázku.

4.2.3. Základní program - hlavní část

Modul 1 na obr. 16 slouží k načítání zadaných hodnot a k jejich exportu do tiskového souboru. Zároveň slouží také k volbě požadovaného typu výpočtu a k ná-

Schéma vstupu a výstupů prostorové simulace procesu broušení

Vstup : zadávané veličiny

Geometrické, fyzikální a technologické parametry		Řezné podmínky	Volitelné hodnoty
- brousícího kotouče	- obrobku		
D ALFA QLSTR1 AMAX QMI1 SIGMA1 QMI2 SIGMA2 CK ROK LAMK	IA IB AS BS KONST1 KONST2 KONST3 KONST4 COB ROOB LAMOB	EN VFT AE IPRC	EXPER CHYBA IEND TEST1 TEST2 TEST3 TEST4 JROV UMS1 HL_U CAS_U ZGR ZAZN1



PROSTOROVÁ SIMULACE PROCESU BROUŠENÍ



Výstup : výsledné hodnoty a charakteristiky

Počet aktivních zrn	Průřez nedeform. trhsek	Řezná síla	Drsnost povrchu	Teplota v povrch. vrstvě	Souhrn charakteristik procesu a kontrola zadaných hodnot
---------------------------	-------------------------------	---------------	--------------------	--------------------------------	--

Obr. 17 Vstupní veličiny a výstupní parametry při simulaci procesu broušení

slednému zadání příslušných dat a parametrů pro zvolený výpočet. Vytváření simulovaného obrobku je realizováno v **modulu 2**. Zde jsou též zavedeny určité proměnné, které následně urychlují výpočet. V **modulu 3** jsou prováděny přípravné výpočty. Jejich cílem je zajištění počátečního stavu pro simulaci procesu, případně jsou zde zavedeny další proměnné, které slouží k uchování údajů pro pozdější použití. V průběhu simulace je určován relativní čas, který odpovídá času skutečně uplynulému při reálném broušení. V modulu 3 jsou proto prováděny i základní výpočty pro zajištění časového průběhu simulovaného broušení. S použitím funkce Random, která je standardně k dispozici v jednotce SYSTEM, se v **modulu 4** modelují simulovaná zrna brusiva. Funkce Random generuje náhodná čísla v intervalu od nuly do jedné (Mikula aj., 1994). Výpočtový algoritmus je vytvořen tak, aby se jednotlivá zrna modelovala v náhodné poloze na obvodě simulovaného brousícího kotouče a aby se současně u každého zrna s použitím náhodných čísel modeloval náhodně veliký vrcholový úhel zrna a náhodně veliký poloměr zaoblení vrcholu zrna. V tomto okamžiku je již vytvořen simulovaný obrobek, a tak je možno brousící kotouč se zrnem brusiva pootočit do řezu, což je realizováno v **modulu 5**. Rozhodujícím krokem je stanovení úhlu, který svírá vertikální osa brousícího kotouče s průvodičem bodu vrcholu zrna, který se právě dotýká první příčné roviny obrobku. Pro určení úhlu se osvědčila iterační metoda regula - falsi, nebo-li metoda sečen, která se v modulu 5 používá jako procedura. V dalším **modulu 6** se určuje vzájemná poloha kotouče a obrobku. Ta je dána vzdáleností, o kterou se brousící kotouč posunul od počáteční polohy. Stanoví se také čas, který uplynul od počátku procesu broušení. Následně se v **modulu 7** vypočítá přesná poloha vrcholu zrna brusiva a ta se pak transformuje do souřadného systému příslušné příčné roviny obrobku. **Modul 8** je prvním rozhodovacím modulem, kde dochází k větvení programu. Porovnáním údajů charakteristických pro aktuální polohu vrcholu zrna brusiva v souřadném systému obrobku s dřívějšími údaji lze stanovit, zda jde zrno do záběru nebo zda již ze záběru vychází. Pokud zrno ze záběru vychází, je zbytečné pokračovat v dalších výpočtech a přechází se na modul 13. Jestliže jde zrno do záběru, pokračuje výpočet dalším rozhodovacím **modulem 9**. Tento modul slouží k urychlení výpočtu. Umožňuje rychle vyhodnotit, zda může být simulované zrno brusiva v dané rovině aktivní nebo zda bude zrno pouze „řezat vzduch“. Jestliže se zjistí, že zrno brusiva v dané rovině aktivní nebude, je opět zbytečné pokračovat ve výpočtech a přechází se na modul 11. Jestliže jsou splněny

předpoklady pro to, aby mohlo zrno v dané rovině řezat, pokračuje výpočet v **modulu 10**. Jak je patrné z obr. 16, lze tento modul dále rozdělit na tři samostatné části. Nejprve se určuje poloha simulovaného zrna brusiva vůči obrobku, tj. v jednotlivých průmětech dané příčné roviny se stanoví výška od základny vzorku k zrnu brusiva nad každým bodem mřížky a její velikost se porovná s příslušnou hodnotou stávající výškové souřadnice simulovaného obrobku v témže bodě. Pokud je v daném bodě výška od základny vzorku k zrnu brusiva menší než původní výšková souřadnice simulovaného obrobku, znamená to, že v tomto bodě mřížky zrno brusiva řeže. Místo původní hodnoty výškové souřadnice simulovaného obrobku se pak dosadí nová hodnota, tj. realizuje se proces odebrání materiálu obrobku. Tyto děje se odehrávají v určité příčné rovině simulovaného obrobku. V rozhodovacím **modulu 11** se určuje, zda touto příčnou rovinou nebyla již poslední rovina obrobku. Pokud tomu tak nebylo, pak se v **modulu 12** zajistí pootočení zrna brusiva v řezu. Podobně jako v modulu 5 se i zde s použitím iterační metody regula - falsi stanoví velikost úhlu, který svírá vertikální osa brousicího kotouče s průvodičem bodu vrcholu zrna, který se právě dotýká následující příčné roviny obrobku. Dále se v modulu 7 stanoví přesná poloha vrcholu zrna brusiva a další algoritmus výpočtu je stejný jako při působení zrna brusiva v první rovině obrobku. Pokud se v modulu 11 zjistí, že zrno působilo v poslední rovině obrobku, je možno postoupit na další rozhodovací **modul 13**, kde je třeba zjistit, zda se v důsledku neustálého vzájemného pohybu kotouče a obrobku dostala vertikální osa simulovaného brousicího kotouče za poslední rovinu obrobku, tedy zda je proces broušení ukončen, či nikoliv. Zároveň se určí celkový čas, který uplynul v průběhu procesu broušení. Pokud proces řezání ukončen není, pak se v modulu 3 následně modeluje nové zrno brusiva. Uvedená posloupnost kroků, která simuluje práci dalších zrn brusiva obdobným způsobem jako u prvního zrna, se neustále opakuje až do okamžiku, kdy je proces broušení ukončen, tj. do okamžiku, kdy se vertikální osa simulovaného brousicího kotouče posune za poslední rovinu obrobku. Pak řešení pokračuje v posledním rozhodovacím **modulu 14**, kde se ověřuje, zda bylo požadováno povrch obrobku znovu přebrousit a tak realizovat proces vyjiskřování. Je-li přebroušení požadováno, postupuje výpočet do modulu 3, kde je zajištěno, že se simulovaný brousicí kotouč vrátí zpět do výchozí polohy, tj. do polohy před započatím simulovaného broušení, přičemž ovšem výškové souřadnice jednotlivých bodů mřížky obrobku zůstávají ve stavu, který odpovídá profilu povrchu po předchozím broušení. Podle požadovaného počtu vyjiskřovacích zdvihů lze proces přebroušení

opakovat. Jestliže byly všechny zdvihy simulovaného broušení provedeny, pokračuje výpočet v **modulu 15**, kde se podle požadovaného typu výpočtu zajistí konečné zpracování údajů a export vypočítaných hodnot na monitor a do tiskového souboru.

4.2.4. Základní program - varianty výpočtu

S použitím prostorové simulace procesu broušení je možno stanovit řadu parametrů procesu broušení:

- počet aktivních zrn,
- průřez nedeformované třísky,
- velikost řezné síly při broušení,
- parametry drsnosti povrchu obrobku,
- teplotu v povrchové vrstvě obrobku,

případně provést některé kontrolní a informativní výpočty:

- souhrn charakteristik procesu a kontrola zadaných hodnot.

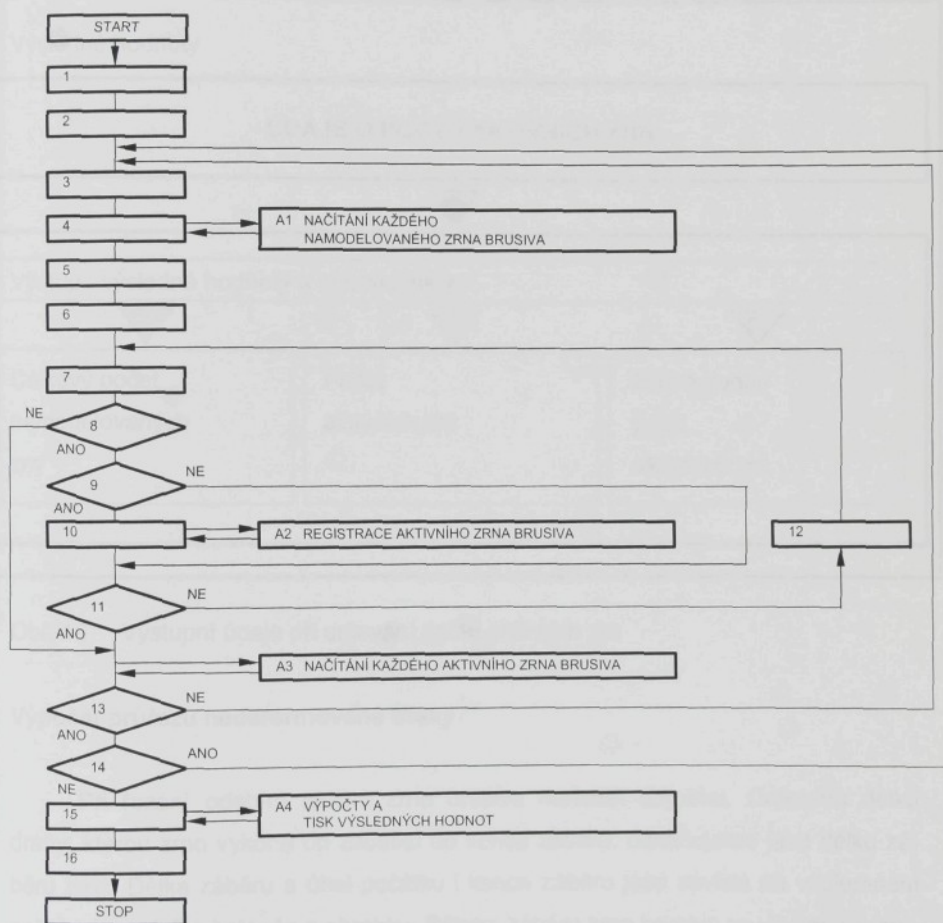
Pro určení příslušných údajů byly vytvořeny výpočtové varianty. Dále budou postupně prezentovány příslušné speciální výpočtové moduly, které byly v základní části programu formálně soustředěny do jediného **modulu 16**.

Určování počtu aktivních zrn

V důsledku stavby brousicího nástroje a kinematických poměrů při obrábění se do záběru dostávají pouze některá zrna brusiva z povrchu kotouče. Tato zrna označujeme jako zrna aktivní a jejich počet je důležitou veličinou charakterizující dynamické poměry při broušení (Očkoš aj., 1986).

V procesu prostorové simulace procesu broušení jsou aktivními ta zrna brusiva, která v průběhu své interakce se simulovaným obrobkem způsobí úběr materiálu v kterékoliv rovině obrobku. Pro vyhodnocení aktivních zrn slouží v programu čtyři speciální výpočtové moduly, jež byly označeny symboly A1 až A4. **Modul A1** je propojen s modulem 4 základní části programu, ve kterém se simulovaná zrna brusiva modelují, a zajišťuje načítání každého modelovaného zrna brusiva. Další **modul A2** jednoduchým způsobem registruje jakýkoliv úběr materiálu u zrna, které se dostalo do záběru. **Modul A3** slouží k registraci aktivního zrna brusiva. Protože zrno může

řezat buď v jedné nebo i v několika příčných a podélných rovinách simulovaného obrobku, zajišťuje tento modul především to, aby bylo každé aktivní zrno brusiva načteno pouze jednou. Poslední **modul A4** slouží k provedení jednoduchých výpočtů a k zobrazení výsledných hodnot na monitoru a k uložení do tiskového souboru. Propojení výpočtových modulů pro určování počtu aktivních zrn s moduly základní části programu je znázorněno na obr. 18.

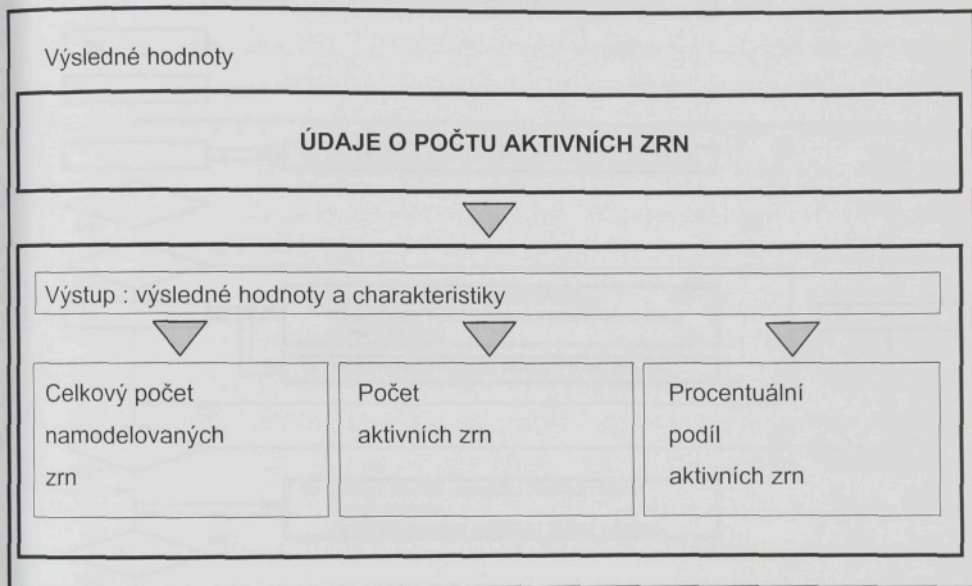


Obr. 18 Schéma vazeb mezi moduly při určování počtu aktivních zrn

Při určování počtu aktivních zrn jsou během výpočtu průběžně načítány údaje o celkovém počtu namodelovaných zrn n_{celk} a celkovém počtu aktivních zrn n_{aktiv} . Procentuální podíl aktivních zrn N_{aktiv} se určí dle následujícího vztahu:

$$N_{\text{aktiv}} = \frac{n_{\text{aktiv}}}{n_{\text{celk}}} \cdot 100 \text{ .}$$

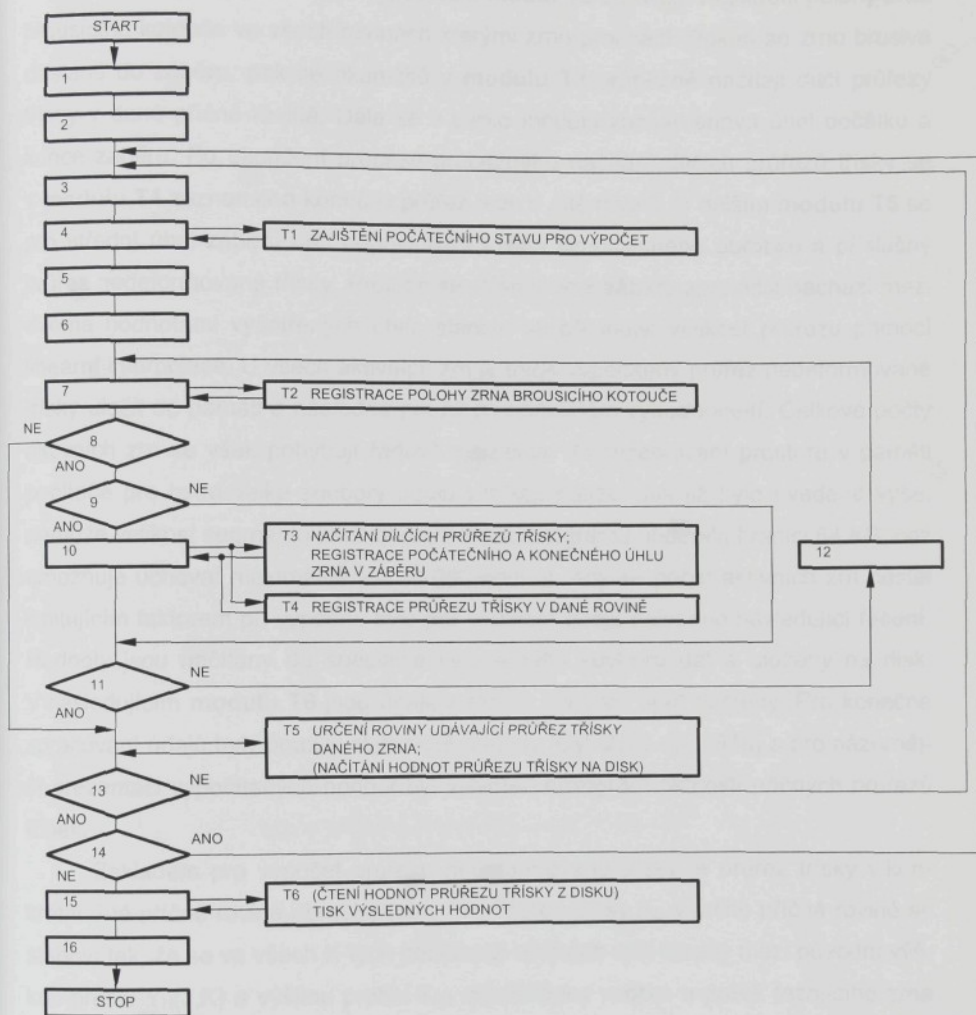
Grafické znázornění výstupních údajů je uvedeno na obr. 19.



Obr. 19 Výstupní údaje při určování počtu aktivních zrn

Výpočet průřezu nedeformované třísky

Při řezání odebírá aktivní zrno brusiva materiál obrobku. Celkovou délku dráhy, kterou zrno vykoná od začátku do konce záběru, označujeme jako délku záběru zrna. Délka záběru a úhel počátku i konce záběru jsou závislé na vzájemném pohybu brousícího kotouče a obrobku. Během záběru zrna brusiva se vlivem kinematických poměrů neustále mění průřez řezu. Pod pojmem průřez nedeformované třísky se rozumí střední hodnota průřezu řezu, který odpovídá polovičnímu úhlu záběru. Hodnota průřezu nedeformované třísky má praktický význam zejména při studiu utváření třísky a při výpočtu řezné síly (Gazda aj., 1993).



Obr. 20 Vazby mezi moduly při výpočtu průřezu nedeformované třísky

Výpočet průřezu nedeformované třísky je realizován šesti speciálními moduly, jejichž návaznost na hlavní část základního programu je znázorněna schématem na obr. 20. První z nich slouží k zajištění počátečního stavu pro výpočet a je označen jako **modul T1**. V tomto modulu se pro jednotlivá modelovaná zrna brusiva vynulují dříve určené hodnoty úhlu sevřeného vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu dotyku vrcholu zrna a hodnoty průřezu třísky v jednotlivých příčných rovi-

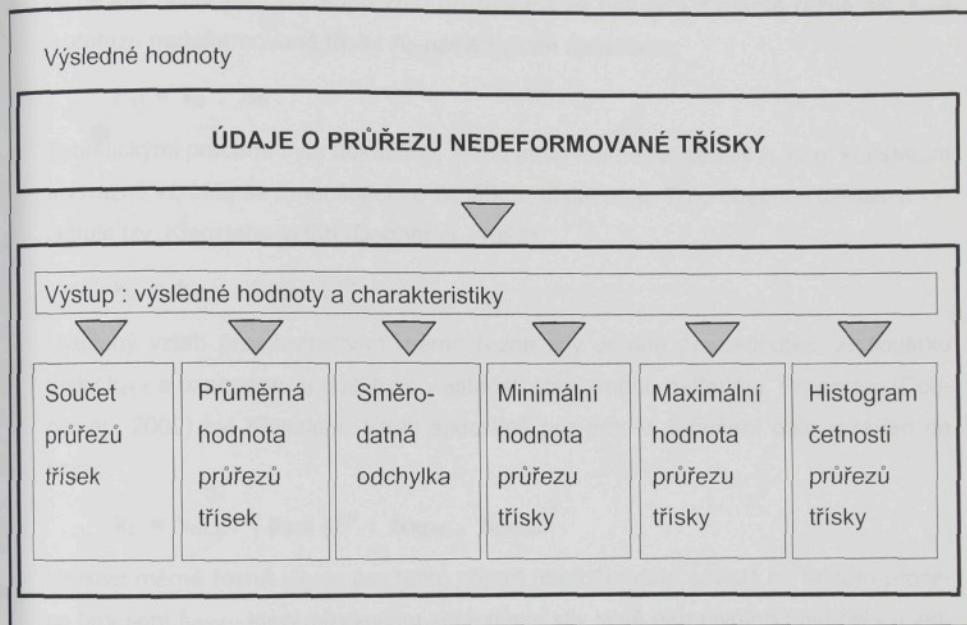
nách obrobku při opakovaných výpočtech. **Modul T2** zajišťuje registraci polohy zrna brousícího kotouče ve všech rovinách kterými zrno prochází. Pokud se zrno brusiva dostane do záběru, pak se okamžitě v **modulu T3** průběžně načítají dílčí průřezy třísky v dané příčné rovině. Dále se v tomto modulu zaznamenává úhel počátku a konce záběru. Po ukončení procesu průběžného načítání dílčích průřezů třísky se v **modulu T4** zaznamená konečný průřez řezu v J-té rovině. V dalším **modulu T5** se pro střední úhel záběru určí odpovídající rovina simulovaného obrobku a příslušný průřez nedeformované třísky. Protože se střední úhel záběru zpravidla nachází mezi dvěma hodnotami vyšetřených úhlů, stanoví se přesnější velikost průřezu pomocí lineární interpolace. U všech aktivních zrn je třeba vypočítaný průřez nedeformované třísky uložit do paměti a následně použít při konečném vyhodnocení. Celkové počty aktivních zrn se však pohybují řádově v tisících. Při rezervování prostoru v paměti počítače pro takto velké soubory údajů vznikají potíže. Jak již bylo uvedeno výše, nemůže velikost segmentu jakéhokoliv modulu programu překročit hranici 64 KB, což umožňuje uchovat maximálně asi 10 000 hodnot. Aby se počet aktivních zrn nestal limitujícím faktorem při výpočtu, bylo pro ukládání údajů nalezeno následující řešení. Hodnoty jsou načítány do speciálně vytvořeného souboru dat a uloženy na disk. V následujícím **modulu T6** jsou údaje z tohoto souboru opět načteny. Pro konečné zpracování údajů byly použity statistické metody (Cyhelský aj., 1978) a pro názornější prezentaci vypočítaných hodnot byl vytvořen histogram četnosti příčných průřezů třísek.

Základem pro výpočet průřezu nedeformované třísky je průřez třísky v konkrétní J-té příčné rovině obrobku (obr. 11). Průřez třísky A_D v určité příčné rovině se stanoví tak, že se ve všech K-tých podélných rovinách určí rozdíly mezi původní výškou profilu $Y_H(J,K)$ a výškou profilu Y_{H2} od základny vzorku u právě řezajícího zrna brusiva nad konkrétním bodem mřížky dle následujícího vztahu:

$$A_D = \sum_{K=1}^{I_A} C_1 \cdot |Y_H(J,K) - Y_{H2}| \cdot$$

Konstanta C_1 je rovna délce šířkového úseku vzorku a_s , pouze na krajích obrobku (pro $K=1$ a $K=I_A$) je její velikost poloviční. Jestliže takto určíme průřezy třísky ve všech rovinách, ve kterých určité zrno působí, a vedle toho určíme také počáteční a konečný úhel záběru, můžeme pak pro poloviční úhel záběru u daného zrna brusiva stanovit průřez nedeformované třísky. Z hodnot vypočítaných pro jednotlivá aktivní

zrna lze souhrnně určit následující údaje: součet průřezů třísek, průměrná hodnota průřezů třísek, výběrová směrodatná odchylka (Rektorys, 2000), dále minimální a maximální vypočítaná hodnota průřezu třísky a histogram četnosti průřezů třísky. Grafické znázornění výstupních údajů shrnuje obr. 21.



Obr. 21 Výstupní údaje o průřezu nedeformované třísky

Výpočet řezné síly při broušení

Řezné síly při broušení vznikají vzájemným účinkem nástroje a obrobku. Působením řezné síly se překonává řezný odpor obráběného materiálu. Při broušení odebírají břity zrn brusiva třísky nepatrných rozměrů a odpovídající síly jsou velmi malé. Protože je však v současně záběru mnoho aktivních zrn brusiva, mohou výsledné síly dosáhnout i značné velikosti. Se zvětšováním řezných sil se zároveň zvětšují také síly mezi prvky technologické soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek a v oblasti řezání i na povrchu obrobku se zvyšují teploty, čímž se zhoršuje přesnost broušení a ovlivňuje kvalita broušeného povrchu. Současně dochází k opotřebování broušícího nástroje. Význam zkoumání problematiky řezných sil při obrábění

bění lze formulovat následujícím způsobem: „Všechny děje, spojené s procesem obrábění, se zrcadí v řezných silách“ (Gazda aj., 1993).

K určení velikosti síly při modelování procesu broušení byl použit způsob výpočtu vycházející z měrné řezné síly určené pro jednotkovou tloušťku třísky. Velikost řezné síly připadající na jedno zrn brusiva F_{c1} se pak určí z měrné řezné síly k_c a z průřezu nedeformované třísky A_D následujícím způsobem:

$$F_{c1} = k_c \cdot A_D.$$

Teoretickými pracemi bylo dokázáno, že hodnota měrné řezné síly k_c není konstantní a výrazně vzrůstá se zmenšující se tloušťkou třísky a_{STR} . Tuto obecnou závislost vyjadřuje tzv. Kienzleho vztah (Degner aj., 1993):

$$k_c = k_{c1.1} \cdot (a_{STR})^{-u}.$$

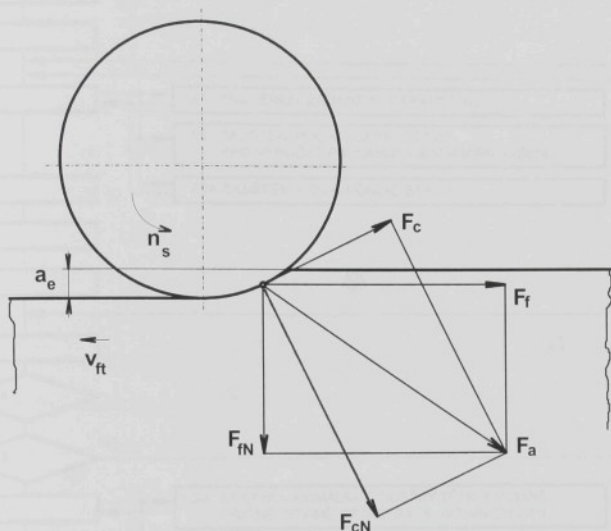
Uvedený vztah prostřednictvím měrné řezné síly určené pro jednotkovou tloušťku třísky $k_{c1.1}$ a exponentu u postihuje vlastnosti obráběného materiálu. Pregerem (Degner aj., 2002) byl Kienzleho vztah speciálně pro proces broušení dále rozšířen do tvaru:

$$k_c = k_{c1.1} \cdot (a_{STR})^{-u} \cdot f_{BROU} \cdot K_{BROU}.$$

Velikost měrné řezné síly je pro tento případ obrábění dále závislá na faktoru procesu broušení f_{BROU} , který především zohledňuje vliv silně negativního úhlu čela u jednotlivých zrn brusiva a další vlivy, jako zrnitost, tvrdost a pojivo brousícího kotouče. Jeho velikost byla zjištěna experimentálně a je publikována v literatuře (Degner aj., 2002), (Jersák, 1988). Hodnota dalšího členu K_{BROU} , tzv. korekčního faktoru rychlosti broušení, je pro běžné případy broušení rovna 1,0, při rychlostním broušení ovšem dosahuje hodnot 0,8 - 0,9.

Základem výpočtu řezné síly je určení střední tloušťky třísky a_{STR} každého aktivního zrna brusiva. Při řešení se současně použije výše uvedený algoritmus stanovení průřezu nedeformované třísky. V této souvislosti je třeba upozornit na tu skutečnost, že průřez třísky se určuje ve svislé rovině a nikoliv v rovině kolmé na vektor řezné rychlosti. Aplikací výše uvedeného postupu výpočtu proto určíme velikost tangenciální složky síly, tj. síly posuvu F_f a nikoliv požadovanou hodnotu řezné síly F_c . Rozdíly mezi vektory sil F_f a F_c jsou patrné z obr. 22. Na uvedeném schematickém obrázku je rozdíl mezi silami značný, to je ovšem způsobeno hodnotou znázorněné velikosti pracovního radiálního záběru a_e . Při konvenčním broušení se velikost a_e

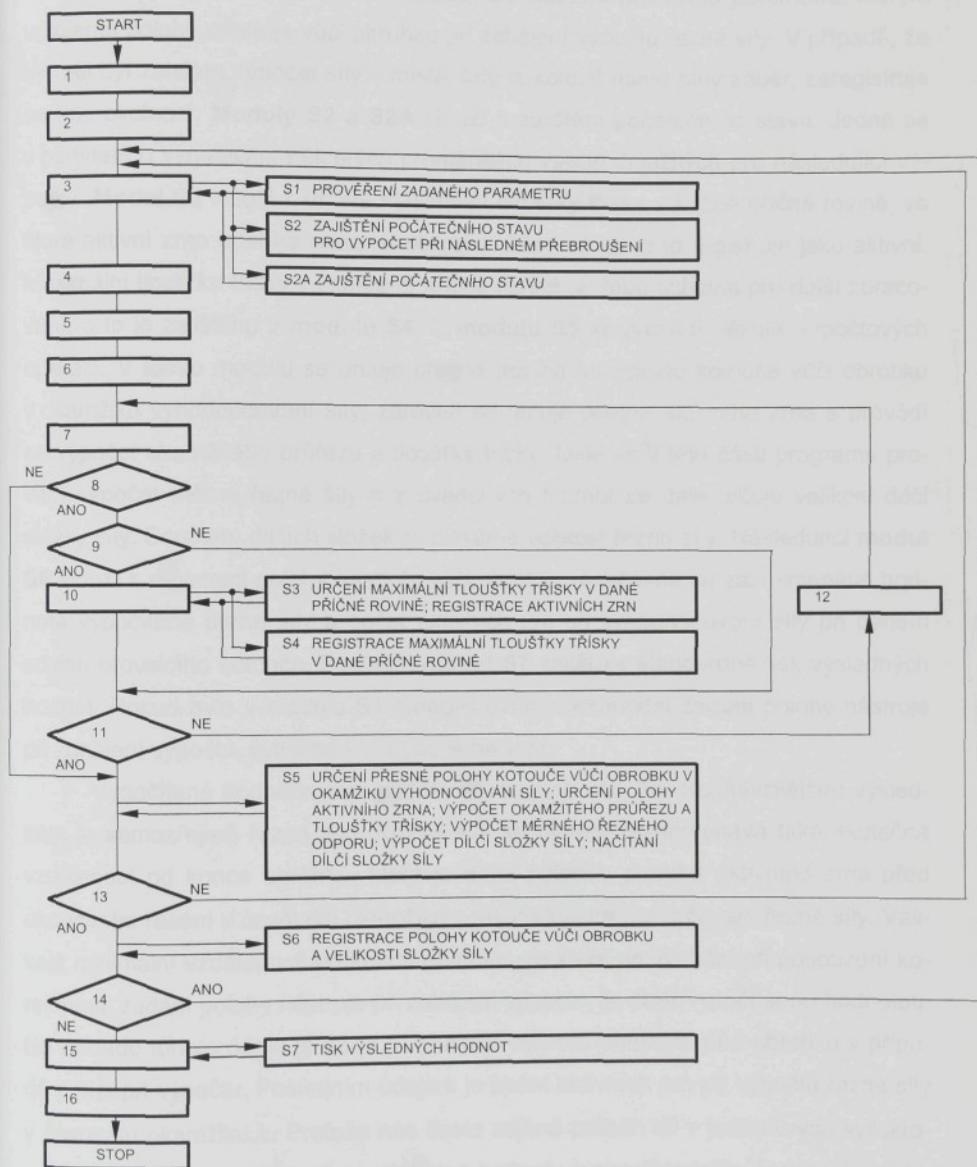
pohybuje řádově v tisícinách až setinách milimetru. Např. pro brousicí kotouč průměru 300 mm a hloubku záběru $a_e = 0,05$ mm je velikost úhlu mezi vektory sil F_f a F_c necelý jeden stupeň. S ohledem na takto malý úhel lze vzniklou chybu zanedbat a uvažovat, že uvedeným postupem výpočtu určíme hodnotu řezné síly F_c .



Obr. 22 Rozklad sil při rovinném broušení obvodem kotouče
(podle - ČSN ISO 3002-4)

Řezná síla je výslednicí složek dílčích sil, které působí na břity jednotlivých aktivních zrn brusiva v záběru. Je zřejmé, že počet aktivních zrn brusiva nezůstává konstantní a v průběhu procesu broušení se mění. Výsledkem experimentálního měření řezné síly je tedy střední hodnota síly zaznamenaná měřicím zařízením. Určení velikosti řezné síly při matematickém modelování je poměrně komplikované především z toho důvodu, se jednotlivá zrna modelujeme postupně. Zahájení výpočtu se proto váže na určitou polohu simulovaného brousícího kotouče vůči obrobku. Vyhodnocování síly začneme provádět tehdy, když nástroj dosáhne vůči obrobku předem zvolené polohy. U prvního aktivního zrna, které poté vejde do záběru určíme polohu a úhel, který charakterizuje polohu tohoto zrna při řezání v poslední rovině před ukončením záběru. Polohou zrna je určen časový okamžik τ pro určování složky síly. Polohy všech dalších aktivních zrn, které jsou v záběru pak vztahujeme k poloze prvního aktivního zrna v okamžiku τ . Pro určení střední hodnoty řezné síly je třeba

výpočet za konstantních řezných podmínek provádět opakovaně při různých vzájemných polohách nástroje a obrobku (Jersák, 1988).

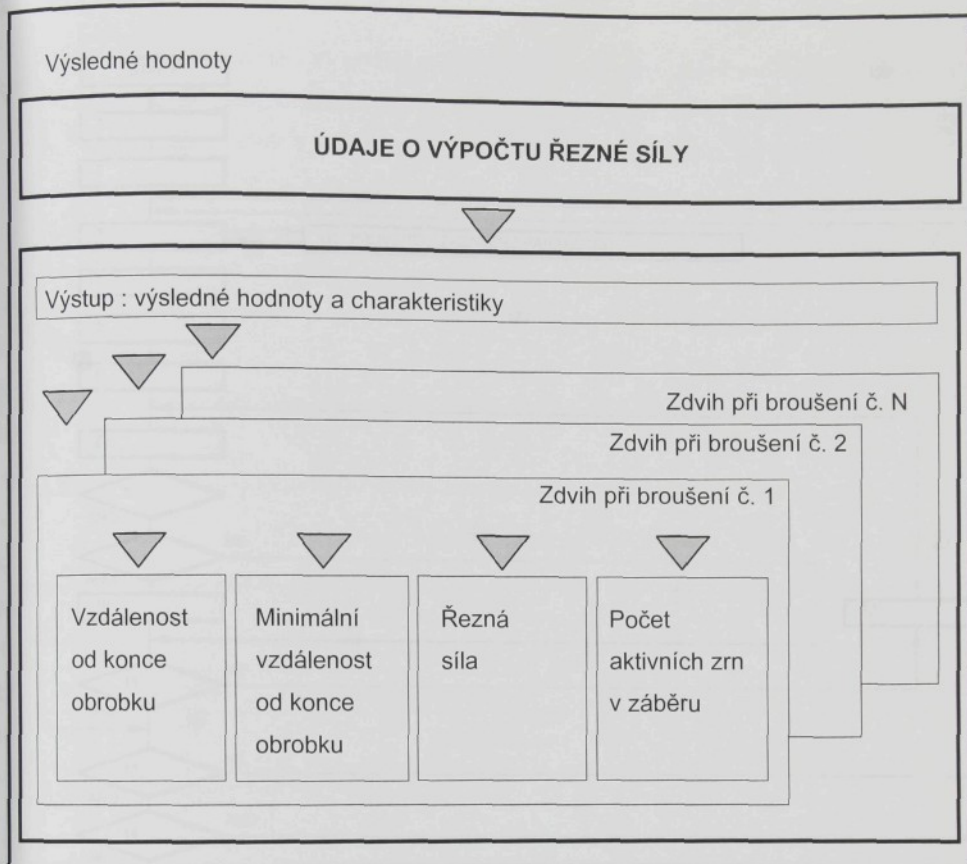


Obr. 23 Vazby mezi moduly při výpočtu řezné síly

Pro výpočet řezné síly při simulovaném broušení slouží v programu osm speciálních výpočtových modulů, které jsou připojeny k základnímu programu způsobem, jež je znázorněn na obr. 23. **Modul S1** slouží k prověření parametru, kterým určujeme polohu nástroje vůči obrobku při zahájení výpočtu řezné síly. V případě, že by měl být zahájen výpočet síly v místě, kdy je kotouč mimo plný záběr, zaregistruje se tato okolnost. **Moduly S2 a S2A** slouží k zajištění počátečního stavu. Jedná se v podstatě o vynulování některých proměnných veličin důležitých pro následující výpočty. **Modul S3** slouží k určení maximální tloušťky třísky v každé příčné rovině, ve které aktivní zrna odebírá materiál obrobku. Zároveň se zrna registruje jako aktivní. Maximální tloušťku třísky v konkrétní příčné rovině je třeba uchovat pro další zpracování, a to je zajištěno v **modulu S4**. V **modulu S5** se provádí několik výpočtových operací. V tomto modulu se určuje přesná poloha brousícího kotouče vůči obrobku v okamžiku vyhodnocování síly, zároveň se určuje poloha aktivního zrna a provádí se výpočet okamžitého průřezu a tloušťky třísky. Dále se v této části programu provádí výpočet měrné řezné síly a z uvedených hodnot se dále určuje velikost dílčí složky síly. Součtem dílčích složek sil získáme velikost řezné síly. Následující **modul S6** slouží k registraci polohy nástroje vůči obrobku, současně se zaznamenává hodnota vypočítané řezné síly a počet aktivních zrn při vyhodnocování síly při daném zdvihu brousícího kotouče. Poslední **modul S7** zajišťuje standardně tisk výsledných hodnot. Pokud bylo v modulu S1 zaregistrováno nekorektní zadání polohy nástroje při zahájení výpočtu, vytiskne se chybové hlášení.

Vypočítané hodnoty jsou graficky shrnuty na obr. 24. Nejdůležitějším výsledkem je samozřejmě řezná síla. Kromě síly se ovšem zaznamenává také skutečná vzdálenost od konce obrobku, která je dána polohou prvního aktivního zrna před ukončením řezání v časovém okamžiku τ , rozhodujícím pro určování řezné síly. Velikost minimální vzdálenosti od konce obrobku, ze které se vychází při posouzení korektnosti zadání polohy nástroje při zahájení výpočtu, je další vypočítanou hodnotou. Na základě tohoto údaje je třeba přizpůsobit velikost simulovaného obrobku v případě potíží při výpočtu. Posledním údajem je počet aktivních zrn při výpočtu řezné síly v časovém okamžiku τ . Protože nás často zajímá průběh sil v jednotlivých vyjiskřovacích zdvizích, vyhodnocují se výsledné hodnoty a charakteristiky řezné síly odděleně při jednotlivých zdvizích.

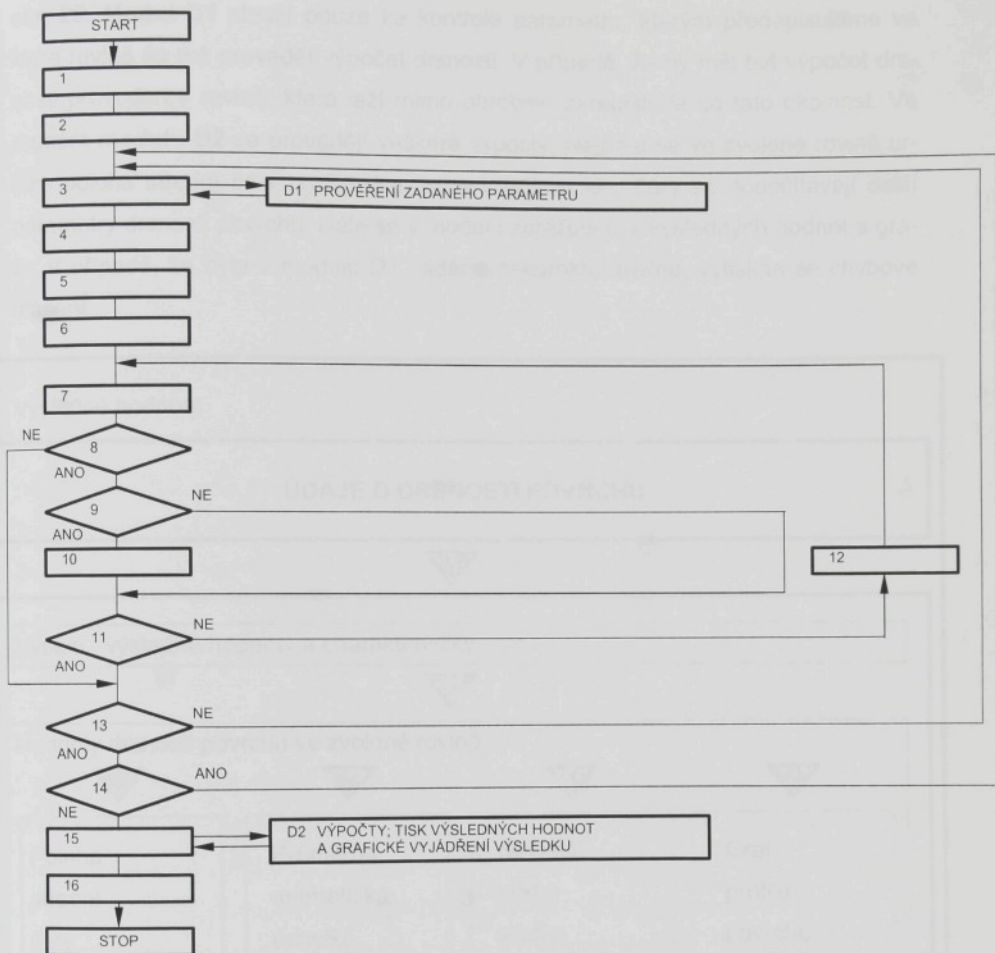
je výstup operant?



Obr. 24 Výstupní údaje o řezné síle při broušení

Výpočet parametrů charakterizujících drsnost povrchu při broušení

Proces broušení je základní dokončovací obráběcí operací. Mezi nejvýznamnější a nejčastěji sledované parametry proto patří parametry charakterizující drsnost povrchu. Pro posuzování drsnosti povrchu součástí ve strojírenské výrobě se používá řada veličin (ČSN EN ISO 4287). Obecně lze parametry profilu povrchu rozdělit na výškové, délkové a tvarové. V technické praxi jsou dosud nejrozšířenější výškové parametry a konkrétně - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a , celková výška profilu R_t a největší výška profilu R_z .

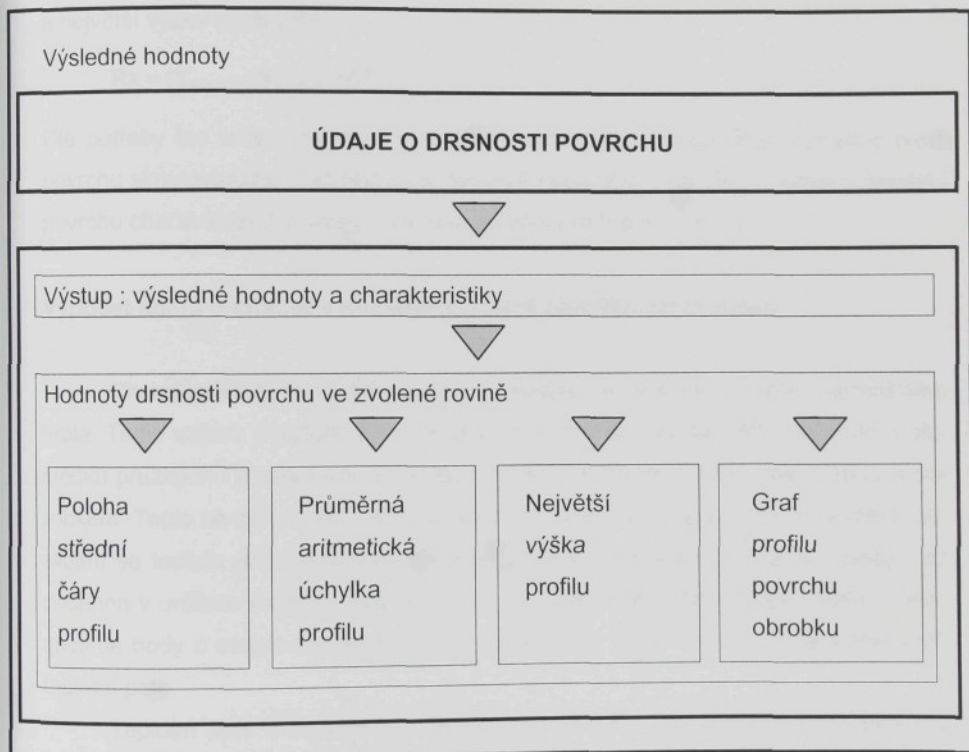


Obr. 25 Vazby mezi moduly při výpočtu parametrů charakterizujících drsnost povrchu při broušení

Výpočtem lze stanovit velikost parametrů R_a a R_z , které charakterizují drsnost vždy v jedné, předem zvolené příčné rovině obrobku po ukončení simulovaného procesu broušení. Pro názornou ilustraci stavu povrchu je možno zobrazit a vytisknout výpis jednotlivých výškových souřadnic a zobrazit jednoduchý graf profilu obrobku ve zvolené rovině obrobku.

Dílčí program pro výpočet parametrů charakterizujících drsnost povrchu při broušení obsahuje dva speciální moduly, jak je zřejmé z vývojového diagramu na

obr. 25. **Modul D1** slouží pouze ke kontrole parametru, kterým předepisujeme ve které rovině se má provádět výpočet drsnosti. V případě, že by měl být výpočet drsnosti proveden v rovině, která leží mimo obrobek, zaregistruje se tato okolnost. Ve druhém **modulu D2** se provádějí veškeré výpočty. Nejprve se ve zvolené rovině určuje poloha střední čáry profilu drsnosti a k poloze této čáry se dopočítávají další parametry drsnosti povrchu. Dále se v modulu zajišťuje tisk výsledných hodnot a grafu. V případě, že byla v modulu D1 zadána nekorektní rovina, vytiskne se chybové hlášení.



Obr. 26 Výstupní údaje charakterizující drsnost povrchu při broušení

Při výpočtu drsnosti povrchu je ve zvolené J-té příčné rovině nejprve ze souboru všech vypočítaných hodnot dle následujícího vztahu určena poloha střední čáry profilu drsnosti R_s :

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

dále lze ve zvolené rovině vypočítat průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu R_a :

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

a největší výšku profilu R_z :

$$R_z = (Y_{HMAX} - Y_{HMIN}) \cdot 10^6$$

Dle potřeby lze také vytisknout graf, který schematicky znázorňuje výsledný profil povrchu simulovaného obrobku po přebroušení povrchu. Vypočítané údaje o drsnosti povrchu charakterizují výstupy schematicky znázorněné na obr. 26.

Výpočet údajů o teplotě v povrchové vrstvě obrobku při broušení

Charakteristickým znakem procesu broušení je značné množství vznikajícího tepla. Teplo vzniká v oblasti styku brousícího kotouče a obráběného materiálu v důsledku pružných i plastických deformací a intenzivního tření mezi zrny brusiva a obrobkem. Teplo se šíří z míst vzniku a ohřívá obrobek, nástroj a třísku. V průběhu obrábění se teplota prvků soustavy (obrobku, třísek a nástroje) postupně zvyšuje, až dosáhne v určitém krátkém časovém intervalu ustáleného stavu (Čáp, 1996). Pokud spojíme body o stejné teplotě křivkami, vznikají tzv. izotermy. Soustava křivek tvoří teplotní pole.

Teplotní pole a zvláště pak teplota povrchové vrstvy obrobku má velký vliv nejen na rozměrovou přesnost součástí, ale tepelné jevy také přímo nebo nepřímo ovlivňují strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě, stupeň a hloubku zpevnění vrstvy, mikrogeometrii obrobeného povrchu, smysl, velikost a gradient zbytkových napětí. Výzkum uvedených procesů a souvisejících změn fyzikálně mechanických vlastností materiálu odkrývá nové možnosti ve zlepšení funkčních vlastností součástí ve strojírenství.

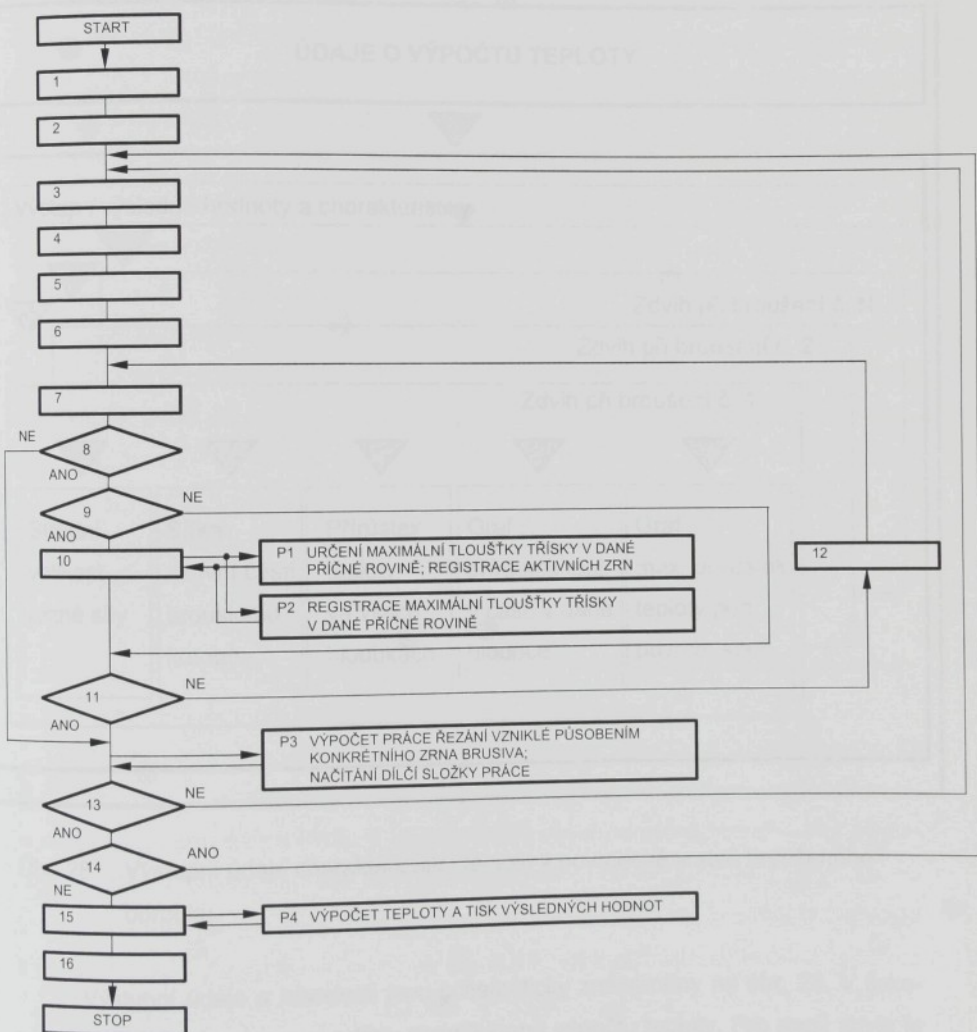
Základním principem, který byl uplatněn u matematického modelu procesu broušení je, že se pro každé aktivní zrno, které se ve fázi ustáleného procesu simulovaného broušení dostane do záběru, určí střední velikost složky řezné síly a také čas, po který je zrno v záběru. Z uvedených hodnot se dále vypočítá odpovídající složka práce řezání. Celkovou práci řezání lze pro konkrétní zdvih stolu určit jako součet složek práce řezání od konkrétních zrn brusiva. Pak lze vypočítat střední velikost řezné síly a ta je spolu s následně vypočítanou hodnotou plošné intenzity tepla jednou ze základních vstupních veličin pro výpočet střední teploty stykové plochy brousicího kotouče s obrobkem. Pro analytické stanovení teplot a teplotního pole v obrobku byla vybrána metoda podle teorie Isajeva a Silina, která byla rozpracována na katedře obrábění formou diplomových (Mládek, 1973), (Čáp, 1996) a výzkumných prací (Gazda, 1975), (Draský aj., 1976). Výpočet teplotních poměrů při broušení se určitým způsobem zjednodušuje, brousící kotouč se nahrazuje plošným zdrojem tepla pohybujícím se vůči obrobku, který se nahrazuje polonekonečným tělesem. Působili-li na toto těleso uvedený zdroj tepla, pak lze po určité době tepelného zatížení τ_0 z plošné intenzity tepla q , tepelné vodivosti materiálu obrobku λ_{ob} a teplotní vodivosti materiálu obrobku a_{ob} vyjádřit rovnici pro nárůst teploty Θ v určitém vyšetřovacím čase τ a v dané hloubce pod povrchem obrobku z :

$$\Theta(z, \tau) = \frac{q}{\lambda_{ob}} \left\{ z \left[\Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{a_{ob} \cdot \tau}} \right) - \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{a_{ob} (\tau - \tau_0)}} \right) \right] + \frac{2\sqrt{a_{ob}}}{\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{\tau} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a_{ob}\tau}} - \sqrt{\tau - \tau_0} \cdot e^{-\frac{z^2}{4a_{ob}(\tau - \tau_0)}} \right) \right\}$$

Stanovení střední teploty stykové plochy brousicího kotouče s obrobkem se u matematického modelu procesu broušení provádí podle výpočtového algoritmu zpracovaného Ing. Čápem (Čáp, 1996). Použitý postup umožňuje vypočítat teplotní zatížení obrobku, jestliže pro konkrétní řezné podmínky známe příslušnou složku řezné síly a tepelně-fyzikální parametry obráběné součásti a brousicího nástroje. Tepelně-fyzikální parametry brousících kotoučů různých specifikací však nejsou běžně dostupné a tím je bohužel omezeno obecné použití simulačního modelu.

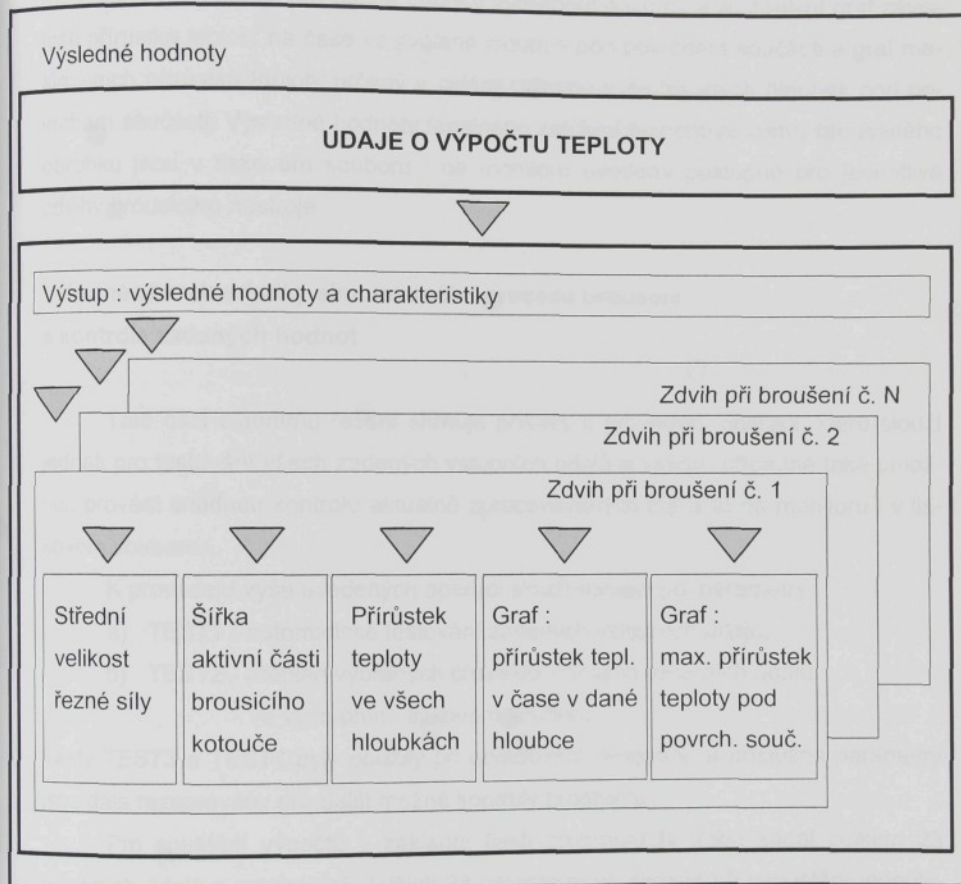
Dílčí program pro výpočet střední teploty při broušení v povrchové vrstvě obrobku obsahuje čtyři speciální moduly. Vazby mezi moduly při výpočtu údajů o teplotě v povrchové vrstvě broušeného obrobku jsou znázorněny na obr. 27. V **modulu P1** se určuje maximální tloušťka třísky v dané příčné rovině a registrují se aktivní zrna. Ve druhém **modulu P2** se ukládá hodnota maximální tloušťky třísky v dané příč-

né rovině do paměti pro další použití. **Modul P3** slouží k určení práce řezání vzniklé působením konkrétního zrna brusiva. Zároveň se načítají dílčí složky práce. Rozhodující části výpočtu jsou prováděny v **modulu P4**. Na základě výpočtu celkové práce řezání, střední velikosti řezné síly a plošné intenzity tepla probíhá v tomto modulu vlastní výpočet teploty. Dále je zde prováděn tisk informativních hodnot o podmínkách výpočtu a také se kontroluje zadaná hloubka pod povrchem, ve které má být



Obr. 27 Vazby mezi moduly při výpočtu údajů o střední teplotě v povrchové vrstvě broušeného obrobku

stanoven graf závislosti teploty na čase při výpočtu teploty. Pokud hodnota hloubky nebyla zadána v povoleném rozsahu, vytiskne se chybové hlášení. Údaje pro následný tisk grafických závislostí se v modulu zpracovávají průběžně.



Obr. 28 Výstupní údaje charakterizující teplotu v povrchové vrstvě broušeného obrobku

Výstupní údaje a závislosti jsou schematicky znázorněny na obr. 28. V tiskovém souboru jsou nejprve uvedeny podmínky při výpočtu teploty. Pro daný zdvih je zde vytištěna hodnota střední velikosti řezné síly a šířky aktivní části brousícího kotouče. Pokud je požadován podrobný rozbor vypočítaných údajů o teplotách v povr-

chové vrstvě obrobku, lze do tiskového souboru dále exportovat poměrně rozsáhlý souhrn všech hodnot vypočítaných přírůstků teploty a to v závislosti na čase v celém rozsahu vyšetřovaných hloubek pod povrchem součásti. Tento podrobný rozbor se zaznamenává pouze do tiskového souboru, nezobrazuje se na monitoru. Jak je zřejmé z přílohy 3, postačí pro běžné případy vytisknout názorný a ilustrativní graf závislosti přírůstku teploty na čase ve zvolené hloubce pod povrchem součásti a graf maximálních přírůstků teploty určený v celém rozsahu vyšetřovaných hloubek pod povrchem součásti. Výsledné hodnoty tepelného zatížení povrchové vrstvy broušeného obrobku jsou v tiskovém souboru i na monitoru uvedeny postupně pro jednotlivé zdvihy brousicího nástroje.

Vybrané charakteristiky simulovaného procesu broušení

a kontrola zadaných hodnot

Tato část algoritmu řešení shrnuje příkazy k provedení operací, které slouží jednak pro testování všech zadaných vstupních údajů a veličin, případně také umožňují provést snadnou kontrolu aktuálně zpracovávaných dat a to na monitoru i v tiskovém souboru.

K provedení výše uvedených operací slouží následující parametry :

- a) TEST1 - automatické testování zadaných vstupních údajů,
- b) TEST2 - přehled vybraných charakteristických vstupních údajů
ve výstupním, tiskovém souboru.

Testy TEST3 a TEST4 byly použity při odlaďování programu a příslušné parametry jsou dále rezervovány pro další možné kontroly programu.

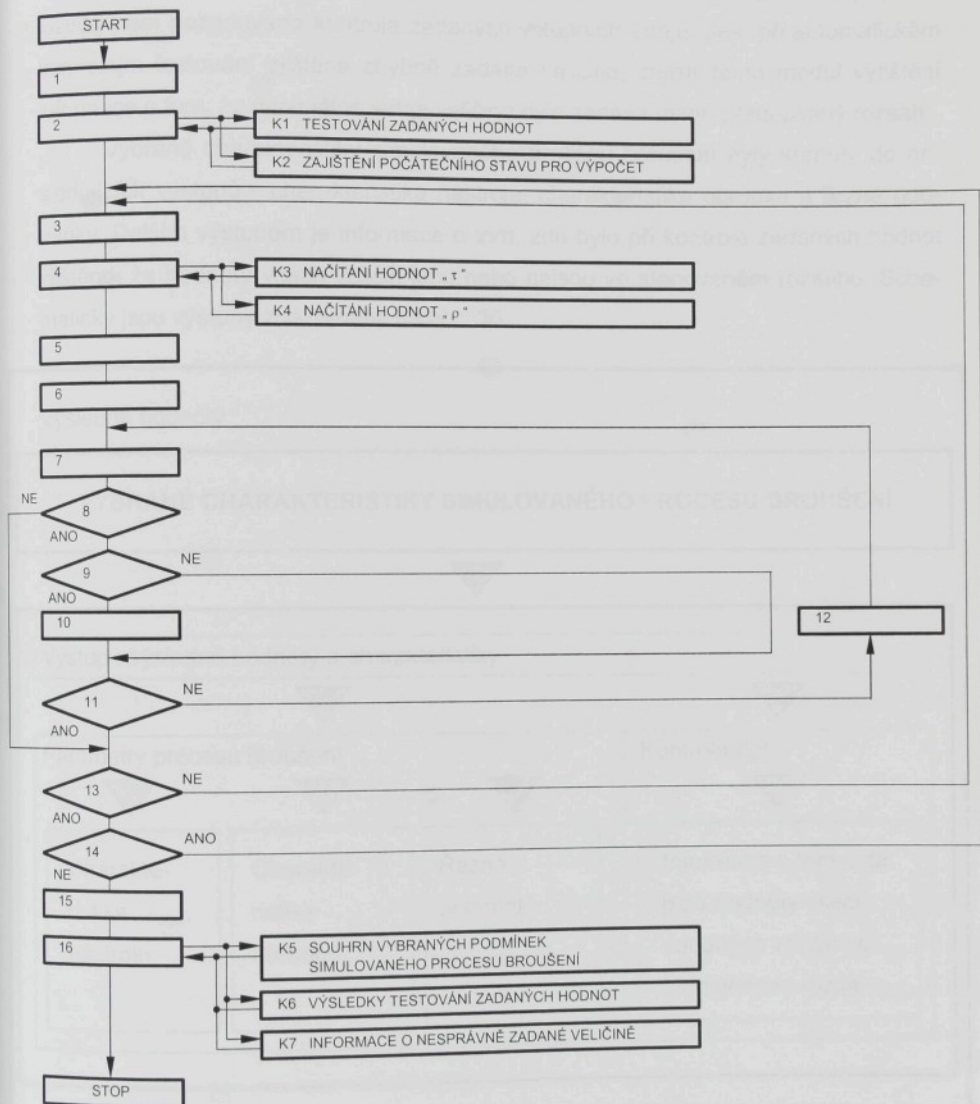
Pro spuštění výpočtů v základní části programu je třeba zadat celkem 23 vstupních údajů a maximálně dalších 23 parametrů se zadává při spouštění jednotlivých výpočtových variant. Protože je vstupních hodnot poměrně hodně, nelze při zadávání vyloučit vznik chyb. Pro zadávané parametry je z tohoto důvodu v programu předem stanovena minimální a maximální přípustná hodnota. V průběhu výpočtu probíhá automatické testování velikosti všech 46 zadaných vstupních údajů. Jestliže se při automatické kontrole zjistí, že velikost určitého parametru neodpovídá stanovenému rozsahu, vytiskne se automaticky hlášení o této skutečnosti, i když uživatel nepožaduje provedení kontroly označené jako TEST1. Pokud je požadováno prove-

dení kontroly označené jako TEST1, pak je poskytnuta kompletní informace o provedeném testu.

Vstupní údaje se do programu pro prostorovou simulaci procesu broušení dávají v základních jednotkách, tj. v metrech, radiánech, pascálech, metrech za sekundu ap. Tyto okolnosti mohou být zdrojem chyb při použití simulačního modelu. K eliminaci chyb může uživateli pomoci kontrola, označená jako TEST2. Tím se zajistí přepočítání nejdůležitějších zadaných hodnot na běžně používané jednotky a jejich násobky. Přepočítané hodnoty se pro vizuální kontrolu zobrazí na monitoru a současně exportují do tiskového souboru.

Pro určení vybraných charakteristik a kontrolu zadaných hodnot při simulovaném broušení slouží v programu celkem sedm speciálních výpočtových modulů. Propojení těchto modulů s moduly základní části programu je znázorněno na obr. 29. S pomocí modulů K1, K6 a K7 je prováděna kontrola parametrů a moduly K2, K3, K4 a K5 slouží pro prezentaci charakteristik procesu broušení. V nejrozsáhlejším **modulu K1** se s použitím speciální procedury postupně prověřují všechny zadané hodnoty. Pokud se některé hodnoty nacházejí mimo přípustné meze, pak se také současně provádí jejich registrace a stanovuje se celkový počet chybně zadaných údajů. V dalším **modulu K2** se zajišťuje počáteční stav pro výpočet a odstraňují se zde dříve uložené hodnoty. Protože se tvar zrna brusiva modeluje s použitím generátoru náhodných čísel, je třeba pro pozdější výpočet průměrné velikosti vrcholového úhlu zrna brusiva a průměrné velikosti poloměru zaoblení zrna brusiva postupně načítat hodnoty stanovené pro všechna simulovaná zrna. To se realizuje v **modulu K3** a v **modulu K4**. K vytištění vybraných charakteristik simulovaného procesu broušení slouží **modul K5**. Jestliže jsou požadovány tyto informace, pak jsou na monitoru a v tiskovém souboru v části B - výsledné hodnoty, pod nadpisem „Vybrané charakteristiky simulovaného procesu broušení“ uvedeny základní charakteristické údaje o brousicím kotouči a statisticky zpracovaných údajích o modelovaných zrnech brusiva, dále o rozměrech obrobku a jeho rozdělení na šířkové a délkové úseky a také o řezných podmínkách při simulovaném broušení. Prezentaci výsledků testování zadaných hodnot zajišťuje **modul K6**. Pokud je požadováno provedení kontroly, objeví se na monitoru i v tiskovém souboru v části B - výsledné hodnoty, pod nadpisem „Údaje o kontrole zadaných hodnot“ informace o tom, že všechny zadané veličiny

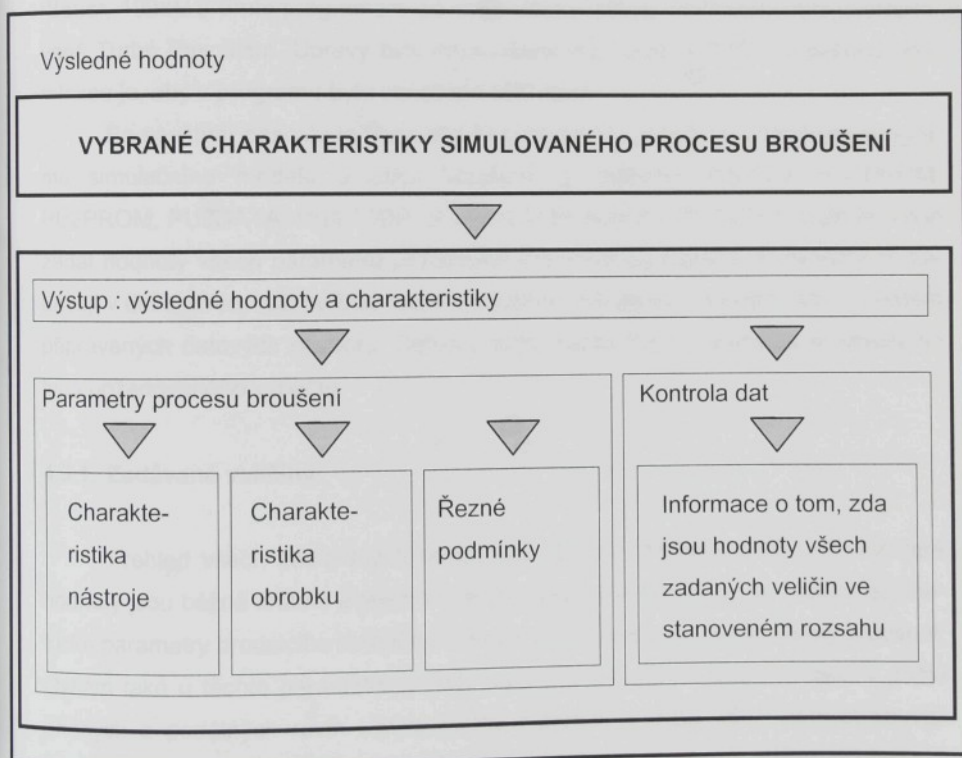
jsou buď ve stanoveném rozsahu nebo že hodnota jedné nebo dvou konkrétních zadaných veličin byla zadána mimo stanovený rozsah. Spolu s touto informací se



Obr. 29 Vazby mezi moduly při určování vybraných charakteristik simulovaného procesu broušení a při kontrole zadaných hodnot

také současně vytiskne případná nepřipustně zadaná hodnota příslušné veličiny. Pokud jsou více jak dvě veličiny zadány mimo stanovený rozsah, objeví se informace také o této okolnosti. Poslední **modul K7** se aktivuje automaticky v tom případě, jestliže není požadována kontrola zadaných vstupních údajů. Je-li při automatickém kontrolním testování zjištěna chybně zadaná veličina, zajistí tento modul vytištění informace o tom, že minimálně jedna veličina byla zadána mimo předepsaný rozsah.

Vybrané charakteristiky simulovaného procesu broušení byly shrnuty do následujících výstupů - charakteristika nástroje, charakteristika obrobku a řezné podmínky. Dalším výstupem je informace o tom, zda bylo při kontrole zadaných hodnot zjištěno, že hodnoty všech veličin jsou nebo nejsou ve stanoveném rozsahu. Schematicky jsou výstupy znázorněny na obr. 30.



Obr. 30 Vybrané charakteristiky simulovaného procesu broušení a údaje o kontrole zadaných hodnot

4.3. Obsluha programu

Simulační model procesu broušení lze provozovat na standardních číslicových počítačích. Před spuštěním výpočtu musí být instalován program Borland Pascal 7.0 a příslušný aplikační program matematického modelu. Z hlediska požadavků na volnou kapacitu disku počítače postačí 50 MB pro kompletní instalaci Borland Pascalu a pro všechny soubory a adresáře aplikačního programu necelé 3 MB.

Programy napsané v Turbo Pascalu (TP) a v Borland Pascalu (BP) bohužel nelze bez zvláštních úprav provozovat na procesorech Pentium Pro a rychlejších. Chyba se objeví při vykonávání "DIV" instrukce, jejíž výsledek se nevejde do vyhrazeného registru. Uvedený problém byl odstraněn použitím programu TPPatch (Bauer, 1998). S tímto programem lze automaticky opravit všechny soubory kompilované Turbo Pascalem. Úpravy byly odzkoušeny pro verze BP7/TP7 a jedinou podmínkou je, aby v programu byla obsažena CRT část.

Po spuštění pascalu je třeba otevřít programové jednotky aplikačního programu simulačního modelu procesu broušení, tj. jednotky P2000U, PU1PROM, PU2PROM, PU3DATA, PU4PODP, případně také jednotku PU3TEST. Dále je nutno zadat hodnoty všech parametrů potřebných pro realizaci výpočtu. Parametry se zadávají v dialogovém režimu buď ručně s použitím klávesnice počítače nebo z předem připravených datových souborů. Celkový počet zadávaných parametrů je závislý na typu požadovaného výpočtu.

4.3.1. Zadávané veličiny

Přehled všech zadávaných veličin pro výpočet je patrný z obr. 17. Některé hodnoty jsou běžně známy a jejich zadávání nečiní potíže. Jedná se např. o geometrické parametry brousícího kotouče a obrobku, případně o řezné podmínky broušení. Ovšem také u těchto parametrů je třeba respektovat určité restriktce, např. v počtu příčných a podélných rovin simulovaného obrobku, protože jejich četnost souvisí s definovanou velikostí pole dynamické proměnné, nebo v maximálním možném počtu přebroušení povrchu, což opět souvisí s velikostí pole, jež bylo definováno pro průběžné ukládání vypočítaných údajů ap. Dalším zdrojem informací jsou experimenty a údaje publikované v odborné literatuře. Jedná se např. o charakteristické rozmě-

ry a geometrii zrn brusiva (Maslov, 1953), (Maslov, 1979), (Krejčíková, 1986), (ČSN 22 4012), (ČSN ISO 525), o velikost exponentu určujícího rozložení zrn brusiva v povrchové vrstvě brousícího kotouče (Kassen, 1969), (Yoshikawa aj., 1971), o fyzikální parametry brousícího kotouče a obrobku (Čáp, 1996) nebo o technologické parametry obrobku (Degner aj., 2002). Potíže mohou nastat v případě, kdy potřebujeme stanovit velikost parametru, který je pro výpočet nezbytný a obecně těžko dostupný. Poslední skupinou zadávaných údajů jsou volitelné hodnoty. Při zadávání těchto údajů je možno se řídit logickým úsudkem (např. rovina, ve které se mají určovat parametry drsnosti povrchu nemůže ležet mimo simulovaný obrobek) nebo je lze poměrně snadno předem vypočítat (např. jaká musí být minimální vzdálenost osy brousícího kotouče od konce obrobku při výpočtu řezné síly při plném záběru) nebo je určit podle potřeby (např. parametry pro provádění standardních testů, příp. zadávání požadavku na kompletní registraci údajů o teplotách a jejich zaznamenání do výstupního souboru). Některé volitelné hodnoty je možné odhadnout (např. maximální počet kroků iterační metody) a případně je korigovat podle výstupního protokolu, kde se automaticky vytiskne hlášení v případě, pokud byla zvolena velikost mimo povolený rozsah minimálních a maximálních hodnot.

4.3.2. Fáze výpočtu

Načítání vstupních údajů pro následný výpočet se provádí v dialogovém režimu buď ručně z klávesnice nebo z předem připravených datových souborů.

Při načítání údajů je třeba v první fázi postupně zadat základní vstupní hodnoty. Jestliže se data načítají z klávesnice, je dále nutno rozhodnout, zda mají být zadávaná data uložena nebo ne. V případě, že požadujeme vstupní údaje uložit, je třeba zadat jméno pro nový datový soubor a dále je třeba určit, jestli se má pro tento a další datové soubory vytvořit nový adresář nebo se pro uložení souborů použije již existující adresář. Pokud zadáváme vstupní údaje z předem vytvořeného datového souboru, postačí uvést jeho jméno a příslušnou cestu. Všechna data se z tohoto souboru automaticky načtou. Následně je programem požadováno zadání jména tiskového souboru. Jméno tohoto souboru může uživatel zvolit podle nápovědy nebo podle své úvahy. Do tiskového souboru se pak průběžně uloží veškeré vypočítané údaje.

Ve druhé fázi zadávání se volí typ výpočtu. Je možno nastavit následující výpočtové režimy:

- určení počtu aktivních zrn,
- výpočet parametrů drsnosti povrchu,
- výpočet průřezu nedeformované třísky,
- výpočet řezné síly při broušení,
- výpočet teploty v povrchové vrstvě obrodku.

Lze zadávat libovolné kombinace výpočtů. Na tomto místě je třeba poznamenat, že se některé výpočtové režimy nastaví automaticky. Např. při výpočtu průřezu nedeformované třísky se současně určují počty aktivních zrn. Výstupní údaje o průřezech třísky jsou pak doplněny také informacemi o aktivních zrnech. Podobně je tomu také při výpočtu řezné síly, kdy se využívá jak údajů o počtech aktivních zrn, tak údajů o průřezech třísky.

Pouze pro některé režimy výpočtu je třeba ve třetí fázi postupně zadávat speciální požadavky a další příslušné vstupní hodnoty. Příkladem speciálního požadavku je, zda se po ukončení výpočtu drsnosti povrchu má tisknout graf profilu povrchu a příkladem další příslušné vstupní hodnoty je zadání pořadového čísla příčné roviny, ve které se má určovat průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra. Zadávání speciálních požadavků se provádí v dialogovém režimu buď ručně z klávesnice nebo z předem připravených datových souborů. Pokud byl při zadávání dat z klávesnice v první fázi uveden požadavek, že mají být tyto údaje uloženy, pak je pro jednotlivé výpočtové varianty následně požadováno také zadání příslušného jména nového datového souboru, kam mají být zadávané vstupní hodnoty uloženy. Kompletní schéma dialogového režimu je zjednodušeně uvedeno v příloze 2.

Pokud je zadávání vstupních údajů pro jednotlivé zvolené typy výpočtu ukončeno, automaticky se v další fázi spustí výpočet. Uživatel programu je průběžně informován o průběhu výpočtu, protože se na monitoru zobrazuje údaj o procentuálním podílu dokončených výpočtů z celkového rozsahu prováděných výpočtových operací.

Jestliže uživatel akceptuje doporučené instrukce, pak je výstupní tiskový soubor s vypočítanými údaji situován v adresáři TISK. Název tiskového souboru si uživatel volí sám v první fázi výpočtu. Pokud jsou údaje zadávány z klávesnice a požaduje-li se jejich uložení, pak jsou dalším výstupem nové datové soubory zadaných jmen

v adresáři DATA, případně v dalších nově vytvořených adresářích nebo podadresářích.

4.3.3. Výstupní soubory

Výstup programu pro modelování procesu broušení tvoří soubor údajů, který je zobrazován na monitoru počítače a současně jsou tyto údaje ukládány do souboru určeného pro následný tisk, tedy do tzv. tiskového souboru. Oba výstupy dokumentují stejné výsledky, nejsou však zcela shodné. Do tiskového souboru a to do části A jsou např. pro následnou kontrolu ukládány všechny zadané hodnoty. Protože na monitoru se údaje zobrazují průběžně, nemá význam zde po ukončení výpočtu zobrazovat zadané hodnoty. Další odlišnost představuje kompletní registrace údajů o teplotách v povrchové vrstvě obrobku. Výsledkem výpočtu je tak rozsáhlý soubor číselných údajů, že jejich zobrazení na monitor nemá smysl. V tomto případě může posloužit k další práci s vypočítanými hodnotami nejlépe písemný záznam. Z tohoto důvodu se kompletní souhrn údajů o teplotách v povrchové vrstvě obrobku na monitoru také nezobrazuje.

Příklad tiskového souboru s vypočítanými údaji je uveden v příloze 3. Tento soubor obsahuje v první části A přehled všech zadaných hodnot. Následně je zde uveden přehled zvolených typů výpočtu spolu s dalšími zadávanými hodnotami. V části B jsou pak uvedeny výsledné hodnoty, které jsou pro některé typy výpočtu doplněny jednoduchými grafickými závislostmi, příp. histogramem pro průřezy nedefinovaných třísek. Závěrečná část tiskového souboru je rezervována pro prezentaci výsledků testů.

5. Metodika ověřování simulačního modelu

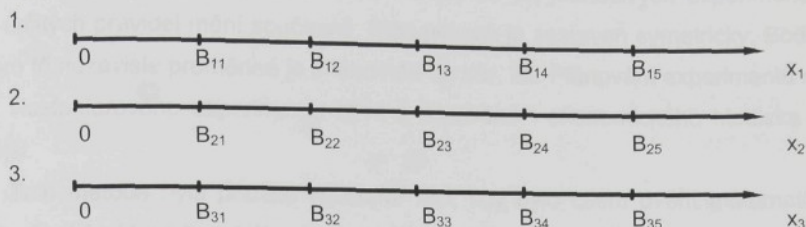
Výpočtové modely patří k nejrozsáhlejším realizovaným a řízeným soustavám s velkou možností variabilit, které člověk vytvořil. U tak složitých soustav je proto nutné věnovat pozornost chybám, které mohou být z hlediska modelování chybami při formulaci problému, ve tvorbě výpočtového modelu, v realizaci výpočtového modelu, ve verifikaci modelu nebo v interpretaci řešení (Janiček, 1998).

Důležitou součástí simulačních metod představuje jejich experimentální ověření. V další části předložené práce proto bude prezentována řada experimentů, jejichž cílem bude prověřit, do jaké míry se dosáhne shody mezi výsledky reálného a simulovaného broušení. Experimenty se budou provádět na rovině brusce BPH 20 a za odpovídajících podmínek na číslicovém počítači. Jako kritérium hodnocení zvolíme parametry drsnosti povrchu obrobku R_a a R_z a dále řeznou sílu F_c při broušení. Pro ověřování výsledků prostorové simulace procesu broušení budou zvoleny tyto parametry především z toho důvodu, že silové poměry výstižně charakterizují proces obrábění (Gazda aj., 1993) a drsnost povrchu je jedním ze základních ukazatelů integrity povrchu součásti po finálním obrobení. Ověřování dalších údajů, které simulační model procesu broušení umožňuje určit, tj. údajů o počtu aktivních zrn, o průřezech nedeformovaných třísek a o rozložení teplot v povrchové vrstvě obrobených součástí, nebude v rámci této práce provedeno. Důvodem jsou jednak vyšší nároky na realizaci měření, neproověřená metodika při určování počtu aktivních zrn, případně také to, že např. údaje o průřezích nedeformovaných třísek experimentálně určit nelze.

5.1. Metodika ověřování prostorové simulace procesu broušení

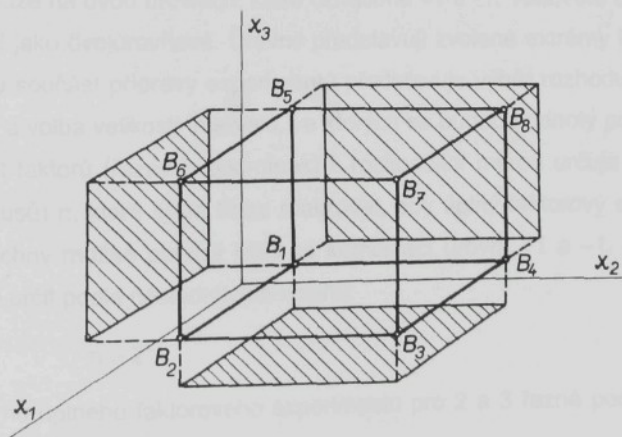
Pro ověření matematického modelu byly použity dvě metody. První metoda je založena na postupné změně hodnoty jedné nezávisle proměnné, přičemž ostatní vstupní veličiny zůstávají konstantní. Sledovaná veličina se ve zvoleném intervalu mění s určitým, zpravidla konstantním, krokem. Takto byla postupně zvětšována velikost určité řezné podmínky a poté byla vyhodnocována reakce zkoumaného procesu. Výhodou této „Metody postupné změny nezávisle proměnné“ je získání podrobných a přehledných závislostí zkoumaných veličin. Příklad plánu experimentů pro tři nezávisle proměnné je schematicky znázorněn na obr. 31. Při mapování rozsáhlé ob-

lasti zkoumaných podmínek je naopak nevýhodou této metody značně velký počet pokusů, velká pracnost a spotřeba času.



Obr. 31 Metoda postupné změny nezávisle proměnné
- příklad plánu experimentů pro tři nezávisle proměnné

Metoda postupné změny nezávisle proměnné byla použita v první fázi ověřování modelu, kdy bylo hlavním cílem zjistit, zda vůbec výsledky při modelování odpovídají reálnému procesu broušení. Při reálném i modelovém broušení byla vyhodnocena závislost řezné síly F_c na velikosti pracovního radiálního záběru a_e a závislost průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a na počtu vyjiskřovacích zdvihů pro dvě různé tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky v_{ft} .



Obr. 32 Metoda vícefaktorového experimentu
- příklad plánu experimentů pro tři nezávisle proměnné (Dráb, 1989)

Druhou metodu představuje tzv. vícefaktorový experiment (Pázman, 1986). Základem této metody je tzv. orthogonální plán (Dráb, 1989), podle něj se určuje počet a druh pokusů. Všechny zkoumané veličiny se při jednotlivých experimentech podle určitých pravidel mění současně. Plán pokusů je sestaven symetricky. Bodový plán pro tři nezávisle proměnné je znázorněn na obr. 32. Plánování experimentů metodou vícefaktorového experimentu bývá z časového i ekonomického hlediska výhodnější.

Tato metoda byla použita ve druhé fázi, kdy bylo cílem ověřit matematický model v široké oblasti řezných podmínek. Metodou vícefaktorového experimentu pro dvě nezávisle proměnné byla zkoumána závislost řezné síly F_c nebo parametrů drsnosti povrchu R_a a R_z při různém počtu vyjiskřovacích zdvihů v závislosti na velikosti pracovního radiálního záběru a_e a tangenciální rychlosti posuvu stolu v_{ft} .

5.1.1. Úplný faktorový experiment

Cílem vícefaktorového experimentu bylo naplánovat zkoušky tak, aby byly výsledky získány a vyhodnoceny co nejefektivněji a současně aby byly výsledky experimentů věrohodné.

Uvažují se experimenty, ve kterých se každý faktor (např. řezná podmínka) vyskytuje pouze na dvou úrovních, které označíme +1 a -1. Takovéto experimenty se pak označují jako dvojúrovňové. Úrovně představují zvolené extrémy každého faktoru. Důležitou součástí přípravy experimentů představuje výběr rozhodujících řezných podmínek x_i a volba velikosti intervalů, ve kterých se budou hodnoty podmínek pohybovat. Počet faktorů (řezných podmínek) k rozhodující měrou určuje celkový počet měření (pokusů) n , které bude třeba realizovat, aby úplný faktorový experiment obsahoval všechny možné pokusy lišící se kombinací úrovní +1 a -1. Celkový počet měření n lze určit podle následujícího vztahu:

$$n = 2^k.$$

Příklad návrhu úplného faktorového experimentu pro 2 a 3 řezné podmínky je znázorněn na následujícím obr. 33.

V další části bude prezentován postup stanovení matematické závislosti mezi výstupními hodnotami a řeznými podmínkami (Dráb, 1989). Při odvozování se vychází z následujících předpokladů. Předpokládá se, že $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

jsou pevně dané hodnoty nezávisle proměnných $x_1, x_2, \dots, x_k$ a y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) jsou hodnoty závisle proměnné y , získané měřením. Dále se předpokládá, že mezi proměnnými $x_1, x_2, \dots, x_k$ a y platí vztah:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k, a_1, a_2, \dots, a_m),$$

který obecně obsahuje m neznámých konstant $a_1, a_2, \dots, a_m$, tzv. parametrů. Na základě výsledků měření je třeba pomocí metody nejmenších čtverců statisticky odhadnout neznámé parametry $a_1, a_2, \dots, a_m$.

Pokus	x_1	x_2
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

Pokus	x_1	x_2	x_3
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

Obr. 33 Příklad návrhu úplného faktorového experimentu pro dvě a tři řezné podmínky

Pro následující úvahy se použije zjednodušující předpoklad, že výše uvedenou funkci lze transformací převést na tvar:

$$Y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_kx_k,$$

kde $Y, x_1, x_2, \dots, x_k$ jsou transformované proměnné a $c_0, c_1, c_2, \dots, c_k$ nové parametry. Transformací původní funkce jsou též dány nové pevné hodnoty $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ a hodnoty Y_i .

Závislosti mezi technologickými proměnnými při obrábění mají při matematickém vyjadřování nejčastěji tvar obecných mocnin, proto lze transformaci provést logaritmováním. Rovnice jsou zpravidla ve tvaru (Bílek, 2001):

$$B = a_1 \cdot b_1^{a_2} \cdot b_2^{a_3} \cdot b_3^{a_4},$$

kde B je závisle proměnná, a_1, a_2, a_3, a_4 jsou neznámé parametry, b_1, b_2, b_3 jsou řezné podmínky (faktory). Logaritmováním provedeme 1. transformaci:

$$\ln(B) = \ln(a_1) + a_2 \cdot \ln(b_1) + a_3 \cdot \ln(b_2) + a_4 \cdot \ln(b_3) .$$

Pro zjednodušení převedeme logaritmované veličiny na následující tvary:

$$Y = \ln(B), \quad c_0 = \ln(a_1), \quad c_1 = a_2, \quad c_2 = a_3, \quad c_3 = a_4,$$

$$X_1 = \ln(b_1), \quad X_2 = \ln(b_2), \quad X_3 = \ln(b_3).$$

Proměnné X_1, X_2, X_3 mohou nabývat hodnot v intervalu:

$$X_1 \in \langle X_{1\min}; X_{1\max} \rangle ,$$

$$X_2 \in \langle X_{2\min}; X_{2\max} \rangle ,$$

$$X_3 \in \langle X_{3\min}; X_{3\max} \rangle .$$

Odhady parametrů $c_0, c_1, c_2, \dots, c_k$, které označíme $c'_0, c'_1, c'_2, \dots, c'_k$, určíme metodou nejmenších čtverců, jejíž princip spočívá v minimalizaci vztahu :

$$F(c'_0, c'_1, c'_2, \dots, c'_k) = \sum_{i=1}^n (Y_i - c'_0 - c'_1 X_{1i} - c'_2 X_{2i} - \dots - c'_k X_{ki})^2 \rightarrow \min.$$

Provedeme-li :

$$\frac{\partial}{\partial c'_j} F(c'_0, c'_1, c'_2, \dots, c'_k) = 0, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k ,$$

tak dostaneme $k+1$ lineárních rovnic pro $k+1$ neznámých $c'_0, c'_1, c'_2, \dots, c'_k$:

$$c'_0 n + c'_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + c'_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} + \dots + c'_k \sum_{i=1}^n x_{ki} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$c'_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + c'_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + c'_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + \dots + c'_k \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{1i} Y_i$$

$$c'_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + c'_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + c'_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 + \dots + c'_k \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{2i} Y_i$$

...

$$c'_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + c'_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} + c'_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{ki} + \dots + c'_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ki} Y_i$$

Poté je vhodné provést další transformaci X_i na X'_i tak, aby sledované pole bylo ve všech směrech v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Pro $j = 1, 2, \dots, k$ pak bude:

$$X'_{ji} = \frac{X_{ji} - S_j}{R_j},$$

kde $S_j = 0,5 (X_{j\max} + X_{j\min})$ a $R_j = 0,5 (X_{j\max} - X_{j\min})$.

Tato úprava značně zjednoduší výše uvedenou soustavu rovnic, neboť matice soustavy bude mít na hlavní diagonále všechny prvky rovny n a ostatní prvky rovny 0 .

Pak tedy bude:

$$c''_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$c''_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{1i} Y_i$$

$$c''_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{2i} Y_i$$

...

$$c''_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X'_{ki} Y_i$$

Odhady $c'_j, j = 0, 1, 2, \dots, k$, pak budou dány zpětnou transformací:

$$Y = c''_0 + c''_1 X'_1 + c''_2 X'_2 + \dots + c''_k X'_k = c''_0 + \sum_{j=1}^k c''_j \frac{X_j - S_j}{R_j},$$

z čehož

$$c'_0 = c''_0 - \sum_{j=1}^k c''_j \frac{S_j}{R_j},$$

$$c'_j = \frac{c''_j}{R_j},$$

pro $j = 1, 2, \dots, k$.

Z rovnice ve tvaru obecných mocnin, která vyjadřuje závislosti mezi technologickými proměnnými při obrábění lze následně vyjádřit neznámé parametry a_1, a_2, a_3, a_4 :

$$a_1 = e^{c'_0}, \quad a_2 = c'_1, \quad a_3 = c'_2, \quad a_4 = c'_3.$$

5.1.2. Statistické vyhodnocování experimentů

Účelem měření je získat objektivní informace o určitých veličinách nebo určitém ději (Dráb, 1989). Naměřené hodnoty se v praxi zpravidla od měření k měření mění, přestože podmínky experimentu zůstávají stálé. Je to způsobeno tím, že kromě známých vlivů působí navíc faktory neznámé, nekontrolovatelné a náhodné. Abychom mohli objektivně posoudit takovéto náhodné veličiny, musíme provádět měření opakovaně a následně s použitím statistických metod stanovit údaje, které naměřené hodnoty charakterizují tak, aby bylo možno minimalizovat vliv náhodných faktorů.

Pro statistické zpracování stanovených údajů byly použity následující matematické nástroje: aritmetický průměr, výběrová směrodatná odchylka a statistický interval spolehlivosti.

Aritmetický průměr (Rektorys, 2000) byl určen jako podíl součtu naměřených hodnot x_i z každého experimentu a počtu prováděných experimentů n :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Výběrová směrodatná odchylka byla pak podle následujícího vztahu vypočítána jako odmocnina ze součtu čtverců všech rozdílů mezi naměřenými hodnotami x_i z jednotlivých experimentů a aritmetického průměru $\bar{x}$, dělená počtem provedených experimentů $n - 1$:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}.$$

Statistický interval spolehlivosti byl určen jako interval, v rámci kterého je střední hodnota výsledků dalšího zkušebního testu umístěna s předpokládanou pravděpodobností. Interval spolehlivosti byl vypočítán z aritmetického průměru, ke kterému byla přičtena nebo odečtena hodnota tzv. konfidenčního intervalu podle následujícího vztahu:

$$\bar{x}_{\max} = \bar{x} \pm t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}}.$$

Hodnota kritického rozdělení $t_{\alpha, n-1}$ byla určena ze statistických tabulek pro požadovanou úroveň spolehlivosti (Rektorys, 2000). Tato hodnota je závislá na α - kritické hodnotě určitého rozdělení, která je taková, že ji náhodná veličina s daným rozdělením pravděpodobnosti překročí pouze s pravděpodobností α a to pro daný počet experimentů n .

5.1.3. Porovnání výsledků experimentů při reálném a simulovaném broušení

Pro vyhodnocení údajů určených metodou postupné změny nezávisle proměnné lze použít klasické porovnávání průběhu dvou grafů. Tento postup není ovšem příliš vhodný pro vyhodnocení údajů určených metodou faktorového experimentu, protože se při jednotlivých experimentech mění současně všechny zkoumané veličiny. V obou případech se však jako výhodné jeví použití korelační analýzy, která umožňuje posoudit těsnost korelační závislosti (Cyhelský aj., 1978).

Za předpokladu lineární závislosti lze úroveň korelace mezi dvěma proměnnými (např. x a y) vyjádřit určením výběrového korelačního koeficientu r dle následujícího vztahu:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}}$$

Korelační koeficient r nabývá hodnot od -1 do 1. Jestliže hodnota r bude rovna 0, pak mezi proměnnými neexistuje žádná funkční závislost a naopak, pokud se bude hodnota r blížit hodnotě 1 nebo -1, pak mezi veličinami existuje kladná nebo záporná funkční závislost. Jestliže se při vyhodnocování korelační závislosti mezi jednou nezávisle proměnnou a jednou závisle proměnnou absolutní hodnota korelačního koeficientu pohybuje v rozsahu hodnot od 0 do 1, pak lze v jednotlivých případech vyslovit následující závěry:

$0,0 < r < 0,3$	velmi nízký stupeň závislosti ,
$0,3 \leq r < 0,5$	nízký stupeň závislosti ,
$0,5 \leq r < 0,9$	značně významný stupeň závislosti ,
$0,9 \leq r$	velmi vysoký stupeň závislosti .

V našem případě však bylo třeba vyhodnotit dvojice simulovaných a naměřených hodnot, což není stejný případ. Z tohoto důvodu byla na základě konzultací na katedře aplikované matematiky TU v Liberci vyslovena následující kritéria (Bílek, 2001):

- | | |
|------------------|---|
| $0 < r \leq 0,3$ | neexistuje závislost mezi naměřenými a simulovanými hodnotami , |
| $0,3 < r < 0,8$ | objektivně nelze závislost posoudit, čím je r větší, tím je také pravděpodobnost závislosti větší , |
| $0,8 \leq r$ | existuje silná závislost . |

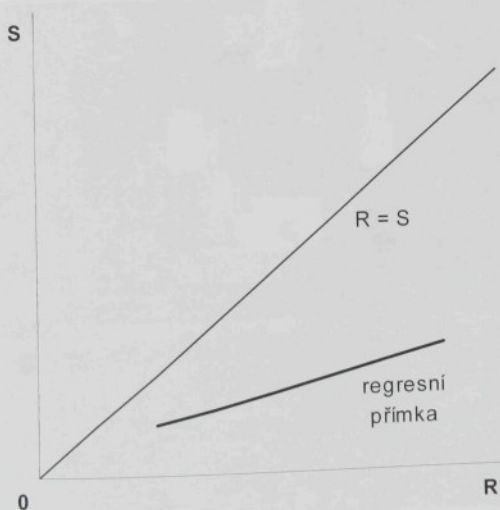
Kontrola, zda existuje podstatný rozdíl mezi výsledky dvou sérií zkoušek A a B realizovaných za různých podmínek (např. při použití dvou druhů brousících kotoučů), byla provedena výpočtem s použitím Studentova t-testu dle následujícího matematického vztahu:

$$|t_a| = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B)}{\sqrt{\frac{(n_A \cdot s_A^2) + (n_B \cdot s_B^2)}{n_A + n_B - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}\right)}} .$$

Vypočítaná hodnota $|t_a|$ byla porovnána s tabulkovou hodnotou t , která byla určena podle počtu prováděných experimentů u obou sérií zkoušek n_A a n_B . V literatuře lze vyhledat (ČSN ISO 8688-1) hodnoty t pro různé počty prováděných experimentů a pro následující úrovně spolehlivosti a stupně významnosti: 95% ~ významný, 99% ~ dost významný, 99,9% ~ velmi významný. Z porovnání hodnoty $|t_a|$ s publikovanými hodnotami t pak vyplynulo, jak významný je rozdíl mezi výsledky série měření A a B. Pokud byla hodnota $|t_a|$ větší než hodnota t pro určitou úroveň spolehlivosti, bylo možno vyslovit hypotézu o stupni významnosti rozdílu mezi posuzovanými sériemi zkoušek A a B.

Pro názorné grafické znázornění míry shody mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami při vyhodnocování údajů určených metodou faktorového experimentu byl navržen způsob grafického vyjádření závislosti simulovaných veličin S na veličinách naměřených (reálných) R , tzv. graf $R - S$. Obecný případ grafu je znázorněn na obr.

34. Tento graf vychází z principů korelační analýzy a umožňuje vyhodnotit experimenty tak, že se naměřené a vypočítané hodnoty vynesou do grafu s lineárními souřadnicemi. Vlastní hodnocení spočívá v porovnání vzájemné polohy regresní přímky (jak kvalitně tvoří vnesené body regresní přímku určuje výběrový korelační koeficient r) a přímky $S = R$, tj. přímky která odpovídá rovnosti simulovaných a naměřených hodnot. Předpokládejme případ, kdy bude soubor simulovaných a naměřených hodnot shodný. V tomto případě, pro $S = R$, bude graf $R - S$ tvořen přímkou procházející počátkem a velikost směrového úhlu této přímky bude činit $\pi/4$. Ve standardním případě je poloha bodů v grafu $R - S$ dána skutečně naměřenými a vypočítanými hodnotami. Pokud body, které v grafu $R - S$ charakterizují určitou skupinu experimentů, proložíme přímkou, získáme regresní přímku, jež charakterizuje tendenci závislosti reálných a simulovaných hodnot. Ze vzájemné polohy přímky $R = S$ a regresní přímky je možno přehledně usoudit, jaký je vzájemný vztah hodnot získaných simulací a hodnot naměřených. Při posuzování je třeba především zohlednit to, jak odpovídá směrnice regresní přímky směrnici přímky $R = S$ a jaká je absolutní vzdálenost regresní přímky od přímky $R = S$.



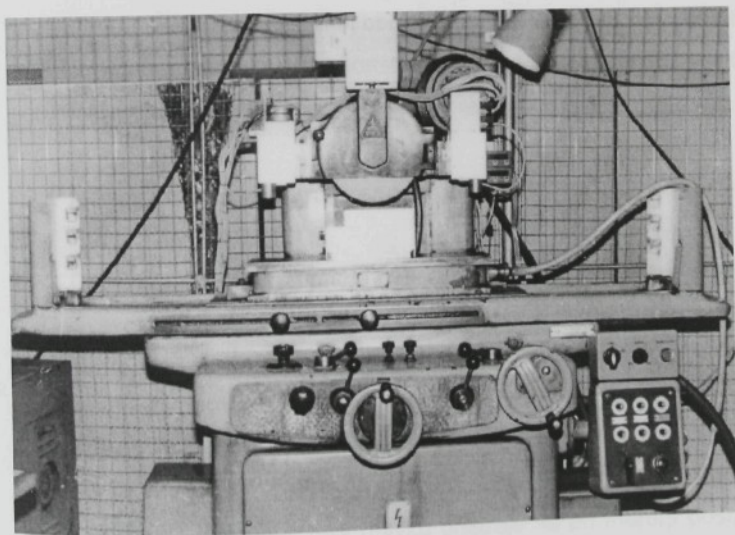
Obr. 34. Ukázka možné polohy regresní přímky a přímky $R = S$

5.2. Experimentální pracoviště

Experimenty rovinného obvodového broušení zápichovým způsobem byly provedeny v laboratoři katedry obrábění a montáže na rovinné brusce pro broušení obvodem kotouče BPH 20 a následně za odpovídajících podmínek na číslicovém počítači. Jako kritérium hodnocení byly zvoleny jednak parametry charakterizující drsnost povrchu - průměrná aritmetická úchylna posuzovaného povrchu R_a a největší výška profilu R_z a dále parametr charakterizující energetické poměry při broušení - řezná síla F_c .

5.2.1. Rovinná bruska

Reálné obrábění bylo provedeno na rovinné brusce BPH 20 pro broušení obvodem kotouče. Stroj byl vyroben v roce 1971 v Povážských strojárnách n. p. Povážská Bystrica. Základní technická data stroje (POVÁŽSKÉ STROJárNY, -):



Obr. 35 Rovinná bruska pro broušení obvodem kotouče BPH 20

- upínací plocha stolu 200 x 630 mm ,
- rozměry brousícího kotouče :

vnější $\varnothing$	250 mm ,
vnitřní $\varnothing$	76 mm ,
šířka	18 mm ,
- otáčky vřetena	$42,7 \text{ s}^{-1}$; $2\,560 \text{ min}^{-1}$,
- tangenciální rychlost posuvu stolu	$0,017 - 0,24 \text{ m.s}^{-1}$,
- rychlost příčného posuvu stolu	$0,083 - 0,1 \text{ m.s}^{-1}$,
- výkon motoru pro vřeteno	1,9 kW .

Pro broušení byly použity staticky vyvážené brousící kotouče typ 1 různých specifikací, o rozměrech cca 250 x 20 x 76 mm. Experimenty byly provedeny bez použití chladicí kapaliny. Před každou skupinou měření byly kotouče jemně orovnány jednokamenovým diamantovým orovnávačem za následujících podmínek :

- otáčky orovnávaného brousícího kot.	$42,7 \text{ s}^{-1}$,
- rychlost posuvného pohybu orovnávače	$0,3 \text{ m.min}^{-1}$,
- nastavený radiální záběr orovnávače	$5 \mu\text{m}$.

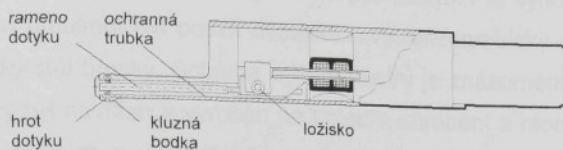
Rozměry obráběných zkušebních obrobků 60 x 50 x 15 mm vyhovovaly zápichovému způsobu broušení a byly dány konstrukčním řešením upínací části dvousložkového tenzometrického dynamometru pro měření složek působících sil.

5.2.2. Měření sil a parametrů drsnosti povrchu

Drsností povrchu rozumíme nepatrné rozměrové nepravidelnosti povrchu, jako jsou vyvýšeniny, prohlubně, důlky, rýhy ap. Drsnost povrchu strojní součásti ovlivňuje její intenzitu opotřebení, vrubovou pevnost, mazací podmínky, schopnost odolávat účinkům koroze, její vzhled a řadu dalších vlastností.

Měření drsnosti povrchu přímou metodou bylo provedeno dotykovým profилоmetrem HOMMEL TESTER T500 (HOMMELWERKE, -) po ukončení procesu broušení (obr. 36). Diamantový hrot dotyku přístroje se při měření posouvá po povrchu obrobené součásti a kopíruje její povrch. Společně s hrotem dotyku doléhá na měřený povrch kluzně vedená patka. Toto uspořádání umožnilo určit relativní profil povrchu, tj. profil povrchu vzhledem k dráze kluzné patky. Pohyb hrotu dotyku byl registrován indukčním měřicím systémem a převeden na elektrický signál. Tím byl v da-

ném místě získán dvourozměrný profil povrchu měřené součásti, přičemž nebyl zohledněn makroskopický tvar profilu.



Obr. 36 Schéma funkční části profilometru HOMMEL TESTER T500

Charakteristiky drsnosti povrchu jsou specifikovány normou ČSN EN ISO, která stanovuje také jednotlivé parametry pro určování struktury povrchu profilovou metodou. Nejstarším a také nepoužívanějším parametrem drsnosti povrchu je průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, která se označuje R_a . Je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (ČSN EN ISO 4287) podle následujícího vztahu:

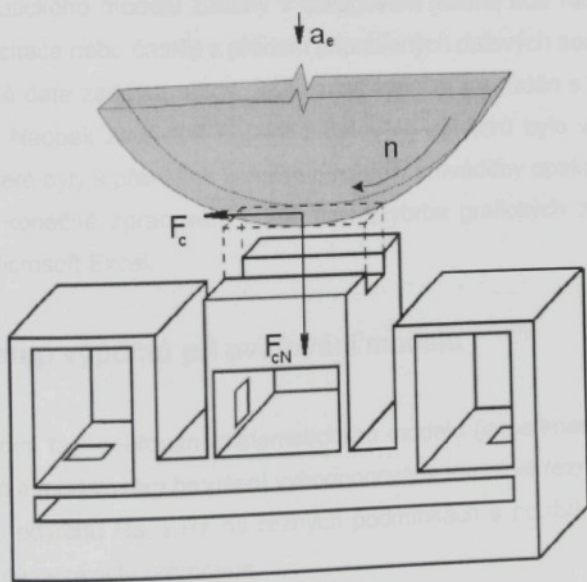
$$R_a = \frac{1}{l} \int_l |Z(x)| \cdot dx$$

Hodnota pořadnice $Z(x)$ je výška posuzovaného profilu v libovolné poloze na ose x , která je určena dráhou snímače dotykového profilometru. Další údaj, kterým byla charakterizována drsnost povrchu, je parametr R_z . Ten je podle normy ČSN EN ISO (z roku 1999) největší výškou profilu (dříve podle normy ISO 4287 z roku 1984 to byla tzv. výška nerovnosti profilu z deseti bodů R_z). Jeho velikost, stejně jako velikost R_a , se udává v mikrometrech. Parametr R_z je definován jako součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně v rozsahu základní délky. Matematické vyjádření je zřejmé z následujícího vztahu:

$$R_z = Z_{p_{MAX}} + Z_{v_{MAX}}$$

Kromě parametrů drsnosti povrchu byla dále vyhodnocována také řezná síla. Jednotlivé aktivní břity brousícího nástroje překonávají řezný odpor obráběného materiálu. Vnější projevem jsou působící síly. Jejich význam vyplývá z toho, že na nich závisí např. výkon obráběcího stroje, teplotní poměry při obrábění a tím také stav povrchové vrstvy obrobku po opracování ap.

Pro měření řezných sil při obrábění se v současné době používají obvykle metody převádějící měřenou sílu na elektrické napětí, protože je lze dobře zpracovávat buď v analogové formě, nebo po digitalizaci počítačem. Pro vyhodnocování sil v průběhu procesu broušení byl použit dvousložkový tenzometrický dynamometr upnutý na magnetický stůl brusky. Schéma dynamometru je znázorněno na obr. 37. Dynamometr, který byl navržen a vyroben na katedře obrábění a montáže, je tvořen soustavou horizontálních a vertikálních membrán pro zjišťování velikosti řezné síly F_c (tangenciální složka) a kolmé řezné síly F_{cN} (normálová složka). Membrány byly polepeny tenzometrickými snímači tak, aby byla zajištěna jejich tepelná kompenzace. Snímače síly byly připojeny k měřicí aparatuře UM 131, která napájela odporové můstky snímačů a zesilovala měřené signály tak, aby je bylo možno připojit k analogovým vstupům měřicí karty počítače. Rozsah dynamometru činí pro sílu $F_c \cong 0..350 \text{ N}$ a pro sílu $F_{cN} \cong 0..600 \text{ N}$, přičemž ve směru síly F_c byla stanovena tuhost $C_{Fc} = 6,6 \text{ N}/\mu\text{m}$ a vlastní frekvence $f_{Fc} = 480 \text{ Hz}$, ve směru síly F_{cN} byla u přístroje stanovena tuhost $C_{FcN} = 25 \text{ N}/\mu\text{m}$ a vlastní frekvence $f_{Fc} = 480 \text{ Hz}$ (Gazda, 1979).



Obr. 37 Tenzometrický dynamometr pro měření řezných sil při rovinném broušení obvodem kotouče

Před zahájením měření sil byla provedena kalibrace dynamometru. Ke kalibraci byla použita kalibrační klec a speciální sady siloměrných vidlic. Řezné síly byly určovány ve fázi ustáleného nesousledného broušení.

5.3. Výpočetní technika

Ke zpracování dat získaných při reálném broušení a pro ověření simulačního modelu procesu broušení byly použity standardní číslicové počítače.

Signály ze snímacích systémů instalovaných na brusce BPH 20 byly přivedeny na měřicí kartu počítače a dále zpracovány s použitím software INMES.

Pro simulaci procesu broušení je na pracovišti autora k dispozici počítač od firmy MIRONET s procesorem AMD Duron 900 a základní deskou Biostar ATX. Jak již bylo uvedeno v kapitole věnované obsluze programu, musel být před spuštěním výpočtu na počítači nainstalován program Borland Pascal 7.0 a příslušný aplikační program matematického modelu. Parametry pro výpočet byly do aplikačního programu matematického modelu zadány v dialogovém režimu buď ručně s použitím klávesnice počítače nebo častěji z předem připravených datových souborů. Z klávesnice bylo vhodné data zadávat tehdy, jestliže byl výpočet prováděn s dosud nepoužitými parametry. Naopak zadávání hodnot z datových souborů bylo vhodné při těch výpočtech, které byly s převážně konstantními daty prováděny opakovaně.

Pro konečné zpracování údajů a pro tvorbu grafických závislostí byl použit program Microsoft Excel.

5.4. Postup výpočtů při ověřování modelu

V první fázi ověřování matematického modelu (experimenty řady 1 a 2) byla při reálném a modelovém broušení vyhodnocována závislost řezné síly F_c a parametrů drsnosti povrchu R_a a R_z na řezných podmínkách s použitím metody postupné změny jedné nezávisle proměnné.

Experimenty řady 1

Při experimentech řady 1 byla zkoumána závislost řezné síly na velikosti pracovního radiálního záběru. Řezná síla byla při experimentech reálného broušení sta-

novena při konstantní řezné rychlosti a stálé tangenciální rychlosti posuvu stolu. Řezná rychlost nástroje byla určena výpočtem z otáček vřetena a z průměru broušícího kotouče. Při experimentech byly zkušební součástky z oceli 11 375 broušeny kotoučem A9932L8V. Řezná síla byla za jinak stejných řezných podmínek určena pro deset různých nastavených hodnot pracovního radiálního záběru a_{eNAST} . Protože tuhost stroje nebyla ideální, nedosáhly skutečné velikosti pracovního radiálního záběru a_e po jednotlivých zdvizech nastavenou velikost a_{eNAST} . Hodnoty skutečného úbytku obrobku a_e byly určeny s použitím dotykového snímače pracovního radiálního záběru, který je na pracovišti autora k dispozici (Gabriel aj., 1998). Jednotlivá měření řezné síly byla vždy třikrát zopakována, přičemž byla také pokaždé zjišťována skutečná velikost pracovního radiálního záběru a statistickým vyhodnocením určena střední velikost pracovního radiálního záběru a_e . Vyhodnocení bylo provedeno při prvním zdvihu stolu brusky, kdy je přídavek na obrábění největší a na soustavu S-N-O-P působily největší řezné síly.

Pro výpočet řezné síly F_c při simulovaném broušení byla zadána hodnota změřené tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky a střední hodnota skutečně změřeného pracovního radiálního záběru. Výpočet řezné síly byl proveden při prvním zdvihu stolu brusky pro deset hloubek záběru a_e . V kapitole věnované popisu programu a algoritmu pro výpočet síly při broušení bylo již uvedeno, že pro určení střední hodnoty řezné síly bylo nutno výpočet při konstantních řezných podmínkách zopakovat v různých vzájemných polohách nástroje a obrobku. Příčinou je to, že se v jednotlivých pozicích broušícího kotouče a obrobku dostává do záběru pokaždé jiný počet simulovaných zrn brusiva a tím se také mění příslušná velikost řezné síly. To odpovídá situaci při reálném broušení, kdy zaznamenané signály ze snímačů také nemají konstantní úroveň. Abychom simulací získali spolehlivý výsledek pro každou hodnotu pracovního radiálního záběru a_e , byl výpočet síly proveden vždy v deseti různých polohách. Vypočítané hodnoty byly podle výše uvedeného postupu statisticky zpracovány a určena průměrná hodnota řezné síly F_c s odpovídajícím 95% příbližným intervalem spolehlivosti. Následně byla stanovena velikost řezné síly na jednotku šířky řezu F_c' . Výsledné hodnoty byly shrnuty do tabulky a grafu.

Experimenty řady 2

Při těchto experimentech byly broušícím kotoučem A9932L8V obráběny zkušební součástky z oceli 12 050. 4 a byly vyhodnocovány parametry drsnosti povrchu.

Drsnosti byly stanoveny při experimentech reálného i simulovaného broušení za jinak stejných řezných podmínek pro dvě hodnoty tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky v_{rt} a pro dvě velikosti nastaveného pracovního radiálního záběru a_{eNAST} . Hodnoty drsnosti povrchu byly určeny po prvním, třetím a sedmém zdvihu stolu. Podobně jako u experimentů řady 1 nebylo při jednotlivých zdvizech stolu brusky dosaženo nastavené velikosti záběru a_{eNAST} , proto byla skutečná velikost pracovního radiálního záběru a_e opět změřena snímačem pracovního radiálního záběru.

Výpočty parametrů drsnosti povrchu byly provedeny za podmínek, jež odpovídaly podmínkám reálného procesu broušení. Hodnoty pracovního radiálního záběru a_e byly zadány podle skutečně změřených hodnot. Výpočet byl proveden postupně v pěti různých rovinách simulovaného obrobku. Statistickým zpracováním stanovených hodnot parametrů drsnosti byla získána střední hodnota průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a a největší výška profilu R_z s odpovídajícím 95% přibližným intervalem spolehlivosti. Výsledné hodnoty byly shrnuty do tabulky a grafů.

Jak již bylo výše uvedeno, je proces broušení ovlivňován značným množstvím veličin. Ve druhé fázi ověřování matematického modelu byly proto ze souboru všech ovlivňujících parametrů vybrány ty, u kterých bylo možno předpokládat, že mají na obráběnou součást rozhodující vliv a k ověřování bylo použito plánování experimentů, tedy metoda tzv. úplného faktorového experimentu.

Experimenty řady 3 - 5

Při experimentech řady 3 až 5 byly hodnoceny velikosti řezné síly při broušení obrobků z různých materiálů, za různých řezných podmínek, při použití různých brousících kotoučů. Především byly provedeny experimenty broušení zkušebních obrobků z oceli 12 050 v přírodním stavu. Jedná se o konstrukční ušlechtilou ocel se zaručeným chemickým složením a s indexem obrobitelnosti 1, tzv. etalonovou ocel, která je na pracovišti autora používána především pro zkoušky obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu. Dále byly broušeny zkušební součásti z oceli 14 109. Tato ocel, používaná zejména při výrobě valivých ložisek, byla vybrána jako vzorový materiál pro experimenty obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu. Zkušební vzorky z této oceli byly kaleny v oleji při teplotě 820 – 840 °C na tvrdost 60 -61 HRC a následně popuštěny v oleji při 170 °C na tvrdost 57 – 58 HRC. Pro srovnání byl jako třetí materiál použit dural, tedy slitina Al-Cu4-Mg. Dural je představitelem skupiny lehkých a neželezných kovů. S ohledem na to, že pro broušení duralu a oceli není

vhodné použít stejný druh brousícího materiálu, byly pro experimenty použity brousící kotouče podobné specifikace, ovšem vyrobené z různých brusiv (99BA46K8V a 48C46J8V).

Experimenty řady 3 až 5 byly provedeny dle stejného postupu. Pro zajištění dostatečné spolehlivosti výsledků bylo měření řezné síly při reálném broušení za konkrétních podmínek provedeno třikrát a z naměřené hodnoty síly byla vypočítána jednotková řezná síla. Při každém experimentu byla změřena velikost tangenciální rychlosti posuvu stolu a ze tří měření stanovena střední velikost skutečného pracovního radiálního záběru. Před vlastním měřením řezné síly při reálném broušení byly zaznamenány skutečné řezné podmínky. Řezná rychlost brousícího kotouče byla určena z otáček vřetene stroje, jež byly stanoveny optickým snímačem otáček a měřičem frekvence (Gabriel aj., 1998), a ze změřeného průměru brousícího kotouče. Požadovanou tangenciální rychlost posuvu stolu brusky bylo obtížné nastavit přesně, protože posuv stolu brusky zajišťuje hydraulický systém. Skutečný posuv, který se co nejvíce blížil požadovanému, byl proto změřen inkrementálním rotačním čidlem a měřičem frekvence (Gabriel aj., 1998). S ohledem na tu okolnost, že hodnota skutečného pracovního radiálního záběru je při broušení každé zkušební součástky poněkud odlišná, bylo třeba provést měření opakovaně a požadovanou střední hodnotu řezné síly i statistický interval spolehlivosti při reálném broušení určit statistickým zpracováním výsledných hodnot.

Pro výpočet řezné síly při simulovaném broušení byly zadány střední hodnoty skutečně změřené tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky a pracovního radiálního záběru. Z výše uvedených důvodů bylo třeba výpočet zopakovat v různých polohách brousícího kotouče vůči obrobku. Při experimentech řady 3 až 5 byly výpočty provedeny v 11 polohách tak, aby se v jejich průběhu brousící kotouč vůči obrobku posunul celkem o 1,0 mm s krokem 0,1 mm. Tím bylo pro každou kombinaci řezných podmínek získáno 11 hodnot řezné síly. Z těchto údajů pak byla určena střední hodnota a statistický interval spolehlivosti s využitím Studentova rozdělení pro úroveň spolehlivosti 95%. Analogicky byla určena střední velikost a statistický interval spolehlivosti pro řeznou sílu na jednotku šířky řezu.

Pro dvojúrovňový úplný faktorový experiment se dvěma vyšetřovanými parametry (tangenciální rychlost posuvu stolu brusky a pracovní radiální záběr) bylo třeba uvedený postup zopakovat celkem pro čtyři kombinace řezných podmínek. Z důvodu lepší názornosti byly zvolené extrémní úrovně faktorů doplněny jednou další kombi-

nací řezných podmínek, která reprezentuje střední hodnoty faktorů. Celkem tedy bylo při experimentech jedné řady vyšetřeno 5 kombinací řezných podmínek.

Po statistickém zpracování byly naměřené a vypočítané hodnoty shrnuty do tabulky stanovených hodnot a dále zpracovány do grafu řezné síly na jednotku šířky řezu pro reálné a simulované broušení. Pro detailní porovnání výsledných hodnot byly stanovené hodnoty dále zaneseny do grafu R - S, kde byly metodou nejmenších čtverců stanoveny parametry regresní přímky charakterizující trend naměřených a vypočítaných hodnot. Ze zjištěných údajů byl dále pro jednotkovou řeznou sílu určen korelační koeficient výsledných hodnot reálného a simulovaného broušení. Dalším výsledkem experimentů, který byl získán v rámci úplného faktorového experimentu, byla také konstanta a_1 a exponenty a_2 , a_3 empirického vztahu:

$$F_c = a_1 \cdot a_e^{a_2} \cdot v_{ft}^{a_3} .$$

Tyto veličiny vyjadřují závislosti mezi technologickými proměnnými a řeznou silou při reálném a simulovaném broušení pro jednotlivé řady experimentů.

Experimenty řady 6 - 7

Pro experimenty byly použity dva druhy brousicích kotoučů a jeden druh materiálu obrobku (ocel 14 109.4). Cílem měření a výpočtů bylo vyšetřit vliv velikosti zrn brusiva a stupně tvrdosti brousicího nástroje na drsnost povrchu broušené součásti. U experimentů řady 6 byl použit kotouč jemné zrnitosti a střední tvrdosti (99BA80L8V), u experimentů řady 7 byl použit kotouč střední zrnitosti s většími zrny brusiva (99BA46K8V), který patří do skupiny tzv. měkkých kotoučů (ČSN ISO 525). Kromě specifikace nástroje zůstaly ostatní řezné podmínky při experimentech na brusce BPH 20 konstantní.

Experimenty řady 6 a 7 byly provedeny dle stejného postupu. Pro zajištění dostatečné spolehlivosti výsledků bylo měření parametrů R_a i R_z po reálném broušení za konkrétních podmínek provedeno vždy třikrát a z naměřených údajů byly vypočítány střední hodnoty. V průběhu každého experimentu byla také změřena velikost tangenciální rychlosti posuvu stolu a ze tří měření byla stanovena průměrná velikost pracovního radiálního záběru. Z výsledků měření pak byla určena střední hodnota průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a a střední hodnota největší výšky profilu R_z včetně příslušných statistických intervalů spolehlivosti.

Podle řezných podmínek stanovených při reálném broušení byly následně zadány hodnoty pro výpočet parametrů drsnosti povrchu při simulovaném broušení. Výpočet parametrů R_a a R_z byl pro změřenou rychlost posuvu stolu a střední hodnotu skutečného pracovního radiálního záběru proveden vždy pětikrát a to v pěti po sobě následujících rovinách simulovaného obrobku. Z výsledných hodnot pak byla pro parametry R_a i R_z určena střední hodnota a s využitím Studentova rozdělení pro úroveň spolehlivosti 95% také statistický interval spolehlivosti.

Při experimentech řady 6 a 7 byly parametry drsnosti povrchu stanoveny po prvním nebo po sedmém zdvihu stolu brusky. Hodnocení drsnosti po prvním zdvihu bylo provedeno z toho důvodu, že při prvním zdvihu je, v porovnání s tloušťkami při následujících zdvizech, tloušťka skutečně odřezávané vrstvy největší. Po sedmém zdvihu byly parametry drsnosti vyhodnocovány za předpokladu, že již proběhla rozhodující část procesu vyjiskřování. V obou případech byl vyšetřován vliv dvou parametrů (tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky a pracovního radiálního záběru) a pro úplný faktorový experiment bylo tedy třeba uvedený postup zpracování dat zopakovat pro dvakrát čtyři kombinace řezných podmínek. Celkem proto bylo při experimentech jedné řady vyšetřeno 8 kombinací řezných podmínek.

Naměřené a vypočítané hodnoty byly po statistickém zpracování shrnuty do tabulky výsledných hodnot a dále zpracovány do grafů znázorňujících průběh závislosti parametrů drsnosti povrchu R_a a R_z na počtu zdvihů, na velikosti pracovního radiálního záběru a na tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky pro reálné a simulované broušení. Hodnoty stanovené při reálném broušení a při matematické simulaci byly opět znázorněny v grafu $R - S$, kde byly pro jejich snadné porovnání metodou nejmenších čtverců stanoveny parametry regresní přímky charakterizující trend naměřených a vypočítaných hodnot. Pro oba parametry drsnosti byly poté určeny korelační koeficienty výsledných hodnot reálného a simulovaného broušení. Nakonec byly z jednotlivých souborů výsledných hodnot drsnosti povrchu určených v rámci úplného faktorového experimentu pro reálné nebo simulované broušení určeny příslušné konstanty b_1, c_1 a exponenty b_2, b_3, c_2, c_3 empirických vztahů:

$$R_a = b_1 \cdot a_e^{b_2} \cdot v_{ft}^{b_3} ,$$

$$R_z = c_1 \cdot a_e^{c_2} \cdot v_{ft}^{c_3} ,$$

které vyjadřují závislosti mezi technologickými proměnnými a parametry drsnosti.

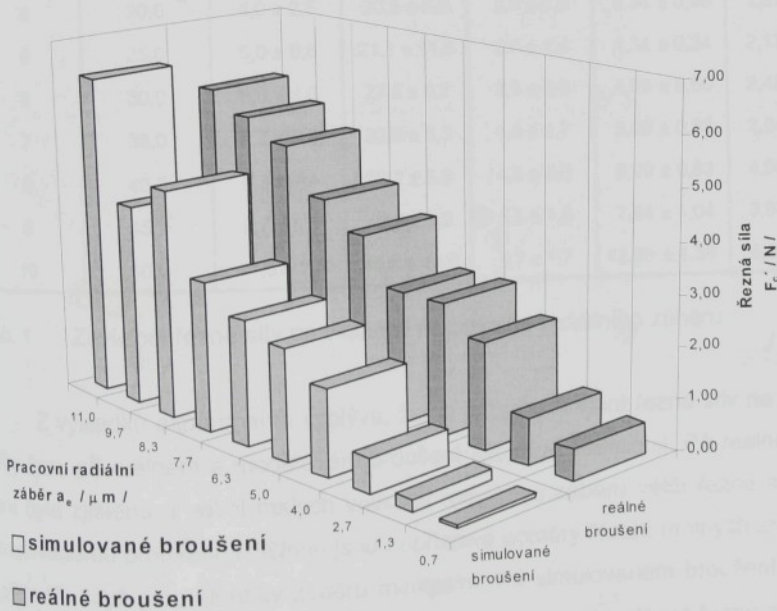
6. Výsledky a hodnocení experimentů

Experimenty byly provedeny při reálném broušení na brusce BPH 20. Podmínky experimentů jsou uvedeny v kapitole „Metodika ověřování simulačního modelu“. Za odpovídajících podmínek byly následně na číslicovém počítači vypočítány požadované parametry s použitím matematického modelu procesu broušení.

6.1. Metoda postupné změny nezávisle proměnné

6.1.1. Řezná síla při broušení oceli 11 375

Při experimentech řady 1 byla vyhodnocována závislost řezné síly na jednotku šířky řezu F_c' při různých velikostech pracovního radiálního záběru a_e . Výchozím předpokladem bylo, že při zvětšování hloubky záběru se zvětšuje velikost řezné síly. Pro reálné broušení zkušebních obrobků z oceli 11 375 rozměrů 72 x 40 x 8 mm byl použit brousicí kotouč typ 1 - 245 x 32 x 76 - A99 32L8V - 35 m.s⁻¹.



Obr. 38 Řezná síla při reálném a simulovaném broušení

Průměrné hodnoty řezné síly určené experimentálně při reálném broušení a hodnoty stanovené výpočtem pomocí modelu procesu broušení jsou uvedeny v tab.

1. Aby byly výsledky experimentů dostatečně spolehlivé, byla jednotlivá měření řezné síly zopakována třikrát a výpočet byl proveden v deseti různých vzájemných polohách nástroje a obrobku. Na obr. 38 jsou zjištěné výsledky znázorněny graficky.

brous. kot.: A99 32 L 8 V řez. rychl.: 32,9 m / s			materiál obrobku : tangenc. rychl. posuvu stolu:		11 375 0,175 m / s	
číslo exper.	pracovní radiální záběr		řezná síla			
			reálné broušení		simulované broušení	
	nastavený	skutečný	celková	jednotkov.	celková	jednotkov.
	a_{enast} [μm]	a_e [μm]	F_c [N]	F_c' [N]	F_c [N]	F_c' [N]
1	5,0	0,7 ± 1,4	5,1 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,13 ± 0,03	0,06 ± 0,02
2	10,0	1,3 ± 1,4	7,5 ± 1,5	0,9 ± 0,2	0,42 ± 0,09	0,21 ± 0,05
3	15,0	2,7 ± 2,9	16,4 ± 0,0	2,1 ± 0,0	1,34 ± 0,18	0,67 ± 0,09
4	20,0	4,0 ± 2,5	20,5 ± 6,7	2,6 ± 0,8	3,34 ± 0,46	1,67 ± 0,23
5	25,0	5,0 ± 6,6	21,1 ± 11,5	2,6 ± 1,4	4,34 ± 0,34	2,17 ± 0,17
6	30,0	6,3 ± 8,0	27,6 ± 6,7	3,5 ± 0,8	4,89 ± 0,56	2,45 ± 0,28
7	35,0	7,7 ± 3,8	32,0 ± 5,3	4,0 ± 0,7	5,88 ± 0,88	2,94 ± 0,44
8	40,0	8,3 ± 1,4	39,2 ± 3,9	4,9 ± 0,5	8,99 ± 0,83	4,50 ± 0,42
9	45,0	9,7 ± 8,7	42,3 ± 8,2	5,3 ± 1,0	7,94 ± 1,04	3,97 ± 0,52
10	50,0	11,0 ± 2,5	45,3 ± 14,0	5,7 ± 1,7	12,63 ± 1,38	6,32 ± 0,69

Tab. 1 Závislost řezné síly na velikosti pracovního radiálního záběru

Z výsledků experimentů vyplývá, že se rozsahy hodnot řezné síly na jednotku šířky řezu při reálném a modelovém broušení zásadně neodlišují. Při reálném broušení byla zjištěna u velmi malých velikostí radiálního záběru větší řezná síla oproti simulovanému broušení. Příčinou jsou nepříznivé poměry řezání reálných zrn brusiva v případě, když jsou hloubky záběru minimální. Při simulovaném broušení byla pro hloubku záběru $9,7 \mu\text{m}$ opakovaně zjištěna poměrně malá velikost řezné síly. Z detailního rozboru algoritmu výpočtu vyšlo najevo, že tato skutečnost souvisí se způsobem generování náhodných čísel u matematického modelu. Z obr. 38 je zřejmé, že

výsledná tendence závislosti řezné síly na velikosti pracovního radiálního záběru při reálném i při simulovaném broušení je dostatečně shodná. Výběrový koeficient korelace $r = 0,959$ vyjadřuje velmi silnou závislost mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami. Z tabulky 1 je také zřejmé, že hodnoty skutečného pracovního radiálního záběru jsou oproti nastaveným hodnotám podstatně menší. Tato okolnost svědčí o poměrně malé tuhosti soustavy S-N-O-P.

6.1.2. Drsnost povrchu při broušení oceli 12 050. 4

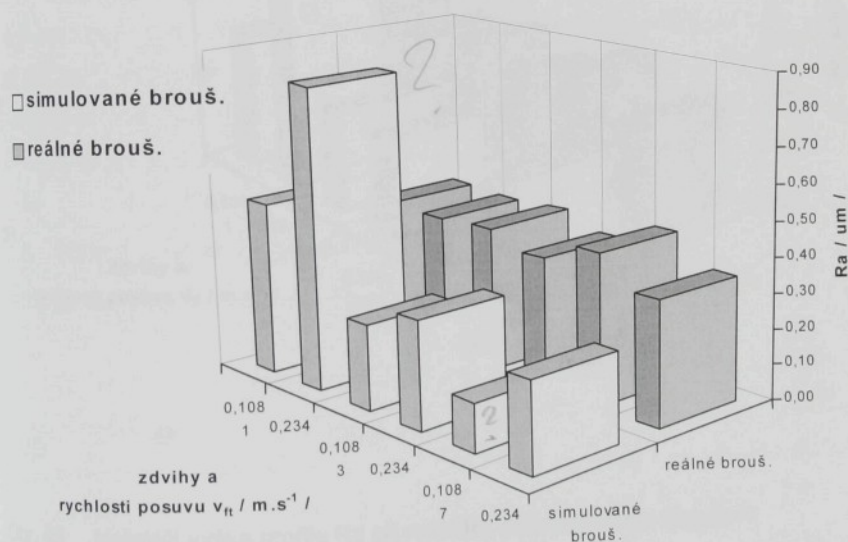
Cílem následujících experimentů řady 2 bylo stanovit hodnoty průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a a největší výšky profilu R_z pro dva případy broušení, odlišující se hodnotou tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky v_{ft} a velikostí nastaveného pracovního radiálního záběru a_{eNAST} při reálném i simulovaném broušení. Hodnoty parametrů drsnosti povrchu byly vyhodnocovány po prvním, třetím a po sedmém zdvihu stolu brusky.

brousící kotouč : A99 32 L 8 V		materiál obrobku : 12 050. 4					
řezné podmínky	zdvihy	č. exp.	R / S	pr.r.záb. a_e [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]	
nastav. hl. záběru 15 μm	1	11	R	5,6 $\pm$ 1,1	0,41 $\pm$ 0,08	2,49 $\pm$ 0,54	
rychlost posuvu 0,108 m / s		12	S	5,6	0,48 $\pm$ 0,01	2,53 $\pm$ 0,08	
řezná rychlost 32,6 m / s	3	13	R	8,8 $\pm$ 1,8	0,41 $\pm$ 0,03	2,42 $\pm$ 0,33	
		14	S	8,8	0,24 $\pm$ 0,01	1,76 $\pm$ 0,08	
	7	15	R	11,6 $\pm$ 5,0	0,43 $\pm$ 0,08	2,48 $\pm$ 0,59	
		16	S	11,6	0,14 $\pm$ 0,01	0,88 $\pm$ 0,03	
nastav. hl. záběru 25 μm	1	17	R	7,8 $\pm$ 4,0	0,40 $\pm$ 0,08	2,31 $\pm$ 0,64	
rychlost posuvu 0,234 m / s		18	S	7,8	0,84 $\pm$ 0,01	5,37 $\pm$ 0,01	
řezná rychlost 32,6 m / s	3	19	R	11,2 $\pm$ 2,8	0,37 $\pm$ 0,06	2,06 $\pm$ 0,12	
		20	S	11,2	0,30 $\pm$ 0,01	1,66 $\pm$ 0,01	
	7	21	R	15,0 $\pm$ 7,6	0,35 $\pm$ 0,06	1,99 $\pm$ 0,28	
		22	S	15,0	0,25 $\pm$ 0,01	1,85 $\pm$ 0,07	

Tab. 2 Závislost parametrů drsnosti povrchu na podmínkách broušení

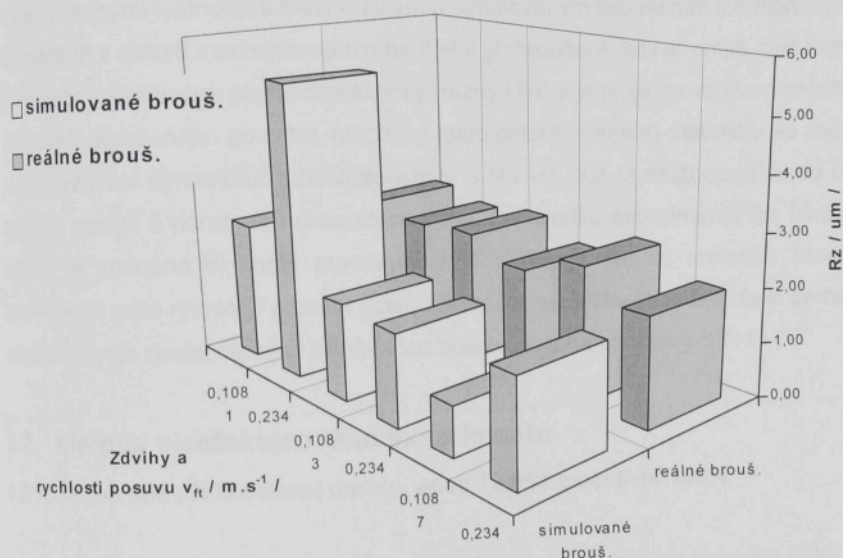
Drsnost povrchu byla vyhodnocována po broušení s malou hloubkou záběru a s malou rychlostí posuvu stolu brusky a následně při větší hloubce záběru a větší rychlosti posuvu. Výchozím předpokladem bylo, že se bude drsnost povrchu zlepšovat s přibývajícím počtem vyjiskřovacích zdvihů pracovního stolu stroje. K obrábění zkušebních obrobků z oceli 12 050.4 rozměrů 60x40x15 mm na brusce BPH 20 byl použit brousicí kotouč typ 1- 245 x 32 x 76 - A99 32L8V - 35 m.s⁻¹.

Dle výše uvedené metodiky bylo za stejných řezných podmínek broušeno vždy pět zkušebních součástí a u každé z nich bylo provedeno měření parametrů drsnosti povrchu na třech místech. Výpočet parametrů Ra a Rz byl pro jednotlivé řezné podmínky při simulaci procesu broušení proveden v pěti polohách zkušební součásti. Naměřené a vypočítané hodnoty byly statisticky vyhodnoceny. Výsledky z měření a výpočtů, které byly provedeny v rámci experimentů řady 2, shrnuje tabulka 2 a graficky jsou výsledky znázorněny na obr. 39 a 40.



Obr. 39 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra při reálném a simulovaném broušení

Ze souhrnné tabulky naměřených hodnot a také z grafických závislostí není patrné, že by si zjištěné průběhy závislostí průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu Ra a největší výšky profilu Rz při reálném a simulovaném broušení vzájemně odpovídaly. Poněkud jinak se situace jeví, budeme-li samostatně posuzovat závislosti pro konkrétní velikost tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky. Z tabulky i z grafů je zřejmé, že se při modelování procesu broušení drsnost povrchu spolu s počtem vyjiskřovacích zdvihů jednoznačně zlepšuje a to u parametru Ra i Rz. Také byla, až na jedinou výjimku, pro Ra i Rz stanovena lepší drsnost povrchu při broušení s menší rychlostí posuvu stolu.



Obr. 40 Největší výška profilu Rz při reálném a simulovaném broušení

Měřením parametrů drsnosti povrchu po reálném broušení na brusce BPH 20 bylo zjištěno, že se velikost sledovaných veličin Ra i Rz pohybuje v poměrně malém rozsahu. Ze změřených hodnot nevyplývá, že se drsnost povrchu jednoznačně zlepšuje s ním. Očekávaná závislost se u parametru Ra i Rz spolu s počtem vyjiskřovacích zdvihů. Prokázala pouze při maximální rychlosti posuvu stolu $0,234 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tj. $14,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

při broušení s malou rychlostí posuvu stolu $0,108 \text{ m.s}^{-1}$ (tj. $6,5 \text{ m.min}^{-1}$) se při maximálním počtu vyjiskřovacích zdvihů naopak projevilo mírné zhoršení drsnosti povrchu. Pro Ra i Rz byla zjištěna lepší drsnost povrchu po broušení s větší rychlostí posuvu stolu. Pokud s přihlédnutím k těmto skutečnostem porovnáme naměřené a vypočítané hodnoty, pak dojdeme k závěru, že při broušení s malou tangenciální rychlostí posuvu stolu mezi nimi není funkční závislost. Tomu také odpovídají korelační koeficienty, které se pro Rz blíží nule (0,09) nebo jsou pro Ra dokonce záporné (-0,73). V případě broušení s maximální rychlostí posuvu naopak funkční závislost existuje. Korelační koeficient pro parametr Ra (0,94) i Rz (0,97) svědčí o silné závislosti mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami. Vysvětlení pro zjištěné rozdíly mezi výslednými hodnotami mezi reálným a simulovaným broušením lze hledat pravděpodobně v oblasti mechanismu tvorby třísky při broušení, kdy je určitá část materiálu obrobku vtačována pod technologický „řezný klín“ a je příčinou vzniku plastických deformací obrobeného povrchu. Množství takto deformovaného materiálu se zvětšuje při snižování dynamické tuhosti soustavy S-N-O-P, což je možnou příčinou minimálních rozdílů u parametrů drsnosti povrchu. Z výsledků experimentů lze usuzovat na to, že zmíněná okolnost pravděpodobně ovlivňuje proces reálného broušení zejména při malé rychlosti posuvu stolu, zatímco u simulovaného broušení se nepříznivě projevuje zjednodušující předpoklad absolutně tuhé soustavy S-N-O-P.

6.2. Metoda vícefaktorového experimentu

6.2.1. Řezná síla při broušení duralu, oceli 12 050 a oceli 14 109.4

Do jaké míry si vzájemně odpovídají hodnoty řezné síly na jednotku šířky řezu F_c při různých podmínkách reálného a simulovaného broušení je zřejmé z tabulek a grafů, které shrnují výsledky experimentů řady 3 až 5. Snahou bylo efektivně vyšetřit co největší oblast možných případů broušení s přihlédnutím k dostupným zdrojům informací o parametrech nástroje a obrobku a k podmínkám na pracovišti autora. Pro zkoušky byly vybrány tři druhy materiálu obrobku (dural, ocel 12 050 a ocel 14 109.4) a dva druhy brousících kotoučů (48C46J8V a 99BA46K8V).

Měření a výpočty byly realizovány dle výše uvedené metodiky. Řezná síla byla při reálném broušení za konkrétních podmínek měřena třikrát a výpočty byly za odpovídajících podmínek zopakovány jedenáctkrát. Výchozím předpokladem bylo, že

se řezná síla zvětšuje jak při zvětšování hloubky záběru, tak při zvětšování rychlosti posuvu.

Při hodnocení dosažených výsledků je třeba mít na zřeteli, že všechny tři řady experimentů (3 - 5) byly realizovány metodou plánování experimentů, kdy byl každý jednotlivý experiment proveden při odlišné velikosti dvou nezávisle proměnných, jež představují zvolené extrémy faktorů. Pro všech pět měření realizovaných v rámci každé řady experimentů tedy platí, že probíhala při různé kombinaci velikosti tangenciální rychlosti posuvu stolu a pracovního radiálního záběru. Tuto okolnost je nutno zohlednit také při posuzování výsledků v příslušných tabulkách a zejména v grafech, kde z uvedených důvodů nelze předpokládat monotónní průběh výsledných hodnot.

Při experimentech řady 3 byl pro reálné broušení zkušebních obrobků z duralu rozměrů 60 x 50 x 16,5 mm použit brousicí kotouč typ 1 - 248 x 20 x 76 - 48C46J8V - 35 m.s⁻¹. Výsledky provedených měření a výpočtů shrnuje tabulka 3 a obrázek 41.

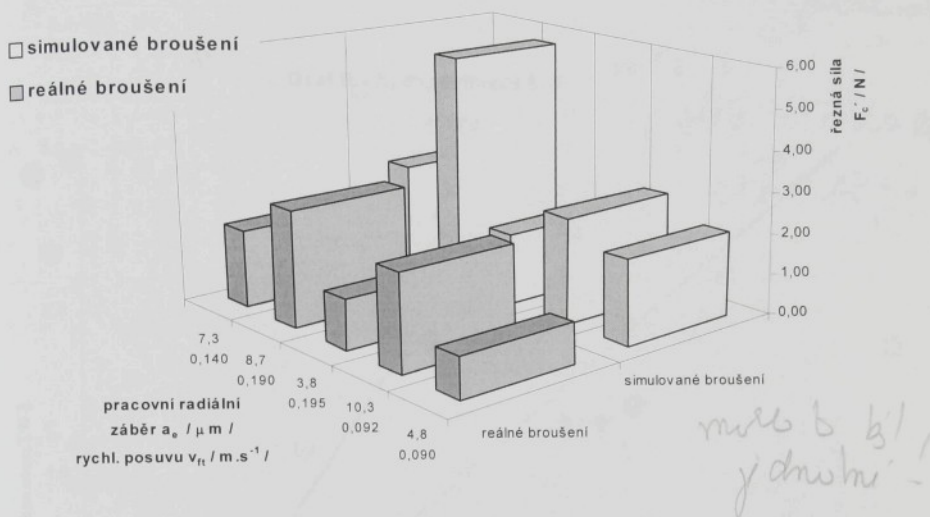
totálně naplněn, s potrovnou pro 6 broušení!

brousicí kot. : 48C 46 J 8 V 248 x 20 x 76 mm řezná rychl. : 33,3 m / s					materiál obrobku : DURAL 60 x 50 x 16,5 mm			
číslo exp.	tangenc. rychl. posuvu		pracovní radiální záběr		řezná síla			
					reálné broušení		simulované broušení	
	požad. $V_{fpož}$ [m.s ⁻¹]	skut. V_{ft} [m.s ⁻¹]	nastav. a_{enast} [μm]	skutečný a_e [μm]	celková F_c [N]	jednotková F_c' [N]	celková F_c [N]	jednotková F_c' [N]
30	0,080	0,090	10,0	4,8 ± 1,9	16,0 ± 5,0	1,0 ± 0,3	4,15 ± 1,31	2,07 ± 0,66
31	0,080	0,092	25,0	10,3 ± 1,4	38,3 ± 19,0	2,3 ± 1,2	5,17 ± 2,59	2,58 ± 1,30
32	0,190	0,195	10,0	3,8 ± 0,7	19,7 ± 11,2	1,2 ± 0,7	3,50 ± 0,96	1,75 ± 0,48
33	0,190	0,190	25,0	8,7 ± 2,9	45,7 ± 19,9	2,8 ± 1,2	11,45 ± 4,68	5,72 ± 2,34
34	0,135	0,140	17,5	7,3 ± 1,4	30,7 ± 9,4	1,9 ± 0,6	5,19 ± 2,73	2,59 ± 1,36

Tab. 3 Velikost řezné síly při různých podmínkách broušení duralu

Porovnáme-li výsledné hodnoty řezné síly na jednotku šířky řezu určené při reálném a modelovém broušení, pak je z tabulky a zejména z obrázku určitá závislost poměrně dobře patrná. Při modelovém broušení byla vždy vypočítána větší síla než při broušení na brusce. Výběrový koeficient korelace, který vyjadřuje míru závislosti naměřených a vypočítaných hodnot, vychází pro uvedené experimenty 0,82, je tedy větší než 0,8, což podle zvolené metodiky znamená, že mezi oběma soubory údajů existuje velmi silná závislost. V tabulce 4 jsou uvedeny vypočítané hodnoty

konstant a exponentů empirických rovnic, jež charakterizují závislost řezné síly na velikosti pracovního radiálního záběru a na tangenciální rychlosti posuvu stolu.



Obr. 41 Řezná síla při reálném a simulovaném broušení duralu

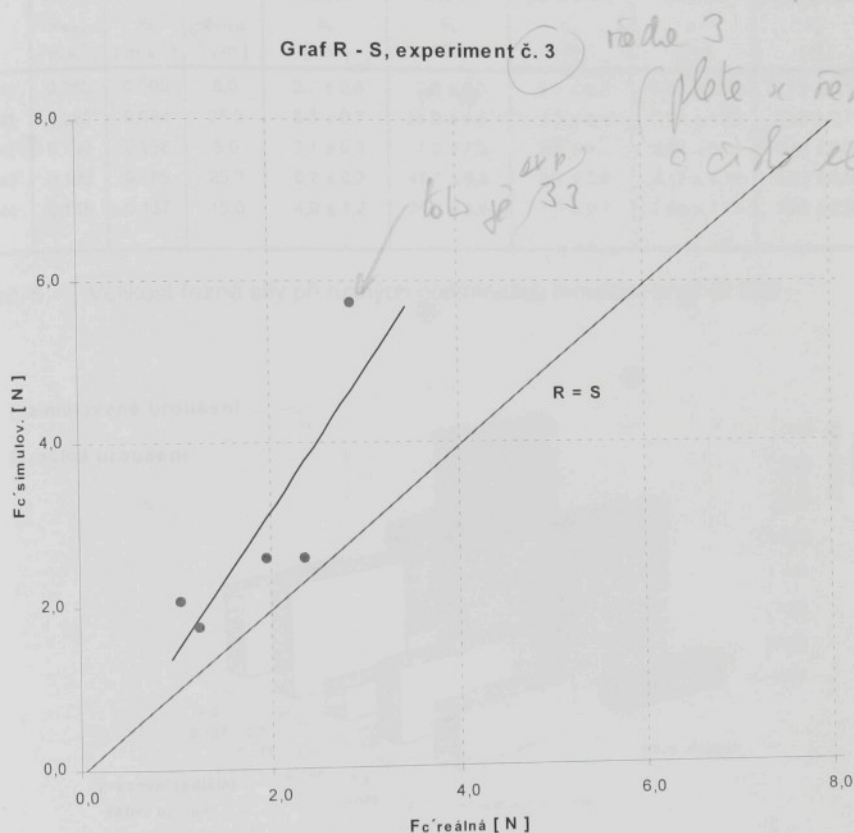
$F'_c = a_1 \cdot a_e^{a_2} \cdot v_{ft}^{a_3}$	a_1	a_2	a_3
reálné broušení	0,87	0,62	0,23
simulované broušení	1,95	0,57	0,36

Tab. 4 Parametry empirických rovnic pro výpočet řezné síly při broušení duralu

Porovnání sil při reálném a simulovaném broušení ve formě grafu $R - S$ je uvedeno na obr. 42. Z tohoto zajímavého obrázku na první pohled vyplývá, že při čtyřech experimentech bylo dosaženo poměrně dobré shody mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami, v jednom případě však vznikla značná odchylka. Ta se projevila u experimentu č. 33, kdy bylo broušení provedeno při největší rychlosti posuvu stolu a současně při největším pracovním radiálním záběru a kdy byla při reálném broušení určena střední jednotková síla 2,8 N a při simulovaném broušení byla vypočítána střední jednotková síla 5,72 N, tedy síla více než dvojnásobná. Při podrobném rozboru výsledných hodnot u experimentu č. 33 a porovnáním s výsledky ostatních

experimentů nebyly zjištěny žádné významné anomálie, až na tu okolnost, že právě u tohoto experimentu byl při výpočtech určen největší průměrný celkový počet zrn v záběru. Regresní přímka v grafu R - S vykazuje směrnici 1,7.

Je to v reálnosti?

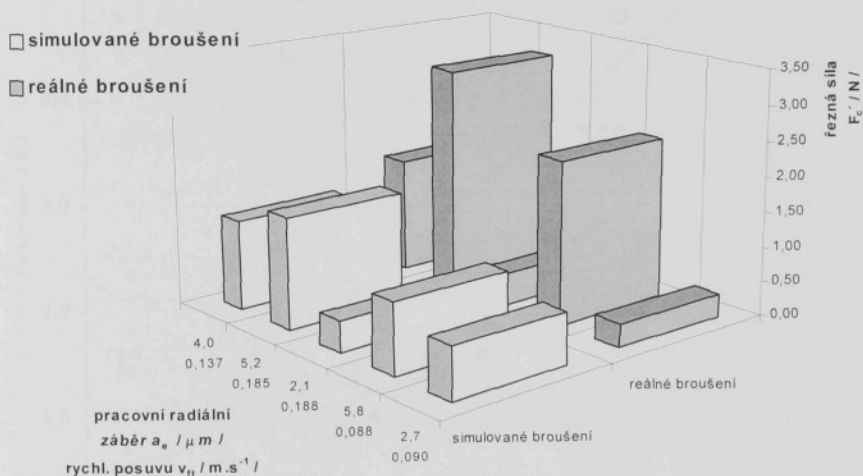


Obr. 42 Graf R - S pro řezné síly při broušení duralu

V další řadě experimentů, označené pořadovým číslem 4, byl pro reálné broušení zkušebních obrobků z oceli 12 050 rozměrů 60 x 50 x 15 mm použit brousicí kotouč typ 1 - 250 x 20 x 76 - 99BA46K8V - 35 m.s⁻¹. Výsledky měření a výpočtů jsou uvedeny v tabulce 5 a graficky jsou výsledky znázorněny na obr. 43.

brousicí kot. : 99BA 46 K 8 V					materiál obrobku : ocel 12 050			
250 x 20 x 76 mm					60 x 50 x 15 mm			
řezná rychl. : 33,5 m / s								
číslo exp.	tangenc. rychl. posuvu		pracovní radiální záběr		řezná síla			
	požad. $v_{\text{řpož}}$ [m.s ⁻¹]	skut. $v_{\text{řt}}$ [m.s ⁻¹]	nastav. a_{enast} [μm]	skutečný a_e [μm]	reálné broušení		simulované broušení	
					celková F_c [N]	jednotková F_c' [N]	celková F_c [N]	jednotková F_c' [N]
40	0,080	0,090	5,0	2,7 ± 0,6	5,0 ± 2,5	0,3 ± 0,2	1,45 ± 0,38	0,73 ± 0,19
41	0,080	0,088	25,0	5,8 ± 0,7	35,0 ± 6,6	2,3 ± 0,4	1,99 ± 1,49	1,00 ± 0,74
42	0,190	0,188	5,0	2,1 ± 0,3	7,0 ± 2,5	0,5 ± 0,2	0,86 ± 0,51	0,43 ± 0,26
43	0,190	0,185	25,0	5,2 ± 0,7	47,7 ± 8,3	3,2 ± 0,6	3,17 ± 1,38	1,59 ± 0,69
44	0,135	0,137	15,0	4,0 ± 1,2	24,8 ± 3,8	1,7 ± 0,3	2,55 ± 1,19	1,28 ± 0,59

Tab. 5 Velikost řezné síly při různých podmínkách broušení oceli 12 050



Obr. 43 Řezná síla při reálném a simulovaném broušení oceli 12 050 a různých velikostech pracovního radiálního záběru

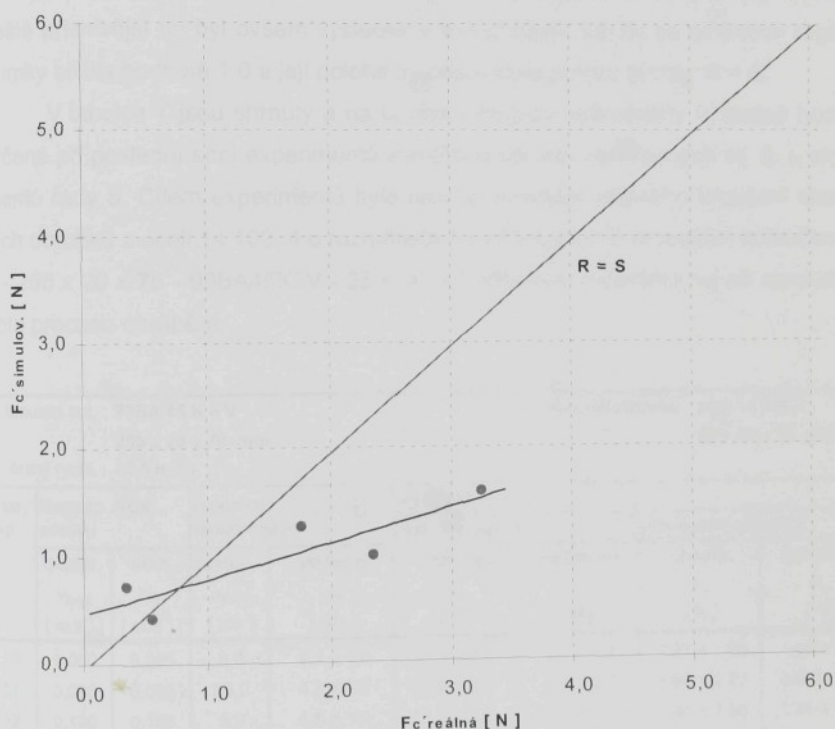
Jestliže porovnáme velikost řezné síly na jednotku šířky řezu, která byla za odpovídajících podmínek určena při reálném a modelovém broušení, pak je i v tomto případě zřejmá určitá závislost. Při obrábění oceli 12 050 byly větší síly zjištěny zpravidla při měření přímou metodou na brusce. Výjimku představuje experiment 40, kdy

byla zkušební součást broušena při minimální rychlosti posuvu a při minimální hloubce záběru a kdy byla větší jednotková řezná síla určena při simulovaném broušení.

$F'_c = a_1 \cdot a_e^{a_2} \cdot v_{ft}^{a_3}$	a_1	a_2	a_3
reálné broušení	0,49	1,21	0,32
simulované broušení	0,43	0,54	-0,03

Tab. 6 Param. empirických rovnic pro výp. řezné síly při broušení oceli 12 050

Graf R - S, experiment č. 4



Obr. 44 Graf R - S pro řezné síly při broušení oceli 12 050

Také pro tuto řadu experimentů je hodnota výběrového koeficientu korelace 0,88 velice příznivá, což opět potvrzuje tu skutečnost, že mezi oběma soubory údajů existuje velmi silná závislost. Matematicky lze popsat závislost řezné síly na velikosti pracov-

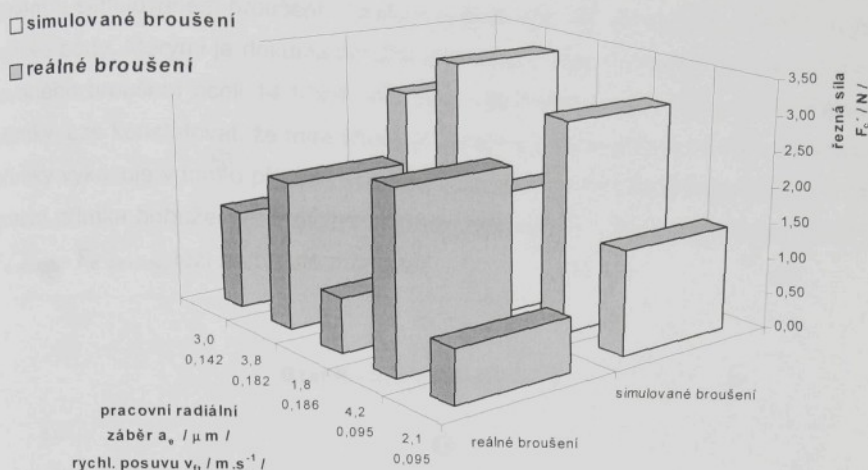
niho radiálního záběru a na tangenciální rychlosti posuvu stolu pro reálné i modelové broušení empirickou rovnicí. Parametry těchto rovnic získané metodou plánování experimentů z výsledných údajů při broušení oceli 12 050 jsou uvedeny v tabulce 6.

Názorně lze porovnat velikost sil, které byly stanoveny při reálném a simulovaném broušení oceli 12 050, z grafu R – S na obr. 44. Z grafu je zřejmé, že jednotlivé body, které dokumentují míru shody mezi výsledky reálného a simulovaného broušení, leží v poměrně úzkém pásu kolem regresní přímky se směrnici 0,33. Pokud vezmeme v úvahu, že se jedná o grafické znázornění výsledných hodnot dvou souborů výsledných údajů získaných metodou plánování experimentů, pak lze poměrně malý rozptyl hodnot kolem regresní přímky považovat za příznivý výsledek. Ještě příznivější by byl ovšem výsledek v tom případě, kdyby se směrnice regresní přímky blížila hodnotě 1,0 a její poloha by odpovídala poloze přímky $R = S$.

V tabulce 7 jsou shrnuty a na obrázku 45 jsou znázorněny výsledné hodnoty určené při poslední sérii experimentů zaměřené na určování řezných sil, tj. u experimentů řady 5. Cílem experimentů bylo provést srovnání reálného broušení zkušebních obrobků z oceli 14 109. 4 o rozměrech 60 x 50 x 15 mm brousicím kotoučem typ 1 - 250 x 20 x 76 - 99BA46K8V - 35 m.s⁻¹ s hodnotami vypočítanými při simulaci tohoto procesu obrábění.

brousicí kot. : 99BA 46 K 8 V 250 x 20 x 76 mm řezná rychl. : 33,5 m / s					materiál obrobku : ocel 14 109.4 60 x 50 x 15 mm			
číslo exp.	tangenc. rychl. posuvu		pracovní radiální záběr		řezná síla			
					reálné broušení		simulované broušení	
	požad. $V_{fpož}$ [m.s ⁻¹]	skut. V_{ft} [m.s ⁻¹]	nastav. a_{enast} [μm]	skutečný a_e [μm]	celková F_c [N]	jednotková F_c' [N]	celková F_c [N]	jednotkov. F_c' [N]
50	0,080	0,095	5,0	2,1 ± 1,3	11,3 ± 2,5	0,8 ± 0,2	2,93 ± 1,29	1,46 ± 0,64
51	0,080	0,095	25,0	4,2 ± 0,7	37,3 ± 3,8	2,5 ± 0,3	5,92 ± 2,87	2,96 ± 1,43
52	0,190	0,186	5,0	1,8 ± 1,4	11,3 ± 0,6	0,8 ± 0,0	3,48 ± 1,60	1,74 ± 0,80
53	0,190	0,182	25,0	3,8 ± 0,7	30,3 ± 3,8	2,0 ± 0,3	6,66 ± 2,45	3,33 ± 1,22
54	0,135	0,142	15,0	3,0 ± 2,2	20,2 ± 5,9	1,3 ± 0,4	5,38 ± 2,62	2,69 ± 1,31

Tab. 7 Velikost řezné síly při různých podmínkách broušení oceli 14 109.4



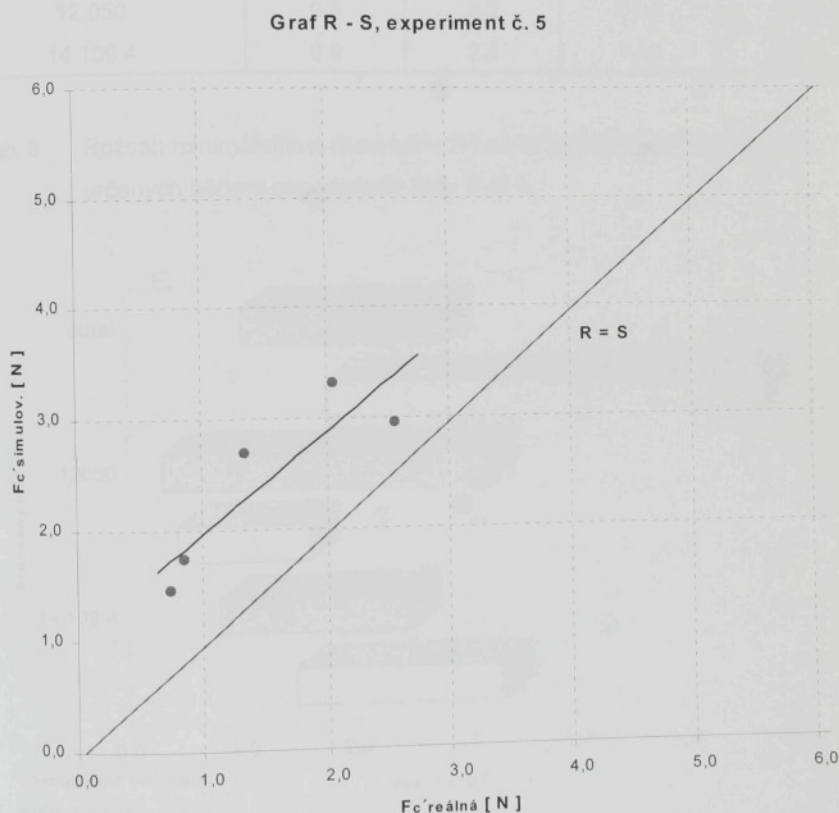
Obr. 45 Řezná síla při reálném a simulovaném broušení oceli 14 109.4 a různých velikostech pracovního radiálního záběru

Porovnáme-li výsledné hodnoty řezné síly, které byly při odpovídajících podmínkách určeny měřením a výpočtem, pak je opět určitá závislost celkem dobře patrná. Při obrábění oceli 14 109.4 byly větší síly zjištěny při simulaci procesu broušení. Pro řadu experimentů 5 byla vypočítána hodnota výběrového koeficientu korelace 0,89. V porovnání s korelačními koeficienty u ostatních řad experimentů se jedná o výsledek, který odpovídá velmi vysokému stupni závislosti a z řady 3 - 5 se jedná o vůbec nejlepší shodu mezi výsledky simulovaných a naměřených hodnot. V tabulce 8 jsou pak pro tuto řadu experimentů opět uvedeny vypočítané hodnoty konstant a exponentů empirických rovnic, které charakterizují závislost řezné síly na velikosti pracovního radiálního záběru a na tangenciální rychlosti posuvu stolu.

$F'_c = a_1 \cdot a_e^{a_2} \cdot v_f^{a_3}$	a_1	a_2	a_3
reálné broušení	0,38	0,98	-0,12
simulované broušení	1,86	0,70	0,24

Tab. 8 Param. empirických rovnic pro výpočet řezné síly při brouš. oceli 14 109.4

Přehledným způsobem lze opět porovnat velikost jednotkové řezné síly při reálném a simulovaném broušení z grafu $R - S$ na obr. 46. Z obrázku vyplývá, že jednotlivé body, kterými je dokumentována míra shody mezi výsledky reálného a simulovaného broušení oceli 14 109.4, leží také v poměrně úzkém pásu kolem regresní přímky. Lze konstatovat, že míra shody je poměrně velká, protože směrnice regresní přímky vykazuje v tomto případě hodnotu 0,92, tedy se blíží ideální hodnotě 1,0. Regresní přímka bohužel není totožná s ideální přímkou $R = S$ a v souřadném systému $F_c'_{\text{reálná}} - F_c'_{\text{simulov.}}$ leží nad touto přímkou.



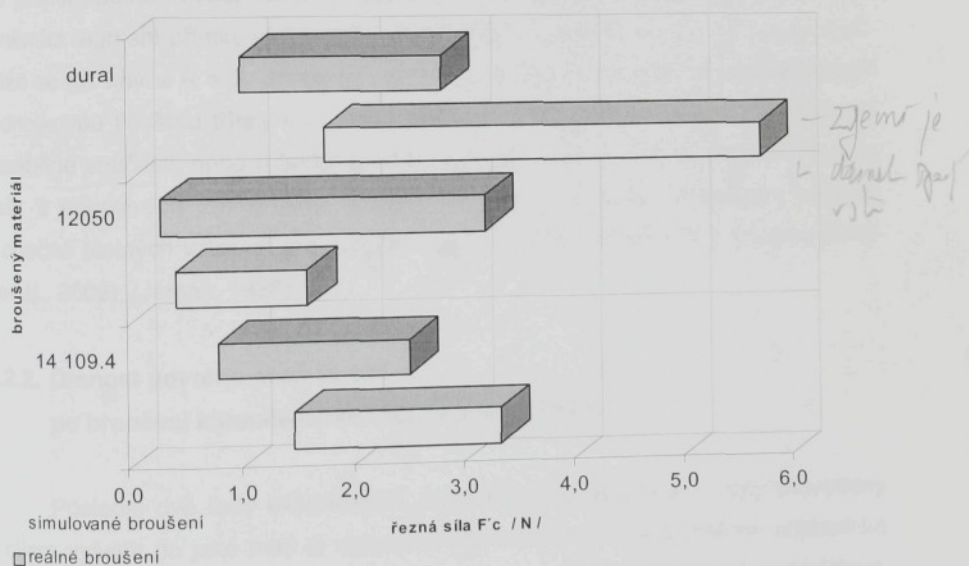
Obr. 46 Graf $R - S$ pro řezné síly při broušení oceli 14 109.4

Jak již bylo uvedeno výše, bylo cílem experimentů řady 3 až 5 zjistit, do jaké míry si vzájemně odpovídají hodnoty jednotkové řezné síly při broušení různých dru-

hů materiálů za různých podmínek reálného a simulovaného broušení. Vzájemné porovnání velikosti řezných sil při broušení jednotlivých materiálů je patrné ze souhrnného přehledu celkového rozsahu hodnot jednotkových řezných sil určených během provedených experimentů. Souhrn je prezentován v tab. 9 a na obr. 47.

broušený materiál	rozsah jednotkové řezné síly F_c' [N]			
	reálné broušení		simulované broušení	
	min. hodn.	max. hodn.	min. hodn.	max. hodn.
dural	1,0	2,8	1,75	5,72
12 050	0,3	3,2	0,43	1,59
14 109.4	0,8	2,5	1,46	3,33

Tab. 9 Rozsah minimálních a maximálních hodnot jednotkových řezných sil určených během experimentů řady 3 až 5



Obr. 47 Rozsah jednotkových řezných sil při reálném a simulovaném broušení

Ze souhrnného přehledu je zřejmé, že nejlepší shody mezi reálným a simulovaným

broušením bylo dosaženo při broušení oceli 14 109.4 a oceli 12 050. Při broušení duralu se výrazně projevuje výše zmíněný nepříznivý výsledek experimentu č. 33.

Z empirických rovnic, získaných při broušení jednotlivých druhů materiálů, je zejména patrný vliv konstanty a_1 , která reprezentuje materiálové vlastnosti broušené součásti a dále je zřejmý vliv exponentu a_2 , jež postihuje vliv pracovního radiálního záběru. Vliv exponentu a_3 , který postihuje velikost tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky, není zpravidla příliš významný. Dále lze pro porovnávání všech experimentů v uvedených řadách využít hodnoty výběrových koeficientů korelace a grafy $R - S$. Grafy přehledně dokumentují určené hodnoty, ovšem z toho důvodu, že směrnice příslušných regresních přímek a jednotlivé úseky, které regresní přímky vymezují na osách y v jednotlivých grafech, jsou výsledkem poměrně komplikovaných závislostí, nelze z grafů učinit jednoduché závěry.

V další fázi řešení by bylo vhodné provést detailní rozbor jednotlivých součinitelů, které do výpočtů vstupují a pokusit se vyhledat ten, který významně ovlivňuje jak velikost korelačního koeficientu, tak i charakter grafu $R - S$. Tím by byla vytvořena jakási zpětná vazba, která by poskytla možnost vhodným způsobem korigovat směrnici regresní přímky i její polohu v souřadném systému $F_c'_{\text{reálná}} - F_c'_{\text{simulov.}}$ a přiblížit se tak křivce $R = S$. Jedná se např. o součinitele měrné řezné síly určené pro jednotkovou tloušťku třísky $k_{c1.1}$ a exponentu u , jež vyjadřují materiálové vlastnosti obráběné součásti, nebo o faktor procesu broušení f_{BROU} , který zohledňuje vliv úhlu čela u jednotlivých zrn brusiva a další specifické vlastnosti brousícího nástroje v obecně platných vztazích pro výpočet řezné síly podle Kienzleho a Pregera (Degner aj., 2002), (Jersák, 1988).

6.2.2. Drsnost povrchu oceli 14 109. 4

po broušení kotoučem 99BA80L8V a 99BA46K8V

Poslední dvě řady experimentů, označené jako řady 6 a 7, byly provedeny s cílem vyšetřit do jaké míry si vzájemně odpovídají hodnoty průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a a největší výšky profilu R_z při různých podmínkách reálného a simulovaného broušení. Aby bylo možno zmapovat širokou oblast možných případů broušení a současně získat věrohodné výsledné údaje z minimálního počtu měření a výpočtů, byla při plánování zkoušek opět použita metoda vícefaktového experimentu. Pro zkoušky byly vybrány obrobky z oceli 14 109.4 a dva druhy

brousicích kotoučů (99BA80L8V a 99BA46K8V). Parametry drsnosti povrchu byly stanoveny po prvním nebo po sedmém zdvihu stolu brusky.

Měření a výpočty byly provedeny dle metodiky popsané ve výše uvedené kapitole. Parametry drsnosti povrchu R_a a R_z byly po reálném broušení za konkrétních podmínek měřeny třikrát a výpočty byly za odpovídajících podmínek zopakovány pětkrát. Výchozím předpokladem bylo, že se za jinak stálých řezných podmínek budou hodnoty drsnosti povrchu měnit v závislosti na tangenciální rychlosti posuvu stolu a v závislosti na počtu vyjiskřovacích zdvihů. Velikost pracovního radiálního záběru by na parametry drsnosti povrchu neměla mít podstatný vliv.

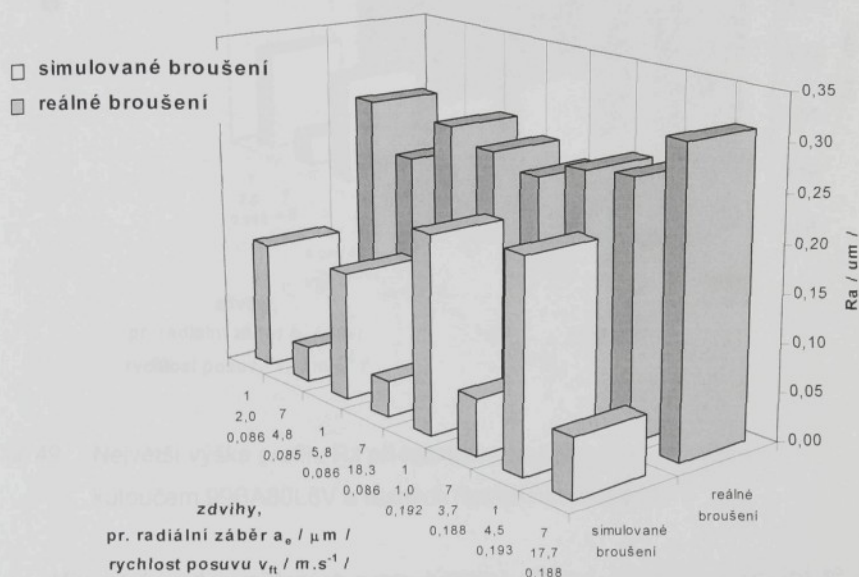
Protože zkoušky řady 6 a 7 byly realizovány metodou plánování experimentů, pak tedy pro všech osm zkoušek realizovaných v rámci každé řady experimentů platí, že probíhaly při různé kombinaci velikosti tangenciální rychlosti posuvu stolu, pracovního radiálního záběru a při různém počtu vyjiskřovacích zdvihů.

Pro experimenty řady 6 byl na brusce BPH 20 použit brousicí kotouč typ 1 - 250 x 20 x 76 - 99BA80L8V - 35 m.s^{-1} a byly jím broušeny obrobky rozměrů 60 x 50 x 15 mm z oceli 14 109.4.

brousicí kot. : 99BA 80 L 8 V					materiál obrobku : ocel 14 109.4				
250 x 20 x 76 mm					60 x 50 x 15 mm				
řezná rychl. : 33,5 m / s									
číslo exp.	tangenc. rychl. posuvu		pracovní radiální záběr		vyj. zdv.	drsnost povrchu reálné broušení		simulované broušení	
	požad.	skut.	nastav.	skutečný					
	$V_{fpož}$ [m.s ⁻¹]	V_{ft} [m.s ⁻¹]	a_{enast} [μm]	a_e [μm]	i [1]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
60	0,080	0,086	5,0	2,0 ± 0,0	1	0,27 ± 0,07	2,25 ± 0,71	0,13 ± 0,01	0,92 ± 0,15
61	0,080	0,085	5,0	4,8 ± 1,9	7	0,22 ± 0,02	2,04 ± 0,27	0,04 ± 0,00	0,26 ± 0,06
62	0,080	0,086	25,0	5,8 ± 5,9	1	0,27 ± 0,04	2,31 ± 1,15	0,13 ± 0,01	0,95 ± 0,14
63	0,080	0,086	25,0	18,3 ± 0,7	7	0,25 ± 0,10	2,10 ± 0,57	0,04 ± 0,00	0,29 ± 0,06
64	0,190	0,192	5,0	1,0 ± 0,4	1	0,24 ± 0,02	1,90 ± 0,76	0,20 ± 0,02	0,99 ± 0,00
65	0,190	0,188	5,0	3,7 ± 1,4	7	0,26 ± 0,10	2,22 ± 1,00	0,06 ± 0,00	0,43 ± 0,05
66	0,190	0,193	25,0	4,5 ± 1,2	1	0,27 ± 0,05	2,04 ± 0,69	0,21 ± 0,01	1,49 ± 0,19
67	0,190	0,188	25,0	17,7 ± 3,1	7	0,31 ± 0,06	2,52 ± 0,37	0,06 ± 0,00	0,49 ± 0,09

Tab. 10 Parametry drsnosti povrchu při různých podmínkách broušení oceli 14 109.4 brousicím kotoučem 99BA80L8V

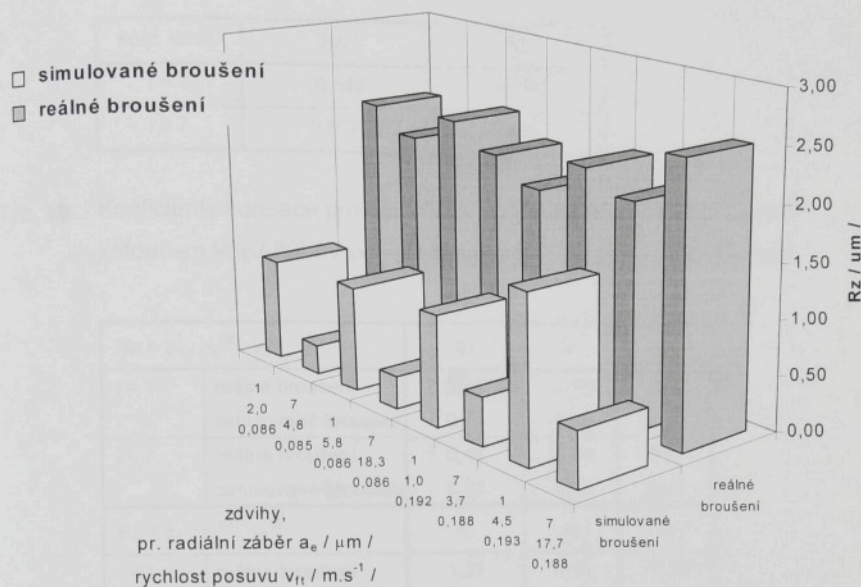
Z výsledků provedených měření a výpočtů jež shrnuje tabulka 10 a obrázek 48 a 49 zřetelně vyplývá, že hodnoty drsnosti povrchu po reálném broušení byly jednoznačně horší než hodnoty drsnosti povrchu, které byly určeny výpočtem. Na první pohled je také patrný rozdíl v tom, že se hodnota parametrů drsnosti povrchu R_a i R_z pro všechny vyhodnocované případy reálného broušení pohybuje v poměrně malém intervalu hodnot, zatímco u výsledných hodnot určených při simulovaném broušení je jasně patrný vliv počtu vyjiskřovacích zdvihů i dalších parametrů.



Obr. 48 Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu R_a při reálném a simulovaném broušení kotoučem 99BA80L8V a různých řezných podmínkách

Dále z výsledků vyplývá, že při reálném broušení nebyla zjištěna významná změna drsnosti povrchu při změně tangenciální rychlosti posuvu stolu. Předpoklad o zlepšení drsnosti povrchu při zvyšování počtu vyjiskřovacích zdvihů se potvrdil pouze v případech nižší rychlosti posuvu stolu brusky. Naopak při simulovaném broušení bylo zlepšení drsnosti povrchu při vyšším počtu vyjiskřovacích zdvihů prokázáno zcela jednoznačně a stejného, i když méně výrazného zlepšení, bylo dosaženo i snížením rychlosti posuvu. Možných příčin toho, že se předpoklady nepotvrdily současně při

reálném i při simulovaném broušení bude pravděpodobně více a některé z nich budou uvedeny v další části této kapitoly.



Obr. 49 Největší výška profilu R_z při reálném a simulovaném broušení kotoučem 99BA80L8V a různých řezných podmínkách

Míru závislosti naměřených a vypočítaných hodnot uvedených v tabulce 10 vyjadřuje souhrnná hodnota výběrového koeficientu korelace. Pro průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu R_a vychází velikost tohoto koeficientu 0,001 a pro největší výšku profilu R_z vychází dokonce záporná hodnota - 0,227. To znamená, že mezi naměřenými a simulovanými hodnotami neexistuje žádná závislost. Pro zajímavost byly z tabulky 10 stanoveny koeficienty korelace odděleně pro experimenty s jedním a sedmi vyjiskřovacími zdvihy a shrnuty do tabulky 11. Z této tabulky je patrné, že nepříznivou velikost souhrnného výběrového koeficientu korelace pro R_a i R_z zapříčiňují experimenty s jedním vyjiskřovacím zdvihem. U experimentů s sedmi vyjiskřovacími zdvihy byla mezi naměřenými a simulovanými hodnotami prokázána dokonce silná závislost. V následující tabulce 12 jsou uvedeny vypočítané hodnoty konstant a exponentů empirických rovnic, jež charakterizují závislost parametrů drsnosti

povrchu na velikosti pracovního radiálního záběru, na tangenciální rychlosti posuvu stolu a na počtu vyjiskřovacích zdvihů.

koef. korel.	Ra	Rz
i = 1	- 0,542	- 0,395
i = 7	0,807	0,922

Tab. 11 Koeficienty korelace pro parametry drsnosti povrchu při broušení kotoučem 99BA80L8V po jednom a sedmi vyjiskřovacích zdvizech

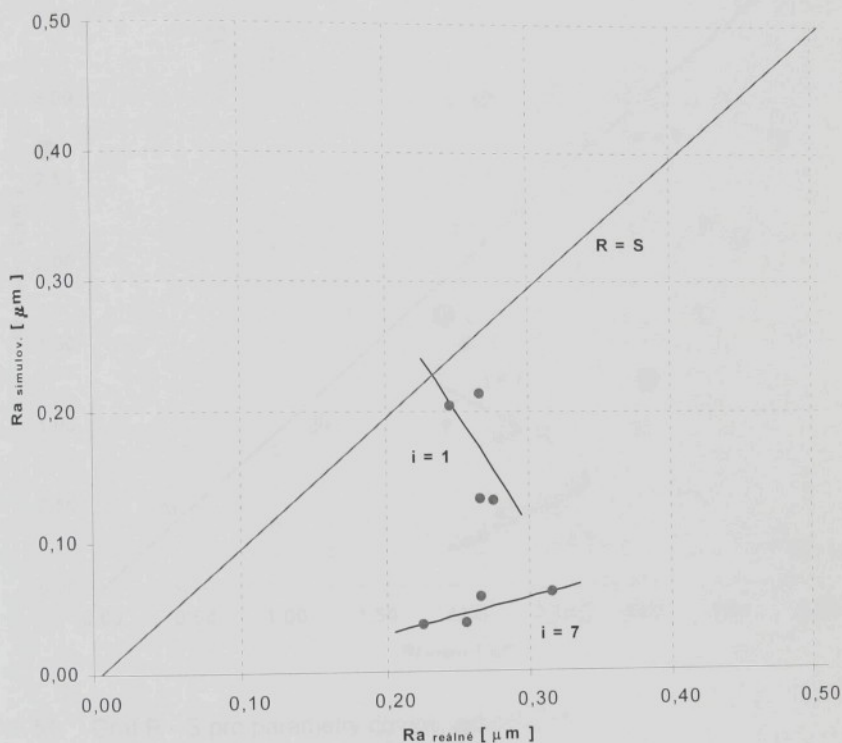
$Ra = b_1 \cdot a_e^{b_2} \cdot v_R^{b_3}$		b_1	b_2	b_3
i = 1	reálné broušení	0,26	-0,15	-0,06
	simulované broušení	0,71	-0,30	0,58
i = 7	reálné broušení	0,44	-0,04	0,21
	simulované broušení	0,27	-0,29	0,55
$Rz = c_1 \cdot a_e^{c_2} \cdot v_R^{c_3}$		c_1	c_2	c_3
i = 1	reálné broušení	1,27	0,14	-0,19
	simulované broušení	1,95	0,07	0,33
i = 7	reálné broušení	2,53	0,11	0,18
	simulované broušení	1,49	-0,06	0,63

Tab. 12 Parametry empirických rovnic pro výpočet parametrů drsnosti povrchu při broušení kotoučem 99BA80L8V

O vztahu mezi změřenými a vypočítanými hodnotami parametrů drsnosti povrchu vypovídají také grafy R - S uvedené na obr. 50 a 51. Z těchto grafů a z tab. 10 je patrné, že se při experimentech s jedním vyjiskřovacím zdvihem poloha bodů znázorňujících změřené a vypočítané údaje v absolutních hodnotách sice blíží poloze bodů ideální závislosti $R = S$, a to zejména při experimentech č. 64 a 66, ovšem tendence závislosti simulovaných veličin na veličinách naměřených charakterizovaná regresní křivkou má směrnici orientovanou zcela opačným směrem, než je žádoucí (při $i = 1$ vykazuje regresní přímka záporné směrnice jak pro Ra -1,7, tak pro Rz - 0,6). Při experimentech se sedmi vyjiskřovacími zdvihy je poloha bodů znázorňujících naměřené a vypočítané údaje více vzdálena od ideální polohy bodů závislosti $R =$

S, naopak regresní křivka má směrnici orientovanou žádoucím směrem (při $i = 7$ vykazuje regresní přímka směrnici pro Ra 0,3 a pro Rz 0,5).

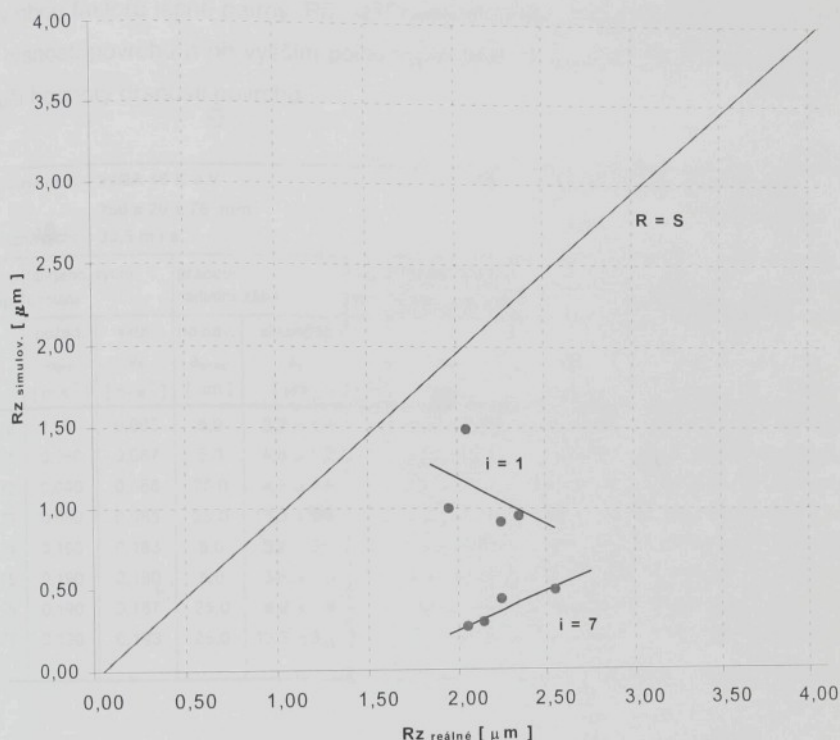
Graf R - S, param. Ra, experiment č. 6



Obr. 50 Graf R - S pro parametry drsnosti povrchu Ra při broušení kotoučem 99BA80L8V

Z uvedených grafů R - S i z dalších charakteristik experimentů řady 6 vyplývá, že se při experimentech s jedním vyjiskřovacím zdvihem mezi změřenými a vypočítanými hodnotami parametrů drsnosti povrchu nepodařilo prokázat uspokojivou shodu. Lépe vycházejí experimenty se sedmi vyjiskřovacími zdvihy, kde byly sice zjištěny poměrně značné rozdíly mezi absolutními hodnotami při měření a simulaci broušení, ovšem současně byla mezi určenými údaji prokázána dokonce silná závislost.

Graf R - S, param. Rz, experiment č. 6



Obr. 51 Graf R - S pro parametry drsnosti povrchu Rz při broušení kotoučem 99BA80L8V

Poslední řada experimentů byla označena jako experimenty řady 7. Pro broušení součástí rozměrů 60 x 50 x 15 mm z oceli 14 109.4 použit brousící kotouč typ 1 - 250 x 20 x 76 - 99BA46K8V - 35 m.s⁻¹. Oproti předchozí řadě experimentů, kdy byl použit kotouč jemné zrnitosti a střední tvrdosti, byl v tomto případě použit měkčí kotouč s většími zrny brusiva. Ostatní řezné podmínky na brusce BPH 20 zůstaly nezměněny. Výsledky provedených měření a výpočtů shrnuje souhrnná tabulka 13 a obrázky 52 a 53.

Z výsledných údajů vyplývá, že při reálném broušení oceli 14 109.4 brousícím kotoučem 99BA46K8V se hodnota parametrů Ra i Rz vzájemně odlišuje pouze minimálně. Vliv tangenciální rychlosti posuvu stolu na drsnost povrchu nebyl při reálném

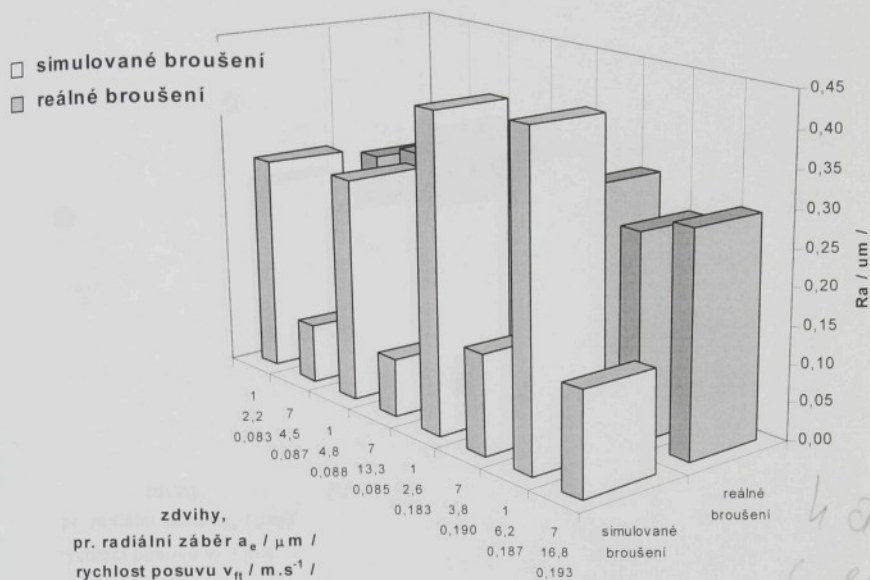
ném broušení zjištěn a také se neprokázalo, že by se při zvýšení počtu vyjiskřovacích zdvihů zlepšila drsnost povrchu. U výsledných hodnot simulovaného broušení je vliv obou faktorů jasně patrný. Při nižší rychlosti posuvu byly vypočítány nižší hodnoty drsnosti povrchu a při vyšším počtu vyjiskřovacích zdvihů byly stanoveny výrazně lepší hodnoty drsnosti povrchu.

brousící kot. : 99BA 46 K 8 V						materiál obrobku : ocel 14 109.4			
250 x 20 x 76 mm						60 x 50 x 15 mm			
řezná rychl. : 33,5 m / s									
číslo exp.	tangenc. rychl. posuvu		pracovní radiální záběr		vyj. zdv.	drsnost povrchu			
						reálné broušení		simulované broušení	
	požad. V_{p02} [m.s ⁻¹]	skut. V_{ft} [m.s ⁻¹]	nastav. a_{enast} [μm]	skutečný a_e [μm]	i [1]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
70	0,080	0,083	5,0	2,2 ± 1,4	1	0,27 ± 0,05	1,74 ± 2,56	0,28 ± 0,02	1,99 ± 0,25
71	0,080	0,087	5,0	4,5 ± 1,2	7	0,29 ± 0,07	2,26 ± 0,69	0,08 ± 0,00	0,55 ± 0,10
72	0,080	0,088	25,0	4,8 ± 1,4	1	0,32 ± 0,11	2,61 ± 0,49	0,29 ± 0,03	1,97 ± 0,19
73	0,080	0,085	25,0	13,3 ± 3,8	7	0,32 ± 0,04	2,68 ± 0,72	0,08 ± 0,00	0,57 ± 0,05
74	0,190	0,183	5,0	2,6 ± 2,0	1	0,22 ± 0,05	1,90 ± 0,62	0,42 ± 0,09	2,29 ± 0,53
75	0,190	0,190	5,0	3,8 ± 1,4	7	0,31 ± 0,06	2,70 ± 0,58	0,13 ± 0,01	0,93 ± 0,10
76	0,190	0,187	25,0	6,2 ± 1,9	1	0,27 ± 0,04	2,30 ± 0,49	0,43 ± 0,10	3,01 ± 1,03
77	0,190	0,193	25,0	16,8 ± 5,0	7	0,30 ± 0,01	2,45 ± 0,67	0,13 ± 0,01	0,95 ± 0,06

Tab. 13 Parametry drsnosti povrchu při různých podmínkách broušení
oceli 14 109.4 broušícím kotoučem 99BA46K8V

Zajímavé je porovnání zjištěných údajů s výsledky experimentů řady 6. Při experimentech řady 7 bylo možno očekávat určité zhoršení drsnosti povrchu, protože byl použit kotouč s většími zrnny brusiva. Porovnáme-li údaje z tabulek 10, 13 a z příslušných grafů, pak je zřejmé, že při reálném broušení na brusce BPH 20 byly v obou případech průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz přibližně stejné. Naopak při simulaci procesu broušení byly průměrné hodnoty parametrů vzájemně odlišné, při broušení kotoučem s většími zrnny brusiva byla stanovena jednoznačně horší drsnost povrchu. Tomuto odpovídají také výsledky statistické významnosti rozdílů naměřených hodnot obou souborů naměřených údajů (ČSN ISO 8688-1). Rozdíly mezi výsledky dvou porovnávaných sérií údajů dosáhly stupeň významnosti „významný“, případně „dost významný“ pouze pro případy simulovaného broušení. Pro

reálné broušení byly hodnoty statistické významnosti vždy hluboko pod úrovní „významný“.

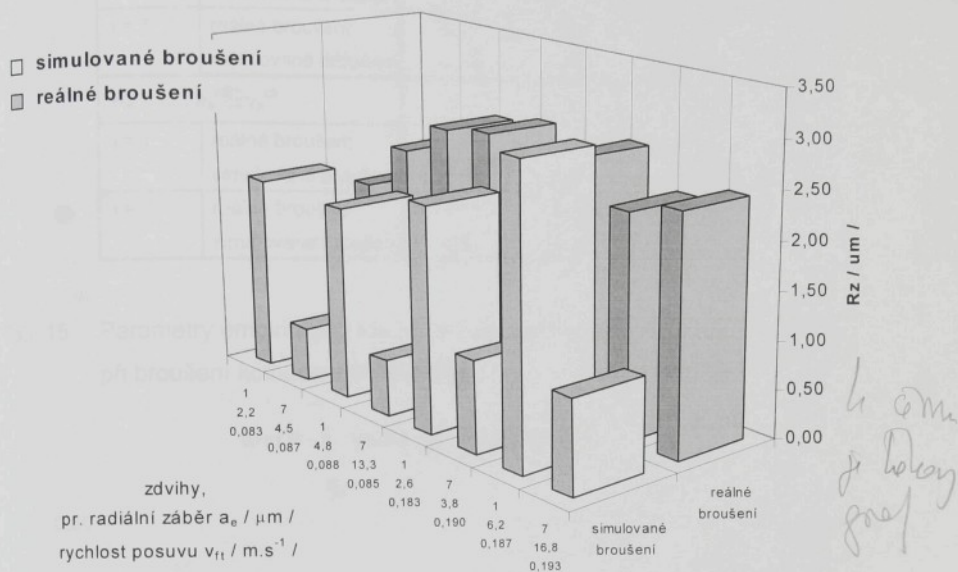


Obr. 52 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra při reálném a simulovaném broušení kotoučem 99BA46K8V a různých řezných podmínkách

Pro stanovení míry závislosti naměřených a vypočítaných hodnot byla u experimentů řady 7 opět použita souhrnná hodnota výběrového koeficientu korelace. Pro průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu Ra byla zjištěna záporná hodnota tohoto koeficientu - 0,674 a pro největší výšku profilu Rz vychází také záporná hodnota - 0,478. V souhrnu tedy vychází, že mezi naměřenými a simulovanými hodnotami neexistuje žádná závislost. Podobně jako u předešlé řady experimentů byly proto z hodnot uvedených v tabulce 13 stanoveny koeficienty korelace odděleně pro experimenty s jedním a sedmi vyjiskřovacími zdvihy a shrnuty do tabulky 14. Z této tabulky je patrné, že ani v detailnějším pohledu nelze mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami nalézt žádnou závislost.

Pro experimenty této poslední řady jsou vypočítané hodnoty konstant a exponentů empirických rovnic, jež charakterizují závislost parametrů drsnosti povrchu

na velikosti pracovního radiálního záběru, na tangenciální rychlosti posuvu stolu a na počtu vyjiskřovacích zdvihů, uvedeny v tabulce 15.



Obr. 53 Největší výška profilu Rz při reálném a simulovaném broušení kotoučem 99BA46K8V a různých řezných podmínkách

koef. korel.	Ra	Rz
$i = 1$	- 0,592	0,148
$i = 7$	- 0,024	0,286

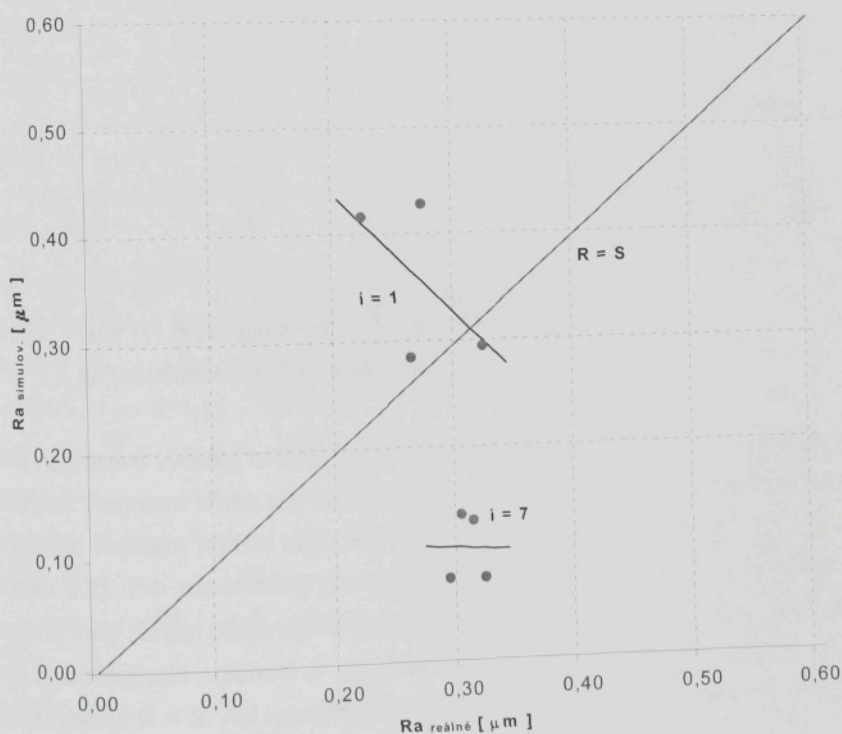
Tab. 14 Koeficienty korelace pro parametry drsnosti povrchu při broušení kotoučem 99BA46K8V po jednom a sedmi vyjiskřovacích zdvihích

Z grafů $R - S$, které jsou uvedeny na obr. 54 a 55, je zřejmé, že se při experimentech s jedním vyjiskřovacím zdvihem poloha bodů znázorňujících změřené a vypočítané údaje pro některé experimenty blíží poloze bodů ideální závislosti $R = S$ (zejména pro parametr Ra při měření č. 70 a 72), ovšem při dalších experimentech s větší tangenciální rychlostí posuvu stolu již taková shoda nebyla dosažena.

$Ra = b_1 \cdot a_e^{b_2} \cdot v_{ft}^{b_3}$		b_1	b_2	b_3
$i = 1$	reálné broušení	0,12	0,21	-0,27
	simulované broušení	0,63	0,17	0,39
$i = 7$	reálné broušení	0,27	0,05	-0,01
	simulované broušení	0,30	0,10	0,64
$Rz = c_1 \cdot a_e^{c_2} \cdot v_{ft}^{c_3}$		c_1	c_2	c_3
$i = 1$	reálné broušení	1,84	0,17	0,04
	simulované broušení	4,41	0,10	0,38
$i = 7$	reálné broušení	2,95	-0,02	0,06
	simulované broušení	2,41	0,03	0,62

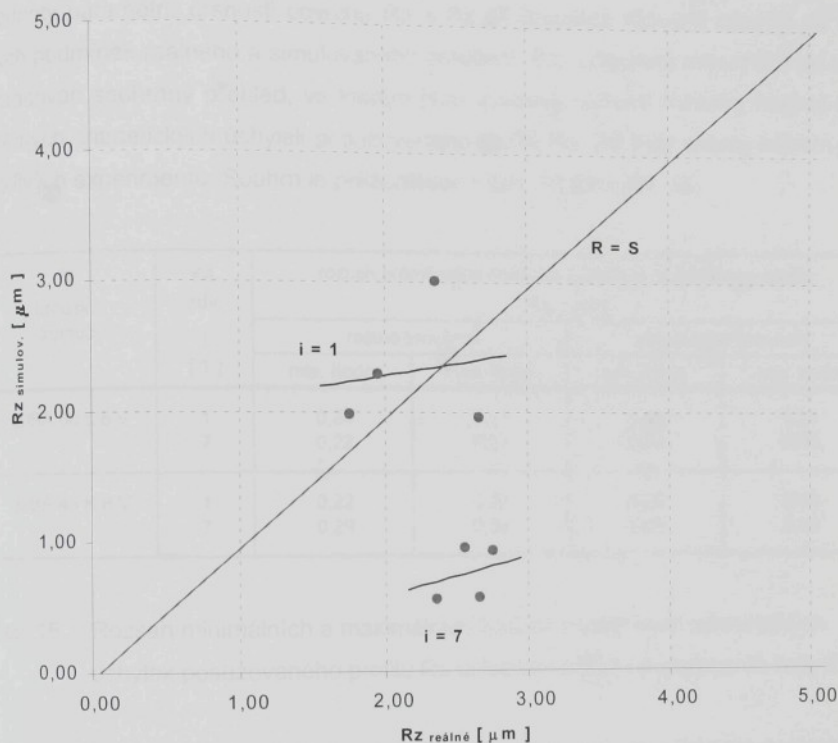
Tab. 15 Parametry empirických rovnic pro výpočet parametrů drsnosti povrchu při broušení kotoučem 99BA46K8V

Graf R - S, param. Ra, experiment č. 7



Obr. 54 Graf R - S pro param. drsnosti povrchu Ra při broušení kot. 99BA46K8V

Graf R - S, param Rz, experiment č. 7



Obr. 55 Graf R - S pro parametry drsnosti povrchu Rz při broušení kotoučem 99BA46K8V

Velmi nepříznivě vychází tendence závislosti simulovaných veličin na veličinách naměřených. Regresní křivka má směrnici orientovanou opačně než je žádoucí (při $i = 1$ vykazuje regresní přímka zápornou směrnici pro $R_a - 1,1$, směrnice pro R_z má hodnotu 0,2). Pro experimenty se sedmi vyjiskřovacími zdvihy je charakteristický poměrně malý rozptyl pozic vyšetřovaných bodů. Při těchto experimentech je poloha bodů znázorňujících změřené a vypočítané údaje více vzdálena od ideální polohy bodů závislosti $R = S$. Ani regresní křivka nemá vždy směrnici orientovanou žádoucím směrem (při $i = 7$ vykazuje regresní přímka směrnici pro $R_a - 0,05$ a pro $R_z 0,3$).

Z grafů R - S na obr. 54 a 55 i z dalších charakteristik vyplývá, že se u expe-

řimentů řady 7 mezi změřenými a vypočítanými hodnotami parametrů drsnosti povrchu shodu nepodařilo prokázat.

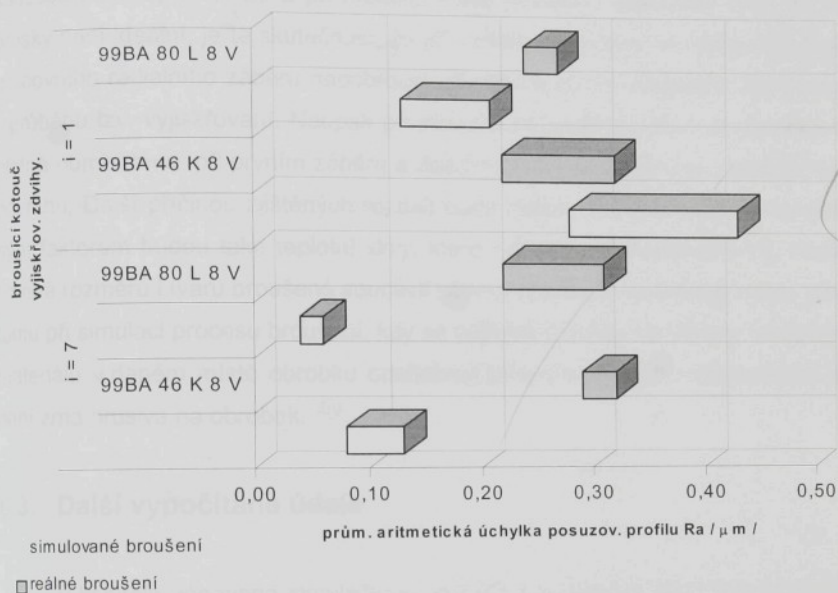
Cílem experimentů řady 6 a 7 bylo zjistit, do jaké míry si vzájemně odpovídají hodnoty parametrů drsnosti povrchu R_a a R_z při broušení různými nástroji za různých podmínek reálného a simulovaného broušení. Pro vzájemné porovnání byl opět zpracován souhrnný přehled, ve kterém jsou uvedeny celkové rozsahy hodnot průměrných aritmetických úchylek posuzovaného profilu R_a , jež byly určeny během jednotlivých experimentů. Souhrn je prezentován v tab. 16 a na obr. 56.

broušící kotouč	vyj. zdv. i [1]	rozsah průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu R_a [μm]			
		reálné broušení		simulované broušení	
		min. hodn.	max. hodn.	min. hodn.	max. hodn.
99BA 80 L 8 V	1	0,24	0,27	0,13	
	7	0,22	0,31	0,04	0,21
99BA 46 K 8 V	1	0,22	0,32	0,28	0,43
	7	0,29	0,32	0,08	0,13

Tab. 16 Rozsah minimálních a maximálních hodnot průměrných aritmetických úchylek posuzovaného profilu R_a určených během experimentů řady 6 a 7

Ze souhrnného přehledu výsledných hodnot R_a je zřejmé, že výsledné hodnoty po reálném broušení nástrojem s menšími zrny nebyly vždy jednoznačně lepší oproti nástroji s většími zrny. Při simulovaném broušení byla drsnost povrchu po broušení nástrojem s menšími zrny vždy lepší v porovnání s nástrojem s většími zrny, což odpovídá obecným předpokladům. Celkově nebylo mezi reálným a simulovaným broušením dosaženo příznivé shody. Pokud budeme odděleně posuzovat experimenty s jedním a sedmi vyjiskřovacími zdvihy, pak se sice na první pohled jeví, že rozsahy výsledných hodnot reálného a simulovaného broušení si vzájemně více odpovídají při experimentech s jedním vyjiskřovacím zdvihem. Z výše uvedených grafů na obr. 50 a 54 ovšem vyplývá, že ač se změřené a vypočítané údaje v absolutních hodnotách blíží, tendence závislosti simulovaných veličin na veličinách naměřených charakterizovaná regresní křivkou má bohužel směrnici orientovanou zcela opačným směrem, než je žádoucí. S ohledem na zmíněné grafy lze proto, i když jsou rozdíly

mezi změřenými a vypočítanými údaji v absolutních hodnotách větší, o něco příznivěji hodnotit výsledné hodnoty drsnosti povrchu po broušení se sedmi vyjiskřovacími zdvihy.



Obr. 56 Rozsah průměrných aritmetických úchylek posuzovaného profilu při reálném a simulovaném broušení

Porovnáme-li parametry empirických rovnic, které charakterizují závislost naměřených a vypočítaných hodnot R_a , R_z na podmínkách broušení, pak je zřejmé, že vliv řezných podmínek na dosahovanou drsnost je v případě reálného broušení minimální, některé exponenty řezných podmínek jsou dokonce záporné, což je v rozporu s obecně publikovanými informacemi. V případě simulovaného broušení byl zjištěn vliv tangenciální rychlosti posuvu stolu brusky na parametry drsnosti povrchu. Pro parametr R_z byl při reálném i simulovaném broušení pro oba posuzované brousící kotouče prokázán vliv materiálových vlastností broušené součásti. Při porovnávání naměřených a vypočítaných hodnot lze opět použít např. hodnot výběrových koeficientů korelace a grafů $R - S$. Pozitivně je možno hodnotit jediné to, že absolutní hodnoty vypočítaných údajů se řádově nerozcházejí s naměřenými údaji. Negativním ry-

sem je, že u převážné většiny sledovaných závislostí, a to u obou řad experimentů, nebylo dosaženo uspokojivé shody. Vzniklé rozdíly mezi výslednými hodnotami parametrů reálného a simulovaného broušení pravděpodobně souvisí především s rozdílnými tuhoplastickými podmínkami soustavy S-N-O-P při reálném broušení součástí na stroji BPH 20 a při modelovaném broušení. Důkazem toho, že tuhost brusky není ideální, je ta skutečnost, že při reálném broušení se nastavená hodnota pracovního radiálního záběru neodbrousí při prvním zdvihu najednou, ale postupně, v průběhu tzv. vyjiskřování. Naopak při simulaci procesu broušení se obrobek kompletně obrobí hned při prvním záběru a dalšími zdvihy se následně „zlepšuje“ kvalita povrchu. Další příčinou zjištěných rozdílů bude zřejmě vliv chvění stroje a významným faktorem budou také teplotní vlivy, které v oblasti makro rozměrů mj. vedou ke změně rozměrů i tvaru broušené součásti během chladnutí povrchové vrstvy. Jinak je tomu při simulaci procesu broušení, kdy se veškeré procesy související s odebráním materiálu v daném místě obrobku odehrávají pouze v okamžiku vzájemného působení zrna brusiva na obrobek.

6.3. Další vypočítané údaje

V kapitole věnované simulačnímu modelu procesu broušení bylo již uvedeno, že kromě řezné síly a parametrů charakterizujících drsnost povrchu lze výpočtem určit také údaje o počtu aktivních zrn, údaje o průřezu nedeformované třísky a údaje o výpočtu teploty při broušení. Ilustrativní protokol obsahující zadané hodnoty a všechny vypočítané údaje, které lze získat v rámci jednoho výpočtu, je uveden v příloze 3.

V protokolu jsou výsledné hodnoty uvedeny v části B. Příklad kompletního tisícového souboru v příloze 3 obsahuje nejprve vypočítaný údaj o tom, jak dlouho by ve skutečnosti trvalo broušení obrobku stejných rozměrů, jako má simulovaná zkušební součást. Pro uvedený případ broušení součásti šířky 1,2 mm, délky 4,0 mm dvěma zdvihy při použití brousicího kotouče $\varnothing 250$ mm, kdy řezná rychlost činila $39,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tangenciální rychlost posuvu stolu brusky $10,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a pracovní radiální záběr 0,05 mm byl určen čas 0,089 s.

V další části jsou pro daný případ broušení uvedeny údaje o aktivních zrnech brusiva. Při výpočtu bylo celkem namodelováno více než 41 000 zrn brusiva. Z nich bylo necelých 4 000 zrn aktivních, tj. v uvedeném případě asi 9,4 %.

Následně jsou v protokolu uvedeny výsledné údaje o drsnosti povrchu. Číselné údaje o parametrech R_a a R_z byly v rámci konkrétních experimentů základem pro zhotovení tabulek 2, 10 aj. V daném případě byla ve zvolené příčné rovině vypočítána hodnota průměrné aritmetické úchylny posuzovaného profilu $R_a = 0,38 \mu\text{m}$ a největší výška profilu $R_z = 2,3 \mu\text{m}$. Jak je zřejmé z přílohy 3, lze ve zvolené rovině také vytisknout zjednodušený graf profilu povrchu.

Poté jsou v protokolu shrnuty statistické údaje charakterizující příčný průřez třísky. Pro výše uvedený případ broušení byla vypočítána minimální hodnota průřezu $3,8 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^2$, maximální hodnota průřezu $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$ a průměrná hodnota průřezů třísek $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2$. Tato hodnota velmi dobře odpovídá údajům o průřezích nedeformovaných třísek v literatuře, kde je uveden interval od $1 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2$ do $1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ (Příkryl aj., 1975). Náznornou představu o charakteru rozložení vypočítaných příčných průřezů třísky lze získat z vytištěného histogramu, ve kterém jsou třísky podle velikosti průřezu rozděleny do 11 tříd.

Vypočítané řezné síly při jednotlivých zdvích stolu, prezentované v další části protokolu, byly použity pro zhotovení příslušných tabulek 1, 3 atd. V daném případě broušení, kdy byl výpočet proveden v určité poloze nástroje vůči obrobku, bylo při prvním zdvihu zaregistrováno 10 aktivních zrn brusiva a byla vypočítána velikost řezné síly 12,4 N. Při druhém zdvihu nebylo v dané poloze zaregistrováno žádné další aktivní zrno a velikost řezné síly činila 0,0 N.

Další poměrně velká skupina výsledných údajů v protokolu vyjadřuje grafické závislosti teplotního zatížení obrobku při broušení. První grafická závislost charakterizuje, jak se během prvního zdvihu stolu brusky ve vybrané rovině v průběhu času mění teplota určitého bodu, který se nachází ve zvolené hloubce pod povrchem součásti. Ve vyšetřované hloubce 0,15 mm pod povrchem byl určen maximální přírůstek teploty 234°C v čase 0,0001 s po průchodu brousicího kotouče a již 0,05 s po průchodu brousicího kotouče činil přírůstek teploty pouhých 87°C . Z vypočítaných údajů vyplývá, že v daném místě dochází k velmi rychlému poklesu teploty. Druhá grafická závislost znázorňuje maximální přírůstky teploty v celém rozsahu vyšetřovaných hloubek pod povrchem součásti také v průběhu prvního zdvihu stolu brusky. Za da-

*je to tak
de ne
orón*

ných podmínek broušení byl vypočítán maximální přírůstek teploty 316°C těsně pod povrchem broušené součásti, v hloubce 0,0001 μm . V hloubce 0,6 mm byl určen přírůstek teploty pouze o 95°C. Následující grafy vyjadřují analogické závislosti určené při druhém zdvihu stolu brusky.

Předposlední skupina údajů v příloze 3 shrnuje vybrané charakteristiky simulovaného procesu broušení, tj. údaje o brousicím kotouči, obrobníku a řezných podmínkách. Protokol je ukončen informací o provedené kontrole zadaných hodnot, kdy je testováno, zda se hodnoty všech zadaných veličin pohybují v předepsaném rozsahu.

Shrnutí výsledků

a další směry rozvoje matematického modelování

7. Závěr

Metody modelování se kromě ekonomiky, energetiky, meteorologie, stavitelství, zdravotnictví, vojenského sektoru ap. často uplatňují také při řešení technických problémů. Ač jsou tyto metody používány již několik století, lze jejich největší rozvoj zaznamenat až v období rozvoje matematických modelů, kdy se pro řešení komplikovaných výpočtových algoritmů začala používat výpočetní technika.

Výpočtový, simulační model procesu rovinného broušení představuje originální řešení autora vytvořené na katedře obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci. Základním impulsem pro realizaci modelu procesu broušení se stal odborný článek, který publikovali H. Yoshikawa a T. Sata (Yoshikawa aj., 1968). V tomto článku bylo naznačeno použití metody Monte-Carlo při určování polohy zrn na povrchu brouscího kotouče. Podle skutečného tvaru břitů nástroje byl na pracovišti autora nově navržen dokonalejší model zrn brusiva s náhodně velikým poloměrem zaoblení a s náhodně velikým vrcholovým úhlem. V řadě prací byla problematika modelování dále rozvíjena (Růžička, 1974), (Jersák, 1981), (Gazda aj., 1985). Komplexní model procesu broušení v jazyku FORTRAN, typ G, jež byl podobný modelu prezentovanému v této práci a který bylo možno zpracovat na sálovém číslicovém počítači EC 1033, byl autorem vytvořen již dříve (Jersák, 1988). Podstatu simulace procesu broušení představuje matematický popis kinematických poměrů, ke kterým dochází při vzájemné interakci mezi jednotlivými zrny brusiva modelovanými na povrchu brouscího kotouče vůči modelovanému obrobku.

7.1. Shrnutí výsledků

a další směry rozvoje matematického modelu

V rámci výzkumného záměru MŠMT „Laboratoř pro matematické modelování technologických procesů“, jehož řešitelem je Doc. RNDr. Miroslav Brzezina z katedry aplikované matematiky FP TU v Liberci, a grantového projektu „Základní výzkum progresivních a vysoce přesných technologií“, jehož nositelem je Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., vedoucí Ústavu strojírenské technologie ČVUT Praha, na jejichž řešení se autor podílel, byl na základě původního postupu vytvořen nový program pro použití na

osobním počítači. Výpočtový algoritmus matematického modelu procesu rovinného broušení obvodem kotouče byl zpracován tak, aby bylo možno stanovit počet aktivních zrn brusiva, průřez nedeformované třísky, velikost řezné síly při broušení, parametry drsnosti povrchu obrobku a teploty v povrchové vrstvě obráběné součásti. Použitý programovací jazyk Borland Pascal - verze 7.0, umožnil zásadně změnit strukturu programu. Pro zlepšení uživatelského komfortu byla programová jednotka sloužící k zadávání údajů nově zpracována tak, aby bylo možné načítat vstupní údaje a provádět volbu typu výpočtu v dialogovém režimu z klávesnice počítače. Kromě toho zůstala zachována také varianta načítání údajů a volby typu výpočtu z předem připravených datových souborů. Výpočtovým algoritmem bylo zajištěno, že se po ukončení výpočtu výsledné hodnoty exportují na monitor počítače a současně ukládají do výstupního tiskového souboru.

Podstatná část práce byla věnována ověření míry shody mezi výsledky reálného a simulovaného broušení. Experimenty byly provedeny na rovinné brusce BPH 20 a výpočty byly realizovány na osobním počítači. Protože silové poměry výstižně charakterizují proces obrábění a drsnost povrchu je jedním ze základních ukazatelů integrity povrchu součásti po finálním obrobení, byly jako kritérium pro vzájemné porovnání výsledků zvoleny parametry drsnosti povrchu obrobku R_a a R_z a dále řezná síla F_c .

Při experimentech zaměřených na zkoumání vlivu řezných podmínek na velikost řezné síly F_c byly kotoučem A9932L8V broušeny zkušební součástky z oceli 11 375, kotoučem 99BA46K8V byly broušeny vzorky z oceli 12 050 a 14 109.4 a pro broušení součástek z duralu byl použit kotouč 48C46J8V. Ve všech případech bylo mezi výsledky reálného a simulovaného broušení dosaženo velmi dobré shody. Vypočítané hodnoty byly uspokojivé nejen z hlediska absolutních velikostí řezných sil, ale také z hlediska tendencí závislostí simulovaných veličin na veličinách naměřených, což je zřejmé i z charakteru regresních křivek v příslušných grafech $R - S$. Mezi soubory výsledných údajů byla ve všech případech zjištěna velmi silná závislost. Simulační model procesu rovinného broušení tedy umožňuje s poměrně dobrou přesností predikovat velikost řezné síly při broušení řady materiálů za různých řezných podmínek. Tento závěr však bohužel neplatí v celém rozsahu podmínek broušení. Při detailním rozboru naměřených a vypočítaných hodnot bylo zjištěno, že při minimální velikosti pracovního radiálního záběru se výsledné hodnoty odlišují. Pravděpodobným zdrojem vzniklých nepřesností jsou podmínky řezání při extrémně malých

hloubkách záběru. Pokud většina zrn brusiva působí v nepatrné hloubce, dochází ve zvýšené míře pouze ke klouzání zrn po povrchu materiálu. Tyto podmínky, kdy poloměry zaoblení bříty zrn brusiva mohou být větší než hloubky záběru a navíc na obráběnou součást působí také teplotní vlivy, zásadním způsobem ovlivňují velikost řezné síly. Další možnou příčinou vzniklých rozdílů může být také použitý způsob výpočtu řezné síly. Jeho největší předností je to, že platí obecně pro různé podmínky broušení. Pro tento výpočet je třeba určit tzv. měrnou řeznou sílu a průřez nedeformované třísky. Měrná řezná síla se ovšem určuje z empirického vztahu a není známo, zda je pro minimální hloubky záběru jeho přesnost vyhovující. Při extrémně malých hloubkách záběru se reálný proces oddělování třísky odehrává za odlišných podmínek a rozdílné výsledky reálného a simulovaného broušení tedy nepřímo na tuto skutečnost upozorňují. V další fázi řešení simulačního modelu by tedy bylo vhodné zaměřit se na zkoumání podmínek řezání při extrémně malých hloubkách záběru a získané poznatky využít pro zpřesnění metody určování měrné řezné síly. S ohledem na pracnost a časovou náročnost při realizaci výpočtů by také bylo v další fázi řešení vhodné upravit algoritmus tak, aby výpočet řezné síly proběhl automaticky v několika vzájemných polohách brousícího kotouče vůči obrobku a vypočítané hodnoty byly přímo statisticky zpracovány, čímž by bylo podchyceno kolísání velikosti řezné síly v různých vzájemných polohách brousícího kotouče vůči obrobku.

V porovnání s experimenty zaměřenými na zkoumání vlivu řezných podmínek na velikost řezné síly byly výsledky těch experimentů, při kterých byl vyhodnocován vliv řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu, méně příznivé. Měření drsnosti bylo provedeno po obrábění zkušebních součástek z oceli 12 050.4 brousícím kotoučem A9932L8V a po obrábění zkušebních součástek z oceli 14 109.4 dvěma různými brousícími kotouči 99BA80L8V a 99BA46K8V. Mezi výsledky reálného a simulovaného broušení byla prokázána shoda pouze v některých případech broušení. Absolutní hodnoty parametrů drsnosti povrchu stanovené při reálném a při simulovaném broušení se značně rozcházel a jak je zřejmé z příslušných grafů $R - S$, mají v řadě případů regresní křivky směrnici orientovanou nežádoucím směrem. Funkční závislost mezi soubory výsledných údajů byla zjištěna pouze výjimečně. Simulační model procesu rovinného broušení tedy v této fázi řešení není vhodný pro predikci parametrů drsnosti povrchu při broušení za různých řezných podmínek. V kapitole věnované výsledkům experimentů bylo již uvedeno, že se u parametrů R_a i R_z při reálném broušení na brusce BPH 20 neprojevil téměř žádný vliv řezných podmínek, a

proto je třeba k těmto hodnotám přistupovat s jistou obezřetností. Přesto je zřejmé, že je za účelem dosažení lepší míry shody mezi naměřenými a vypočítanými údaji u parametrů charakterizujících drsnost povrchu třeba formulovat určitá opatření ke zpřesnění matematického modelu a přitom se zaměřit zejména na oblast vytváření povrchu obrobku. Drsnost povrchu je u současného modelu obráběné součásti výsledkem průniku vzájemně se pohybujících zrn brousícího kotouče vůči obrobku za předpokladu absolutně tuhé soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek. U reálného broušení jsou deformační procesy při vytváření třísky významně ovlivňovány působícím teplem a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. Proces tvorby třísky se uskutečňuje v několika fázích, vedle plastických deformací vznikají také deformace pružné a na okrajích vzniklých rýh se tvoří valy. Zejména za podmínek, kdy vznikají třísky malých průřezů, jsou poměry pro úběr materiálu značně nepříznivé a velká část materiálu je pouze „odhrnuta“ ke krajům rýh, jež zrna brusiva svým pohybem vytvářejí. Zpřesnění matematického modelu procesu broušení by tedy mělo směřovat k vytvoření dílčího matematického modelu obrobku. Prvním krokem by mělo být právě modelování valů na okrajích rýh. Tato problematika byla již na pracovišti autora řešena (Vondrovský, 1990). Ke zlepšení shody mezi parametry drsnosti povrchu při reálném a simulovaném broušení by také přispělo již výše uvedené zpřesnění podmínek řezání při extrémně malých hloubkách záběru a následná úprava příslušných částí výpočtového algoritmu. Dalším úskalím stávajícího matematického modelu je také proces vyjiskřování. Vlivem působení řezných sil dochází v reálné soustavě S-N-O-P ke vzniku deformací. Ty se kromě jiného projevují tím, že během konkrétního zdvihu stolu stroje je hodnota skutečné tloušťky odřezávané vrstvy menší, než pracovní radiální záběr a_{eNAST} nastavený na brusce. Důsledkem toho je, že se u reálného broušení při jednotlivých vyjiskřovacích zdvizech velikost skutečně odebrané vrstvy mění a postupně zmenšuje. Matematický model však nic podobného nezohledňuje. Vyjiskřování probíhá tak, že se pouze přebírují vrcholky nerovností vzniklé po předcházejících zdvizech. Jak prokázaly zejména provedené experimenty se sedmi vyjiskřovacími zdvihy, má tato skutečnost za následek velmi nízké hodnoty parametrů profilu drsnosti. Při simulovaném broušení by proto bylo vhodné odstranit tuto nerosrovnalost postupným rozdělením celkového pracovního radiálního záběru a_e na dílčí pracovní záběry příslušející jednotlivým zdvihům a_{ei} . Otázkou však je, jak toto rozdělení provést. V případě, že simulaci předchází reálné broušení na brusce, lze hodnoty dílčích pracovních radiálních záběrů změřit a do matematického modelu je násled-

ně zahrnout jako konstanty. Takový přístup však je nevhodný, protože je vázán na experimenty. Aby bylo možno realizovat simulaci bez předchozího reálného broušení, bude třeba formulovat matematickou rovnici pro výpočet a_{ei} a to v závislosti na řezných podmínkách. Řešení tohoto problému tedy znamená nalezení obecného vztahu, kterým by byla při jednotlivých zdvizích určena závislost skutečné velikosti pracovního radiálního záběru na řezných podmínkách.

Další navrhovaná opatření souvisí s rozšířením možností aplikace matematického modelu procesu broušení. Pro realizaci výpočtu je zapotřebí velké množství vstupních údajů, které jsou často poměrně obtížně dosažitelné. Jedná se např. o parametry charakterizující rozložení úhlů a poloměrů zaoblení vrcholů zrn brusiva. Z tohoto důvodu lze simulační model použít pouze tehdy, je-li jako nástroj použit kotouč s „prověřenými“ zrny brusiva. Podobně jsou v současné době možnosti výpočtu řezných sil omezeny na ty případy, kdy je známa velikost měrné řezné síly pro jednotkovou tloušťku třísky, hodnota exponentu a parametrů Kienzleho, příp. Pregerova vztahu. Restrikci pro výpočet teploty v povrchové vrstvě obrobku zase představují tepelně-fyzikální parametry brousicích kotoučů různých specifikací, které nejsou běžně dostupné. V další fázi řešení by proto bylo vhodné rozšířit škálu dostupných údajů pro další případy broušení. Kromě výše navrhovaných opatření lze s ohledem na ukončení vývoje programu Borland Pascal 7.0 současně doporučit použití novějšího programovacího jazyka, např. programu Delphi.

7.2. Přínosy simulace procesu broušení

Simulace procesu rovinného broušení představuje novou metodu zkoumání procesu broušení. Matematický model je ve své podstatě univerzálním nástrojem, který po patřičném „naostření“ umožní provádět simulovaně různé experimenty a tím docílit úspor času, energie, materiálu apod.

Vědecké přínosy

Při vytváření simulačního modelu reálného procesu je žádoucí, aby co nejlépe odpovídal předloze. Současně ovšem platí, že každý model je určitým kompromisem. Na jedné straně stojí kvalitní a přesný model a na straně druhé stojí znalosti, čas a celkové úsilí, které je třeba vynaložit, abychom tohoto stavu dosáhli. Při realizaci nového modelu složitého procesu je obtížné dosáhnout kvalitu i přesnost okamžitě.

K požadovanému cíli vede cesta postupného zdokonalování od obecných zákonitostí procesu k detailům, které zkoumanou soustavu ovlivňují. Matematický model umožňuje provádět kvalitativní (změny výpočtového algoritmu) a kvantitativní (změny zadávaných hodnot) zásahy. Zpětná vazba, kterou představuje realizace výpočtu, pak umožňuje ověřit, jak tyto zásahy ovlivní výsledek simulace a zda se zvyšuje věrohodnost, s jakou model reprezentuje reálný systém.

- V rámci řešení předložené práce byl vytvořen simulační model procesu rovinného broušení obvodem kotouče nové koncepce a jeho výpočtové algoritmy umožňující provedení všech navrhovaných variant výpočtů byly odladěny. Nebylo zjištěno, že by v České republice nebo v zahraničí existoval model procesu broušení na podobném principu. Vědecké přínosy prezentované metody simulace spočívají především v tom, že otevírají novou cestu pro poznání zákonitostí tvorby třísky, vytváření povrchů obrobku i dalších charakteristických účinků procesu broušení souvisejících se silovým působením, teplotními vlivy apod.

Z výsledků experimentů provedených v rámci řešení této práce je zřejmé, že při použití matematického modelu procesu rovinného broušení nebyla v některých případech dosažena uspokojivá shoda mezi výsledky reálného a simulovaného broušení. Z toho vyplývá, že současný stav řešení simulačního modelu lze označit za studii, která může konkrétní vědecké a prakticky použitelné přínosy přinést teprve po dalším upřesnění. Lze předpokládat, že po překonání dnes známých, ale i neočekávaných úskalí, nalezne metoda modelování procesu rovinného broušení v budoucnosti široké uplatnění, protože metody modelování umožňují získávat vědecké poznatky v řadě různých oblastí. Reálné procesy, jež probíhají v konkrétním případě obrábění, jsou však u modelů vyjádřeny „pouze“ matematickými vztahy. Pokud je ovšem tato transformace provedena, pak lze simulaci stanovit i takové údaje, které lze experimentálně určit pouze velice obtížně.

- Při experimentálním ověřování realizovaného simulačního modelu byla zjištěna velmi dobrá shoda mezi výsledky reálného a simulovaného broušení při výpočtech řezných sil, při porovnávání parametrů drsnosti povrchu byla zjištěna částečná shoda pouze v některých případech. Vytvořený simulační model je proto třeba dále rozvíjet zejména v oblasti deformačního chování materiálu obrobku, pružně - plastického chování soustavy S-N-O-P ve fázi vyjiskřování a také v oblasti empirických výpočtových vztahů pro extrémně malé hloubky záběru.

Při vytváření matematického modelu procesu broušení bylo autorem věnováno značné úsilí tomu, aby bylo možno výpočtový algoritmus aplikovat pro různé druhy výpočtů. Otevřená struktura hlavní části základního programu umožňuje v případě potřeby snadno připojit libovolný počet dalších speciálních výpočtových modulů.

- Předností matematického modelu procesu broušení je, že jej lze dále zpřesňovat a rozšiřovat.

Přínosy metod modelování a simulace procesu broušení jsou zejména v oblasti teoretického výzkumu obrábění a to především proto, že jsou významným nástrojem poznávání tohoto komplikovaného způsobu obrábění (Tönshof aj., 1992).

Přínosy pro praxi

Není zcela jednoznačné, zda ve strojírenské výrobě převažují případy obrábění, kdy se uplatňuje použití nástrojů s definovanou geometrií břitu na úkor nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu, či zda je tomu naopak. Nastávají oba případy. V oblastech s rostoucími požadavky na přesnost výroby a produktivní obrábění materiálů se ztíženou obrobiteľností zpravidla roste význam procesů obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu a speciálně broušení. Požadovaná produktivita se velmi často dosahuje automatizací výroby, přičemž je třeba automatizované operace (např. u strojů pro výrobu a ostření nástrojů) spolehlivě plánovat.

- Přednost simulační metody spočívá v tom, že oproti reálnému obrábění je při matematickém modelování procesu broušení za předem definovaných podmínek chování systému S-N-O-P zajištěna opakovatelnost výsledků.

Zkoumání vlivu různých faktorů na průběh a výsledek procesu broušení a parametry obráběné součásti předpokládá provedení řady experimentů. Metoda simulace procesu broušení umožňuje s využitím číslicového počítače realizovat vzájemné působení nástroje vůči obrobku virtuálně a vyhodnocovat, jak se mění výstupní, vypočítané parametry při změně geometrických, fyzikálních a technologických vstupních veličin. Simulační metoda je tedy nástrojem, který zefektivňuje získání požadovaných hodnot.

- Bez toho, aby bylo broušení provedeno reálně, lze modelovat vzájemné působení nástroje vůči obrobku a vyšetřovat vliv jednotlivých faktorů soustavy S-N-O-P na tento proces obrábění.

Metody obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií břitu se vyznačují tím, že jsou ovlivněny velkým množstvím technologických faktorů. Pro úspěšné provedení broušicích operací je stále zapotřebí velký podíl zkušeností, dovedností a zručnosti obsluhy broušicího stroje. Snahy o snižování podílu lidských dovedností se projevují již dnes a v blízké budoucnosti lze předpokládat další zvýšení intenzity tohoto úsilí. Ke snížení tohoto podílu také v oblasti broušení pravděpodobně významnou měrou přispějí tzv. expertní systémy. V podstatě se jedná o vytváření speciálních počítačových programů, které s využitím vhodně zakódovaných informací a postupů umožňují simulovat rozhodovací činnost experta při řešení složitých úloh. V dialogovém režimu s uživatelem umožňují na základě poskytnutých údajů o řešené problematice a data-báze obecných znalostí postupně upřesňovat představu o řešeném případě a následně formulovat závěry, případně navrhnout postup řešení. Podstatnou součástí expertních systémů představují řešící mechanismy, tj. procedury, které vyvolávají údaje z báze znalostí a aplikují je na právě řešený případ. V případě vytváření expertního systému procesu broušení je simulační model vhodným „základním kamenem“ řešícího mechanismu.

- Simulační model může sloužit jako významná součást expertního systému procesu broušení, aplikovatelného např. při navrhování vhodných rezných podmínek.

Modelování procesu broušení je vědeckým základem pro získání nových technologických poznatků a jeho význam do budoucna ještě poroste (Warnecke aj., 1994).

Seznam použité literatury

(Barták, 1993)

BARTÁK, J., aj. *Encyklopedický slovník*. Red. Encyklopedický dům, spol. s r.o., 1. vyd. Praha: ODEON a Encyklopedický dům, spol. s r.o., 1993. 1254 s. ISBN 80-207-0438-8.

(Bauer, 1998)

BAUER, A. *TPPatch verze 1.00 - úprava souborů psaných v TP7/BP7 na CPU PII*, překlad: Zatloukal, V., 1998, v.zatloukal@micronic.cz .

(Baul aj., 1972)

BAUL, R. M., GRAHAM, D., SCOTT, W. Characterization of the working surface of abrasive wheels. *Tribology*. August 1972, -, s. 169 - 176.

(Bílek, 2001)

BÍLEK, P. *Experimentální ověřování vlivu řezných podmínek u matematického modelu procesu broušení: Diplomová práce*. TU v Liberci, 2001. 70 s.

(Bumbálek, 2000)

BUMBÁLEK, B. Vysoká škola bez výzkumu není vysokou školou. *Strojírenská technologie*. Červen 2000, 5, č. 2. s. 3 - 5. ISSN 1211-4162.

(Bumbálek aj., 1981)

BUMBÁLEK, B., OŠŤÁDAL, B. *Metodika sestavování diagramů broušení: Výzkumná zpráva*. - Brno, 1981. 36 s.

(Čáp, 1996)

ČÁP, D. *Studium teplotního pole při rovinném broušení: Diplomová práce*. Technická univerzita v Liberci, 1996. 80 s.

(ČSN 22 4012)

ČSN 22 4012. Zrnitost a velikost drceného brusiva. 1974. Praha: Úřad pro normalizaci a měření.

(ČSN EN ISO 4287)

ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999. Praha: Český normalizační institut.

(ČSN ISO 3002-4)

ČSN ISO 3002-4. Základné veličiny pri rezaní a brúsení, časť 4: Sily, práca a výkon. 1994. Praha: Český normalizační institut.

(ČSN ISO 3002-5)

ČSN ISO 3002-5. Základné veličiny pri rezaní a brúsení, časť 5: Základná terminológia brusných operácií používajúcich brúsiace kotúče. 1993. Praha: Český normalizační institut.

(ČSN ISO 525)

ČSN ISO 525. Označování a značení brousicích nástrojů: rozmezí vnějších průměrů a tolerance. 1993. Praha: Český normalizační institut.

(ČSN ISO 690)

ČSN ISO 690. Bibliografické citace: obsah, forma a struktura. 1996. Praha: Český normalizační institut.

(ČSN ISO 8688-1)

ČSN ISO 8688-1. Testovanie trvanlivosti pri frézovaní, Časť 1: Rovinné frézovanie. 1993. Praha: Centrum služeb pro normalizaci.

(Cyhelský aj., 1978)

CYHELSKÝ, L., HUSTOPECKÝ, J., ZÁVODSKÝ, P. *Příklady k teorii statistiky*. 1. vyd. Praha, Bratislava: SNTL a ALFA, 1978. 392 s. ISBN - .

(Degner aj., 1993)

DEGNER, W., LUTZE, H., SMEJKAL, E. *Spanende Formung, Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 13. Auflage. München-Wien: Carl Hanser Verlag, 1993. 302 s. ISBN 3-446-17131-2.

(Degner aj., 2002)

DEGNER, W., LUTZE, H., SMEJKAL, E. *Spanende Formung, Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 15. Auflage. München-Wien: Carl Hanser Verlag, 2002. 396 s. ISBN 3-446-22138-7.

(Douša, 1990)

DOUŠA, J. *Modelování na číslicových počítačích*. 3. vyd. Praha: ES ČVUT, 1990. 184 s. ISBN 80-01-00447-3.

(Dráb, 1989)

DRÁB, V. *Technologie I - Návod ke cvičení*. 2. vyd. Liberec: VŠST, 1989. 177 s. ISBN 80-7083-006-9.

(Draský aj., 1976)

DRASKÝ, J., aj. *Teploty při obrábění: Výzkumná zpráva*. Liberec: VŠST Liberec, 1976. - s.

(Gabriel aj., 1998)

GABRIEL, V., JERSÁK, J., MATUSKÝ, J., VOTOČEK, J., ŽIŽKA, J. *Víceparametrická monitorizace procesu obrábění - Závěrečná zpráva projektu GAČR 101/96/1608: Výzkumná zpráva*. Liberec: TU v Liberci, 1998. 111 s.

(Gašpárek, 1979)

GAŠPÁREK, J. *Dokončovacie spôsoby obrábania*. 1. vyd. Bratislava a Praha: ALFA a SNTL, 1979. 360 s. ISBN -.

(Gazda, 1979)

GAZDA, J. *Dynamometr pro měření řezných sil při rovinném broušení obvodem kotouče: Výzkumná zpráva*. Liberec: VŠST Liberec, prosinec 1979. 17 s.

(Gazda, 1973)

GAZDA, J. *Modelování brusného procesu: Kandidátská disertační práce*. VŠST Liberec, 1973. 141 s.

(Gazda, 1975)

GAZDA, J. *Výzkum technologie rychlostního broušení - Teplotní pole v obrobnku: Výzkumná zpráva*. Liberec: VŠST Liberec, 1975. - s.

(Gazda, 1979)

GAZDA, J. *Řezivost brusných kotoučů: Habilitační práce*. VŠST Liberec, 1979. 131 s.

(Gazda aj., 1993)

GAZDA, J., BUKAČ, K., GABRIEL, V., JERSÁK, J., PRŮŠEK, A., VYTLAČIL, M., *Teorie obrábění - Řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Liberec: ES VŠST Liberec, 1993. 123 s. ISBN 80-7083-110-3.

(Gazda aj., 1985)

GAZDA, J., DRÁB, V., BURIAN, J., JANOUŠEK, J., JERSÁK, J., TIEP, N. V., *Vytváření povrchu a obrobitelnost broušením - část 1. - Vytváření povrchu fyzikálním a matematickým modelováním: Výzkumná zpráva*. Liberec: VŠST Liberec, září 1985. 69 s.

(Gazda aj., -)

GAZDA, J., JERSÁK, J. *Pokroky v broušení kovů*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Strojírenská technologie - knihovnička, -. - s. ISBN -. (v tisku).

(Harenberg, 1992)

HARENBERG, B. *Kronika lidstva*. Realizace českého vydání - Biermann, K., Hanus, F. 1. české vyd. Bratislava: Fortuna Print, spol. s r.o., 1992. 1264 s. ISBN 80-7153-039-5.

(HERMES, -)

HERMES, Wien: Brusivo na podložce - HERMES-Brousicí nástroje. [B.r.]. 12 s.

(HOMMELWERKE, -)

HOMMELWERKE, GmbH, Schwenningen: Hommel Tester T500 - Bedienungsanleitung. [B.r.]. - s.

(Hušek, 1987)

HUŠEK, R., LAUBER, J. *Simulační modely*. Odpov. red. ing. Ivana Brzáková, 1. vyd. Praha; Bratislava: SNTL; ALFA, 1987. 352 s. ISBN -.

(Janiček, 1998)

JANIČEK, P., ONDRÁČEK, E. *Řešení problémů modelováním : Téměř nic o všem*. 1. vyd. Brno: Fakulta strojní VUT v Brně 1998 v nakladatelství PC-DIR Real, s.r.o., 1998. 335 s. ISBN 80-214-1233-X.

(Jersák, 1981)

JERSÁK, J. *Příspěvek k matematickému modelování procesu broušení: Diplomová práce*. VŠST Liberec, 1981. 60 s.

(Jersák, 1988)

JERSÁK, J. *Matematické modelování kinematiky procesu broušení simulační metodou: Kandidátská disertační práce*. VŠST Liberec, 1988. 164 s.

(Jersák, 1999)

JERSÁK, J. Berechnung der Prozeßparameter mit Anwendung einer Methode der mathematischen Modellierung des Schleifens. In Vortragsband Technische Universität Dresden - Technická univerzita v Liberci. XII. Gemeinsames Wissenschaftliches Kolloquium - XII. mezinárodní vědecké sympozium. 1. vyd. Dresden: TU Dresden 1999, s. 35 - 40. ISBN 3-86005-235-7.

(JUNKER MASCHINEN, -)

JUNKER MASCHINEN, Nordrach: QUICKPOINT - CNC-Außenrundscheifen mit CBN oder Diamant. [B.r.]. 20 s.

(Kassen, 1969)

KASSEN, G. *Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges: Kandidátská disertační práce*. TH Aachen, 1969. - s.

(Kocman, 2001)

KOCMAN, K., aj. *Aktuální příručka pro technický úsek*. Základní dílo – stav srpen 2001 – včetně 18 aktualizací. Praha: Verlag DASHÖFER, 1996 - 2001. 4 svazky. ISBN 80-902247-2-5.

(Krejčíková, 1986)

KREJČÍKOVÁ, M. *Zkoumání tvaru jednotlivých volných zrn brusiva: Diplomová práce*. VŠST Liberec, 1986. 68 s.

(Kulhánek, 1970)

KULHÁNEK, F. *Konstrukční oceli Československé a zahraniční*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1970. - s. ISBN -.

(Kvoch, 1995)

KVOCH, M. *Programování v Turbo Pascalu 7.0*. Lektor: Ing. P. Herout. Dotisk 1. vydání. České Budějovice: KOPP, 1995. 236 s. ISBN 80-901342-5-4.

(Lang aj., 1989)

LANG, G., SALJÉ, E. *Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen*. 1. Auflage. Essen: Vulkan Verlag, 1989. 198 s. ISBN 3-8027-2687-1.

(Mádl, 1997)

MÁDL, J. (rec.) : Westkämper, E. aj., *Čisté výrobní technologie - konkurenční výhoda zítřka?*. Aachen. Werkzeugmaschinenkolloquium 1996. In: Sborník recenzí přednáškového bloku „Strojírenská výrobní technika a technologie pro 21. století“, díl II., 1997, s. 208 - 222.

(Malle, 1988)

MALLE, K. *Hochgeschwindigkeitsschleifen - Alternative zum Drehen und Fräsen?* VDI-Z. Juli 1988, 130, Nr. 7. s. 50 - 56.

(Malý encyklopedický slovník, 1972)

Malý encyklopedický slovník. Vědecký red. dr. Václav Král, DrSc., 1. vyd. Praha: ACADEMIA, 1972. 1456 s. ISBN -.

(Maslov, 1953)

MASLOV, J. N. *Základy theorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1953. 176 s. ISBN -.

(Maslov, 1979)

MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. Doplnil F. Neckář., 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 248 s. ISBN -.

(Mikula aj., 1994)

MIKULA, P., JUHOVÁ, K., SOUKENKA, J. *Borland Pascal 7.0 kompendium*. 1. vyd. Praha: Grada, 1994. 920 s. ISBN 80-7169-009-0.

(Mládek, 1973)

MLÁDEK, J. *Teplotní pole v obrobku: Diplomová práce*. VŠST Liberec, 1973. 63 s.

(Neckář aj., 1991)

NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. *Vybrané statě z úběru materiálu*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1991. 88 s. ISBN 80-01-00696-4.

(Neuschl, 1988)

NEUSCHL, Š., aj. *Modelovanie a simulácia*. Zodpov. red. RNDr. Margita Flimelová. 1. vyd. Bratislava; Praha: ALFA; SNTL, 1988. 424 s. ISBN -.

(NORTON, -)

NORTON, Conflans-Ste-Honorine Cedex: Keramisches Aluminium-Oxid für das Präzisionsschleifen - Norton setzt mit SG neue Maßstäbe in der Schleiftechnologie. [B.r.]. 4 s.

(Oczoš aj., 1986)

OCZOŠ, K., PORZYCKI, J. *Szlifowanie - Podstawy i technika*. 1. wyd. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1986. 298 s. ISBN 83-204-0771-0.

(Paturi, 1993)

PATURI, R., F. *Kronika techniky*. Realizace českého vydání - Biermann, K., Hanus, F. 1. české vyd. Praha: Fortuna Print, spol. s r.o., 1993. 656 s. ISBN -.

(Pázman, 1986)

PÁZMAN, A., aj. *Riešené situácie z navrhovania experimentov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1986. 208 s. ISBN -.

(POVÁŽSKÉ STROJÍRNY, -)

POVÁŽSKÉ STROJÍRNY n.p., Povážská Bystrica: Pasport brusky BPH 20. [B.r.]. - s.

(Přikryl aj., 1975)

PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. 2. vyd. Praha, Bratislava: SNTL, ALFA, 1975. 240 s. ISBN -.

(Przybylski, 1977)

PRZYBYLSKI, L. Charakterystyka rozkladu krawedzi ziarn na powierzchni roboczej sciernicy. *Mechanik*. 1977, -, Nr. 8. s. 403 - 404.

(Reinhold aj., 1988)

REINHOLD, R., CLAUSNITZER, M., *Schleifen - Grundlagen und Intensivierung*. 1. vyd. Berlin: VEB Verlag Technik, 1988. 280 s. ISBN 3-341-00262-6.

(Rektorys, 2000)

REKTORYS, K. *Přehled užití matematiky I a II*. 7. vyd. Praha: Prometheus, spol. s r. o., 2000. 1594 s. ISBN 80-7196-179-5.

(Růžicka, 1974)

RŮŽICKA, J. *Návrh matematického modelu brusného kotouče: Diplomová práce.* VŠST Liberec, 1974. - s.

(Schmidt aj., 1974)

SCHMIDT, E., aj. *Příručka řezných nástrojů.* 2. vyd. Praha : SNTL, 1974. 580 s. ISBN -.

(Snoeys aj., 1974)

SNOEYS, R., PETERS, J., DECNEUT, A. The Significance of chip Thickness in Grinding. *Annals of the CIRP.* 1974, 23, č. 2. s. 227 - 237. ISSN -.

(Sova, 1997)

SOVA, F. (rec.) : Christoffel, K. aj., *Komprimierte Prozeßketten - Voraussetzungen und Potentiale.* Aachen. Werkzeugmaschinenkolloquium 1996. In: Sborník recenzí přednáškového bloku „Strojírenská výrobní technika a technologie pro 21. století“, díl II., 1997, s. 179 - 207.

(Špillar, 1986)

ŠPILLAR, V. *Hodnocení příčného profilu rýhy vzniklé po rytí jedním zrnem brusiva u různých materiálů: Diplomová práce.* VŠST Liberec, 1986. 85 s.

(Tönshoff aj., 1992)

TÖNSHOF, H., K., PETERS, J., INASAKI, I., PAUL, T., Modelling and Simulation of Grinding Processes. *Annals of the CIRP.* 1992, 42, Nr. 2. s. 677 - 688.

(TYROLIT, 1997)

TYROLIT Schleifmittelwerke Swarovski K.G., Schwaz: Tobias, P. - Stand und Entwicklungsmöglichkeiten der Schleifwerkzeuge. 1997, 14 s.

(Vasilko aj., 1988)

VASILKO, K., BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov.* Red. M. Kupková. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988. 240 s. ISBN -.

(Vlach, 1990)

VLACH, B., *Technologie obrábění a montáží.* 1.vydání. Praha: SNTL, 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.

(Vondrovský, 1990)

VONDROVSKÝ, M. *Aplikace poznatků o tvorbě třísky při matematickém modelování procesu broušení: Diplomová práce.* Liberec: VŠST Liberec, 1990. 75 s.

(Vytlačil aj., 1991)

VYTLAČIL, M., SVOBODA, K. *Výrobní systémy II. Projektování pružných výrobních*

systémů. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1991. 257 s. ISBN 80-7083-057-3.

(WALTER, -)

WALTER AG, Tübingen: Helitronic Power - Der Gipfel der Schleiftechnologie. [B.r.]. 24 s.

(Warnecke aj., 1994)

WARNECKE, G., MERZ, R., SPIEGEL, P. Modellierung und Simulation des Abricht- und Schleifprozesses. VDI-Z. September 1994, 136, Nr. 9. s. 70 - 72.

(Yoshikawa aj., 1971)

YOSHIKAWA, H., PEKLENIK, J. Three-dimensional Simulation Techniques of the Grinding Process. In *Advances in Manufacturing Systems*. - . vyd. Oxford: Pergamon Press. 1971, s. 89 - 102.

(Yoshikawa aj., 1968)

YOSHIKAWA, H., SATA, T. Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process. In *Annals of the C.I.R.P.*. Vol. XVI. 1. ed. Great Britain: 1968, pp. 297 - 302.

(Zítek, 1990)

ZÍTEK, P. *Simulace dynamických systémů*. Odpov. red. ing. Marcela Hrubá. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 420 s. ISBN 80-03-00330-X.

(Żebrowski aj., 1967)

ŻEBROWSKI, H., MAZURKIEWICZ, M. Badania nad zarysowywaniem pojedynczym naturalnym ziarnem ściernym. *Mechanik*. 1967, -, Nr. 1. s. 27 - 30.

Seznam příloh

	rozsah
příloha č. 1. Seznam použitých zkratek a symbolů v simulačním programu	7 listů
příloha č. 2. Schéma dialogového režimu	3 listy
Příloha č. 3. Příklad tiskového souboru s vypočítanými údaji	17 listů

Přílohy

Seznam použitých zkratk a symbolů v simulačním programu

A	teplotní vodivost materiálu obrobku	[$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
AE	hloubka záběru (pracovní radiální záběr)	[m]
AKTIV	procento aktivních zm v procesu broušení	[%]
ALFA	exponent charakterizující rozložení zm brusiva pod povrchem kotouče	[1]
AMAX	maximální šířka zrna dané zrnitosti	[m]
ARO	šířkový úsek zrna	[m]
AS	šířkový úsek vzorku	[m]
AX	šířka simulovaného brousícího kotouče	[m]
BD	šířka aktivní části brousícího kotouče při určování teploty	[m]
BETAN	úhel, který svírá vertikální osa brousícího kotouče a průvodič vrcholu zrna připraveného k řezání	[rad]
BS	délkový úsek vzorku	[m]
CAS	čas (pro zobrazení průběhu teplot v čase)	[s]
CASC	celkový čas modelovaného procesu broušení	[s]
CASP	proběhlý čas modelovaného procesu broušení	[s]
CAS_PR	čas pracovní (pro realizaci výpočtu)	[s]
CAS_TZ	doba tepelného zatížení	[s]
CAS_U	počet vyhodnocovaných časových úseků při výpočtu teploty	[1]
CK	měrná tepelná kapacita brousícího kotouče	[$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
COB	měrná tepelná kapacita obrobku	[$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Cst_adresar	jméno cesty k nově vytvořenému adresáři pro uložení dat zadaných v rámci exper.	[-]
Cst_d_dat	jméno cesty d.dat k načítání základních vzorových dat pro datový soubor DSC0	[-]
Cst_d01_dat	jméno cesty d01.dat pro uložení nově zadaných zákl. dat pro datový soubor DST1	[-]
Cst_dd01_dat	jméno cesty dd01.dat pro uložení nově zadaných dat pro výpočet drsnosti povrchu pro datový soubor DST2	[-]
Cst_dp01_dat	jméno cesty dp01.dat pro uložení nově zadaných dat pro výpočet teploty pro datový soubor DST4	[-]
Cst_ds01_dat	jméno cesty ds01.dat pro uložení nově zadaných dat pro výpočet síly při broušení pro datový soubor DST3	[-]
Cst_pxx_xxx	jméno cesty pxxxxxxx.xxx pro uchování hodnot SPT pro datový soubor DSTC0	[-]
Cst_pyy_yyy	jméno cesty pyyyyyyy.yyy pro uchování hodnot ETP1 pro datový soubor DSTC1	[-]
Cst_pzz_zzz	jméno cesty pzzzzzzz.zzz pro uchov. hodnot Z a TEPLMAX pro dat. soub. DSTC2	[-]
Cst_t_txt	jméno cesty t.txt pro uložení všech výstupních hodnot pro datový soubor DST0	[-]
Cst_tfz	jméno cesty pro datový soubor „tfz“ v PU4PODP	[m]
D	průměr brousícího kotouče	[rad]
DELMAL	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu dotyku vrcholu zrna, dolní mez pro lineární interpolaci při výpočtu SPT	[rad]
DELMs	úhel, udávající polohu vrcholu vyšetřovaného zrna vůči prvnímu zrnu u kterého vyhodnocujeme složku síly	[rad]
DELTA	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu dotyku vrcholu zrna J-té příčné roviny obrobku při řezání zrna	[rad]
DELTA1	hodnota úhlu DELTA pro lineární interpolaci při určování složky síly	[rad]
DELTA2	hodnota úhlu DELTA pro lineární interpolaci při určování složky síly	[rad]
DELTAJ	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna, který se dotýká příčné roviny obrobku při pootáčení kotouče v řezu	[rad]
DELTAN	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna, který se dotýká příčné roviny obrobku; nová hodnota	[rad]
DELTAP	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu, který leží na základní válcové ploše kotouče a dotýká se okraje obrobku před obráběním	[rad]
DELTAS	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu vrcholu zrna, který se dotýká příčné roviny obrobku; stará hodnota	[rad]

DELTP	hodnota rozdílu mezi konečným a počátečním úhlem záběru zrna brusiva	[rad]
DELVEL	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem bodu dotyku vrcholu zrna, horní mez pro lineární interpolaci při výpočtu SPT	[rad]
DELZK	konečný úhel záběru zrna	[rad]
DELZKP	hodnota úhlu DELZK pro první zrna u kterého vyhodnocujeme složku síly	[rad]
DELZP	počáteční úhel záběru zrna	[rad]
DELZS	střední úhel záběru zrna	[rad]
DPC	parametr pro určení, zda bude prováděn výpočet celkové drsnosti povrchu	[1]
DSC0	jméno datového souboru pro čtení základních vzorových dat	[-]
DST0	jméno datového souboru pro tisk všech hodnot	[-]
DST1	jméno datového souboru pro tisk nově zadáných základních dat	[-]
DST2	jméno datového souboru pro tisk nově zadáných dat pro výpočet drsnosti povrchu	[-]
DST3	jméno datového souboru pro tisk nově zadáných dat pro výpočet síly při broušení	[-]
DST4	jméno datového souboru pro tisk nově zadáných dat pro výpočet teploty	[-]
DST4B	jméno datového souboru pro tisk - provizorně v PU4PODP	[-]
DST5A	jméno datového souboru pro tisk - v PU4PODP změnit název dat. soub.	[-]
DST5B	jméno datového souboru pro tisk - provizorně v PU4PODP	[-]
DSTC0	jméno datového souboru pro tisk a čtení vypočít. hodnot střed. průřezu třísky SPT	[-]
DSTC1	jméno datového souboru pro tisk a čtení vyp. hodnot práce řezání konkr. zrna ETP1	[-]
DSTC2	jméno datového soub. pro tisk a čtení vyp. hodnot hloubky Z a teploty TEPLMAX	[-]
E	pomocná hodnota sloužící ke grafickému vyjádření drsnosti povrchu	[1]
EN	otáčky brousícího kotouče	[s ⁻¹]
ETP	celková práce řezání pro konkrétní zdvih stolu při přebrušování povrchu při výpočtu teploty	[J]
ETP1	práce řezání v důsledku působení konkrétního zrna brusiva při daném zdvihu brousícího kotouče při výpočtu teploty	[J]
EXPER	proměnná pro pořadové číslo experimentu	[1]
F_DELTAJ	funkční hodnota iterační funkce pro nalezený kořen iterační rovnice	[1]
F_DELTAN	funkční hodnota iterační funkce pro nalezený kořen iterační rovnice	[1]
F_F	střední velikost řezné síly	[N]
FC	velikost řezné síly při daném zdvihu brousícího kotouče a v daném místě úseku ustáleného broušení	[N]
FCAST	složka řezné síly při broušení daná 1 aktivním zrnem brusiva	[N]
FCELK	řezná síla v určitém okamžiku, při zvolené poloze brousícího nástroje vůči obrobku	[N]
FIDIF	úhel vymezující na povrchu brousícího kotouče úsek daný polohou vyšetřovaného zrna a prvního zrna u kterého vyhodnocujeme složku síly	[rad]
FIMS	úhel vymezující na povrchu brousícího kotouče maximální velikost úseku, ve kterém se mohou nacházet aktivní zrna v okamžiku vyhodnocování síly	[rad]
FIN	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem vrcholu zrna brusiva; nová hodnota	[rad]
FIP	hodnota úhlu FIN pro první aktivní zrna u kterého vyhodnocujeme složku síly	[rad]
FIS	úhel seřvený vertikální osou brousícího kotouče a průvodičem vrcholu zrna brusiva; stará hodnota	[rad]
FTP	složka síly daná jedním aktivním zrnem brusiva při výpočtu teploty	[N]
GENN2	název generátoru náhodných čísel s normálním rozložením pravděpodobnosti	[1]
GR1	proměnná vyjadřující četnost průřezů třísek v konkrétní třídě histogramu	[1]
GR2	proměnná tvořící dvojrozměrné pole a sloužící ke grafickému znázornění histogramu průřezů třísek	[1]
GRAF1	parametr pro určení zda se bude drsnost povrchu vyjadřovat graficky	[1]
GRMAX	proměnná použitá pro určení maximální četnosti průřezů třísek ve třídě histogramu	[1]
GRMIN	proměnná použitá pro určení minimální četnosti průřezů třísek ve třídě histogramu	[1]
HL_U	počet vyhodnocovaných hloubkových úseků při výpočtu teploty	[1]
HTPJ	maximální tloušťka třísky v příčné rovině při rytí konkrétním zrnem brusiva při výpočtu teploty	[m]

HTPS	střední tloušťka třísky v příčné rovině při rytí konkrétním zrnem brusiva při výpočtu teploty	[m]
HTR	maximální tloušťka třísky v konkrétní příčné rovině	[m]
HTR1	hodnota tloušťky třísky pro lineární interpolaci při určování složky síly	[m]
HTR2	hodnota tloušťky třísky pro lineární interpolaci při určování složky síly	[m]
HTRMS	okamžitá tloušťka třísky při určování složky řezné síly	[m]
CHYBA	velikost přípustné chyby u iterační metody	[rad]
I01	proměnná pro modelování souřadnic zm	[1]
I02	proměnná pro tisk GRAF1 a pro tisk grafické závislosti teploty	[1]
I03	proměnná pro určování význačných úhlů a rovin při záběru konkrétního zrna	[1]
I04	proměnná pro určování počáteční roviny záběru zrna	[1]
I05	proměnná pro určování konečné roviny záběru zrna	[1]
I06	proměnná pro určování střední roviny záběru zrna	[1]
I07	proměnná pro určov. počáteční a konečné polohy řezání zrna pro vyhodn. řezné síly	[1]
I08	proměnná pro prověření zadaného parametru UMS1 při výpočtu řezné síly	[1]
I09	prom. zaj. výpočet síly pouze tehdy, jestliže bylo zrnem identifikováno jako aktivní	[1]
I10	proměnná použitá při volbě typu výpočtu	[1]
I11	konstanta signalizující chybně zadanou veličinu JROV	[1]
I12	proměnná pro určov. hodnot potřebných při lineární interpolaci při výp. řezné síly	[1]
I13	proměnná pro určov. hodnot potřebných při lineární interpolaci při výp. řezné síly	[1]
I14	proměnná pro vyjádření průběhu výpočtu	[1]
I15	proměnná pro odstranění blikání obrazovky při zobrazov. údaje o průběhu výpočtu	[1]
I16	proměnná použitá pro určení počtu sčítanců při výpočtu střední hodnoty TAU	[1]
I17	proměnná použitá pro určení počtu sčítanců při výpočtu střední hodnoty RO	[1]
I18	proměnná pro řízení procesu testování hodnoty zadaných veličin	[1]
I19	proměnná pro určov. počtu vyhodnocov. středních průřezů třísky pro zápis na disk	[1]
I20	proměnná pro určování počtu aktivních zm	[1]
I21	proměnná použitá pro stanovení grafu závislosti teploty na čase při výpočtu teploty	[1]
I22	proměnná použitá pro registraci nestandardní hloubky při výpočtu teploty	[1]
I24	proměnná použitá pro zjištění počtu časových úseků při výpočtu teploty	[1]
I26	proměnná použitá pro zjištění počtu hloubkových úseků při výpočtu teploty	[1]
I28	proměnná použitá při výpočtu teploty, jež zajišťuje výpočet síly pouze tehdy, jestliže bylo zrnem brusiva identifikováno jako aktivní	[1]
I29	proměnná použitá pro určování počtu dílčích složek síly při zápisu na disk	[1]
I30	proměnná použitá pro identifikaci jednotlivých zdvihů	[1]
I31	proměnná použitá při určování počtu údajů o hloubce a teplotě při zápisu na disk	[1]
I32	proměnná pro volbu, zda zadané hodnoty uložit nebo nikoliv	[1]
I33	proměnná pro vytvoření histogramu průřezů třísky	[1]
I34	proměnná zajišťující zobrazení a tisk histogramu příčných průřezů třísek	[1]
I35	proměnná zajišťující zobrazení a tisk histogramu příčných průřezů třísek	[1]
IA	počet podélných rovin obrobku	[1]
IAKTIV	počet aktivních zm	[1]
IB	počet příčných rovin obrobku	[1]
ICELK	počet namodelovaných zm	[1]
IEND	maximální počet kroků iterační metody	[1]
IER	proměnná signalizující průběh nebo výslednou situaci u iterační funkce	[1]
IERJ	proměnná signalizující průběh nebo výslednou situaci u iterační funkce	[1]
IETP	celkový počet podílů práce řezání od konkrétních aktivních zm brusiva při výpočtu teploty	[1]
IPR	proměnná pro registraci aktuálního čísla zdvihu při přebrousování povrchu	[1]
IPRC	celkový počet přebroušení povrchu	[1]

ISPT	celkový počet vyhodnocovaných středních průřezů třísky	[1]
ITEPLMAX	celkový počet údajů o hloubce a teplotě při výpočtu teploty	[1]
IZ	počet aktivních zm při vyhodnocování síly při určitém zdvihu broušícího kotouče	[1]
IZAB	počet aktivních zm zabírajících v okamžiku vyhodnocování síly	[1]
J	obecná příčná rovina	[1]
JROV	J-tá rovina, ve které se budou určovat parametry drsnosti povrchu	[1]
K	obecná podélná rovina	[1]
KK	podíl celkového tepla k teplu přecházejícímu do obrobku	[1]
KONST1	měrná řezná síla „ $k_{z1,i}$ “	[Pa]
KONST2	exponent Kienzleho vztahu „u“	[1]
KONST3	Pregerův procesový faktor „ f_{BROU} “	[1]
KONST4	korekční faktor rychlosti broušení „ K_{BROU} “	[1]
L	pomocný parametr pro grafické vyjádření drsnosti povrchu	[1]
L1	parametr pro volbu typu výpočtu	[1]
L2	parametr pro volbu typu výpočtu	[1]
L3	parametr pro volbu typu výpočtu	[1]
L4	parametr pro volbu typu výpočtu	[1]
L5	parametr pro volbu typu výpočtu	[1]
LAMK	tepelná vodivost broušícího kotouče	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
LAMOB	tepelná vodivost materiálu obrobku	[W . m ⁻¹ . K ⁻¹]
LK	upravená délka stykového oblouku	[m]
LX	proměnná použitá pro grafické vyjádření drsnosti povrchu	[1]
MER	parametr pro stanovení měřítka svislé osy histogramu příčných průřezů třísek	[1]
MER1	parametr pro stanovení měřítka svislé osy histogramu příčných průřezů třísek	[1]
MER2	parametr pro stanovení měřítka svislé osy histogramu příčných průřezů třísek	[1]
N	složka pohybu otáčením	[m]
OK	proměnná typu BOOLEAN nabývající hodnot < true, false >	[-]
PHTPS	měrný řezný odpor při rytí konkrétním zrnem brusiva při výpočtu teploty	[N . m ⁻²]
PHTR	měrný řezný odpor	[N . m ⁻²]
PRVYP	průběh výpočtu	[%]
Q01	konstanta (= VFT / (2 . PI . EN))	[m]
Q02	konstanta (= IA - 1)	[1]
Q03	konstanta (= IB - 1)	[1]
Q04	proměnná (= D / 2 - ZN)	[m]
Q05	proměnná (= Q1 . BETAN + UN)	[m]
Q06	proměnná (= Q1 . DELTAN + UJ)	[m]
Q07	proměnná (= D / 2 . (1 - cos (DELTAN)))	[m]
Q08	proměnná (= Q8 + YH(J,K))	[m]
Q09	proměnná (= Q9 + abs (RS(J) - YH(J,K)))	[m]
Q10	proměnná (= Q10 + RA(J))	[μm]
Q11	proměnná (= Z)	[m]
Q12	proměnná (= Q12 + Q13)	[m]
Q13	proměnná (= AS . YH(J,K) - YH2 nebo AS / 2 . YH(J,K) - YH2)	[m]
Q14	proměnná (= IAKTIV)	[1]
Q15	proměnná (= ICELK)	[1]
Q16	proměnná (= abs(DELZS - DELTA(J)))	[rad]
Q17	proměnná (= min(Q16))	[rad]
Q18	proměnná použitá pro výpočet SPTSO	[1]
Q19	proměnná (= (DELMS - DELTA1) / (DELTA2 - DELTA1))	[1]
Q20	proměnná (= tan(QKAPPA))	[1]

Q21	proměnná (= $RO / \cos(QKAPPA) - RO$)	[m]
Q22	proměnná (= Q4 pro COMMON při CALL RTW1)	[m]
Q23	proměnná (= Q1 pro COMMON při CALL RTW1)	[m]
Q24	proměnná (= zadaná veličina)	[l]
Q25	proměnná (= $RO \cdot \sin(QKAPPA)$)	[m]
Q26	proměnná pro registraci hodnoty první nekorektní zadané veličiny	[l]
Q27	proměnná pro registraci hodnoty druhé nekorektní zadané veličiny	[l]
Q28	proměnná použitá pro výpočet střední hodnoty TAU	[rad]
Q29	proměnná použitá pro výpočet střední hodnoty RO	[m]
Q30	proměnná (= QIT / LAMOB)	[K . m ⁻¹]
Q31	proměnná (= $Z \cdot (Fi(X1) - Fi(X2))$; Fi - Gaussův integrál)	[m]
Q32	proměnná (= $2 \cdot \sqrt{A} / \sqrt{\pi}$)	[m . s ^{-0,5}]
Q33	proměnná (= $\sqrt{(CAS_PR) \cdot e^{(-Z \cdot Z / (4 \cdot A \cdot CAS_PR))}}$)	[s ^{0,5}]
Q34	proměnná (= $\sqrt{(CAS_PR - CAS_TZ) \cdot e^{(-Z \cdot Z / (4 \cdot A \cdot (CAS_PR - CAS_TZ))}}$)	[s ^{0,5}]
QIT	plošná intenzita tepla	[W . m ⁻²]
QKAPAS	parametr profilu zubu - střední hodnota	[rad]
QKAPPA	parametr profilu zubu	[rad]
QL	proměnná zajišťující změnu meze XLI při potížích s iterační funkcí	[l]
QLSTR	střední vzdálenost zrn na obvodu kotouče	[m]
QLSTR1	skutečná průměrná vzdálenost zrn	[m]
QMAX	maximální velikost zadané veličiny	[l]
QMI1	střední hodnota vrcholového úhlu zrna	[rad]
QMI2	střední hodnota poloměru zaoblení vrcholu zrna	[m]
QMIN	minimální velikost zadané veličiny	[l]
QQ	pomocná proměnná pro opakované zapisování znaku mezera	[l]
QR	proměnná zajišťující změnu meze XRI při potížích s iterační funkcí	[l]
R	poloměr brouscího kotouče	[m]
RA	průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu	[μm]
RAC	střední hodnota průměrné aritmetické úchylny posuzovaného profilu	[μm]
RO	poloměr zaoblení vrcholu zrna brusiva	[m]
ROK	hustota brouscího kotouče	[kg . m ⁻³]
ROOB	hustota obrobku	[kg . m ⁻³]
ROSTR	střední hodn. poloměru zaoblení vrcholu zrna brusiva daná rozděln. pravděpodobn.	[m]
RS	poloha střední čáry profilu drsnosti v J-té rovině	[m]
RZ	největší výška profilu	[μm]
RZC	maximální z největších výšek profilu	[μm]
S	průřez třísky v J-té příčné rovině obrobku	[m ²]
SIGMA1	směrodatná odchylka střední hodnoty vrcholového úhlu zrna	[rad]
SIGMA2	směrodatná odchylka střední hodnoty poloměru zaoblení vrcholu zrna	[m]
SMAL	střední průřez třísky, dolní mez pro lineární interpolaci při výpočtu SPT	[m ²]
SMS	okamžitý průřez třísky při určování složky řezné síly	[m ²]
SMS1	hodnota SMS pro lineární interpolaci	[m ²]
SMS2	hodnota SMS pro lineární interpolaci	[m ²]
SPT	střední průřez třísky	[m ²]
SPTMAX	maximální hodnota středního průřezu třísky	[m ²]
SPTMIN	minimální hodnota středního průřezu třísky	[m ²]
SPTPRUM	průměrná hodnota středního průřezu třísky	[m ²]
SPTSO	směrodatná odchylka středního průřezu třísky	[m ²]
SPTSUMA	součet středních průřezů třísek	[m ²]
STPS	střední průřez třísky při rytí konkrétním zrnem brusiva při výpočtu teploty	[m ²]

SVEL	střední průřez trisky, horní mez pro lineární interpolaci při výpočtu SPT	[m ²]
TAU	vrcholový úhel zrna	[rad]
TAUSTR	střední hodnota vrcholového úhlu zrna daná rozdělením pravděpodobnosti	[rad]
TEPL	nárůst teploty obrobku v hloubce Z a v čase CAS při výpočtu teploty	[°C]
TEPLMAX	maximální nárůst teploty v hloubce Z při výpočtu teploty	[°C]
TEPLMAX2	maximální nárůst teploty v celém vyšetřovaném úseku	[°C]
TEPLMAX3	maximální nárůst teploty v hloubce Z při stanovení grafu závislosti teploty na čase	[°C]
TEPLMIN	minimální nárůst teploty v hloubce Z při výpočtu teploty	[°C]
TEPLMIN2	minimální nárůst teploty v celém vyšetřovaném úseku	[°C]
TEPLMIN3	minimální nárůst teploty v hloubce Z při stanovení grafu závislosti teploty na čase	[°C]
TEST1	testování programu	[1]
TEST2	testování programu	[1]
TEST3	testování programu	[1]
TEST4	testování programu	[1]
U	vzdálenost UMS v určitém zdvihu brousícího kotouče	[m]
U40	vzdálenost vrcholu zrna brusiva v poloze, kdy je připraveno k řezání, od vertikální osy brousícího kotouče	[m]
U41	vzdálenost vrcholu zrna brusiva v poloze, kdy prochází první příčnou rovinou, od vertikální osy brousícího kotouče	[m]
U1	šířka intervalu pro 1 třídu v histogramu příčných průřezů třísek	[1]
UC	celková vzdálenost, o kterou se musí brousící kotouč vzhledem k obrobku posunout, aby jej celý přebrousil	[m]
UJ	vzdálenost vertikální osy brousícího kotouče od roviny obrobku, ve které vyšetřujeme polohu vrcholu zrna brusiva při pootáčení kotouče v řezu	[m]
UMS	vzdálenost od konce obrobku, udávající polohu brousícího kotouče v okamžiku vyhodnocování síly	[m]
UMS1	vzdálenost od konce obrobku, udávající polohu brousícího kotouče na počátku procesu vyhodnocování síly	[m]
UMS1MIN	doporučená minimální vzdálenost od konce obrobku odpovídající délce stykového oblouku, určující plný záběr brousícího kotouče při vyhodnocování síly	[m]
UMS2	složka pohybu brousícího kotouče posuvem do polohy, ve které začne proces vyhodnocování síly; měřeno ve směru od výchozí polohy brousícího kotouče	[m]
UMS3	složka pohybu brousícího kotouče posuvem do polohy, ve které se bude síla vyhodnocovat	[m]
UN	vzdálenost vertikální osy brousícího kotouče od první roviny obrobku, ve které se vyšetřuje poloha vrcholu zrna brusiva; nová hodnota	[m]
UP	vzdálenost vertikální osy brousícího kotouče od obrobku, přičemž je brousící kotouč v poloze, kdy se dotýká okraje obrobku před obráběním	[m]
UPP	vzdálenost, o kterou se brousící kotouč posunul od počáteční polohy	[m]
US	vzdálenost vertikální osy brousícího kotouče od první roviny obrobku, ve které se vyšetřuje poloha vrcholu zrna brusiva; stará hodnota	[m]
V	složka pohybu posuvem	[m]
VELIC	proměnná typu STRING pro registraci názvu zadané veličiny	[-]
VELIC1	proměnná typu STRING pro registraci názvu první nekorektně zadané veličiny	[-]
VELIC2	proměnná typu STRING pro registraci názvu druhé nekorektně zadané veličiny	[-]
VFT	posuvná rychlost obrobku; rychlost posuvu stolu brusky	[m . s ⁻¹]
W	náhodné číslo s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti v intervalu < 0,1 >	[1]
X	proměnná použitá pro výpočet teploty	[1]
X1	mez Gaussova integrálu pro výpočet teploty	[1]
X2	mez Gaussova integrálu pro výpočet teploty	[1]
XK	vzdálenost vrcholu zrna od podélné roviny K v dané příčné rovině	[m]
XLI	spodní hranice intervalu vyšetřovaného iterační metodou	[rad]
XN	souřadnice vrcholu zrna brusiva ve směru osy kotouče; nová hodnota	[m]
XOLD	proměnná pro uchování původní hodnoty DELTAN	[rad]
XRI	horní hranice intervalu vyšetřovaného iterační metodou	[rad]

YH	výška profilu vzorku v daném bodě	[m]
YH1N	výška od základny vzorku k vrcholu zrna brusiva; nová hodnota	[m]
YH1S	výška od základny vzorku k vrcholu zrna brusiva; stará hodnota	[m]
YH2	výška od základny vzorku k zmu brusiva nad konkrétním bodem	[m]
YH3	vertikální vzdálenost bodu na povrchu zrna od vrcholu zrna nad konkrétním bodem	[m]
YH4	tloušťka třísky v konkrétní podélné rovině	[m]
YH4MAX	maximální tloušťka třísky v dané příčné rovině	[m]
YH5	tloušťka třísky v konkrétní podélné a příčné rovině při výpočtu teploty	[m]
YH5MAX	maximální tloušťka třísky v dané příčné rovině při výpočtu teploty	[m]
YHM	maximální výška od základny vzorku k zmu brusiva	[m]
YHMAX	hodnota největší výšky profilu v dané rovině	[m]
YHMIN	hodnota nejmenší výšky profilu v dané rovině	[m]
YN	souřadnice vrcholu zrna brusiva na válcové ploše brousícího kotouče; nová hodnota	[m]
YS	souřadnice vrcholu zrna brusiva na válcové ploše brousícího kotouče; stará hodnota	[m]
Z	hloubka pod povrchem při výpočtu teploty	[m]
ZA1N1	parametr pro kompletní registraci údajů o teplotách a jejich zaznamenání do výstupního souboru při výpočtu teploty	[1]
ZGR	hloubka pod povrchem, ve které má být stanoven graf závislosti teploty na čase při výpočtu teploty	[m]
ZMAX	výška aktivní vrstvy brousícího kotouče	[m]
ZN	souřadnice vrcholu zrna brusiva v radiálním směru od povrchu brousícího kotouče; nová hodnota	[m]
ZNAK	proměnná typu CHAR pro zadávání údajů z klávesnice nebo z datového souboru	[-]
ZNAK1	proměnná typu CHAR pro zadávání údajů z klávesnice nebo z datového souboru	[-]
ZNAK2	proměnná typu CHAR pro zadávání údajů z klávesnice nebo z datového souboru	[-]
ZNAK3	proměnná typu CHAR pro reakci na stlačení mezerníku	[-]

SCHÉMA DIALOGOVÉHO REŽIMU

MATEMATICKÝ MODEL PROCESU BROUSENI

Volba formy nabití vstupních údajů

ručně z klávesnice

z datového souboru

Základní vstupní hodnoty

Poradové číslo experimentu

[1]

Počet podélných rovin obrobku

[1]

Počet příčných rovin obrobku

[1]

Sírkový usek obrobku

[m]

Delkový usek obrobku

[m]

Průměr brousícího kotouče

[m]

Parametr rozložení zrn

[1]

Otáčky brousícího kotouče

[1/s]

Rychlost posuvu obrobku

[m/s]

Hloubka zaberu

[m]

Počet zdvihu při broušení

[1]

Střední roztec zrn na povrchu BK

[m]

Maximální sírka zrna dle zrnitosti

[m]

Síředi hodnota vrcholového úhlu zrna

[rad]

Směrod. odchylka stř. hodn. vrcholov. úhlu zrna

[rad]

Síředi hodnota poloměru zaoblení vrcholu zrna

[m]

Směr. odch. stř. hodn. polom. zaobl. vrcholu z.

[m]

Povolená chyba iterace

[1]

Maximální počet kroku iterace

[1]

Test 1

[1]

Test 2

[1]

Test 3

[1]

Test 4

[1]

Budete právě zadána data ukládat ?

ano

ne

Budete pro uložení právě zadanych dat vytvářet
nový adresář nebo uložíte data do existujícího
adresáře ?

vytvořím nový adresář

použiji existující adresář

Vytvořte nový adresář pro
uložení právě zadanych dat

- zadejte cestu a název :

Příklad : a:\data\ex0X

Zadejte cestu a název existu-
jícího adresáře pro uložení

právě zadanych dat :

Příklad : a:\data\ex01

Zadejte jméno datového souboru pro uložení právě
zadanych dat : Příklad : d01.dat :Všechny výstupní hodnoty nasmerujte do tiskového souboru
v adresáři TISK

Zadejte jmeno tiskoveho souboru, kam budou smerovany
vystupni hodnoty : Priklad : a:\tisk\t.txt

Zadejte typ vypoctu

Urceni poctu aktivnich zrn	=> L1 = 1	Zadejte parametr L1 (aktivni zrna)
Vypocet drsnosti povrchu	=> L2 = 1	Zadejte parametr L2 (drsnost povrchu)
Vypocet prurezu nedeformovane trisky	=> L3 = 1	Zadejte parametr L3 (prurez trisky)
Vypocet slozky sily pri brouseni	=> L4 = 1	Zadejte parametr L4 (sila pri brouseni)
Vypocet teploty pri brouseni	=> L5 = 1	Zadejte parametr L5 (teplota pri brouseni)
Zvoleny typ vypoctu :		

URCENI POCTU AKTIVNICH ZRN

VYPOCET DRSNOSTI POVRCHU

Zadejte pozadavky pro vypocet drsnosti povrchu :

- Vypocet celkove prum. hodnoty Ra => DPC = 1	Zadejte hodnotu DPC :
- Graficke znazorneni profilu povrchu => GRAF1 = 1	Zadejte hodnotu GRAF1 :

Volba formy nacisti potrebnych udaju pro vypocet drsnosti povrchu :

rucne z klavesnice

z datoveho souboru

Vstupni hodnoty pro vypocet drsnosti povrchu

Zadejte jmeno datoveho souboru
v adresari DATA, ze ktereho
budou data nactena :
Priklad : a:\data\dd.dat

Poradove cislo roviny pro urcovani Ra [1]

Zadejte jmeno datoveho souboru pro ulozeni
prave zadanych dat : Priklad : dd01.dat :

VYPOCET PRUREZU NEDEFORMOVANE TRISKY

VYPOCET SLOZKY SILY PRI BROUSENI

Volba formy nacisti potrebnych udaju :

- rucne z klavesnice

z datoveho souboru

Vstupni hodnoty pro vypocet slozky sily pri brouseni

Zadejte jmeno datoveho souboru
v adresari DATA, ze ktereho
budou data nactena :
Priklad : a:\data\ds.dat

- Vzdal. od konce obrobku pro urc. sily	[m]
- Merna rezna sila "kc1.1"	[Pa]
- Exponent Kienzleho vztahu "u"	[1]
- Pregeruv procesovy faktor "f _{BROU} "	[1]
- Korekcní faktor rychlost. brous. "K _{BROU} "	[1]

Zadejte jmeno datoveho souboru pro ulozeni
prave zadanych dat : Priklad : ds01.dat

VÝPOČET TEPLOTY PRI BROUSENI

Volba formy nactani potrebných údajů :

ručně z klávesnice

Vstupní hodnoty pro výpočet teploty při broušení

- Měrná řezná síla "kc1.1" [Pa]
- Exponent Kienzleho vztahu "u" [1]
- Pregeruv procesový faktor " f_{BROU} " [1]
- Korekční faktor rychlost. brous. " K_{BROU} " [1]
- Počet vyhodnocovaných hloubek [1]
- Počet vyhodnocovaných časových úseků [1]
- Hloubka pro vyhodnocení teploty v case [m]
- Registrace všech údajů o teplotě [1]
- Měrná tepelná kapacita br. kot. [J/kg.K]
- Hustota brousícího kotouče [kg/m³]
- Tepelná vodivost brous. kotouče [W/m.K]
- Měrná tepelná kapacita obrobku [J/kg.K]
- Hustota obrobku [kg/m³]
- Tepelná vodivost materiálu obrobku [W/m.K]

Zadejte jméno datového souboru pro uložení
právě zadáných dat : Příklad : dp01.dat :

z datového souboru

Zadejte jméno datového souboru
v adresáři DATA, ze kterého
budou data načtena :
Příklad : a:\data\dp.dat

VSECHNA DATA ZADANA

MATEMATICKÝ MODEL BROUSENI - PROBIHA VÝPOČET

TU V LIBERCI, FAKULTA STROJNI, KATEDRA OBRABENI A MONTAZE
MODELOVANI PROCESU BROUSENI

Cast A : zadane hodnoty

EXPER	- Poradove cislo experimentu	[1]	:	1
IA	- Pocet podelnych rovin obrobku	[1]	:	121
IB	- Pocet pricnych rovin obrobku	[1]	:	11
AS	- Sirkovy usek obrobku	[m]	:	9.9999999999996E-0006
BS	- Delkovy usek obrobku	[m]	:	4.000000000000E-0000
D	- Prumer brousicioho kotouce	[m]	:	2.5000000000000E-0001
ALFA	- Parametr rozlozeni zrn	[1]	:	2.0000000000000E+0000
EN	- Otacky brousicioho kotouce	[1/s]	:	5.0000000000000E+0001
VFI	- Rychlost posuvu obrobku	[m/s]	:	1.7000000000001E-0001
AE	- Hloubka zaberu	[m]	:	4.9999999999999E-0005
IPRC	- Pocet zdvihu pri brouseni	[1]	:	2
QLSTR1	- Stred, roztec zrn na povrchu BK	[m]	:	4.9999999999997E-0004
AMAX	- Maxim. sirka zrna dane zrnit.	[m]	:	4.0000000000000E-0004
QM11	- Par.pravd.vrch.uhlu zrna TAUSTR	[rad]	:	1.9000000000000E+0000
SIGMA1	- Par.norm.rozd.pr.vrch.uhlu zrna	[rad]	:	4.0000000000001E-0001
QM12	- Par.pr.polom.zaobl.zrna ROSTR	[m]	:	9.9999999999996E-0006
SIGMA2	- Par.norm.rozd.pr.pol.zaobl.zrna	[m]	:	9.9999999999993E-0007
CHYBA	- Povolena chyba iterace	[1]	:	1.0000000000000E-0010

IEND	-	Maximalni pocet kroku iterace	[1]	:	100
TEST1	-	Test 1	[1]	:	1
TEST2	-	Test 2	[1]	:	1
TEST3	-	Test 3	[1]	:	1
TEST4	-	Test 4	[1]	:	1

Zvoleny typ vypoctu :

URCENI POCU AKTIVNICH ZRN

VYPOCET DRSNOSTI POVRCHU

Zadane hodnoty

JROV	-	Porad. c. roviny pro urcov. Ra	[1]	:	3
------	---	--------------------------------	-----	---	---

VYPOCET PRUREZU NEDEFORMOVANE TRISKY

VYPOCET SLOZKY SILY PRI BROUSENI

Zadane hodnoty

UMS1	-	Vzdal.od konce obr.pro urc.sily	[m]	:	3.599999999999999E-0003
KONST1	-	Merny rezny odpor "kcl.1"	[Pa]	:	2.000000000000000E+0009
KONST2	-	Exponent Kienzleho vztahu "u"	[1]	:	1.000000000000000E-0001
KONST3	-	Pregeruv procesovy faktor"fBROU"	[1]	:	2.000000000000000E+0000
KONST4	-	Korekcní faktor rychl.br. "KBROU"	[1]	:	1.000000000000000E+0000

VYPOCET TEPLOTY PRI BROUSENI

Zadane hodnoty

KONST1	-	Merny rezny odpor "kcl.1"	[Pa]	:	1.780000000000000E+0009
KONST2	-	Exponent Kienzleho vztahu "u"	[1]	:	1.700000000000000E-0001
KONST3	-	Pregeruv procesovy faktor"fBROU"	[1]	:	2.000000000000000E+0000
KONST4	-	Korekcní faktor rychl.br. "KBROU"	[1]	:	1.000000000000000E+0000
HL_U	-	Pocet vyhodnocovanych hloubek	[1]	:	60
CAS_U	-	Pocet vyhodnocov.casovych useku	[1]	:	50
ZGR	-	Hloub.pro vyhodn.teploty v case	[1]	:	1.576999999999999E-0004
ZAZN1	-	Registr.vsech udaju o teplotě	[1]	:	0

CK - Merna tepel.kapacita br.kot. [J/kg.K] : 1.23090000000000E+0003
 ROK - Hustota brousiciho kotouce [kg/m3] : 2.02500000000000E+0003
 LAMK - Tepelna vodivost brous.kot. [W/m.K] : 1.81300000000000E+0000
 COB - Merna tepel.kapacita obrobku [J/kg.K] : 5.735899999999E+0002
 ROOB - Hustota obrobku [kg/m3] : 7.800000000000E+0003
 LAMOB - Tepel.vodivost mater.obrobku [W/m.K] : 4.646999999997E+0001

Cast B : vysledne hodnoty

Celk. cas modelovaneho procesu brouseni [s] : 8.864918041013E-0002

UDAJE O POCTU AKTIVNICH ZRN

 IPRC - Pocet zdvihu pri brouseni [1] : 2
 ICELK - Celk. pocet namodelovanych zrn [1] : 41649
 IAKTIV - Pocet aktivnich zrn [1] : 3926
 AKTIV - Procentual. podil aktivnich zrn [%] : 9.426396792245E+0000

UDAJE O DRSNOSTI POVRCHU

 Hodnoty drsnosti povrchu ve zvolene rovine
 JROV - Porad. c. roviny pro urcov. Ra [1] : 3
 IPRC - Pocet zdvihu pri brouseni [1] : 2
 RS[J] - Poloha stred. cary profilu drsn.[m] : 6.594361900225E-0007
 RA[J] - Prum. aritim. uchl. posuz. povr.[um] : 3.817790095618E-0001
 RZ[J] - Nejvetsi vyska profilu [um] : 2.283126397808E+0000

GRAF1 - vyskove souradnice obrobku a
 profil povrchu ve zvolene rovine JROV : 3

.....
 J = 3 K = 1 YH[J,K] = 1.3E-0006 *
 J = 3 K = 2 YH[J,K] = 4.8E-0007 *
 J = 3 K = 3 YH[J,K] = 1.4E-0007 *

J = 3	K = 4	YH[J, K]	=	1.5E-0006	.	*	.
J = 3	K = 5	YH[J, K]	=	2.2E-0007	.	.	.
J = 3	K = 6	YH[J, K]	=	3.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 7	YH[J, K]	=	4.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 8	YH[J, K]	=	2.0E-0007	.	*	.
J = 3	K = 9	YH[J, K]	=	8.9E-0007	.	.	.
J = 3	K = 10	YH[J, K]	=	5.7E-0007	.	*	.
J = 3	K = 11	YH[J, K]	=	3.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 12	YH[J, K]	=	5.2E-0007	.	*	.
J = 3	K = 13	YH[J, K]	=	3.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 14	YH[J, K]	=	1.5E-0006	.	.	.
J = 3	K = 15	YH[J, K]	=	2.2E-0007	.	*	.
J = 3	K = 16	YH[J, K]	=	4.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 17	YH[J, K]	=	4.2E-0007	.	*	.
J = 3	K = 18	YH[J, K]	=	1.2E-0007	.	*	.
J = 3	K = 19	YH[J, K]	=	1.2E-0007	.	*	.
J = 3	K = 20	YH[J, K]	=	4.5E-0007	.	*	.
J = 3	K = 21	YH[J, K]	=	1.0E-0006	.	*	.
J = 3	K = 22	YH[J, K]	=	3.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 23	YH[J, K]	=	5.5E-0007	.	*	.
J = 3	K = 24	YH[J, K]	=	3.9E-0008	.	*	.
J = 3	K = 25	YH[J, K]	=	7.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 26	YH[J, K]	=	5.0E-0007	.	*	.
J = 3	K = 27	YH[J, K]	=	3.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 28	YH[J, K]	=	1.8E-0007	.	*	.
J = 3	K = 29	YH[J, K]	=	6.7E-0008	.	*	.
J = 3	K = 30	YH[J, K]	=	2.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 31	YH[J, K]	=	3.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 32	YH[J, K]	=	2.7E-0007	.	*	.
J = 3	K = 33	YH[J, K]	=	1.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 34	YH[J, K]	=	7.8E-0007	.	*	.
J = 3	K = 35	YH[J, K]	=	2.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 36	YH[J, K]	=	1.9E-0007	.	*	.
J = 3	K = 37	YH[J, K]	=	2.4E-0007	.	*	.
J = 3	K = 38	YH[J, K]	=	1.1E-0007	.	*	.

J	=	3	K	=	74	YH[J,K]	=	1.1E-0006
J	=	3	K	=	75	YH[J,K]	=	1.3E-0006
J	=	3	K	=	76	YH[J,K]	=	3.3E-0007
J	=	3	K	=	77	YH[J,K]	=	1.5E-0006
J	=	3	K	=	78	YH[J,K]	=	1.2E-0006
J	=	3	K	=	79	YH[J,K]	=	7.3E-0007
J	=	3	K	=	80	YH[J,K]	=	5.5E-0007
J	=	3	K	=	81	YH[J,K]	=	8.7E-0008
J	=	3	K	=	82	YH[J,K]	=	1.9E-0007
J	=	3	K	=	83	YH[J,K]	=	4.8E-0007
J	=	3	K	=	84	YH[J,K]	=	6.4E-0009
J	=	3	K	=	85	YH[J,K]	=	7.0E-0007
J	=	3	K	=	86	YH[J,K]	=	1.2E-0007
J	=	3	K	=	87	YH[J,K]	=	1.0E-0006
J	=	3	K	=	88	YH[J,K]	=	4.3E-0007
J	=	3	K	=	89	YH[J,K]	=	5.0E-0007
J	=	3	K	=	90	YH[J,K]	=	2.3E-0006
J	=	3	K	=	91	YH[J,K]	=	1.8E-0006
J	=	3	K	=	92	YH[J,K]	=	5.7E-0007
J	=	3	K	=	93	YH[J,K]	=	1.1E-0006
J	=	3	K	=	94	YH[J,K]	=	2.9E-0007
J	=	3	K	=	95	YH[J,K]	=	4.4E-0007
J	=	3	K	=	96	YH[J,K]	=	2.1E-0007
J	=	3	K	=	97	YH[J,K]	=	2.3E-0007
J	=	3	K	=	98	YH[J,K]	=	8.6E-0008
J	=	3	K	=	99	YH[J,K]	=	1.3E-0006
J	=	3	K	=	100	YH[J,K]	=	9.0E-0007
J	=	3	K	=	101	YH[J,K]	=	8.0E-0007
J	=	3	K	=	102	YH[J,K]	=	1.1E-0006
J	=	3	K	=	103	YH[J,K]	=	1.2E-0006
J	=	3	K	=	104	YH[J,K]	=	9.9E-0007
J	=	3	K	=	105	YH[J,K]	=	1.3E-0006
J	=	3	K	=	106	YH[J,K]	=	1.4E-0006
J	=	3	K	=	107	YH[J,K]	=	5.0E-0007
J	=	3	K	=	108	YH[J,K]	=	4.6E-0007

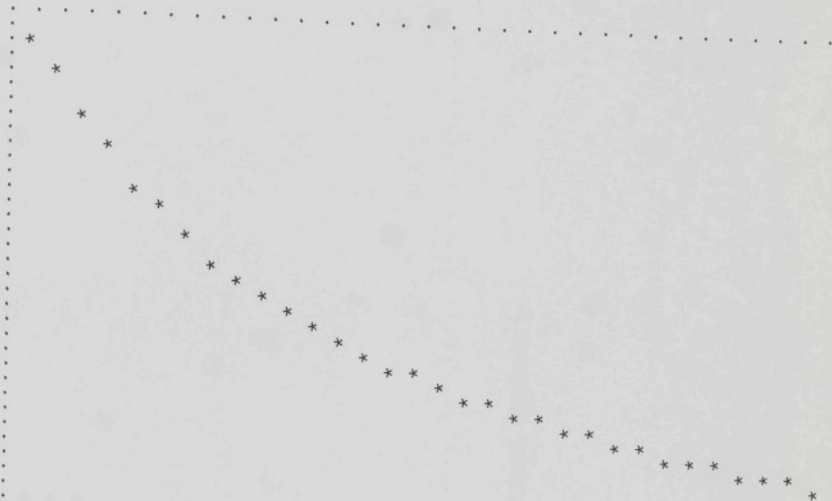
J = 3	K = 109	YH[J,K]	=	1.7E-0006	.	*	.
J = 3	K = 110	YH[J,K]	=	6.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 111	YH[J,K]	=	1.5E-0006	.	*	.
J = 3	K = 112	YH[J,K]	=	7.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 113	YH[J,K]	=	5.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 114	YH[J,K]	=	3.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 115	YH[J,K]	=	5.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 116	YH[J,K]	=	4.6E-0007	.	*	.
J = 3	K = 117	YH[J,K]	=	3.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 118	YH[J,K]	=	7.3E-0007	.	*	.
J = 3	K = 119	YH[J,K]	=	9.1E-0007	.	*	.
J = 3	K = 120	YH[J,K]	=	1.6E-0006	.	*	.
J = 3	K = 121	YH[J,K]	=	5.0E-0007	.	*	.

UDAJE O PRUREZU NEDEFORMOVANE TRISKY

Statistické údaje charakterizující příčný prurez trisky			
SPTSUMA-	Soucet prurezu trisek	[m2]	: 1.326470354575E-0007
SPTPRUM-	Prumerna hodnota prurezu trisek	[m2]	: 3.378681494078E-0011
SPTSO	Smerodatna odchylka	[m2]	: 4.987012940578E-0011
SPTMIN	Minimalni hodn. prurezu trisky	[m2]	: 3.760407141922E-0015
SPTMAX	Maximalni hodn. prurezu trisky	[m2]	: 2.222323566672E-0009

Histogram			
interv.ltr.:	2.2223198062643225E-0010 ;	*	odpovida cetnosti 1 az 431
Cetnost	3919	5	1
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
38	0	0	0
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0
51	0	0	0
52	0	0	0
53	0	0	0
54	0	0	0
55	0	0	0
56	0	0	0
57	0	0	0
58	0	0	0
59	0	0	0
60	0	0	0
61	0	0	0
62	0	0	0
63	0	0	0
64	0	0	0
65	0	0	0
66	0	0	0
67	0	0	0
68	0	0	0
69	0	0	0
70	0	0	0
71	0	0	0
72	0	0	0
73	0	0	0
74	0	0	0
75	0	0	0
76	0	0	0
77	0	0	0
78	0	0	0
79	0	0	0
80	0	0	0
81	0	0	0
82	0	0	0
83	0	0	0
84	0	0	0
85	0	0	0
86	0	0	0
87	0	0	0
88	0	0	0
89	0	0	0
90	0	0	0
91	0	0	0
92	0	0	0
93	0	0	0
94	0	0	0
95	0	0	0
96	0	0	0
97	0	0	0
98	0	0	0
99	0	0	0
100	0	0	0

CAS [sec]	PRIRUSTEK TEPLoty [st.C]
CAS = 0.00010000	TEPL = 235.770986
CAS = 0.00110000	TEPL = 228.726858
CAS = 0.00210000	TEPL = 215.239401
CAS = 0.00310000	TEPL = 203.619090
CAS = 0.00410000	TEPL = 193.787469
CAS = 0.00510000	TEPL = 185.355361
CAS = 0.00610000	TEPL = 178.014308
CAS = 0.00710000	TEPL = 171.539477
CAS = 0.00810000	TEPL = 165.766078
CAS = 0.00910000	TEPL = 160.570831
CAS = 0.01010000	TEPL = 155.859479
CAS = 0.01110000	TEPL = 151.558496
CAS = 0.01210000	TEPL = 147.609496
CAS = 0.01310000	TEPL = 143.965391
CAS = 0.01410000	TEPL = 140.587676
CAS = 0.01510000	TEPL = 137.444486
CAS = 0.01610000	TEPL = 134.509168
CAS = 0.01710000	TEPL = 131.759215
CAS = 0.01810000	TEPL = 129.175458
CAS = 0.01910000	TEPL = 126.741446
CAS = 0.02010000	TEPL = 124.442962
CAS = 0.02110000	TEPL = 122.267643
CAS = 0.02210000	TEPL = 120.204673
CAS = 0.02310000	TEPL = 118.244543
CAS = 0.02410000	TEPL = 116.378847
CAS = 0.02510000	TEPL = 114.600127
CAS = 0.02610000	TEPL = 112.901735
CAS = 0.02710000	TEPL = 111.277720
CAS = 0.02810000	TEPL = 109.722739
CAS = 0.02910000	TEPL = 108.231978
CAS = 0.03010000	TEPL = 106.801084
CAS = 0.03110000	TEPL = 105.426112



CAS = 0.03210000	TEPL = 104.103474	*
CAS = 0.03310000	TEPL = 102.829900	*
CAS = 0.03410000	TEPL = 101.602400	*
CAS = 0.03510000	TEPL = 100.418238	*
CAS = 0.03610000	TEPL = 99.274900	*
CAS = 0.03710000	TEPL = 98.170073	*
CAS = 0.03810000	TEPL = 97.101627	*
CAS = 0.03910000	TEPL = 96.067592	*
CAS = 0.04010000	TEPL = 95.066147	*
CAS = 0.04110000	TEPL = 94.095602	*
CAS = 0.04210000	TEPL = 93.154391	*
CAS = 0.04310000	TEPL = 92.241056	*
CAS = 0.04410000	TEPL = 91.354237	*
CAS = 0.04510000	TEPL = 90.492670	*
CAS = 0.04610000	TEPL = 89.655171	*
CAS = 0.04710000	TEPL = 88.840633	*
CAS = 0.04810000	TEPL = 88.048021	*
CAS = 0.04910000	TEPL = 87.276363	*
CAS = 0.05010000	TEPL = 86.524748	*

Maximalni prirustek teploty urcen
v celém rozsahu vysetrovanych hloubek pod povrchem soucasti

HLOUBKA	MAXIMALNI	
POD POVRCHEM	PRIRUSTEK	TEPLoty
[m]	[st.C]	
Z = 0.0000000001	TEPLMAX = 315.718896	*
Z = 0.0000100001	TEPLMAX = 315.101819	*
Z = 0.0000200001	TEPLMAX = 313.282309	*
Z = 0.0000300001	TEPLMAX = 310.351054	*
Z = 0.0000400001	TEPLMAX = 306.445445	*
Z = 0.0000500001	TEPLMAX = 301.732238	*
Z = 0.0000600001	TEPLMAX = 296.388682	*

Z = 0.0000700001
 Z = 0.0000800001
 Z = 0.0000900001
 Z = 0.0001000001
 Z = 0.0001100001
 Z = 0.0001200001
 Z = 0.0001300001
 Z = 0.0001400001
 Z = 0.0001500001
 Z = 0.0001600001
 Z = 0.0001700001
 Z = 0.0001800001
 Z = 0.0001900001
 Z = 0.0002000001
 Z = 0.0002100001
 Z = 0.0002200001
 Z = 0.0002300001
 Z = 0.0002400001
 Z = 0.0002500001
 Z = 0.0002600001
 Z = 0.0002700001
 Z = 0.0002800001
 Z = 0.0002900001
 Z = 0.0003000001
 Z = 0.0003100001
 Z = 0.0003200001
 Z = 0.0003300001
 Z = 0.0003400001
 Z = 0.0003500001
 Z = 0.0003600001
 Z = 0.0003700001
 Z = 0.0003800001
 Z = 0.0003900001
 Z = 0.0004000001
 Z = 0.0004100001

TEPLMAX = 290.585526
 TEPLMAX = 284.474395
 TEPLMAX = 278.180604
 TEPLMAX = 271.801131
 TEPLMAX = 265.406518
 TEPLMAX = 259.045095
 TEPLMAX = 252.748072
 TEPLMAX = 246.534426
 TEPLMAX = 240.414980
 TEPLMAX = 234.395462
 TEPLMAX = 228.478604
 TEPLMAX = 222.665470
 TEPLMAX = 216.956243
 TEPLMAX = 211.821105
 TEPLMAX = 207.601771
 TEPLMAX = 203.327106
 TEPLMAX = 199.010384
 TEPLMAX = 194.664166
 TEPLMAX = 190.300254
 TEPLMAX = 185.929660
 TEPLMAX = 181.562584
 TEPLMAX = 177.208415
 TEPLMAX = 172.875727
 TEPLMAX = 169.303018
 TEPLMAX = 165.726715
 TEPLMAX = 162.142775
 TEPLMAX = 158.557218
 TEPLMAX = 154.975763
 TEPLMAX = 151.581754
 TEPLMAX = 148.497591
 TEPLMAX = 145.409336
 TEPLMAX = 142.321053
 TEPLMAX = 139.271903
 TEPLMAX = 136.543002
 TEPLMAX = 133.811608

Z = 0.0004200001	TEPLMAX = 131.080731	*
Z = 0.0004300001	TEPLMAX = 128.503712	*
Z = 0.0004400001	TEPLMAX = 126.046694	*
Z = 0.0004500001	TEPLMAX = 123.589446	*
Z = 0.0004600001	TEPLMAX = 121.235328	*
Z = 0.0004700001	TEPLMAX = 118.997284	*
Z = 0.0004800001	TEPLMAX = 116.759233	*
Z = 0.0004900001	TEPLMAX = 114.646363	*
Z = 0.0005000001	TEPLMAX = 112.588392	*
Z = 0.0005100001	TEPLMAX = 110.553818	*
Z = 0.0005200001	TEPLMAX = 108.647591	*
Z = 0.0005300001	TEPLMAX = 106.741255	*
Z = 0.0005400001	TEPLMAX = 104.937911	*
Z = 0.0005500001	TEPLMAX = 103.160963	*
Z = 0.0005600001	TEPLMAX = 101.449564	*
Z = 0.0005700001	TEPLMAX = 99.784760	*
Z = 0.0005800001	TEPLMAX = 98.168373	*
Z = 0.0005900001	TEPLMAX = 96.601793	*
Z = 0.0006000001	TEPLMAX = 95.078870	*

Podminky pri vypoctu teploty [1] :
 IPR - Zdvih pri brouseni cislo 2
 F_F - Stredni velikost rezne sily [N] : 2.271915624317E-0002
 BD - Sirka aktivni casti br. kot. [m] : 1.199999999999999E-0003

Zavislost prirustku teploty na case
 ve zvolene hloubce pod povrchem soucasti

ZGR	-	Zvol.hlubka pod povrchem souc. [m]	: 1.576999999999999E-0004
CAS		PRIRUSTEK TEPLoty	
		[st.C]	
CAS = 0.00010000		TEPL = 1.349521	*

CAS = 0.00110000	TEPL =	1.309201	*
CAS = 0.00210000	TEPL =	1.232001	*
CAS = 0.00310000	TEPL =	1.165488	*
CAS = 0.00410000	TEPL =	1.109213	*
CAS = 0.00510000	TEPL =	1.060948	*
CAS = 0.00610000	TEPL =	1.018929	*
CAS = 0.00710000	TEPL =	0.981868	*
CAS = 0.00810000	TEPL =	0.948822	*
CAS = 0.00910000	TEPL =	0.919085	*
CAS = 0.01010000	TEPL =	0.892118	*
CAS = 0.01110000	TEPL =	0.867500	*
CAS = 0.01210000	TEPL =	0.844896	*
CAS = 0.01310000	TEPL =	0.824038	*
CAS = 0.01410000	TEPL =	0.804704	*
CAS = 0.01510000	TEPL =	0.786713	*
CAS = 0.01610000	TEPL =	0.769912	*
CAS = 0.01710000	TEPL =	0.754172	*
CAS = 0.01810000	TEPL =	0.739382	*
CAS = 0.01910000	TEPL =	0.725451	*
CAS = 0.02010000	TEPL =	0.712294	*
CAS = 0.02110000	TEPL =	0.699843	*
CAS = 0.02210000	TEPL =	0.688035	*
CAS = 0.02310000	TEPL =	0.676815	*
CAS = 0.02410000	TEPL =	0.666136	*
CAS = 0.02510000	TEPL =	0.655955	*
CAS = 0.02610000	TEPL =	0.646234	*
CAS = 0.02710000	TEPL =	0.636938	*
CAS = 0.02810000	TEPL =	0.628038	*
CAS = 0.02910000	TEPL =	0.619505	*
CAS = 0.03010000	TEPL =	0.611315	*
CAS = 0.03110000	TEPL =	0.603445	*
CAS = 0.03210000	TEPL =	0.595874	*
CAS = 0.03310000	TEPL =	0.588584	*
CAS = 0.03410000	TEPL =	0.581558	*
CAS = 0.03510000	TEPL =	0.574780	*

CAS = 0.03610000	TEPL =	0.568236	*
CAS = 0.03710000	TEPL =	0.561912	*
CAS = 0.03810000	TEPL =	0.555796	*
CAS = 0.03910000	TEPL =	0.549878	*
CAS = 0.04010000	TEPL =	0.544145	*
CAS = 0.04110000	TEPL =	0.538590	*
CAS = 0.04210000	TEPL =	0.533203	*
CAS = 0.04310000	TEPL =	0.527975	*
CAS = 0.04410000	TEPL =	0.522899	*
CAS = 0.04510000	TEPL =	0.517968	*
CAS = 0.04610000	TEPL =	0.513174	*
CAS = 0.04710000	TEPL =	0.508512	*
CAS = 0.04810000	TEPL =	0.503975	*
CAS = 0.04910000	TEPL =	0.499558	*
CAS = 0.05010000	TEPL =	0.495256	*

Maximalni prirustek teploty urcen
v celem rozsahu vysetrovanych hloubek pod povrchem soucasti

HLOUBKA POD POVRCHEM [m]	MAXIMALNI PRIRUSTEK [st.C]	TEPLoty
Z = 0.000000001	TEPLMAX =	1.807131
Z = 0.0000100001	TEPLMAX =	1.803599
Z = 0.0000200001	TEPLMAX =	1.793185
Z = 0.0000300001	TEPLMAX =	1.776407
Z = 0.0000400001	TEPLMAX =	1.754051
Z = 0.0000500001	TEPLMAX =	1.727074
Z = 0.0000600001	TEPLMAX =	1.696488
Z = 0.0000700001	TEPLMAX =	1.663271
Z = 0.0000800001	TEPLMAX =	1.628292
Z = 0.0000900001	TEPLMAX =	1.592267
Z = 0.0001000001	TEPLMAX =	1.555752

Z	=	0.0001100001	TEPLMAX	=	1.519150	*
Z	=	0.0001200001	TEPLMAX	=	1.482738	*
Z	=	0.0001300001	TEPLMAX	=	1.446695	*
Z	=	0.0001400001	TEPLMAX	=	1.411129	*
Z	=	0.0001500001	TEPLMAX	=	1.376102	*
Z	=	0.0001600001	TEPLMAX	=	1.341647	*
Z	=	0.0001700001	TEPLMAX	=	1.307780	*
Z	=	0.0001800001	TEPLMAX	=	1.274506	*
Z	=	0.0001900001	TEPLMAX	=	1.241828	*
Z	=	0.0002000001	TEPLMAX	=	1.212435	*
Z	=	0.0002100001	TEPLMAX	=	1.188284	*
Z	=	0.0002200001	TEPLMAX	=	1.163816	*
Z	=	0.0002300001	TEPLMAX	=	1.139108	*
Z	=	0.0002400001	TEPLMAX	=	1.114231	*
Z	=	0.0002500001	TEPLMAX	=	1.089252	*
Z	=	0.0002600001	TEPLMAX	=	1.064236	*
Z	=	0.0002700001	TEPLMAX	=	1.039239	*
Z	=	0.0002800001	TEPLMAX	=	1.014316	*
Z	=	0.0002900001	TEPLMAX	=	0.989517	*
Z	=	0.0003000001	TEPLMAX	=	0.969067	*
Z	=	0.0003100001	TEPLMAX	=	0.948597	*
Z	=	0.0003200001	TEPLMAX	=	0.928083	*
Z	=	0.0003300001	TEPLMAX	=	0.907560	*
Z	=	0.0003400001	TEPLMAX	=	0.887060	*
Z	=	0.0003500001	TEPLMAX	=	0.867633	*
Z	=	0.0003600001	TEPLMAX	=	0.849980	*
Z	=	0.0003700001	TEPLMAX	=	0.832303	*
Z	=	0.0003800001	TEPLMAX	=	0.814626	*
Z	=	0.0003900001	TEPLMAX	=	0.797173	*
Z	=	0.0004000001	TEPLMAX	=	0.781553	*
Z	=	0.0004100001	TEPLMAX	=	0.765919	*
Z	=	0.0004200001	TEPLMAX	=	0.750288	*
Z	=	0.0004300001	TEPLMAX	=	0.735537	*
Z	=	0.0004400001	TEPLMAX	=	0.721474	*
Z	=	0.0004500001	TEPLMAX	=	0.707409	*

Z = 0.0004600001	TEPLMAX =	0.693934	*
Z = 0.0004700001	TEPLMAX =	0.681124	*
Z = 0.0004800001	TEPLMAX =	0.668314	*
Z = 0.0004900001	TEPLMAX =	0.656220	*
Z = 0.0005000001	TEPLMAX =	0.644440	*
Z = 0.0005100001	TEPLMAX =	0.632795	*
Z = 0.0005200001	TEPLMAX =	0.621884	*
Z = 0.0005300001	TEPLMAX =	0.610972	*
Z = 0.0005400001	TEPLMAX =	0.600650	*
Z = 0.0005500001	TEPLMAX =	0.590479	*
Z = 0.0005600001	TEPLMAX =	0.580683	*
Z = 0.0005700001	TEPLMAX =	0.571154	*
Z = 0.0005800001	TEPLMAX =	0.561902	*
Z = 0.0005900001	TEPLMAX =	0.552935	*
Z = 0.0006000001	TEPLMAX =	0.544218	*
.....			

VYBRANE CHARAKTERISTIKY SIMULOVANEHO PROCESU BROUSENI

Charakteristika brousiciho kotouce :

Prumer brousiciho kotouce	[mm]	:	250.0000
Sirka brousiciho kotouce	[mm]	:	1.3000
Maximalni sirka zrna dane zrnitosti	[mm]	:	0.4000
Stredni vzdalenost zrn brusiva	[mm]	:	0.5000
Prum. velik. vrcholoveho uhlu zrna brus.	[st.]	:	108.7118
Prum. velik. polomeru zaobljeni zrna brus.	[um]	:	9.9998

Charakteristika obrobku :

Sirka obrobku	[mm]	:	1.2000
Sirkovy usek obrobku	[mm]	:	0.0100
Delka obrobku	[mm]	:	4.0000
Delkovy usek obrobku	[mm]	:	0.4000

Rezne podminky :

Rezna rychlost	39.2699
Rychlost posuvu stolu brusky	10.2000
Pracovni (radialni) zaber	0.0500

UDAJE O KONTROLE ZADANYCH HODNOT

Hodnoty vseh zadanych velicin jsou ve stanovenem rozsahu.

***** KONEC VYPOCTU *****