UDK 621.923

Prispevek k opisu procesa notranjega brušenja

FRANC ROETHEL

1. Uvod

Metoda za opis brusilnega procesa z analizami vhodnih in izhodnih naključnostnih funkcij za profile brusov in površine obdelovancev je bila že obravnavana [1]. Izdelana je bila na osnovi korelacijske teorije brušenja, ki jo je razvil J. Peklenik [2]. Rezultati raziskav so pokazali, da lahko z varianco in avtokorelacijsko funkcijo opišemo stanje površine brusa in obdelovanca. Potek raztrosa naključnostnih funkcij, ki popisujejo površine, smo v naših raziskavah določili z analizo varianc serije površin. Do raztrosa je prišlo zaradi različnih oblik površin na raznih merilnih mestih in običajnih naključnih odstopanj. Srednja vrednost avtokorelacijskih funkcij je definirala poprečno stanje oblike površine pri določenih obdelovalnih razmerah. S podobnimi načini so bili vrednoteni tudi že drugi obdelovalni procesi [3]. Normalizirano avtokorelacijsko funkcijo površine lahko opišemo tudi s koeficienti prilagojenih krivulj za srednje vrednosti avtokorelacijskih funkcij [4]. Avtokorelacijske funkcije in njihovo srednjo vrednost lahko pretvorimo s Fourierjevo transformacijo v spektre moči. Za natančnejše vrednotenje je potrebno vsako avtokorelacijsko funkcijo posebej transformirati in nato ponovno iskati srednjo vrednost spektrov [1]. V dosedanjih raziskavah smo skušali definirati parametre brusilnega procesa, na katerega bi se lahko oprli pri avtomatiziranju. Raziskave so bile opravljene na stroju za brušenje s krmiljeno konstantno silo [5]. Krmilni sistem je bil za ta stroj posebej razvit [6]. Zamisel o krmiljenju sile je bila že znana, vendar pri izdelavi obdelovalnih strojev v svetu bolj malo izkoriščana [7]. Postopek doslej izkorišča le ameriški izdelovalec obdelovalnih strojev Heald. Brusilni postopki in metode dela pa so bili že podrobno določeni [8]. Vse to delo pa ne omogoča adaptivnega krmiljenja. Za adaptivno krmiljenje bi bilo treba določiti večje število parametrov, po katerih bi lahko vodili proces z računalnikom. Pristop k ocenjevanju potrebnih parametrov smo opisali v dosedanjih objavah o raziskovalnem delu, njihov del pa bomo opisali v tem članku.

2. Teoretični pristop k opisu nekaterih parametrov v brusilnem procesu

Brusilni proces lahko obravnavamo kot transformacijski tehnični sistem. V prvi aproksimaciji imamo lahko proces za linearen. Na vhodu in na izhodu procesa smo vrednotili površine brusa in obdelovanca z avtokorelacijskimi funkcijami in s spektri moči [1]. Vse meritve smo izvedli *on line*, to se pravi s sprotnim merjenjem procesa na računalniku in vrednotenjem vhodnih in izhodnih veličin. Zato je bilo treba izdelati paket programov, ki tako merjenje in hkratno vrednotenje omogočajo [9, 10]. Programi so bili izdelani po teoriji statistične matematike v jeziku FORTRAN IV za vrednotenje rezultatov in za snemanje rezultatov [11, 12, 13] v ASSEMBLERJU.

Za opis obdelovalnega procesa rabimo vrsto podatkov o stroju, orodju in obdelovancu, ki jih v okviru ene ozke raziskave ne moremo raziskati. Zato smo se pri naših preizkusih omejili na opis geometričnih lastnosti brusa pri vhodu v proces in analizo geometrijskih lastnosti brusa ter obdelovanca pri izhodu iz procesa. Transformacije v procesu smo opisali z modulom povečanja.

Za krmiljenje brusilnega procesa moramo spoznati vpliv velikosti primične sile na lastnosti izhoda. Pri podani referenci ima uporabljeni krmilni sistem posebno zanko, ki preprečuje spremembo sile pod vplivom naključnih odstopkov med procesom. Referenco lahko nastavimo ročno ali tudi prek računalnika za optimalne pogoje dela. Računalnik bi lahko dodajal spremembe sile ustrezno obdelovancu, ki prihaja v proces. Silo lahko spremeni računalnik med posameznimi delovnimi fazami in celo med procesom. Zato pa morajo biti podane karakteristične funkcije sistema pri različnih razmerah dela med procesom. Pogoji so definirani z obrabo brusa, generiranjem površine in neokroglostjo obdelovanca.

Stvarna pritisna sila brušenja je podana v vodilni funkciji*

$$F_y = F_{ref} + \Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 + \Delta F_4 \qquad (1)$$

F_{ref} pomeni osnovno referenčno silo. Dobimo jo lahko iz banke podatkov po številnih preizkusih in po dosedanjih izkušnjah pri klasičnem brušenju. Razumljivo je, da bo treba tako banko šele ustvariti.

Tej sili bo moral računalnik dodati še razlike sile, ki nastanejo zaradi različnih razmer pri vhodu v proces. Te razlike so: ΔF_1, ki pomeni spremembo sile zaradi obdelovalnih lastnosti (tudi trdote) materiala obdelovanca

$$\Delta F_1 = \Delta F_1 (H_o) \qquad (2)$$

ΔF_2, ki pomeni spremembo sile zaradi trdote uporabljenega brusa

$$\Delta F_2 = \Delta F_2 (H_b) \qquad (3)$$

ΔF_3, ki pomeni spremembo sile, nastale zaradi različnih vstopnih površin brusa

$$\Delta F_3 = \Delta F_3 (S_{bi}) \qquad (4)$$

* Pregled simbolov in enot veličin — gl. str. 130!

Računalnik bo moral upoštevati še želeno hrapavost obdelovanca in obrabo brusa pri izhodu. Povezavo med hrapavostjo pri vhodu in izhodu dajo frekvenčno-odgovorne funkcije oziroma njihov karakteristični del — modul povečanja. Vpliv hrapavosti obdelovanca pri izhodu na primično silo zapišemo

$$\Delta F_4' = \Delta F_4' (S_{oo}) \quad (5)$$

in vpliv obrabe brusa pri izhodu

$$\Delta F_5' = \Delta F_5' (S_{bo}) \quad (6)$$

V prvi fazi brušenja želimo imeti optimalni odjem, ki ga narekujejo drugi parametri obdelave. Sprememba sile zaradi optimalnega odjema znaša:

$$\Delta F_6' = \Delta F_6' (a) \quad (7)$$

V drugi fazi brušenja želimo doseči želeno hrapavost. Velikost sile pa je lahko odvisna še od časa trajanja druge faze

$$\Delta F_7' = \Delta F_7' (t_t) \quad (8)$$

Modul povečanja je razmerje med izhodnim in vhodnim spektrom moči pri tehničnem sistemu

$$|H(f)|^2 = \frac{S_{yy}}{S_{xx}} \quad (9)$$

Zato smo ga uporabili tudi za opis transformacije površin v brusilnem procesu. Kvadratni koren modula povečanja da faktor povečanja $|H(f)|$. Obe vrednosti pa ne vsebujeta faktorja faze, ki bi bil potreben za popoln opis frekvenčno-odzivne funkcije. Tega faktorja v našem primeru nismo uporabili, ker nima fizikalnega pomena. Za karakterizacijo sprememb površin da modul povečanja zadovoljiv opis. Izračunane vrednosti modula povečanja so odločilno pomembne za nastavitev modelne funkcije, ki opiše celoten proces, in po katerem bi se ravnal adaptivno krmiljeni stroj. Računalnik lahko primerja dejansko merjeno stanje v procesu z modelno funkcijo in ugotavlja odstopanja. Odstopanja dajo naprej signal vodilni funkciji, ki vodi proces po želeni poti.

Vodilna funkcija mora voditi v procesu vse parametre, ki jih krmilimo. Vodilno funkcijo za primično silo smo že podali v enačbi (1). Člen ΔF_4 bo odvisen od modula povečanja. Zato lahko pišemo

$$\Delta F_4 = \Delta F_4 (|H(f)|^2) \quad (10)$$

ali

$$\Delta F_4 = \Delta F_4 (\Delta F_4', \Delta F_5', \Delta F_6', \Delta F_7') \quad (11)$$

kjer vsebuje ΔF_4 vse potrebne informacije, ki so bile podane v enačbah 5, 6, 7 in 8.

Za adaptivno krmiljenje potrebujemo primerne vrednosti modula povečanja pri določenih frekvencah, ki tvorijo vrhove. Le-te je mogoče filtrirati in uporabiti. S tem prihranimo spomin računalnika. Pri določanju modelne in vodilne funkcije ne smemo pozabiti, da jih uporabljamo v dveh fazah dela pri optimalnem odjemu in pri iziskrenju oziroma glajenju površine. Za vsako fazo obdelave potrebujemo druge vrednosti.

Modelno funkcijo bomo morali sestaviti z medsebojnimi zvezami med parametri, ki opisujejo brusilni proces:

$$\zeta = \zeta (H_o, H_b, S_{bi}, |H(f)|^2, t_t, a, F_y, v_b, v_o, s) \quad (12)$$

Poleg navedenih odvisnosti bo modelna funkcija lahko odvisna še od variance ali drugih statističnih parametrov, s katerimi smo ali bomo dodatno karakterizirali posamezne parametre v procesu.

Pri vhodu v proces imamo parametre povezane s korelacijsko funkcijo in funkcijo spektra moči R_{xxb} in S_{xxb} profila naostrenega brusa. Pri tem se kakovost materiala bistveno ne spreminja in jo imamo lahko za konstantno. Vstopna površina obdelovanca se neprenehoma prilagaja spremembam oblike rezalnega profila brusa in je zato nimamo za stalen samostojen vhod. Pri izhodu iz procesa zopet opišemo površine obrabljenega brusa z njegovo korelacijsko funkcijo R_{yyb} in funkcijo spektra moči S_{yyb}. Prav tako predstavlja izhod iz procesa površina obdelovanca, ki jo opišemo z avtokorelacijsko funkcijo R_{yyo} in funkcijo spektra moči S_{yyo}.

Povezavo med vhodom in izhodom sistema dajejo enačbe za brus

$$S_{yyb}(f) = |H_b(f)|^2 S_{xxb}(f) \quad (13)$$

$$S_{xyb}(f) |H_b(f)| S_{xxb}(f) \quad (14)$$

in za obdelovanec

$$S_{yyo}(f) = |H_{nbo}(f)|^2 S_{xxb}(f) \quad (15)$$

$$S_{xyo}(f) |H_{nbo}(f)| S_{xxb}(f) \quad (16)$$

Pri tem pomeni $H_b(f)$ frekvenčno-odzivno funkcijo transformacije brusa med procesom brušenja. Frekvenčno-odzivna funkcija vsebuje faktor povečanja in faktor faze. Za obravnavo in opis procesa zadošča poznavanje faktorja povečanja $|H_b(f)|$ oziroma modula povečanja $|H_b(f)|^2$, ker faktor faze ne da fizikalnega parametra, ki bi bil za vodenje procesa pomemben.

Enako pomeni $H_{nbo}(f)$ frekvenčno odzivno funkcijo transformacije površine obdelovanca v odvisnosti od vhodnega profila naostrenega brusa. Za opis transformacije se lahko tudi tu zadovoljimo z modulom povečanja $|H_{nbo}(f)|^2$.

Oba modula $|H_b(f)|^2$ in $|H_{nbo}(f)|^2$ sta odvisna od časa trajanja procesa in od sile, ki med procesom deluje v brusilnem prostoru. Tako dobimo funkciji, ki ju bomo uporabili v modelni funkciji:

$$\varphi_b(t_t) = |H_b^t(f, t_t)|^2 \text{ za } F_y = \text{const} \quad (17)$$

$$\varphi_{nbo}(t_t) = |H_{nbo}^t(f, t_t)|^2 \text{ za } F_y = \text{const} \quad (18)$$

Po enačbah (17) in (18) je modul povečanja $|H(f)|^2$ funkcija dveh spremenljivk, frekvence in časa brušenja t_t. Enačbi (16) in (17) sta veljavni samo za brušenje s konstantno silo F_y = const. Pri tem smo dobili odvisnost povečanja spektra moči od frekvence in od časa trajanja procesa (enačbi 17 in 18) pri podani sili.

Za proces si lahko izberemo tudi konstanten čas trajanja in si ogledamo transformacije v procesu pri različnih primičnih silah, tako dobimo drugo funkcijo za model:

$$\psi_b(F_y) = |H_b^F(f, F_y)|^2 \text{ za } t_t = \text{const} \quad (19)$$

$$\psi_{nbo}(F_y) = |H_{nbo}^F(f, F_y)|^2 \text{ za } t_t = const \quad (20)$$

Zopet smo dobili funkciji dveh spremenljivk, ki sta odvisni od frekvence in primične sile. Tako dobimo odvisnost povečanja spektra moči od frekvence in od velikosti sile F_y pri danem času.

Enačb 17, 18, 19, 20 teoretično ni mogoče določiti zaradi kompleksnosti spremenljivk. Njihov opis dobimo le s preizkusom.

Popolnejši opis procesa dobimo s hkratnim upoštevanjem spremembe modula po času in sili. To pa je že popolnejša oblika za postavitev modela

$$\vartheta_b(t_t, F_y) = |H_b^{tF}(f, t_t, F_y)|^2 \quad (21)$$

$$\vartheta_{nbo}(t_t, F_y) = |H_{nbo}^{tF}(f, t_t, F_y)|^2 \quad (22)$$

Funkcijsko vrednost $|H(f, t_t, F_y)|^2$ smo s preizkusom približno določili za en primer brušenja pri danih razmerah v okviru naših raziskav. To pa glede na količino podatkov še ne zadošča za popolno modelno funkcijo. Vodilna funkcija pa mora vsebovati več parametrov

$$\xi = \xi(F_y, a, s, v_b, v_o, t_t) \quad (23)$$

Po meritvah pri prihodnjih raziskavah bo treba počasi zajeti ves obdelovalni sistem z vsemi pomembnimi parametri. Nekatere vrednosti za ξ npr. a, s, itd. je že danes mogoče predpostaviti.

Za natančnejši opis procesa in obravnavo dejanskega stanja *med procesom* smo v zadnjem času izračunali še modula povečanja med spektri moči za površino obdelovanca in obrabljenega brusa pri konstantni primični sili in pri različnih časih brušenja v enakih razmerah dela. Vrednost modula povečanja je

$$\varphi_{obo}(t) = |H_{obo}^t(f, t_t)|^2 \text{ za } F_y = \text{const} \quad (24)$$

Prav tako smo računsko določili tudi modul povečanja za obrabljen brus nasproti površini obdelovanca pri konstantnem obdelovalnem času in različnih primičnih silah. Za ta primer dobimo izraz po enačbi

$$\psi_{obo}(F_y) = |H_{obo}^F(f, F_y)|^2 \text{ za } t^t = \text{const} \quad (25)$$

Očitno je, da smo pri enačbah 24 in 25 predpostavljali kot vhod v proces dejansko stanje površine brusa med obdelavo in kot izhod dejansko stanje površine obdelovanca med obdelavo. Torej je bil v tem primeru vhod površine brusa spremenljiv in bi ga bilo treba med procesom stalno meriti. Žal z današnjimi merilnimi postopki to še ni izvedljivo, ker še ne poznamo sistema za natančno merjenje stanja površine brusa med obdelavo — v času procesa brušenja v obeh fazah dela. Pri tem imamo za prvo fazo največji mogoči odjem, za drugo fazo pa izdelavo želene površine obdelovanca po kakovosti. Ti dve fazi dela smo upoštevali že v vodilni in modelni funkciji ξ in ζ s parametri a, v_b, v_o, s, t_t, ki jih je treba za vsako fazo dela posebej določiti.

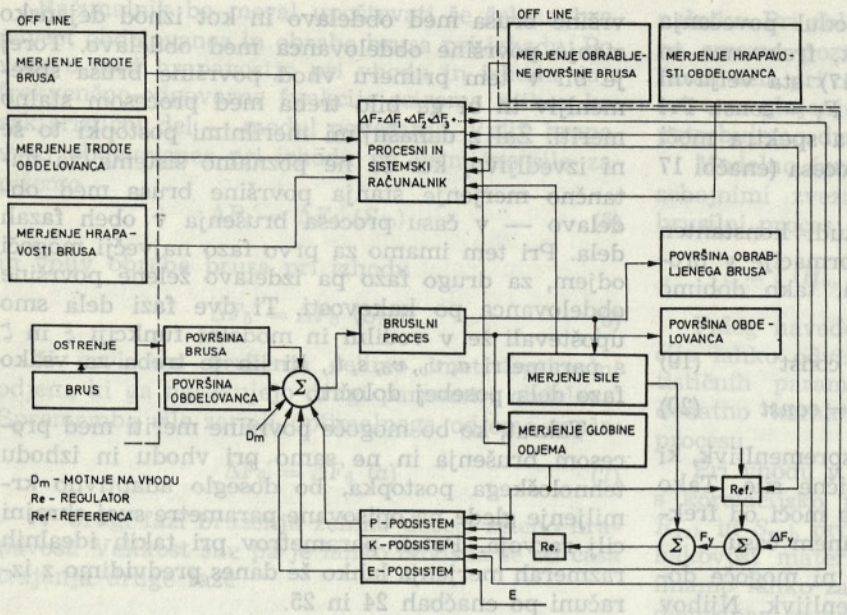
Takrat, ko bo mogoče površine meriti med procesom brušenja in ne samo pri vhodu in izhodu tehnološkega postopka, bo doseglo adaptivno krmiljenje glede na opisovane parametre svoj skrajni cilj razvoja. Potek parametrov pri takih idealnih razmerah merjenja lahko že danes predvidimo z izračuni po enačbah 24 in 25.

Že krmiljenje z upoštevanjem začetnih pogojev pri delu za proces in želenega učinka — želene površine obdelovanca — pomeni veliko podatkov in s tem drage naprave za obdelavo informacij. Zagotavlja pa z največjo mogočo verjetnostjo pravilno samostojno strojno vodenje procesa. Posebno glede na kakovosti brusa, ki se ne spreminjajo v ozkih tolerancah, je te vrste adaptacija procesa nujno potrebna.

Še v primeru, da bo mogoče meriti površino med procesom, je vprašljivo, če bodo stroji za obdelavo informacij dovolj hitri, da bodo lahko v realno potrebnem času izvrednotili meritev in dali potrebni korekturni signal v obdelovalni sistem. Glede na današnje stanje računalnikov lahko trdimo, da je njihova hitrost premajhna, ker so obdelovalni časi pri brušenju lahko izredno kratki — tudi manj od pol minute!

3. Zamisel sistema za notranje brušenje

Osnovni model sistema za notranje brušenje je utemeljen na korelacijski teoriji [2] in je bil že opisan [1] v literaturi. Na tem mestu ga omenjamo le zato, da prikažemo praktično zamisel sistema — zgrajenega po teoretičnih predpostavkah in eksperimentalnih rezultatih, ugotovljenih v tem delu. Krmiljeni parametri v sistemu so primična sila, čas, v katerem opravimo posamezne faze dela v procesu, in odjem. Naštete parametre, ki jih krmilimo, moramo opazovati v odvisnosti od zaželenega cilja obdelave. Na sl. 1 je prikazana blokovna shema adaptivno krmiljenega sistema za notranje brušenje. Brusilni proces sam obravnavamo kot »črno škatlo« z naključnostnim vhodom in izhodom. Vhod opisuje naključnostna funkcija — rezalna površina brusa. Pri izhodu sta površina obrabljenega brusa in želena površina obdelanega obde-



Sl. 1. *Blokovna shema adaptivno krmiljenega sistema za notranje brušenje*

lovanca. Povratna zveza brusilnega sistema je po zamisli J. Peklenika [18] izvedena prek obdelovalnega stroja, ki je sestavljen iz podsistemov za pozicioniranje, kinematiko in energijo. Sistem sam naj zagotovi optimalni odjem materiala obdelovanca in želeno površino. Med procesom merimo prek senzorja in ojačevalnika primično silo in ji prek regulatorja in kinematskega podsistema vzdržujemo stalno vrednost. Optimalno modelno funkcijo brusilnega procesa bomo hranili v sistemskem računalniku, ki je povezan s procesnim računalnikom. Signal merjene sile in globine odjema bo tekel v procesni računalnik *on line*. Primerjava med merjeno vrednostjo in modelno funkcijo bo dala krmilne parametre za vodenje obdelovalnega sistema. Te bomo združili v vodilno funkcijo. Krmilni signal bo potoval do regulacijskega kroga za konstantno silo in tako nastavljal novo referenčno vrednost zanjo. Za nastavitev optimalne modelne funkcije potrebujemo veliko število *of line* meritev vplivnih parametrov. Mednje štejemo lastnosti brusa, ki so predvsem opisane z njegovo trdoto in obliko naostrene površine in fizikalnimi lastnostmi obdelovanca — najkrajše popisanimi s trdoto. Ravno tako merimo pri izhodu površino obrabljenega brusa in obdelanega obdelovanca pri določenih obdelovalnih razmerah. Vse navedene meritve bo treba v primerni obliki hraniti v računalniku. Iz informacij, ki jih ima računalnik pred procesom, lahko izberemo kinematične in pozicionirne parametre za potek procesa in njegovo krmiljenje. V prvi fazi procesa potrebujemo optimalno odjemanje, v drugi želeno površino obdelovanca, ki jo bomo dobili iz procesa pri pravilnem krmiljenju. Začetni pogoji procesa morajo vsebovati določeno osnovno primično silo, rezalno hitrost z določeno hitrostjo brusa in obdelovanca ter hitrost vzdolžnega podajanja. Obdelovalni sistem za brušenje ima več krmilnih zank. Po prvi glavni zanki za primično silo, ki smo jo že omenili, je druga zanka za ugotavljanje relativne pozicije med brusom in obdelovancem. Dobimo jo z enakim sistemom, kakor merimo globino odjema. Fazo iziskrenja lahko krmilimo časovno glede na predpostavljeno silo in želeno površino. Tako zasnovan obdelovalni brusilni sistem daje več različnih možnosti za obratovanje:

1. S preprosto ročno nastavitvijo reference za primično silo in tipala za pozicijo površine obdelovanca lahko opravimo proces brušenja. Pri tem potrebujemo le časovni rele za izklop reference po fazi iziskrenja. Fazo odjemanja konča pozicijsko tipalo, ki preklopi referenco med obema fazama obdelave.

2. Referenco za primično silo nastavimo z računalnikom na podlagi informacij o obdelovalnem sistemu in o vhodu ter izhodu procesa. Prvo fazo brušenja omejimo s triger-relejem s senzorjem za pozicijo, drugo pa s časovnim relejem.

3. Referenco za primično silo nastavimo z računalnikom na podlagi informacij o obdelovalnem sistemu pri vhodu in izhodu v proces. Prvo in drugo fazo omejimo s triger-relejem, ki dobiva informacijo od senzorja za pozicijo.

4. Avtomatsko krmilimo vse kinematske in pozicionirne parametre brušenja z računalnikom iz zbranih informacij o procesu brušenja. Podatke za predviden proces vnašamo v računalnik ročno.

5. Avtomatsko merimo vhod v proces in uravnavamo vse kinematske in pozicionirne parametre brušenja po zbranih informacijah o procesu brušenja.

Tako izdelan brusilni obdelovalni sistem bi lahko uporabili v industriji. Z njim bi lahko skrajšali obdelovalne čase in zmanjšali izmeček. Konstrukcijo je mogoče izdelati v takšni obliki, da se sistem lahko nabavlja po delih in nato izpopolnjuje. To bi omogočilo nabavo tudi takim porabnikom, ki bi finančno ne zmogli vsega naenkrat. Res pa je, da bi bil obdelovalni sistem za industrijsko uporabo precej drag.

4. Obdelovalni in merilni sistem

Za izvajanje raziskav pri notranjem brušenju smo predelali brusilni stroj Bryant 16-C-16 (sl. 1 a). Na stroju smo z novim prestavnim razmerjem povečali obodno hitrost brusa na 50 m/s. Za ostrenje brusov je bila izdelana posebna naprava, ki je bila podrobno že opisana [14]. Z njo je mogoče natančno določiti razmere pri ostrenju. Brusilno vreteno s predpisano primično silo primikamo k obdelovancu s hidravličnim sistemom [6], ki je voden prek električnih induktivnih senzorjev in krmiljen električno. Vsa vodila v obdelovalnem sistemu so oprta na hidrostatične ležaje, ki omogočajo minimalno trenje.

Površine brusa in obdelovanca smo merili z merilnikom Talysurf, ki je bil vezan na procesni računalnik IBM S/7 [10]. Primično silo smo merili z dinamometrom, izdelanim posebej v ta namen. Od dinamometra smo vodili signal prek Hottingerjevega ojačevalnika na regulator, ki je vplival na hidravlični sistem. Material smo definirali z njegovo trdoto, merjeno po Rockwellu in po Vickersu. Z Vickersom smo skušali določiti tudi naključni potek trdote po površini obdelovanca. Trdoto brusov smo merili na pnevmatski napravi za merjenje trdote, ki je bila izdelana po zamisli J. Peklenika na Fakulteti za strojništvo [15, 17].

5. Merilni pogoji

Pogoji preizkusov so bili naslednji:

Material obdelovanca: Č 47 34 (VCMO 230), Ø 160 × × 100 × 13 mm

Brus: B 80 K 6 V Ø 80 × 32 mm

$v = 57$ m/s

$n_o = 126$ vrt/min

$s = 1{,}1$ m/min

Raziskane površine brusov in obdelovancev smo vrednotili pri primičnih silah:

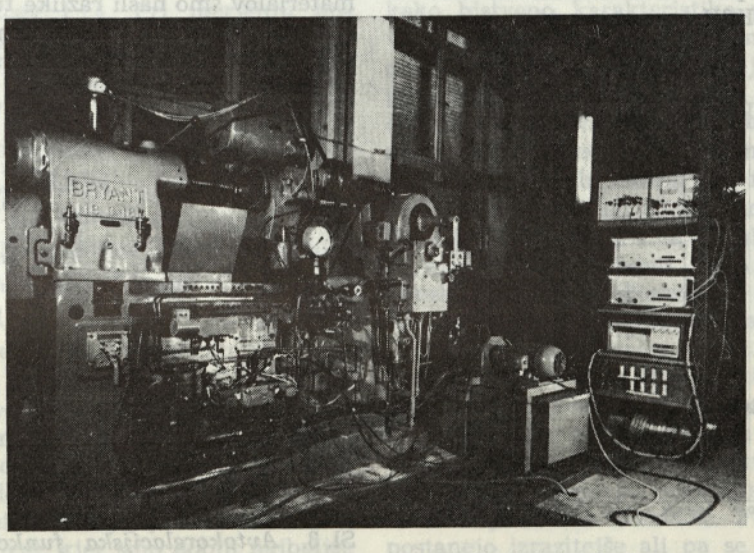
$F_y = 30, 46, 61, 77, 92, 0$ [N/cm]

in času $t = 4, 8, 12, 16$ in 20 [s]

Vsako meritev površine smo ponovili osemkrat, da smo dobili zadovoljivo število funkcij in s tem ugotovili tudi morebitne odstopke površin, ki se pojavljajo na različnih straneh radija brusa in obdelovanca.

Iz vsake merjene površine smo izračunali avtokorelacijsko funkcijo in po osmih meritvah njeno srednjo vrednost. Vsako avtokorelacijsko funkcijo smo s Fourierjevo transformacijo pretvorili v spekter moči, nato poiskali srednjo vrednost in določili spektre moči za vse naštete pogoje dela [1]. Hkrati smo spremljali tudi gibanje standardnih deviacij naključnih funkcij površin. Iz podanih spektrov moči za posamezne delovne pogoje smo zbrali nekaj karakterističnih frekvenc ter jih primerjali z meritvijo hrapavosti *Ra* [1]. Za brušenje smo izbrali dodatek + 0,25 mm na preizkušancu.

Iz številnih raziskav J. Peklenika so znani optimalni pogoji za ostrenje brusov [16]. Za našo meritev smo določili optimalne pogoje za ostrenje brusa in predpostavili



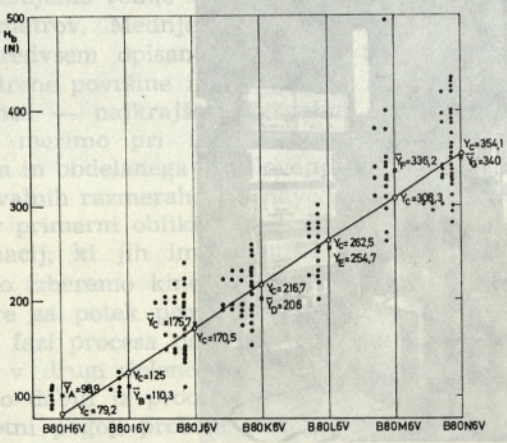
Sl. 1a. *Obdelovalni in merilni sistemi*

pristavitev diamanta na gib $a_b = 0{,}02$ mm
vzdolžno podajanje $s_b = 0{,}092$ mm/vrt
potrebno število ostrilnih gibov $n_b = 10$.

V zadnjem času sicer zopet mnogo raziskujejo ostrenje v dveh fazah, vendar končnih rezultatov, ki bi bili splošno veljavni, še nimamo.

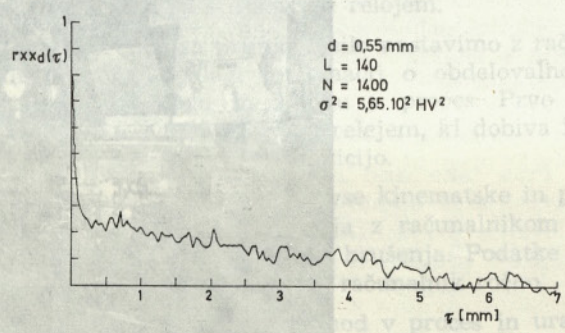
Že prej smo omenili, da je najznačilnejša karakteristika brusa njegova trdota. Te pa ne smemo zamenjati s trdoto brusilnega zrna. Trdoto brusa predstavlja sila, ki je potrebna za iztrganje zrna iz vezivnih mostičkov [15]. Za merjenje trdote je več metod in priprav. Na Fakulteti za strojništvo je bila izdelana naprava za merjenje trdote brusov s pnevmatičnim merilnikom sile [17]. Merilnik daje srednjo vrednost trdot na brusu. Zaradi naključne porazdelitve vezalnih mostičkov in velikosti zrn ter oblik, ne moremo definirati trdote deterministično.

Dejanske trdote brusov vseh izdelovalcev glede na označeni razred imajo močan raztros. Zato smo se odločili, da izberemo za raziskave le take bruse, ki bodo imeli dovolj dobro definirano trdoto in s tem zanesljiv vhodni podatek za proces brušenja. Pri preizkusih nas je vodila želja, da bi pri eni seriji preizkusov trdoto čim bolj odstranili kot parameter, ki se naključnostno spreminja. Za sam preizkus smo izbrali več trdotnih kakovosti, in sicer od H do N. Na vsakem brusu smo meritev ponovili dvakrat. Vse meritve smo obdelali z računalnikom. Določili smo srednjo vrednost trdote vsake skupine brusov, ki imajo enako označbo, in ugotovili odstopek srednje vrednosti od linearne odvisnosti trdote od označbe. Rezultati in distribucija so razvidni s slike 2. Linearno odvisnost trdote od označbe smo določili z regresijsko premico. Potek premice skozi skupino brusov smo določili in ga označili z Y_c za vsako skupino posebej. Za merjenje pri naših raziskavah smo se odločili za brus B80K6V.



Sl. 2. *Trdota brusov v odvisnosti od označb*

Za raziskavo smo izbrali material Č 4734 (VCMO 230). Material smo poboljšali, kalili smo ga pri temperaturi 850 °C v olju in popustili pri 560 °C. Pri vseh preizkušancih smo definirali trdoto po Rockwelu (HR_b). Znano je, da trdota na vseh mestih v materialu ni enaka. Odvisna je od strukture, oblike in velikosti kristalnih zrn, zato smo se odločili, da bomo izmerili trdoto po liniji na preizkušancu. Trdoto smo merili na razdaljah 50 μm s silo 50 pondov s sistemom merjenja za mikrotrdoto po Vickersu. Z izmerjenimi podatki smo izračunali smerni koeficient regresijske premice. Če bi bil koeficient manjši ali večji od nič, bi lahko sklepali, da material po merjeni liniji ni homogen. Za vsa vrednotenja smo uporabili elektronski računalnik IBM 1130. Pri ničelnem smernem koeficientu smo dobili zagotovljeno homogenost. Odčitki merjenih trdot dajo vrsto podatkov, ki jih lahko statistično obravnavamo kot stacionaren proces in opišemo s parametri avtokorelacijskih funkcij. Zato smo določili za material avtokorelacijsko funkcijo trdote. Primer vrednotenja vidimo na sliki 3. Rezultati preizkušanja so pokazali, da pri jeklu, ki ga obravnavamo, vrednotena mikrotrdota ne kaže izrazitih parametrov, ki bi lahko rabili za obdelavo procesa z adaptivno regulacijo. Material, ki smo ga preizkušali, ni kazal izrazitih smernih koeficientov linearne regresije po globini (prerezu) niti po površini. To zadostuje, da ga lahko obravnavamo kot makro in mikro homogen material glede na trdoto. Zato smo se odločili, da upoštevamo preizkušeni material oziroma njegovo trdoto kot konstanten parameter procesa, ki je odvisen samo od vrste materiala. Za natančnejše ugotavljanje obdelovalnosti in tehnoloških lastnosti, pa bo treba v prihodnje razviti novo metodo za merjenje žilavosti, ki lahko bistveno vpliva na izdelke, izdelane z adaptivno krmiljenim obdelovalnim sistemom. Pri primerjanju drugih vrst materialov smo našli razlike tudi v avtokorelacijski funkciji v takem velikostnem redu, da lahko ta rabi za karakterizacijo strukturnih sprememb pri materialu z znano sestavo.



Sl. 3. *Avtokorelacijska funkcija mikrotrdote obdelovanca*

Na vhodu v proces smo tako definirali material obdelovanca in brusa z njegovo trdoto. Iz skupine brusov smo izbrali samo tiste, ki so pokazali najmanjša odstopanja od srednje vrednosti merjene trdote. Kinematične pogoje brušenja smo določili po dosedanjih izkušnjah v industriji in po rezultatih raziskav drugih raziskovalnih organizacij po svetu. Obliko obdelovanca je narekoval obdelovalni stroj, na katerem smo merili. Pri konstantnih pogojih za orodja in obdelovance pri vhodu smo pri raziskavah spreminjali samo primično silo na brusu in čas brušenja. Površine smo opisali z avtokorelacijskimi funkcijami, s spektri moči in lastnostmi distribucij, kakor je bilo že objavljeno [1]. Pri merjenju površin smo se srečali s problemom prekratke merilne poti tako na brusu kakor tudi na obdelovancu. Ta problem smo rešili tako, da smo uporabili statistično načelo, po katerem lahko množico popišemo pri zahtevani natančnosti z eno meritvijo ali pa z več meritvami manjših skupin. Ugotovili smo, da se lahko zadovoljimo z osmimi meritvami. Pri tem moramo računati osem funkcij in poiskati njihovo srednjo vrednost. Pri merjenju površin brusov smo se pri serijah meritev odločili za naslednje merilne pogoje

— število odčitkov N = 750
— število odčitkov na sekundo $\nu = 32\,[s^{-1}]$
— čas odčitanja $T_m = 23{,}4\,[s]$
— merilno dolžino $T = 29{,}6\,[mm]$
— medsebojno razdaljo odčitkov $\Delta t = 0{,}04\,[mm]$
— korelacijsko dolžino $\tau_{max} = 8\,[mm]$
— medsebojno razdaljo frekvenc $\Delta f = 0{,}125\,[mm]$
— maksimalno frekvenco $f_{max} = 25\,[mm^{-1}]$
— število koreliranih točk $L = 200$

S preizkusi smo ugotovili, da je najprimernejše razmerje med merjenimi razdaljami na površini brusov in obdelovancev 1 : 4. Pri merjenju površin obdelovancev smo se odločili za naslednje merilne pogoje:

— število odčitkov $N = 750$
— število odčitkov na sekundo $\nu = 128\,[s^{-1}]$
— čas odčitavanja $T_m = 5{,}9\,[s]$
— merilno dolžino $T = 7{,}4\,[mm]$
— medsebojno razdaljo odčitkov $\Delta t = 0{,}01\,[mm]$
— korelacijsko dolžino $\tau_{max} = 2\,[mm]$
— medsebojno razdaljo frekvenc $\Delta f = 0{,}5\,[mm]$
— maksimalno frekvenco $f_{max} = 100\,[mm^{-1}]$
— število koreliranih točk $L = 200$

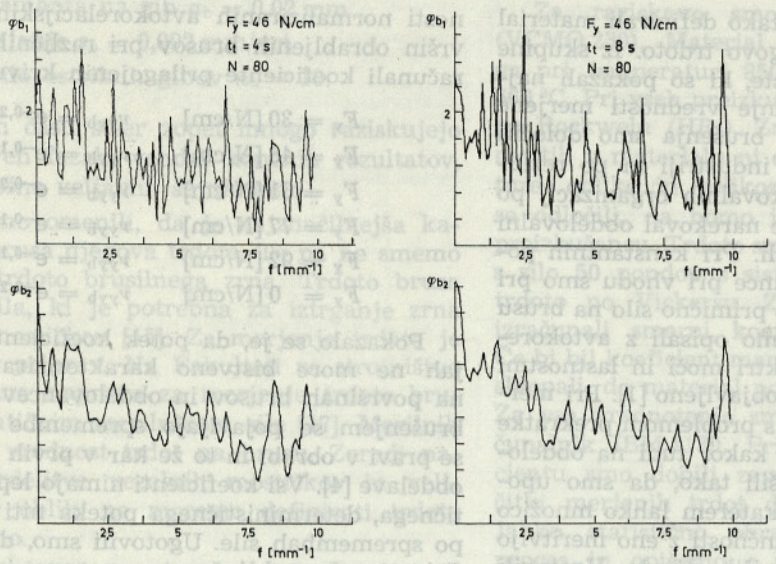
Za popolnejše vrednotenje srednjih vrednosti normaliziranih avtokorelacijskih funkcij za površine brusov in obdelovancev smo izračunali tudi koeficiente prilagojenih krivulj [4] za različne čase brušenja pri sili 46 N/cm, kjer smo dobili najboljše površine. Ravno tako smo vrednotili srednje vrednosti normaliziranih avtokorelacijskih funkcij površin obrabljenih brusov pri različnih silah in izračunali koeficiente prilagojenih krivulj ter dobili:

$$F_y = 30\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}256|\tau|}$$
$$F_y = 46\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}191|\tau|}$$
$$F_y = 61\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}259|\tau|}$$
$$F_y = 77\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}156|\tau|}$$
$$F_y = 92\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}181|\tau|}$$
$$F_y = 0\,[N/cm] \qquad \nu_{yyb} = e^{-0{,}213|\tau|}$$

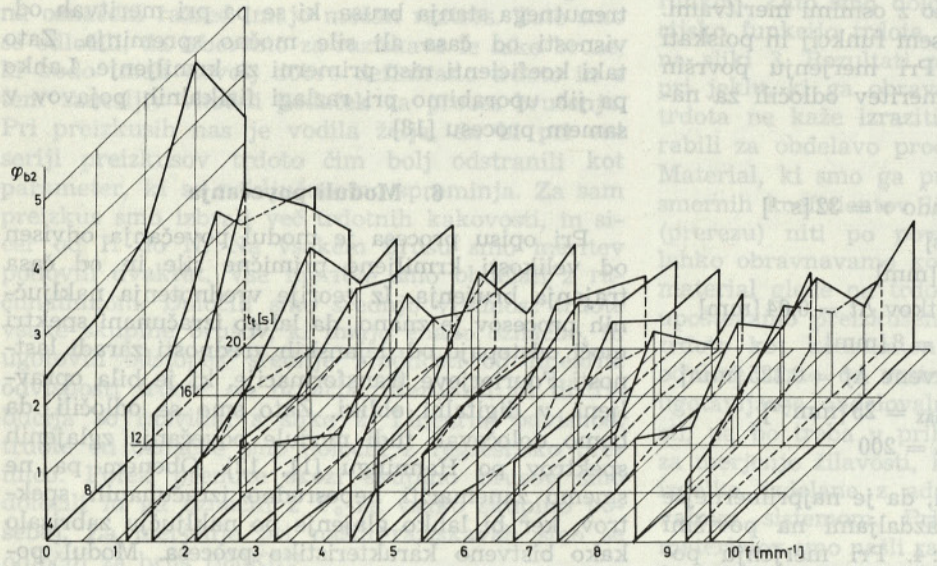
Pokazalo se je, da potek koeficientov v funkcijah ne more bistveno karakterizirati sprememb na površinah brusov in obdelovancev. Med samim brušenjem se pojavljajo spremembe v naostritvi, se pravi v obrabi in to že kar v prvih kratkih časih obdelave [4]. Vsi koeficienti nimajo lepega matematičnega, determinističnega poteka niti po času, niti po spremembah sile. Ugotovili smo, da so vsi koeficienti zelo naključnostne narave in odvisni od trenutnega stanja brusa, ki se pa pri meritvah odvisnosti od časa ali sile močno spreminja. Zato taki koeficienti niso primerni za krmiljenje. Lahko pa jih uporabimo pri razlagi fizikalnih pojavov v samem procesu [18].

6. Moduli povečanja

Pri opisu procesa je modul povečanja odvisen od velikosti krmiljene primične sile in od časa trajanja brušenja. Iz teorije vrednotenja naključnih procesov je znano, da lahko izračunani spektri moči odstopajo od dejanskih vrednosti zaradi lastnosti Fourierjeve transformacije, ki je bila opravljena v digitalni obliki. Zato smo se odločili, da bomo določevali tudi module povečanja zglajenih spektrov po Hanningu [11, 12]. Obenem pa ne smemo zanemariti neposredno izračunanih spektrov, ker bi lahko glajenje po naključju zabrisalo kako bistveno karakteristiko procesa. Modul povečanja direktnih spektrov moči smo označevali z indeksom 1, modul povečanja glajenih spektrov pa z indeksom 2. V prvi seriji izračunov smo izračunali modul povečanja med obrabljeno in naostreno površino brusa pri konstantni primični sili po različnih časih brušenja. Do frekvence 10 $[mm^{-1}]$ pri brusih smo imeli 80 izračunanih točk frekvenc. Spektri so pri višjih frekvencah zelo naključnostni in majhni po vrednosti. Zato smo filtrirali samo karakteristični del. Posamezni vrhovi so zelo gosti in nepregledni. V splošnem lahko ugotovimo povečanje moči spektrov do 12. sekunde brušenja nato pa se poprečna moč spektrov zmanjšuje. Primer modula povečanja vidimo na sliki 4, kjer je primerjava med neglajenim in glajenim modulom povečanja za površine brusa pri dveh časih obdelave. Sčasoma se modul spreminja predvsem v območju nizkih frekvenc. Posamezne frekvence postanejo izrazitejše ali pa se celo na novo pojavijo. Izbrali smo najznačilnejše vrhove po raz-



Sl. 4. *Primeri glajenih in neglajenih modulov povečanja za površine brusov pri dveh časih obdelave*



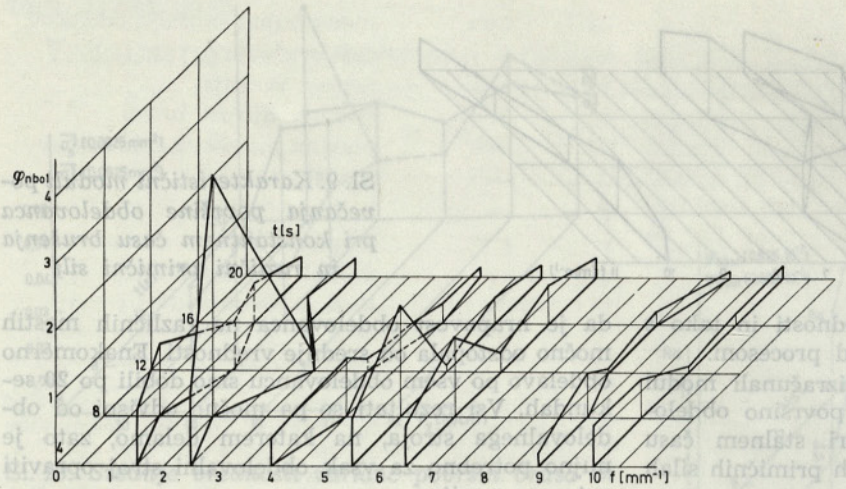
Sl. 5. *Značilni vrhovi modulov povečanja pri konstantni primični sili* F_y = 46 N/cm *v odvisnosti od časa brušenja*

ličnih časih brušenja. Na sliki 5 je lepo vidno, kako se frekvence posameznih vrhov s časom brušenja spreminjajo. Menimo, da je za opis procesa najugodnejše, da zberemo tiste frekvence, kjer ima modul svoj stalni vrh. Te vrednosti so bile: 1,48; 4,82; 6,18 in 8,54.

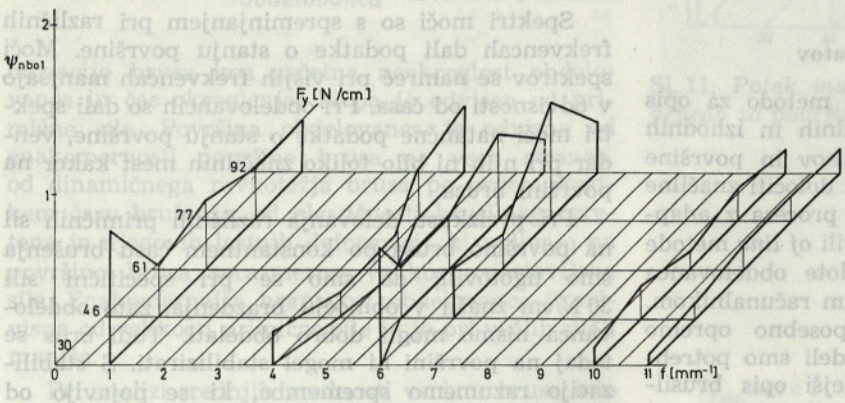
Druga serija izračunov da module povečanja med spektri moči za površino obdelovanca in naostrenega brusa pri enaki primični sili in po različnih časih brušenja. Pri vseh modulih nismo upoštevali prvih dveh mest pri ničelni frekvenci, ker bi drugače dobili slabo razmerje in ničelna frekvenca ni primerna za nastavitev modelne funkcije. Pri vsakem modulu smo upoštevali petdeset izračunanih točk. Tudi tu smo izfiltrirali karakteristični del, ker so spektri pri višjih frekvencah zelo naključnostni in imajo majhne moči. Izbrane frekvence in njihove vrednosti modulov so na sliki 6. Na sliki je tudi lepo vidno, kako se spreminja frekvenca po posameznih vrhovih. Moduli povečanja zglajenih spektrov moči ne dajejo novih informacij in jih zato posebej ne navajamo.

V tretji seriji izračunov smo izračunali module povečanja z obrabljeno in naostreno površino brusa za različne primične sile po 20 sekundah brušenja. Ugotovimo lahko da so najprimernejše frekvence 1,48, 4,82, 6,18, 8,54 [mm⁻¹]. Ta vrsta frekvenc je dovolj značilna in zanesljiva. Na vseh računanih in zbranih mestih so vrhovi. Poleg tega gibanje vrednosti modulov nima na vseh frekvencah enake smeri in medsebojno spreminja predznak.

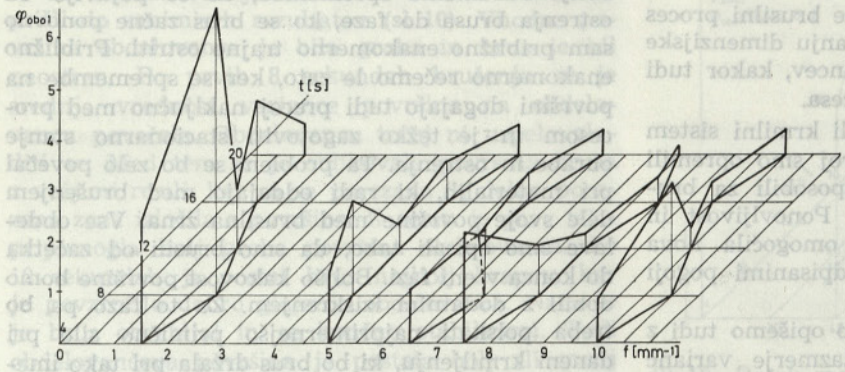
V četrti seriji izračunov smo izračunali module povečanja med spektri moči za površino obdelovanca in naostrenega brusa pri različnih primičnih silah po 20 sekundah brušenja. Rezultati so na sliki 7.



Sl. 6. *Karakteristični moduli povečanja površine obdelovanca pri konstantni sili v odvisnosti od časa brušenja*

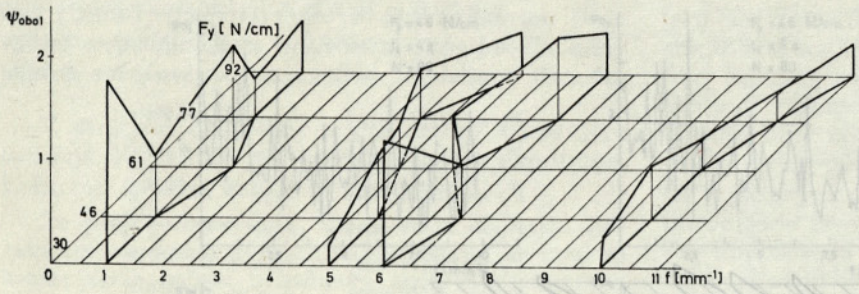


Sl. 7. *Karakteristični moduli povečanja površine obdelovanca pri konstantnem času brušenja in različnih primičnih silah*



Sl. 8. *Karakteristični moduli povečanja površine obdelovanca pri konstantni sili in različnem času brušenja*

V peti seriji izračunov smo izračunali module povečanja med spektri moči za površino obdelovanca in obrabljenega brusa pri konstantni primični sili $F_y = 46$ [N/cm] pri različnih časih brušenja. S slike 8 je razvidno, da se tu vrhovi pri nobeni od frekvenc ne ustalijo, ampak se povsod po frekvenci s časom brušenja premikajo. Vrhovi se sicer pojavljajo blizu značilnih frekvenc, ki smo jih že omenili v drugem in četrtem izračunu. Za to in naslednjo serijo meritev moramo poudariti, da smo dejansko izračunavali module tako, kakor naj bi se pojavljali med samim procesom, ko hkrati delujejo med seboj površine brusa in obdelovanca, vendar tega sedaj med procesom še ne moremo meriti. S slike lahko opazimo, da se značilne frekvence spreminjajo v sorazmerno širokem pasu in kakšnih posebnih značilnosti tudi pri merjenju med procesom ne bomo odkrili. Vse kaže, da bo meritev naostrenega brusa pred začetkom obratovanja pri drugih konstantnih parametrih zadostovala za krmiljenje. Pri tem izračunu lahko upoštevamo, da smo morali za meritev dejansko proces prekiniti in je lahko celo v tem času prekinjevanja prišlo do kakšnih sprememb v modulu, ker procesa ne moremo prekiniti v teoretičnem času »nič« oziroma ga prekiniti v ozkem impulzu. Lahko pa ugotovimo, da sicer lahko nastavimo modelno funkcijo tudi med samim procesom in ne samo na začetku. V tem primeru bi morali izbrati določen ozkopasovni filter in primerjati vrednosti modula pove-



Sl. 9. *Karakteristični moduli povečanja površine obdelovanca pri konstantnem času brušenja in različni primični sili*

čanja za posamezne merjene vrednosti in tako s preizkusom določiti vrednosti med procesom.

V šesti seriji, izračunov smo izračunali modul povečanja med spektri moči za površino obdelovanca in obrabljenega brusa pri stalnem času brušenja 20 sekund in pri različnih primičnih silah (slika 9).

7. Vrednotenje rezultatov

V okviru raziskav smo razvili metodo za opis brusilnega procesa z analizo vhodnih in izhodnih naključnih funkcij za profile brusov in površine obdelovancev. Pri tem smo skušali določiti značilne parametre za vodenje brusilnega procesa z adaptivnim krmiljenjem. Zato smo razvili *of line* metode za merjenje trdote brusa in trdote obdelovanca ter *on line* opis površin s procesnim računalnikom. Za vsa merjenja smo razvili posebno opremo *(software)*. Obravnavali in predvideli smo potrebne raziskovalne smeri za popolnejši opis brusilnega procesa, s katerim bo mogoče brusilni proces avtomatizirati ob hkratnem povečanju dimenzijske in oblikovne natančnosti obdelovancev, kakor tudi večje učinkovitosti brusilnega procesa.

Za samo krmiljenje smo razvili krmilni sistem in ga preizkusili. Obdelovalni stroj smo opremili s hidrostatičnimi ležaji in ga usposobili za brušenje do rezalne hitrosti 57 m/s. Ponovljivost in natančnost naostritve brusa je omogočila nova ostrilna naprava z natančno predpisanimi pogoji za ostrenje.

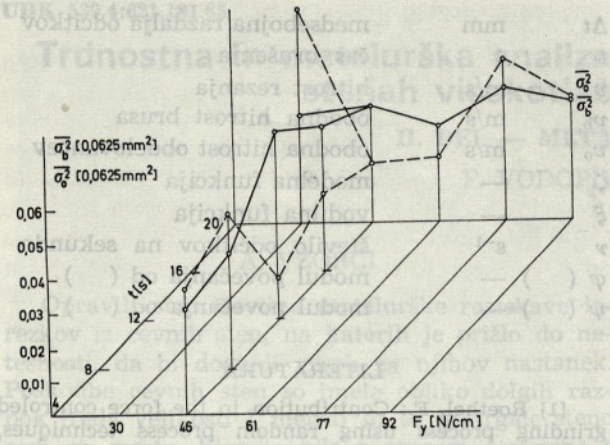
Stanje na površini brusa lahko opišemo tudi z varianco topografije površine. Razmerje varianc naostrenega brusa z obrabljenim brusom pove stanje obrabe brusa. Pri tem je treba podrobno spremljati raztros varianc na različnih mestih na obodu brusa. V prvem delu raziskav smo izmerili in izračunali potrebne avtokorelacijske funkcije površin brusov in obdelovancev, izračunane in zglajene spektre moči ter module povečanja.

Spremembe na obdelovancu so močno odvisne od sprememb na brusu. Pri tem smo potrdili dejstvo, da velika hrapavost na brusu ne daje tudi velike hrapavosti na obdelovancu. Pri sili $F_y = 46$ N/cm smo dobili dobro hrapavost na obdelovancu že po 12 sekundah, čeprav se površina brusa še ni stabilizirala in je imela na različnih mestih različne hrapavosti. To pa je bil tudi vzrok, da je hrapavost obdelovanca na različnih mestih močno odstopala od srednje vrednosti. Enakomerno obdelavo po vsem obdelovancu smo dobili po 20 sekundah. Vsi rezultati so pa močno odvisni od obdelovalnega stroja, na katerem delamo, zato je nujno potrebno za vsak obdelovalni stroj opraviti ustrezne meritve.

Spektri moči so s spreminjanjem pri različnih frekvencah dali podatke o stanju površine. Moči spektrov se namreč pri višjih frekvencah manjšajo v odvisnosti od časa. Pri obdelovancih so dali spektri moči natančne podatke o stanju površine, vendar pri njih ni bilo toliko značilnih mest kakor na površini brusa.

Pri preizkusu delovanja različnih primičnih sil na površino brusa po konstantnem času brušenja smo ugotovili, da smo se pri specifični sili 30 N/cm znašli v območju brazdenja, zato obdelovanca nismo mogli dobro obdelati. Tudi brus se tedaj na površini ni mogel stabilizirati. S stabilizacijo razumemo spremembe, ki se pojavijo od ostrenja brusa do faze, ko se brus začne ponovno sam približno enakomerno trajno ostriti. Približno enakomerno rečemo le zato, ker se spremembe na površini dogajajo tudi precej naključno med procesom in je težko zagotoviti stacionarno stanje obrabe in ostrenja. Ta problem se bo zelo povečal pri materialih, ki radi oddajajo med brušenjem dele svoje površine med brusilna zrna. Vse obdelave smo opisali tako, da smo brusili od začetka do konca v eni fazi. Boljšo kakovost površine bomo dobili z dodatnim iziskrenjem. Za to fazo pa bo treba poiskati najprimernejšo primično silo pri danem krmiljenju, ki bo brus držala pri tako imenovani »ničelni sili« z ustrezno časovno konstanto oziroma s predpisanim primikanjem. »Ničelna sila« je definirana z lastnostmi krmilnega sistema in pomeni le krmiljeni dotik brusa z obdelovancem.

Oceno procesa smo skušali dobiti tudi z izračunom koeficientov prilagojenih krivulj normaliziranih avtokorelacijskih funkcij, ti pa ne dajo dobre zveze med površino brusa in obdelovanca. Poprečno stanje brusa najboljše označujejo srednje vrednosti sprememb moči na določenih frekvencah. Na sliki 10 smo izbrali srednje vrednosti varianc za površine brusov in obdelovancev v odvisnosti od časa obdelave in različne primične sile. Tu sta vidni izbrani smeri raziskav, ki sta se pokazali za najboljši. Velik vpliv na samonaostrevanje in sta-

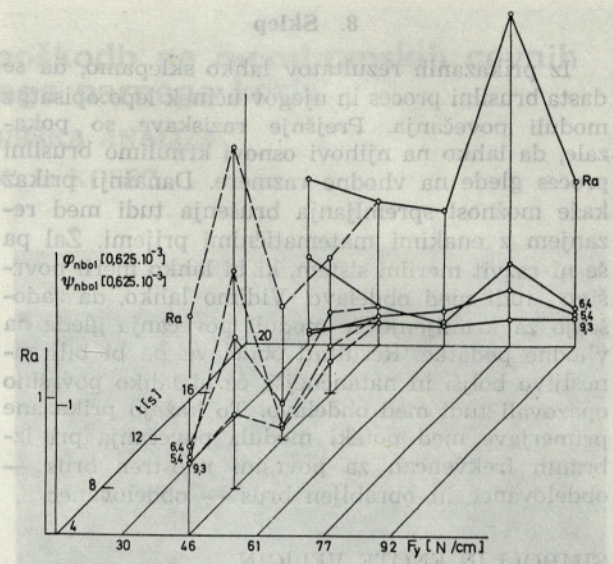


Sl. 10. *Srednje vrednosti varianc površin brusa in obdelovanca*

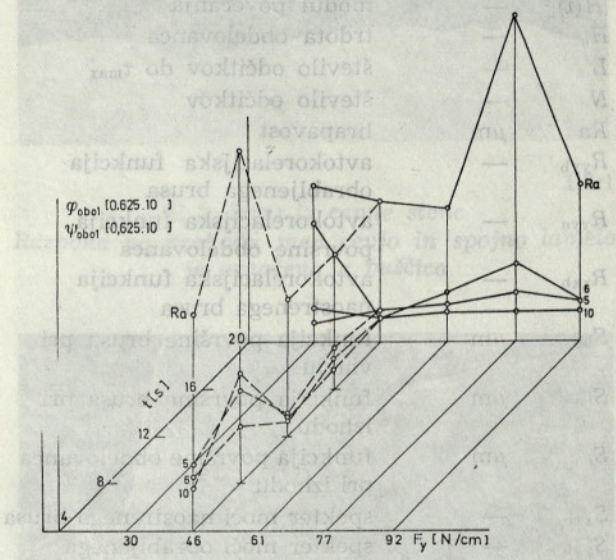
bilizacijo brusa ima začetna neokroglost obdelovanca in čas okroglenja, ki pa je odvisen od primične sile. Površina obdelovanca je odvisna od enakomernosti površine brusa na vseh straneh, od dinamičnega ravnotežja brusa po prvem kratkem času brušenja, od elastičnosti brusilnega vretena in njegovih lastnih deformacij, ki vplivajo na površino brusa sorazmerno velikosti nastavljene sile. Enakomernejša hrapavost obdelovanca je odvisna od velikosti primične sile in je pri večjih silah manjša.

Pri analizi srednjih vrednosti varianc brusa smo prišli do zanimivih rezultatov (sl. 10). Vhodna površina obdelovanca je bila groba in brus je bil naostren. Po prvih 8 sekundah brušenja se je srednja vrednost variance površine na obdelovancu povečala. Obdelovancu torej ni uspelo gladiti se. Med tem se je oblikovala površina brusa z večjimi rezili, ker so se porezana in delno porezana zrna izločila s površine. K temu je prav tako pripomogla bolj groba površina obdelovanca. Po 12 sekundah je postal brus najbolj hrapav, kar je povzročilo dobro glajenje obdelovanca. Nato se je brus obrabljal in se končno stabiliziral. Tudi obdelovančeva površina je postala bolj ali manj stabilizirana. Nihanja so nastala zaradi medsebojnih vplivov obeh površin, ki neprestano prihajata v proces in se pod vzajemnim vplivom spreminjata. Naključna procesa, ki opisujeta površino brusa in obdelovanca, sta torej izpostavljena posebni dinamiki, ki bi jo veljalo še posebej raziskati. Kolikor nam je znano, doslej še niso bile izvedene takšne raziskave.

Vrednosti modula povečanja za površini naostren brus — obdelovanec pri izrazitih frekvencah so izrisane na sliki 11. Pri štirih frekvencah imajo dovolj zgovoren potek. S slike je razvidno, da je potek modula povečanja močno podoben poteku vrednosti *Ra* za obdelovanec, s katero smo definirali hrapavost površine obdelovanca. Moduli



Sl. 11. *Potek modula povečanja na izbranih frekvencah za površini naostren brus — obdelovanec ter hrapavost Ra*



Sl. 12. *Potek modula povečanja na izbranih frekvencah za površino obrabljen brus — obdelovanec ter hrapavost Ra*

povečanja za obrabljen brus — obdelovanec pri spremembah časa brušenja pri stalni sili oziroma pri spremembah sile pri konstantnem času so pri karakterističnih frekvencah brušenja podani na sliki 12. Očitno je, da so velikosti modula povečanja pri karakterističnih frekvencah manjše in manj izrazite, kar je razumljivo, če upoštevamo, da je to modul povečanja med obrabljenim brusom med obdelavo nasproti površini obdelovanca. Iz navedenega lahko sklepamo, da za proces zadošča opis glede na naostren brus.

8. Sklep

Iz prikazanih rezultatov lahko sklepamo, da se dasta brusilni proces in njegov učinek lepo opisati z moduli povečanja. Prejšnje raziskave so pokazale, da lahko na njihovi osnovi krmilimo brusilni proces glede na vhodne razmere. Današnji prikaz kaže možnost spremljanja brušenja tudi med rezanjem z enakimi matematičnimi prijemi. Žal pa še ni razvit merilni sistem, ki bi lahko meril površino tudi med obdelavo. Vidimo lahko, da zadoščajo za krmiljenje že moduli povečanja glede na vhodne podatke. Rezultati obdelave pa bi bili zanesljivo boljši in natančnejši, če bi lahko površino opazovali tudi med obdelavo. To kažejo prikazane primerjave med poteki modula povečanja pri izbranih frekvencah za površini naostren brus — obdelovanec in obrabljen brus — obdelovanec.

SIMBOLI IN ENOTE VELIČIN

F_y	N	primična sila (podajalna sila)
H_b	N	trdota brusa
$H(f)$	—	frekvenčno-odzivna funkcija
$\|H(f)\|^2$	—	modul povečanja
H_o	—	trdota obdelovanca
L	—	število odčitkov do τ_{max}
N	—	število odčitkov
Ra	μm	hrapavost
R_{yyb}	—	avtokorelacijska funkcija obrabljenega brusa
R_{yyo}	—	avtokorelacijska funkcija površine obdelovanca
R_{xxb}	—	avtokorelacijska funkcija naostrenega brusa
S_{bi}	μm	funkcija površine brusa pri vhodu
S_{bo}	μm	funkcija površine brusa pri izhodu
S_{oo}	μm	funkcija površine obdelovanca pri izhodu
S_{xxb}	—	spekter moči naostrenega brusa
S_{yyb}	—	spekter moči obrabljenega brusa
S_{yyo}	—	spekter moči površine obdelovanca
T	mm	merilna dolžina
T_m	s	čas odčitavanja
a	mm	odjem
a_b	mm	pristavitev diamanta na gib
Δ_f	mm	medsebojna razdalja frekvenc
f_{max}	mm^{-1}	maksimalna frekvenca
L	—	število koreliranih točk
n_b	—	potrebno število ostrilnih gibov
n_o	vrt/min	vrtilna hitrost obdelovanca
s	m/min	vzdolžno podajanje
s_b	mm/vrt	vzdolžno podajanje brusa pri ostrenju
Δt	mm	medsebojna razdalja odčitkov
t_t	s	čas brušenja
v	m/s	hitrost rezanja
v_b	m/s	obodna hitrost brusa
v_o	m/s	obodna hitrost obdelovancev
ζ	—	modelna funkcija
ξ	—	vodilna funkcija
ν	s^{-1}	število odčitkov na sekundo
φ ( )	—	modul povečanja od ( )
ψ ( )	—	modul povečanja od ( )

LITERATURA

[1] Roethel, F.: Contribution to the force controled grinding process using random process techniques, Manufacturing Systems, 1974, št. 4, str. 275—284.

[2] Peklenik, J.: Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process, Trans. ASME, Vol. 86, p. 97, 1964.

[3] Roethel, F., Justin., B., Leskovar, P., Seljak, Z.: Nove identifikacijske metode obdelovalnega procesa, Zbornik VIII. posvetovanja proizvodnega strojništva, Ljubljana, 1973, str. GT 3. 1—3. 27.

[4] Roethel, F.: Prispevek k opisu sprememb površin pri procesu notranjega brušenja, Zbornik X. savetovanje proizvodnog mašinstva, Beograd, 1975, OR. 14. 1—14. 9.

[5] Roethel, F., Peklenik, J.: Uvodne raziskave brušenja s krmiljeno primično silo, Strojniški vestnik, 1969, št. 2, str. 49—54.

[6] Roethel, F., Peklenik, J., Grabec, I.: Razvoj krmilnega sistema za notranje brušenje, Strojniški vestnik, 1974, št. 4, str. 121—126.

[7] Hahn, S. R.: Controlled force grinding — A new technique for precision internal grinding, Journal of Engineering for Industry, 1964, str. 287—293.

[8] Hahn, S. R.: On the selection and design of grinding cycles, 7th M. T. D. R. Conference, 1966, Birmingham.

[9] Roethel, F.: Direkte Messung der Technologischen Daten mit EDV-Anlage, COMPCONTROL '74, Szeged, 1974, Vortraege, Sektion III, IV, str. 341—355.

[10] Roethel, F.: Sprotno merjenje in vrednotenje parametrov v obdelovalnih procesih, Strojniški vestnik, 1974, št. 3. str. 87—93.

[11] Bendat, J. S.: Principles and applications of random noise Theory, John Wiley & Sons, New York, 1971.

[12] Bendat, J. S., Piersol, A. G.: Random Data-Analysis and Measurement Procedure, John Wiley & Sons, New York, 1971.

[13] Roethel, F.: Merenje i vrednovanje stohastičkih procesa računarom, Tehnika-Mašinstvo, 1975, br. 5, str. 921—926.

[14] Roethel, F., Peklenik, J., Lobe, P.: Nova naprava za ostrenje brusov, Strojniški vestnik, 1973, št. 2, str. 40—42.

[15] Peklenik, J.: Neue statische und dynamische Prüfmethoden der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Schleifkörpern, Industrie Anzeiger, 1960, št. 28, str. 425—430.

[16] Peklenik, J.: O pravilnem ostrenju brusov, Strojniški vestnik, 1957, št. 4/5, str. 98.

[17] Peklenik, J., Gantar, I.: Merilne metode in priprave za kontrolo brusilnih orodij, poročilo za SBK, 1971.

[18] Peklenik, J., Roethel, F.: Identifikacija površin v brusilnem procesu, poročilo za SBK, 1975.

Avtorjev naslov: doc. dr. mag. Franc Roethel,
Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani