

DK 621.924.5.001.2

Uvodne raziskave brušenja s krmiljeno primično silo

FRANC RÖTHEL — JANEZ PEKLENIK

1 Uvod

Vse raziskave na področju brušenja so ta čas usmerjene v večjo proizvodnost, zmanjšanje stroškov za obdelavo, večjo natančnost obdelave in bolj kvaliteto površino obdelovanca. Prvi dve zahtevi dosegamo s kvaliteto in optimalno avtomatizacijo brusilnih procesov, drugi dve pa s pravilno izbiro brusilnega postopka in pravilnim definiranjem vplivnih veličin. Večjo proizvodnost dosegamo še s povečanjem hitrosti brušenja. V tej smeri so v zadnji dobi mnogo raziskovali na TH Aachen [24], a brez poglobljenih študij opisov procesa s pomočjo korelacijske teorije brušenja, ki je za konvencionalni način brušenja že razvita [20, 14]. Večja hitrost brušenja terja boljše mehanske kvalitete brusa, ki jih naša industrija že dosega, tako da je smotno, da te dane možnosti tudi izkoristimo.

Brušenje pomeni enega najbolj zamotanih problemov pri postopku orezavanja. To predvsem zato, ker vpliva na brusilni proces veliko činiteljev: vpliv materiala obdelovanca, velikost, oblika, vezava in sestava brusnih zrn, trdota, premer, debelina, vzdolžno in prečno podajanje in vrtilna hitrost brusa; togost in natančnost obdelovalnega sistema, hlajenje procesa in drugi. Skoraj vsi našteti činitelji so bili določeni in opisani že dosedaj precej matematično in eksperimentalno [1].

Število vplivnih količin je torej zelo veliko in vse so med seboj v funkcionalni zvezi. Splošno veljavnih računskih vrednosti ni bilo mogoče določiti samo po presoji posameznih veličin. Zadnja leta je mnogo raziskovalcev posvetilo tovrstno delo fizikalnim definicijam brušenja. Tega tehnološkega procesa že v začetku razvoja ni bilo mogoče obravnavati enako kakor struženje ali frezanje, ker se je že pri prvih raziskavah pojavilo nekaj veličin, ki jih je mogoče zajeti le statistično. Obsežno delo na tem področju je bilo opravljeno na TH Aachen med delovanjem J. Peklenika na tej šoli.

Že Salje je raziskoval problematiko brušenja po drugi strani. Zanimal ga je končni rezultat — kakšna hrapavost in kakšne sile se pojavljajo v določenih pogojih rezanja. Pri tem je analiziral tudi ekonomsko stran brušenja v zvezi s kvaliteto površine. Z velikim številom poskusov je s pomočjo dimenzionalne analize dognal nekaj splošno veljavnih sklepov. Hrapavost površine je izrazil kot funkcijo hitrosti obdelovanca in brusa, velikosti pristavljanja brusa, števila prebrusenj in toplotne prevodnosti, tangencialno silo pa kot funkcijo strižne trdnosti in prereza odrezka pri različnih kvalitetah brusa. Dosedanje raziskave so pokazale, da ima brusilni postopek, ki je eden najpomembnejših finalnih postopkov v obdelovalni tehniki, zelo majhno storilnost. Odbrušeni volumen obdelovanca je razmeroma majhen v enoti časa v primerjavi z drugimi postopki orezavanja. Raziskave v smeri večanja storilnosti so zadevale na težavne probleme, med katerimi je eden najbolj odločujočih — izboljšanje kvalitete površine in dodelava preciznih geometričnih oblik obdelovanca pri povečani hitrosti brušenja. Večja hitrost brušenja je združena z boljšo mehansko kvaliteto brusa. Ta pa je dalje v zvezi s stroški proizvodnje. Ker ima brus stohastično zgradbo, nastajajo posebno pereči problemi pri notranjem brušenju in avtomatiziranju te operacije.

Že od prvih začetkov raziskav pri brušenju je znano, da je storilnost brušenja odvisna od hitrosti primika brusa k obdelovancu. Žal pa kaže hitrejši primik negativne posledice. Sile rezanja se povečajo, površinska hrapavost obdelovanca narašča. Brus sam se hitreje obrablja, njegova obstojna doba pa se zmanjša. Vrhu tega se na površini obdelovanca pojavljajo ožigi in risi.

Velikega pomena je ugotovitev, da se s povečano obodno hitrostjo zmanjša hrapavost površine obdelovanca in se manjšajo tudi rezalne sile, medtem ko se povečuje obstojna doba brusa. Že leta 1935 je dognal Krug, da večja obodna hitrost zmanjšuje obrabo brusa in pritisk brusa k obdelovancu.

S problemom povečane obodne hitrosti brušenja so se v zadnjem času pečali tudi na TH Aachen [24]. Pri tem jim je uspelo približati storilnost brušenja normalni storilnosti struženja ali frezanja, pri tem pa obdržati karakteristične kvalitete brušenja pri obdelovancih. Ugotovljeno je bilo, da je možno povečati storilnost brušenja samo s povečanjem obodne hitrosti. Pri tem velja pogoj, da se kvaliteta obdelovanca ne zmanjša. Pri normalnem brušenju je bila povečana obodna hitrost brusa do 90 m/s. Pri tem se je čas brušenja zmanjšal do 95 %. Nadaljnja raziskava bo morala iti še za tem, da bi ves brusilni cikel potekal v eni delovni fazi. Slaba stran brušenja z veliko obodno hitrostjo pa ostaja še vedno slabša možnost za fino obdelavo v določenih primerih in zmanjšana uporabnost za manjše serije.

Brušenje zagotavlja veliko natančnost obdelave, geometrično enakomernost površine in majhno hrapavost kot posledico velikega števila majhnih odrezkov — odrezanih z veliko hitrostjo. Z dobrimi brusilnimi pogoji dosegamo s konvencionalnim brušenjem natančnost obdelave v velikosti 1,0 ... 3,0 μm .

Razen tega lahko z brušenjem obdelujemo izredno trde materiale. Brusilna zrna sama imajo namreč veliko trdoto in trdotno odpornost in s tem sorazmerno lastno obstojno dobo.

Hkrati lahko obdelujemo veliko ploskev. Zaradi tega je storilnost postopka velika. Nanjo vplivata hitrost oboda brusa, ki znaša pri modernih strojih do 50 m/s, in obdelovanca do 80 m/min [1].

Obrusen izdelek mora imeti zdravo površino, tj. površino brez ožigov in mikro zarez. To jamči za majhno obrabo in dolgo življenjsko dobo obdelovanca.

2 Doseženi razvoj brušenja s krmiljeno silo

V Heald Machine Company v ZDA je bil po Hahnu preskušen in upeljan nov postopek notranjega brušenja s krmiljeno konstantno primično silo [29, 30]. Z uvedbo tega postopka sta se kvaliteta in storilnost zelo povečali [30], vendar pri njem ni posebej uporabljena in s krmiljenjem definirana zadnja faza brušenja — iziskovanje. Prav ta pa bistveno vpliva na kvaliteto površine. Zato je primerno, da to možnost raziščemo. Na fakulteti za strojništvo imamo na uporabo brusilni stroj starejšega tipa (Bryant), ki ga je možno preurediti in predelati, da bo ustrezal novim potrebam. Hkrati je potrebno misliti na možnosti za merjenje vseh vplivnih veličin, da se bo dal kasneje postopek brušenja fizikalno definirati in opisati. V preteklih letih je bil stroj tolikanj popravljen, da bi bili lahko na njem brusili po klasičnem načinu. Za nov postopek pa je potrebno stroju prigraditi novo krmiljenje brusilnih faz, ki vodijo posebej definirano brušenje in iziskovanje, ter regulacijski krog, ki s povratno zvezo regulira primično silo.

Notranje brušenje z vzdolžnim podajanjem uporabljamo za majhne in srednje obdelovance (zobnike, puše, izvrtine itd.). Pri tem se navadno obdelovalec in brus vrtila v nasprotnih smereh. Brus mora biti v premeru manjši od obdelovanca, da lahko brusi v izvrtini. Njegov premer znaša 3/4 do 4/5 premera izvrtine, ki jo brusimo [2]. Zelo kvaliteten in enakomeren izdelek po dolžini brušenega obdelovanca daje brus, ki reže s celotno čelno površino, kar pomeni, da naj bo širina brusa večja od globine izvrtine. Tega

seveda ni mogoče doseči pri vseh oblikah obdelovanca. Hkrati z vzdolžnim podajanjem smo imeli doslej globinsko podajanje po premeru brusa.

Novi način brušenja s krmiljeno silo v enačbi (1) postavlja podajanje a v odvisnosti od postavitvene sile F_y

$$a = f(F_y) \quad (1)$$

v kateri je tudi sila sama odvisna od časa.

$$F_y = F_y(t) \quad (2)$$

Brus sam nima neprekinjenega rezalnega roba. Zaradi tega ostajajo po prehodu brusne ploskve po obdelovancu na površini rege in neravnosti, ki jih poravnamo z naslednjim prehodom brusa po obdelovalni površini. Končne neravnosti poravnavamo s povečanjem števila dotikov brusnih zrn z obdelovalno površino. To dosegamo z večjim številom prehodov ali z zmanjšanjem prečnega podajanja. Če povečamo število prehodov, se poveča tudi število zares. Pri konvencionalnem brušenju smo le-te odpravili z večkratnim prehodom po površini brez prečnega podajanja. Ta del operacije smo poimenovali »iziskrovanje« (Ausfunken, Sparking out), ker z njim odvezujemo zelo majhne delčke materiala in tako gladimo površino. Vpliv prečnega podajanja je že precej raziskan [1], kar velja tudi za rezalno silo F_z [1].

Razen že odrejenih zahtev za postopek brušenja želimo pri krmiljenem stroju doseči tudi to, da bodo imele izvrtine, ki jih brusimo, natančno geometrično obliko v dopustnih tolerancah. Jasno je, da ni mogoče dobiti neke absolutne idealne rešitve, želimo pa le, da bi bile slučajnostne napake čim manjše. Postopek lahko izboljšujemo, če odstranjujemo izvore in vzroke, ki so privedli do napak. Vzroke lahko iščemo v vhodnih merah obdelovanca ali pa v brusilnih strojih samih. Možnost za izboljšanje postopka pri notranjem brušenju je v literaturi že obravnavana [29, 30]. Oglejmo si sliko 1!

Brus je pritrjen na vreteno. Povrh tega, da se obdelovalec in brus vrtila, se vreteno še podaja v obdelovalec. Podajalna naprava ni popolnoma toga in zato prihaja do elastične deformacije gredi. Vidimo, da brus v obdelovancu dejansko zaostaja za vretenom toliko, kolikor znaša deformacija. Na sliki 1 je to ravno enako razliki $y_d - y_c$. Deformacija gredi je odvisna od sile, s katero pritiskamo brus v obdelovalec. Pri klasičnih strojih za notranje brušenje je hitrost primika vretenjaka stalna. S tem povzročamo na stičnem mestu med brusom in obdelovancem različno silo. Elastičnost take naprave povzroča neenakomerno podajalno silo.

Pri strojih, ki so sedaj v uporabi, povzroča vhodna napaka oz. odstopke tudi odstopke obdelovanca na izhodu iz stroja. To si lahko ogledamo na sliki 2, ki kaže odvisnost giba y od časa t .

Črta OD kaže gib brusilnega vretena od začetne do končne mere obdelovanca po obdelavi, seveda s po-

gojem, če je stroj popolnoma tog. Pri točki D prične mo z iziskrovanjem. Tu se podajalno gibanje ustavi in se nato konča v E. Podajalna naprava pa ni nikoli popolnoma toga, kakor smo že omenili. Zato brus za poplačane toliko, kolikor znaša elastična deformacija.

Dejansko pot brusa kaže krivulja OCF. Od O do C je bilo podajalno gibanje, od C do F, se pravi v času iziskrovanja pa je brus odvezoval le s silo, ki jo je dajala naprava zaradi lastne elastične deformacije. Vidimo, da še v končni točki F ne dosegamo želene velikosti. Pri odmiku podajalne naprave je ostalo še vedno nekaj elastične deformacije, ki je nismo popolnoma izkoristili. Čeprav bi bili proces časovno programirali tako, da bi bili šli s točke F v E, tega za vsak obdelovalec ne bi bili dosegli. Tukaj namreč variirata trdota obdelovanca in ostrina brusa, ki je lahko pri vsakem kosu, ki ga izdelujemo, drugačna. Na končni odstopke ima velik vpliv tudi začetno odstopanje mer obdelovanca. Tak primer kaže na sliki 2 druga krivulja O'CF'. V tem primeru je bila očitno izvrtina v obdelovancu že večja in je podajalno gibanje doseglo obdelovalec kasneje. Zato se je ves proces pričel pri O'. Podajanje se je končalo pri C'. Odvzeli smo nekaj več materiala kakor v prvem primeru. Sila, s katero je bil brus pritisnjen na obdelovalec, je bila sedaj drugačna. To se pozna v vsej fazi iziskrovanja od C' do F'. Odstopke kosa na izhodu je bil drugačen kakor v prejšnjem primeru. To pot smo nekaj bliže točki E. Razliko med obdelovanima kosoma pa vidimo v razliki med F in F'. Razlika med E in F' pa kaže preostalo deformacijo brusilnega vretena.

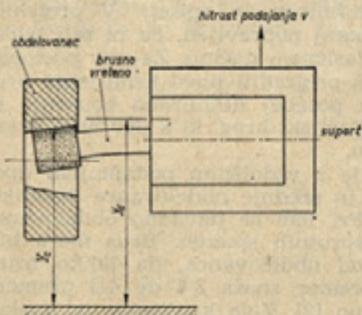
Razen odstopka v izmeri, ki smo ga obravnavali doslej, dobimo še slučajnostne odstopke v premočrtnosti vrtanja. V obdelovancu se pojavlja koničnost zaradi kotnega odmika brusa od obdelovanca med obdelavo. Vreteno se pod silo upogne in s tem brus nagne proti obdelovancu. Različna sila, ki je nastala med obdelavo, daje različen rezultirajoč kot pri obdelanem obdelovancu.

Iz že povedanega se vidi, da je kotni odklik brusa sorazmeren z normalno silo brušenja. Ti odkliki se od obdelovanca do obdelovanca spreminjajo tako, kakor se je spreminjala vhodna dimenzija obdelovanca.

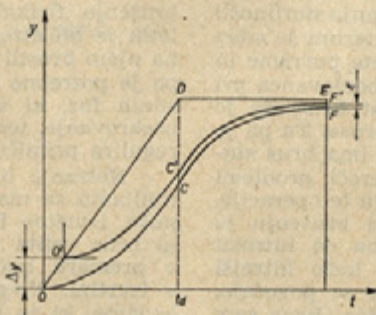
Da bi odpravil končni odstopke mere obdelovanca, je Hahn izdelal posebno metodo za obdelovanje z brušenjem s krmiljeno silo. To metodo opisuje slika 3.

Brusilno vreteno je pritrjeno na suport, ki nima trenja. Vreteno lahko rotira okoli točke P. Točka A omejuje velikost slike. Z omejitvijo v točki B pa kontroliramo koničnost, ki je nastala zaradi upogiba vretena, C je dušilka v sistemu, ki duši nihanje. Če imamo v sistemu stalno deformacijo, ki je posledica stalne sile, tedaj že premik suporta daje končno mero na obdelovancu. Ciklus ene obdelave je časovno lahko različen.

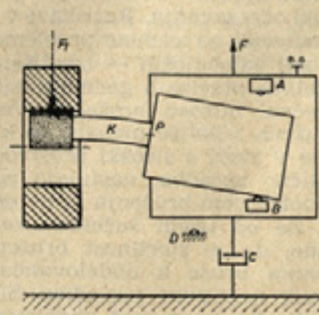
Končna mera in koničnost na obdelovancu pa je zato stalna. Koničnost in končna mera sta tako ne-



Sl. 1. Navaden način brušenja



Sl. 2. Odvisnost prečnega podajanja brusa od časa



Sl. 3. Brusilni sistem prof. Hahna

odvisni od variacij vhoda. Za praktičen izkoristek tega postopka je potreben posebno izdelan stroj. Hahn opravlja brušenje v enem samem ciklusu, zato iziskrovanje v tem postopku ne prihaja posebej do veljave.

3 Nov način brušenja z regulirano silo

Dosedanji postopek lahko izboljšamo tako, da na klasičnem stroju, kakršen je npr. Bryant, uvedemo regulirano krmiljeno silo. Ker klasični stroji nimajo možnosti za kotni odmik brusilnega vretena, bi pri njih ne mogli odpraviti koničnosti. Zato razdelimo delovni ciklus na dva dela. V prvem delu brušenja s konstantno silo dosegamo zaokroženje obdelovanca s silo in hitrostjo, ki daje največji učinek. S tem dosežemo končno mero obdelovanca, nato pa v ciklusu iziskrovanja, ki je opravljen z manjšo silo, odpravimo koničnost v obdelovancu in hkrati izboljšamo kvaliteto površine, kakršno daje normalno iziskrovanje. Sila (pri iziskrovanju) mora biti tako majhna, da praktično ne more deformirati brusilnega vretena. Sila je namreč premo sorazmerna z deformacijo vretena. Potrebo po preskusu ciklusa iziskrovanja je utemeljil Peklenik [18].

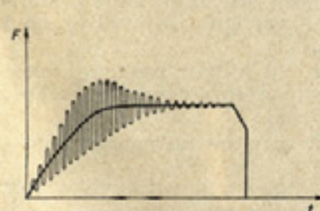
V konvencionalnem notranjem brušenju se elastična energija odstopka vretena uporablja, da se dobi zaželen oblika in se izboljša površinska hrapavost obdelovanca. Ob koncu brusilnega ciklusa nimamo več primičnega podajanja a , temveč se brusno vreteno zadržuje na končni meri. Brus še nadalje odvzema del površine. S tem se sprošča elastična energija vretena in sila, ki pritiska brus k obdelovancu, se manjša. S tem se manjša tudi globina odvzema in se dosega efekt poravnavanja površine. Jasno je, da tako zadnji del obdelovalnega procesa ni vođen dovolj dimenzij-sko definirano. Novi postopek bo ta del lahko definirano natančneje. Tega dela dosedanj razvoj brušenja s krmiljeno silo ni obravnaval. Na sliki 4 vidimo potek sile po dosedanjem postopku [33].

Da lahko vpeljemo proces, ki ga prikazuje naslednja slika 5, moramo na brusilnem stroju Bryant prigraditi regulacijski in krmilni sistem.

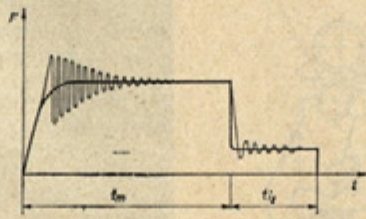
Suport na okroglem nosilcu lahko obdržimo takšen, kakršnega je imel stroj dosedaj. Na novo je potrebno izdelati brusilni vretenjak, ki mora vsebovati enoto za otipavanje sile. Potrebno ga je le prilagoditi obstoječemu stroju oz. suportu. Če si ogledamo sliko 6, ki shematično ponazarja sistem podajanja brusa k obdelovancu, opazimo bistveno razliko med Hahnovim podajanjem in podajanjem v naši izvedbi.

Medtem ko se pri stroju Heald lahko suport zavrti tako, da kompenzira ukrivljenost vretena, tega pri Bryantu ni mogoče uresničiti, ne da bi se spuščali v popolnoma novo konstruiranje stroja. Ukrivljenje bo pri nas ostalo, koničnost obdelovanca pa lahko odpravimo v fazi iziskrovanja. Velikostni red tega odstopka mora biti torej zajet v iziskrovanju. Ta predpostavka pa nas vodi do poenostavljene konstrukcije strojev ozir. poenostavljenih gibanj suportov, ki bi jih izdelali za obdelavo po tem postopku.

Suport (slika 6) premikamo z regulirano silo F_B , ki jo daje hidravlika. Primarno silo dobimo s prenosom, ki ga sestavlja suport na stično ploskev med obdelovancem in brusom.



Sl. 4. Potek pritiskne sile pri Hahnovem postopku brušenja v odvisnosti od časa



Sl. 5. Predpostavljene potek pritiskne sile pri novem postopku brušenja v odvisnosti od časa

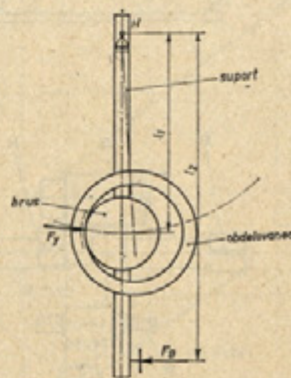
Za regulacijo te sile je potreben poseben regulacijski sistem, za delo v več fazah pa nov krmilni sistem.

4 Osnovni problemi regulacije in način rešitve

Namen regulacije je vzdrževati primarno silo na stroju Bryant na predpisani vrednosti. Silo F_y stalno merimo in primerjamo s predpisano veličino. Vsak odstopok F_y je potrebno korigirati. Vzrok nezaželenih sprememb so motnje, ki jih povzročajo motilne veličine. Predpisano vrednost veličine F_y ureja in predpisuje vodilna veličina.

Pri brušenju s konstantno silo se na stičnem mestu med brusom in obdelovancem pojavljajo vibracije slučajnostne narave. Zaradi neregularnosti brusilnih elementov na brusu normalna sila ni absolutno konstantna. V tem sistemu nastaja kot njegova posledica šum.

Oglejmo si sistem nekoliko podrobneje! V zadnjem času je bila razvita in raziskana korelacijska teorija brušenja [20]. Pri tem so bili v pretresu vplivi fizikalnih in geometričnih lastnosti brusilnih orodij v naostrenem in obrabljenem stanju kakor tudi pristavitve brusa k obdelovancu na obliko korelacijskih funkcij, funkcij aritmetičnih srednjih vrednosti oz. spektrov razsipavanja s pomočjo informacijske teorije. Obdelovalni postopek brušenja je analitično definiran s prenosnimi funkcijami fizikalnega sistema »brusilno orodje — obdelovanec — brusilni proces — hrapavost površine — obraba orodja«. Definirana je tudi rezalna sposobnost brusov glede na prenosno funkcijo sistema. Raziskani so bili rezalni prostor brusa kot vhodna veličina in obe izhodni veličini — hrapavost površine in spremembe v obliki rezalnega prostora zaradi obrabe. Naš sistem, ki ga obravnavamo, ima v prvem delu grobega brušenja predvsem namen okroglejstva, v drugem pa izboljšanje površine obdelovanca in odpravo koničnosti. Regulacijski sistem naj torej v prvem delu okrogli, v drugem pa gladi površino. Medtem ko prvi del lahko še ujamemo s klasično regulacijo, je to pri drugem delu, ko iziskujemo, nemogoče. Obdelovanec in površina brusa imata stohastično obliko, ki povzroča odmik brusa ozir. deformacijo brusilnega vretena in s tem stohastični potek v rezalnem prostoru. Raziskave elementarnih profilov na brusilnih orodjih z različnimi velikostmi zrn, trdotami, vrstami ipd., so pokazale, da je proces profila stacionaren in ergodičen [20]. Pogoji, da uporabljamo pri ostrenju brusov optimalne pogoje in se pri pripravi orodja v rezalnem prostoru ne pojavljajo sistematični odstopki, je tako izpolnjen. Ker imamo optimalne pogoje ugotovljene, predvsem velikost ostrilnega podajanja in pristavitve, lahko računamo z izpolnitvijo pogoja ergodičnosti. Pri klasičnem iziskrovanju se število profilov, ki učinkujejo na glajenje površine, kontinuirno zmanjšuje.



Sl. 6. Shema suporta stroja Bryant

Za to sta dva razloga, in sicer zmanjšanje hrapavosti in elastične deformacije. Sila se pri tem postopku polagoma manjša. Iz navedenega izhaja, da lahko obravnavamo postopek brušenja kot stacionaren in ergodičen stohastični proces. Vprašanje je le, kako se bo obnašal naš proces v delovni fazi iziskovanja v naših pogojih. To je treba še raziskati. Ker vseh potrebnih podatkov nimamo, ni mogoče vnaprej preračunati potrebnih osnov za vodenje regulacijskega procesa z vplivom šumov.

Zato je potrebno zasnovati tak sistem regulacije, ki omogoča kasnejšo vgraditev korekturnih členov in filtrov.

Težava pri izračunavanju tega sistema je tudi v pomanjkanju opreme. Razen tega tudi še ni instrumentov, ki bi omogočali pretvarjanje stohastičnega signala in računanje korelacijskih funkcij z elektronskim računalnikom. Sicer je možno posneti stohastičen potek sile pri izhodu in ga kasneje preračunavati ročno, kar bi pa bilo v danih možnostih in pogojih prezaudno.

Po vsem prednjem se lahko odločimo za hipotezo, da se bo stohastični signal primične sile po amplitudi zmanjševal proti koncu iziskovanja pri konstantni sili in bo lahko definiriral željeno površino. Zato bomo za zdaj prigradili regulacijskemu krogu in krmilnemu sistemu omejevalni elektronski rele, ki bo pri predpisani amplitudi ustavil proces iziskovanja. Pri tem grozi sicer nevarnost, da bodo ostale nepredvidene motnje v sistemu večje in bodo to funkcijo preglasile. V tem primeru procesa ne bomo mogli ustaviti po maksimaliziranih amplitudah, temveč ga bo potrebno omejiti časovno ali pa iskati kakšno drugo rešitev. Po izvedenih meritvah in vrednostnih rezultatih bomo lahko pozneje optimirali naš proces.

5 Rekonstrukcija stroja Bryant 16-0-16

Brusilni stroj Bryant 16-0-16 je namenjen za notranje brušenje. Sicer pa ga lahko uporabljamo tudi za plano brušenje s skledastim brusom kakor tudi za čelno brušenje.

Oglejmo si njegovo grobo shematično sliko (sl. 7)!

Osnovo stroja sestavlja postelja (1). Na levi strani postelje je vretenjak (2) z nastavkom za pritrditev

vpenjalne naprave (4) za obdelovance. Vretenjak je votel in omogoča dovod hladilne tekočine. Stroj poganjamo z elektromotorjem s prenosom (3). Elektromotor je gibljivo pritrjen na levo stran postelje, z njim lahko pritegujemo jermen. Na desni strani postelje je podpora ležaja, ki rabi hkrati za okrov (5) krmilnega sistema hidravlike. Na njem je krmilno kolo (7) s segmenti za nastavljanje vzdolžnega podajanja suporta. Suport (6) podajamo hidravlično, za nastavitve giba pa imamo tudi možnost ročnega postavljanja. Glavna ročica (8) ima štiri lege za poglavitne faze dela: brušenje, ostrenje brusa, mirovanje in hitri gib nazaj. Razen vrtilnega štirifaznega premika lahko ročico pomaknemo tudi v vzdolžni smeri. Ta gib spreminja smer podajanja. Vzdolžno hitrost suporta nastavljamo s krmilnim ventilom. Enako vlogo ima drug manjši ventil, s katerim nastavljamo hitrost med ostrenjem brusa. Suport je trdno vpet na valjast nosilec (9), ki se pri vzdolžnem podajanju pomika z njim. Valjasti nosilec leži na dveh dvodelnih ležajih (10), v katerih odpravljamo zrak s pritisknim vijakom. Proti abrazivnim vplivom sta ležaja zavarovana s harmonikastimi pušami (11). Na suport je pritrjen elektromotor (12), ki rabi za pogon brusilnega vretena (13). Med motorjem in brusilnim vretenom je prenos (14) s klinastimi jermeni. Valjasto vodilo je zaščiten s teleskopom. Za ostrenje brusa je potrebna naprava, ki omogoča avtomatičen primik brusa k diamantu v posebni fazi dela. Posebnost stroja je hitro vzdolžno odstavljanje brusa od obdelovanca. Poleg stroja je nameščen rezervoar za hladilno olje. Mazanje glavnih ležajev je izvedeno pod tlakom, mazanje delovnega vretena in brusilnega vretena pa s kapalkami.

Da bi dosegli hitrost rezanja brusa 50 m/s, je bilo potrebno rekonstruirati prenos od elektromotorja za pogon vretena brusa do vretena. Vreteno je krajše in togo ter je na njem prigraden sistem za otipavanje primične sile F_y . Dokonstruirali smo potrebno vpenjalno napravo, da lahko vpenja nov obdelovanec — preskušane v izmerah $\phi 160/100 \times 20$. Obdelovanec je iz jekla Č 4732. Prilagojen je merilnim podatkom Hahna, tako da je možna primerjava [29]. Predelali smo napravo za ostrenje brusov tako, da bo primik diamanta izmerljiv. Primični mehanizem za suport smo izdelali tako, da je mogoče z njim regulirati silo. Večji vrtilni hitrosti je treba prilagoditi brus v izmeri $\phi 80/32 \times 32$. Izmera je vzeta glede na obdelovanec po praktični enačbi [2] $D_b = (3/4 \dots 4/5) D_o$.

Stroju je treba dodati nov regulacijski sistem. Izdelani so nov sistem hidrostatičnih ležajev, dinamometer in drobna oprema.

6 Koncept in konstrukcija naprave za merjenje primične sile

Pri konstrukciji dinamometra in brusilnega vretena smo se skušali držati osnovnih načel, ki so jih določili raziskovalci pri dosedanjem razvoju dinamometra [37, 5, 19] in še zahtev, ki so specifične za naš primer.

— Majhne merne poti, ki dajo veliko statično togost. Dinamometer sam naj čimmanj vpliva na koničnost brušene izvrtine.

— Velika občutljivost in hitrost reakcije, tako da bo mogoče meriti stohastične spremembe sile. To zahteva majhno vztrajno maso.

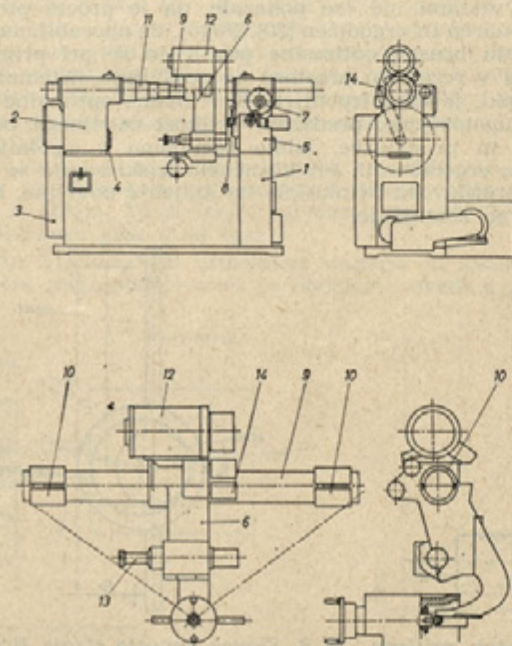
— Velika natančnost meritev na zahtevanem območju 0 ... 100 kp.

— Velika dinamična togost, dovolj velika lastna frekvenca, da se izključi pojav resonance.

— Možnost za enostavnejše in čim hitrejše umerjanje.

— Majhno število potrebnih pomožnih naprav.

— Zanesljivo delovanje.



Sl. 7. Brusilni stroj Bryant 16 — C — 16

Način merjenja	Merilna pot [μm]	Merljiva frekvenca [Hz]	Natančnost meritve %
1 mehaničen	200 2500	30 ... 40	± 1,0 ... 3,0
2 hidravlični	100 ... 500	2 ... 5 150 ... 500	± 1,0 ... 3,0
3 pnevmatičen	1000	—	—
4 električen	1 ... 3	30000 ... 50000	± 2,0
piezoelektričen	—	—	—
kapacitiven	40	30000	—
trdni polprevodniki	8	20000	± 1,0 ... 3,0
tekočinski polprevodniki	300	200	—
merilni trakovi	—	50000	± 1,0 ± 3,0
induktivni postopek	600	5000	± 1,0
magnetoelastični postopek	5	20000	—

Sl. 8. Primerjalna tabela dajalnikov

- Varno delovanje.
- Enostavno ravnanje z merilnimi napravami in možnost za hitro vrednotenje ter registracijo.
- Možnost za izdelavo v inštitutu in uporabo fakultetnih instrumentov.
- Majhni stroški za izdelavo.

Po proučeni literaturi [5, 19, 37, 38, 39] smo se odločili, da privzamemo osnovno zamisel J. Peklenika o dinamometru, ki je bil izdelan na TH Aachen.

Deformacije v dinamometru merimo z induktivnim dajalnikom. Dinamometer je možno namestiti tako, da kažeta po dva dajalnika vedno samo eno komponento sile z majhno napako. Izdelali smo ga tako, da lahko z njim merimo le primično silo. Ima pa pred-

videne elastične nosilce za merjenje rezalne sile. Pri tem bo potrebno dodati le dajalnike.

Za induktivne dajalnike smo se odločili po študiju [19] že zbranih podatkov z upoštevanjem razvoja induktivnih dajalnikov pri podjetju Hottinger. V tabeli (sl. 8) so zbrane razmere in lastnost posameznih načinov merjenja. Odločitev je utemeljena tudi zaradi tega, ker imamo dajalnike in merilne ojačevalnike na uporabo pri fakulteti.

Velika vrtilna hitrost brusnega vretena $v = 12\,000\text{ min}^{-1}$ je nalagala posebno obravnavo. Klasični sistem mazanja z mastjo za tolikšne vrtilne hitrosti ne zadošča. Zato smo se odločili, da uporabimo uvoženo napravo za mazanje z oljno meglo tovarne SKF z označbo 722000. Potreben tlak zraka za napajanje naprave dobimo s posebnim kompresorjem (domače izvedbe).

Dinamometer smo umerjali z utežmi. Umerjalno območje je znašalo od 0 do 41 kp, kar zadošča za naš preskušaneec in prve preskuse. Pri umerjanju nismo upoštevali, da deluje že sila lastne teže vretena v vertikalni smeri. Umeritev je rabila predvsem za to, da ugotovimo histereza odstopanja, raztros in linearnost meritve po vsej skali. S tem, ko smo ugotovili linearnost, lahko izberemo tudi drugo izhodišče — ničelno točko. To ustreza namenu, saj suport med obdelavo ni v ravnotežni legi in ga je potrebno v tej legi držati s silo F_{hs} . Referenci, ki jo bo dal dinamometer, je potrebno pri regulaciji sile prišteti še silo za odmik suporta na delovno mesto. Umerjanje dinamometra je prikazano na sliki 9.

Dinamometer je treba na stroju ponovno umeriti, ker ležijo dajalniki vodoravno in je tako spremenjena ničelna točka. Tabela umerjenja je prikazana na sliki 10.

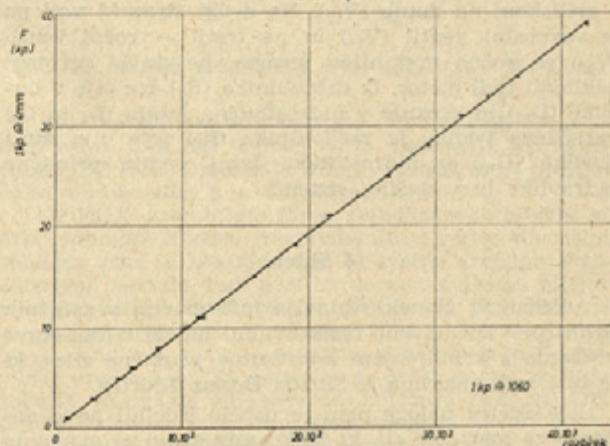
7 Uležanje vodil

Hidrostatični ležaji morajo prenašati sile reakcij zaradi lastne teže in sile reakcij pri obdelavi, ki so dinamične narave. Rezultatna reakcij teče skozi ležaj vedno pod določenim kotom. Zato smo se odločili za ležajne blazinice, ki podpirajo ležaj pod kotom 45° . Tak ležaj bolje prestreza stranske sile. V primeru s klasičnim ležajem smo zmanjšali tudi dolžino blazinice na škodo večjega potrebnega tlaka v ležaju. Razlog za to je deformacija gredi, ki sicer res ni velika, vendar smo morali upoštevati težavnost dobrega centriranja — soosenja ležajnih skodelic v starem stroju, pri katerem ležišč ni mogoče ponovno obdelati. Valjasto vreteno smo v ta namen prebrusili.

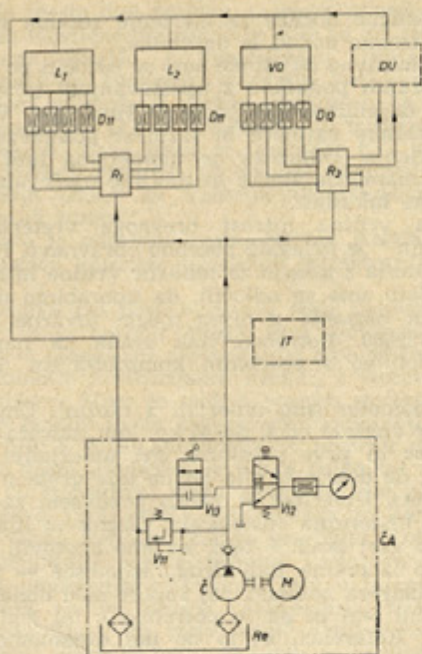
Hidrostatične ležaje na valjastem vodilu, na vodilu hidravlike in dušilko napaja skupen vir. Ugotovili smo, da potrebujemo hidravlični agregat, ki bo dal pri tlaku 12 atn pretok 2 l/min.



Sl. 9. Umerjanje dinamometra



Sl. 10. Odvisnost odklona na ojačevalniku od potisne sile. Merilno območje: 100 ... 500 x. Lega: x 0,1 ind. Vrednost skale: 1,0.



Sl. 11. Hidravlična shema hidrostatskih ležajev

Temu primerno smo po nomogramih dimenzionirali dovodne cevi [46]. Načelna hidravlična shema za hidrostatske ležaje je prikazana na sliki 11.

Pri domačem proizvajalcu (Prva petoletka, Trstnik) smo izbrali hidravlični pogonski agregat, ki je večji, kakor bi bil potreben. Pred očmi smo imeli možnost, da bomo uporabili agregat tudi še za druge namene v laboratoriju. Cena agregatov je ne glede na podatke praktično enaka. Povrh tega so tudi podatki nezanesljivi, saj nobeden izmed teh agregatov nima podanih osnovnih karakteristik. Zato smo nam ni znano lastno nihanje pritiska agregata. Predvideli smo, da bomo po potrebi priključili na omrežje hidravlike izenačevalnik tlaka (IT). Čeprav se bo olje v našem sistemu močno grelo, menimo, da bo zasnovani (normirani) rezervoar zadovoljil, ker je predviden za večje pretočne količine.

Iz črpalke (C) priteče olje prek samozapornega povratnega ventila v razdelilnika R_1 in R_2 . Na stranski veji je priključen manometer, ki ga lahko aktiviramo s pritiskom na gumb (V_{12}). Na drugi stranski veji pa je varnostni ventil (V_{11}) in na tretji — ročni ventil (V_{13}) za ročno prekinitev pogona, ne da bi pri tem odklopili tudi motor. Iz razdelilnika (R_1) gre olje v dušilke (D_{11}) in skoznje v hidrostatske ležaje (L_1 in L_2) valjastega vodila. Iz razdelilnika (R_2) teče olje skozi dušilke (D_{12}) v hidrostatski ležaj vodila primične hidravlike in v dušilni sistem.

8 Sklep

Pričujoči članek sestavlja informacijo o začetnih delih pri znanstveno-raziskovalni nalogi »Raziskave brušenja s krmiljenjem konstantne primične sile«, ki je bila sofinancirana iz Sklada Borisa Kidriča.

V okviru naloge nam je uspelo izdelati novo napravo za merjenje sil, ki lahko rabi samo za merjenje ali pa tudi za krmiljenje in regulacijo obdelovalnega procesa.

LITERATURA

- [1] Maslov, E. N.: Grundlagen der Theorie des Metallschleifens. Verlag Technik, Berlin, 1932.
- [2] Feldmann, P.: Handbuch des Schleifers. Dr. Max Jäneck, Verlagbuchhandlung, 1942.
- [3] Kleinschmidt, B.: Das Schleifen in der Metallbearbeitung. Verlag von M. Krayn, Berlin, 1936.
- [4] Peklenik, J.: Das Schleifen von Hartmetallbestückten Werkzeugen. Industrie-Anzeiger, 1967, št. 20, s. 277—282.
- [5] Peklenik, J.: Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. TH Aachen, 1957.
- [6] Peklenik, J.: Untersuchungen über das Verschleißkriterium beim Schleifen. Industrie-Anzeiger, 1958, št. 27, s. 397—402.
- [7] Peklenik, J.: Beitrag zur Bestimmung der Spandicke beim Schleifen. Industrie-Anzeiger, 1959, št. 55.
- [8] Peklenik, J.: Prispevek k teoriji brušenja. Strojniški vestnik, 1959, št. 4/5.
- [9] Peklenik, J.: Untersuchungen der Härte von Schleifkörpern. Industrie-Anzeiger, 1960, št. 28, s. 431—436.
- [10] Peklenik, J.: Über einige Gesetzmäßigkeiten des Aufbaues von Schleifkörpern als Zerspanungswerkzeuge. Industrie-Anzeiger, 1960, št. 46, s. 705—711.
- [11] Peklenik, J.: Beitrag zur Zähigkeitsprüfung von Schleifkörpern. Industrie-Anzeiger, 1960, št. 46, s. 712—714.
- [12] Peklenik, J.: Beitrag zur Härteprüfung von Schleifwerkzeugen. Microtecnic 1960, št. 5, 6.
- [13] Peklenik, J.: Versuchsergebnisse zur Ausbildung der Schneidelemente an Schleifwerkzeugen. Industrie-Anzeiger, 1961, št. 1929—1936.
- [14] Peklenik, J.: Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process. Trans. ASME, 1964, vol. 86, s. 97—106.
- [15] Peklenik, J.: Grinding Fundamentals. ASME, New York, 1963, s. 201—208.
- [16] Peklenik, J.: Contribution to the Theory of Surface Characterisation. CIRP Annalen 1964.
- [17] Peklenik, J.—R. Lane—M. C. Shaw: Comparison of Static and Dynamic Hardness of Grinding Wheels. ASME Paper No. 63—Wa 134.
- [18] Peklenik, J.: Diskusijski pripevek k objavi R. S. Hahn-Controlled Force Grinding. ASME Paper 63-Wa-21.
- [19] Peklenik, J.: Raziskave h korelacijski teoriji brušenja. Strojniški vestnik, 1965, št. 4/5, str. 1—10.
- [20] Thalemann, M.: Härteprüfung von Schleifkörpern. Fertigungstechnik und Betrieb, 1964, zvezek 9, s. 560—564.
- [21] Opitz, H.—Peklenik, J.: Einige Bemerkungen zur Bestimmung elastischer Eigenschaften von Schleifwerkzeugen. Werkstattstechnik, 1965, zvezek 6, s. 274—276.
- [22] Opitz, H. in sodelavci: Untersuchung des Schleifvorganges bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und Zerspanleistungen. Westdeutscher Verlag — Köln und Opladen, 1968.
- [23] Jakimov, A. V.: Isledovanie temperatur v zone šlifovanja. Vestnik mašinstrojenja 1964/8, s. 64—66.
- [24] Piegart, H.: Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsfehler beim Innenschleifen. Fertigungstechnik und Betrieb, 1966, zvezek 1, s. 23—30.
- [25] Yokogawa, K.: Einfluss der Wärmeverformung bei Rundschleifmaschinen auf die Schleifgenauigkeit. Werkstatt und Betrieb, 1966, zvezek 9, s. 635—640.
- [26] Hahn, R. S.: Controlled-Force Grinding — A New Technique for Precision Internal — Grinding. Journal of Engineering for Industry, 1964, avg. s. 287—293.
- [27] Hahn, R. S.: Some Characteristics of Controlled Force Grinding. Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [28] Ölebensschmierung von Wälzlager. SKF, TSP 5298, Reg. 7425.
- [29] Hahn, R. S. in sodelavci: On the Selection and Design of Grinding Cycles. Pergamon Press, Oxford 1966.
- [30] Soldatnikov, W.: Einführung in die statistische Dynamik linearer Regelungssysteme. VEB Verlag Technik Berlin, 1963.
- [31] Himmler, C. R.: Untersuchungen an druckregelnden Servoventilen und Triplex — Redundanzsystem, Ölhydraulik und Pneumatik, 1968, št. 3, s. 87—95.
- [32] Profos, P.: Regulirovanie parosilovych ustanovok. Založba Energija, Moskva, 1967.
- [33] Salbroh—Balcer: Pribori dlja izmerenja sil rezanja i kritičnih momentov na metalorezuših stankah. Mašgiz 1967.
- [34] Theoretische Betrachtungen zur Gestaltung von Schleifspindeln, Kugellagern oder Rollenlagern. Die Kugellager — Zeitschrift 1961, št. 1, s. 11.
- [35] Peklenik, J.: Der Mechanismus des Schleifens und die Überschleifzahl. Industrie-Anzeiger 1958, št. 1, s. 10—17.
- [36] Peklenik, J.: O pravilnem ostranju brusov. Strojniški vestnik, 1957, št. 4/5, s. 88—99.
- [37] Vogelpohl, G.: Betriebssichere Gleitlager. Springer Verlag, Berlin, 1958.
- [38] Chaimowitsch: Ölhydraulik. VEB — Verlag Technik, Berlin 1963.
- [39] Panzer—Beitler: Arbeitsbuch der Ölhydraulik. Krausskopf Verlag, Mainz 1965.
- [40] Fuller, D.: Theorie und Praxis der Schmierung.

Naslov avtorjev:

dipl. ing. Franc Röthel
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani
prof. dr. ing. Janez Peklenik
University of Birmingham