

DK 621.9:531.71

Moderne merilne metode pri raziskovanjih odrezavanja kovin

JANEZ PEKLENIK

1. Nekaj uvodnih pripomb

Naravni ekonomski zakon, ki usmerja ustvarjalno dejavnost družbe, je zelo preprost: izdelovati čimveč in čim kvalitetneje s čimmanjšo potrošnjo energije, materiala in časa. Izdelovalna sredstva, ki služijo temu namenu, so zlasti tudi obdelovalni stroji. S surovinsko in energetske bazo sestavljajo osnovo industrije in gospodarske moči države. Od količine in kvalitete izdelovalnih sredstev in uporabe modernih obdelovalnih metod v kovinski industriji je v veliki meri odvisna gospodarska kapaciteta države. Zahteva po kvalitetnih obdelovalnih strojih in novih tehnoloških metodah pa je neogibno združena z obširnim raziskovalnim delom. Težnje v tej smeri so in morajo biti vsaj tako važne, kakor je razvoj atomske – energetske in tehnološke baze. Velike industrijske države vlagajo v znanstveno delo na teh področjih zelo znatna sredstva, saj se zavedajo izrednega pomena obvladanja tehnologije kovin, ki je predvsem odločujoča v hudem konkurenčnem boju na svetovnih tržiščih.

Ni naš namen opisovati zgodovinski razvoj tehnološke znanosti, marveč samo na kratko osvetliti problematiko in poudariti pomen te znanstvene veje za razvoj industrije nasploh.

Že pred kakimi petdesetimi leti je Američan W. Taylor odkril izreden pomen in važnost sistematičnega znanstvenega dela in uvajanja znanstvenih metod v kovinsko industrijo. Razvoj v Nemčiji, Angliji, Franciji in Švici v tej smeri je ubral svojo pot tudi že v začetku našega stoletja. Tako imajo močne industrijske države določeno prednost pred ostalimi, ker so oprte na precejšnjo tradicijo ter imajo že ustrezne znanstvene institucije. Sovjetska zveza je tudi spoznala izreden pomen te veje znanosti, kar je imelo za posledico intenzivno graditev novih tehnoloških raziskovalnih inštitutov. Ti so s svojim delom ogromno prispevali k razvoju njihove industrije.

Industrija obdelovalnih strojev oziroma kovinska industrija v Jugoslaviji nasploh se je začela razvijati šele pred dobrimi desetimi leti. Spričo tega je razumljivo, da v naši državi še ni ustrežajočih institucij, ki bi bile opremljene z vsemi modernimi pripomočki, kakršni so potrebni za raziskovanja obdelovalnosti kovin in obdelovalnih strojev. Tehnološki inštituti na posameznih tehničnih fakultetah univerz v Jugoslaviji so opremljeni razmeroma pomanjkljivo. Manjkajo jim predvsem potreben instrumentarij ter visoko kvalificirane moči, ki bi bile sposobne opravljati zapletene raziskave na teh področjih. Zaradi tega je naša industrija navezana

na izsledke iz tujine. Ta dela in ti podatki pa niso vedno primerni za uporabo v naših obratih, ker ne upoštevajo specifičnosti naših materialov, kakor jekel, neželeznih kovin, rezilnih materialov itd. Nadalje so podatki v posameznih virih mnogokrat pomanjkljivi, ker inozemskim industrijam in znanstvenim institucijam ni ravno do tega, da bi tuja industrija dobila povsem pravilne podatke o posameznih tehnoloških postopkih.

Namen te razprave je podati nekaj bistvenih načel in smernic za izvajanja raziskav pri odrezavanju kovin in obdelovalnih strojih. S pomočjo zbranih podatkov bo mogoče v prizadetih obratih izdelati merilne instrumente oz. uporabljati ustrezno metodo za določene raziskave o obdelovalnosti kovin:

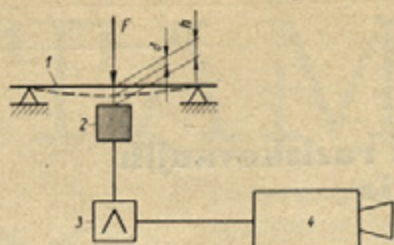
Celotna razprava je razdeljena na štiri dele, in sicer:

1. meritve sil in vrtilnih momentov,
2. meritve temperatur pri odrezavanju,
3. meritve obrabe orodij,
4. statične in dinamične meritve na obdelovalnih strojih.

Že v naprej naj pripomnimo, da terjajo te raziskave veliko izkušenj in razumevanja za bistvo tehnološkega procesa odrezavanja. V obravnavi bodo navedene le najznačilnejše merilne metode. Jasno je, da ni mogoče vseh izvedb, ki obstajajo, obravnavati podrobno, ker je področje izredno široko. S temi izvajanji želimo dati inženirju-tehnologu v obratu nekaj napotkov za samostojno reševanje določenih problemov pri obdelavi kovin in vzbuditi pri študentih strojništva zanimanje za to vejo udejstvovanja. Povrh sistematike raziskovalnih metod bomo poizkušali dodati nekaj praktičnih izkušenj, ki jih je treba upoštevati pri gradnji specialnih merilnih naprav za sile, temperature in obrabo orodij. Le z uvedbo znanstvenih metod analize v tehnološko dogajanje v obratih bo možno doseči tudi naši kovinski industriji raven, ki je potrebna za uspešno in gospodarsko zdravo uveljavljanje na notranjem in svetovnem tržišču.

2. Merjenje sil in vrtilnih momentov

Določitev sil, ki se pojavljajo pri odrezavanju kovin, ima poseben pomen pri konstrukciji obdelovalnih strojev in orodij. Sile, ki obremenjujejo posamezne elemente obdelovalnega stroja in orodja, so za statično analizo togosti in s tem za dimenzioniranje izredne važnosti. Raziskovalec rezalnih postopkov kovin teži za tem, da iz eksperimentalne analize sil najde splošno veljavne zakone o poteku



Sl. 1. Principialna shema zgradbe merilnika za sile

in velikosti sil pri najrazličnejših pogojih in vrstah odrezavanja.

2.1 Zgradba merilne naprave

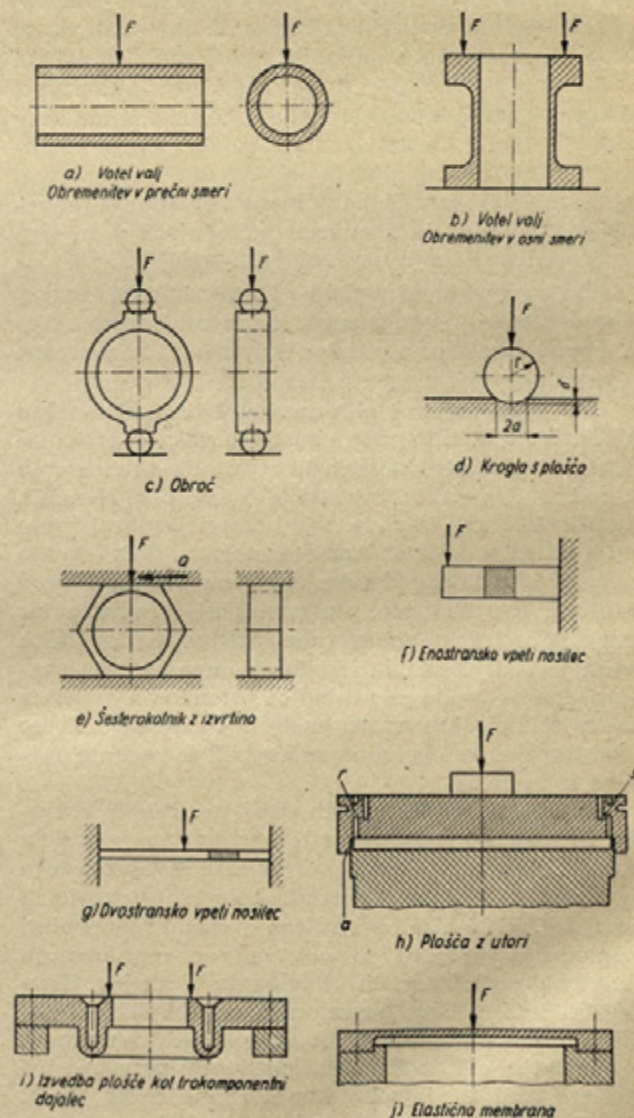
Naprava za merjenje sil in momentov sestoji iz naslednjih elementov (slika 1): 1. elastičnega dajalnika, 2. pretvornika ali oddajnika, 3. ojačevalnika in 4. sprejemnika z registrirno napravo. Kot izhodna velikost pri vseh merilnih postopkih za sile služi velikost deformacije nekega dajalnika, ki se pod vplivom obremenitve, torej sil oz. momentov, elastično deformira. Velikost merilne poti δ , ki je enaka velikosti deformacije elastičnega dajalnika, se pretvori s tkzv. pretvorniki v različne fizikalne veličine, n. pr. kapacitivnost, induktivnost, zračni tlak itd. Po ustrezni ojačitvi se prenašajo te vrednosti v sprejemnik oz. v registrirno napravo, kjer je omogočeno vizuelno opazovanje n. pr. kazalca instrumenta, katodnega ali svetlobnega žarka, grafične linije itd.

Dajalniki. Elastični dajalniki za merjenje sil in momentov imajo lahko najrazličnejše oblike in so lahko obremenjeni na nateg ali tlak, upogib ali torzijo. Na sliki 2, a do j, je prikazanih nekaj oblik dajalnikov, ki se uporabljajo v merilnih napravah, kakor n. pr.: votel valj, obroč, krogla s ploščo, šesterokotnik z izvrtino, plošča, membrana itd. Kot posebnost je potrebno omeniti obešenje plošče z utori po F. Eiseletu [1], ki preprečuje pri upogibnih obremenitvah vsako mehanično histerezo (slika 2 h). Ta izvedba pride v poštev v merilnikih, kjer so potrebne razmeroma velike merilne poti za ugotovitev sil. Današnji razvoj pa teži ravno k zmanjšanju elastičnih deformacij. Kakor kažejo izsledki zadnjih let, je najboljša izvedba plošče kot dajalnika membrana brez utorov, ki pa mora biti skrbno zvezana z ostalimi deli merilne naprave [2, 3]. Proračun elastičnih dajalnikov se opravi po znanih trdnostnih zakonih. Kakor dokazuje praksa, dosežena natančnost proračuna ne zadošča. Pravilne in točne vrednosti med obremenitvami in elastičnimi deformacijami je možno doseči le s poizkusom. Materiali, ki jih uporabljamo kot dajalnike, morajo slediti Hookovemu zakonu. Najprimernejša so močno legirana jekla.

Pretvorniki. Relativno majhne merilne poti δ , ki se s časom in velikostjo sile spreminjajo, se v merilniku pretvarjajo v različne fizikalne veličine kakor n. pr. hidravlične, pnevmatične, električne, elektromagnetne veličine itd. Te se v ojačevalniku

primerno ojačujejo. Kot prenosni organi služijo enostavni elementi, kakor n. pr. vzvodje, cevovodi, električna žica in podobno. Za ojačenje merilnih veličin služijo lahko najrazličnejši, n. pr. mehanski, elektronski ali transistorski ojačevalniki. Teh vprašanj tu ne bomo obravnavali podrobneje, ker ne spadajo neposredno v problematiko zgradbe merilnika.

V gradnji merilnikov se kot metode pretvarjanja elastičnih deformacij v dajalnikih v zadnjih letih uporabljajo predvsem električna načela. Ta slone na spremembi kapacitivnosti, ohmske odpornosti, induktivnosti itd. Ti načini pretvarjanja se v merilni tehniki sil pri odrezavanju največ uporabljajo. Zato se bomo omejili le na te, ki so praktično najpomembnejši. Električne metode pretvarjanja merilnih poti imajo tudi to prednost, da sta elastični dajalnik in pretvornik lahko ločena od ojačevalnika in sprejemnika. S tem je izpolnjena zahteva po majhnih dimenzijah teh dveh elementov.

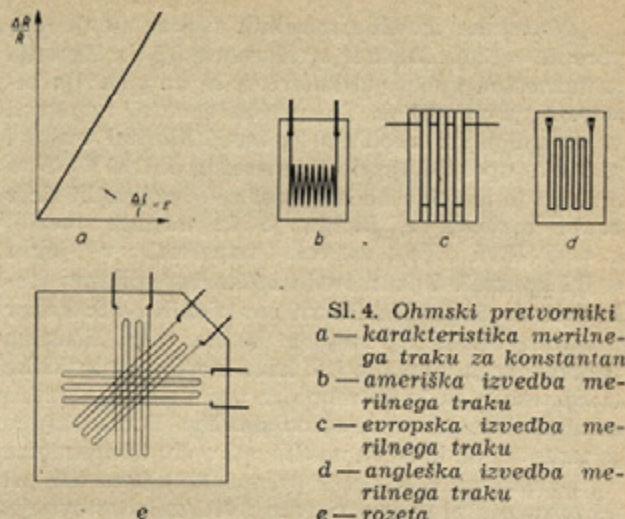


Sl. 2. Oblike elastičnih dajalnikov

Pretvorniki s spremembo kapacitivnosti. Za pretvarjanje elastičnih deformacij dajalnika se je v precejšnji meri uveljavila kapacitivna metoda. Kondenzator obremenimo tako, da zmanjšujemo ali povečujemo razdaljo med kondenzatorskima ploščama ali pa spreminjamo velikost ploskve kondenzatorja (slika 3 a, b). Sprememba razdalje med ploščama $\Delta\delta$ ali pa sprememba velikosti ploskev ΔA zaradi rezalnih sil povzročata spremembo kapacitete C . Pretvorniški sistem napajamo z izmeničnim tokom in merimo spremembo toka v mA. S primerno vezavo in oblikovanjem kondenzatorja lahko dobimo karakteristiko $I = f(\delta)$ oz. $I = f(F)$ poljubne oblike (slika 3 c). Za meritve rezalnih sil je ta način zaradi majhnih merilnih poti zelo ugoden. Velika občutljivost in malo zakrivljena karakteristika sta prednosti te metode. Razdalja med ploščama naj znaša 200 do 300 μ . Zbližanje lahko znese do 50 μ . Pomanjkljivost te metode je v otežkočenem spreminjanju merilnega območja. Sprememba temperature ne vpliva na merilne rezultate. Kolikor pa se dajalnik oz. kovinski deli v okolici raztegnejo ali skrčijo in se s tem zmanjša razdalja med ploščami, je to možno korigirati z ničelno lego instrumenta. Po tej poti je možno meriti frekvence do 10 000 Hz. V vsakem primeru dobimo zelo dobre in nepopačene rezultate.

Kot pretvornik po kapacitivnem načelu lahko uporabljamo tudi lastnosti piezoelektričnega kristala (turmalin, kremenov kristal itd.). Dopustne deformacije kristala smejo znašati le 1 do 3 μ . Temperatura ima velik vpliv na merilni rezultat. Zaradi velike občutljivosti na deformacije in temperature ter drugih pomanjkljivosti se ta način pretvornika v praksi ni obnesel najbolje.

Odpornostni pretvorniki. Ohmska odpornost nekega prevodnika ali polprevodnika z elastičnimi lastnostmi se v določenem tokovnem krogu spremeni, če se spremeni napetostno-elastično stanje v njem. Za merjenja sil in momentov na obdelovalnih strojih so se uveljavili različni postopki, in sicer: postopek s trdnim in tekočinskim polprevodnikom ter postopek z merilnimi trakovi. Prva dva načina se v praksi nista obnesla. Obravnavali bomo samo merilne trakove, ki lahko služijo kot pretvor-

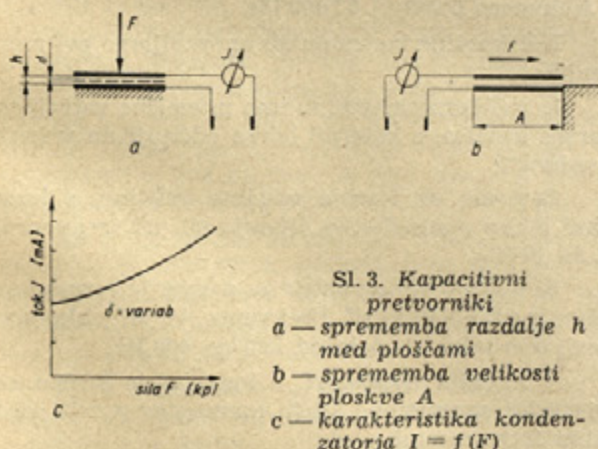


Sl. 4. Ohmski pretvorniki
a — karakteristika merilnega traku za konstantanove ali krom-nikljeve žice s premerom 0,02 mm, ki je nalepljena v meandrski obliki na folijo iz papirja ali plastične mase. Na konceh sta priložena na trak dva priključka iz debelejših žic. Na trgu so znane različne evropske in ameriške izvedbe (slika 4 b, c, d). Folijski daje električno izolacijo proti kovinski površini. Trakovi morajo izdržati zelo velike zahteve. Material mora imeti zelo veliko specifično odpornost, ki mora ostati med obremenitvijo konstantna, nadalje termoelektrične napetosti ne smejo vplivati na merilni rezultat, trak se mora dati dobro upogibati itd. Merilne trakove nalepljamo na elastične dajalnike s posebnim lepilom, ki mora v polnem obsegu prenašati vse premike dajalnika na trak. Pri tem je treba skrbno upoštevati navodila za lepljenje in sušenje, kakršna izdajajo dobavitelji merilnih trakov. Zelo važna je zaščita pred vlago, ki se pri meritvah na obdelovalnih strojih pojavlja zaradi hladilne tekočine ali olja. Dobro varovalo so vosek ali posebna zaščitna pokrivala iz gumija.

niki in so dali pri raziskovanju sil odrezavanja in obdelovalnih strojev zelo dobre rezultate.

Kovinska žica, ki je mehansko obremenjena, se raztegne in spremeni svojo električno odpornost. Sprememba odpora $\Delta R/R$ v določenem območju je proporcionalna raztežku ϵ (slika 4 a). Če poznamo elastične lastnosti materiala, je možno iz spremembe ohmskega odpora žice sklepati na napetosti, ki se pojavljajo v merjencu. Merilni trak je iz konstantanove ali krom-nikljeve žice s premerom 0,02 mm, ki je nalepljena v meandrski obliki na folijo iz papirja ali plastične mase. Na konceh sta priložena na trak dva priključka iz debelejših žic. Na trgu so znane različne evropske in ameriške izvedbe (slika 4 b, c, d). Folijski daje električno izolacijo proti kovinski površini. Trakovi morajo izdržati zelo velike zahteve. Material mora imeti zelo veliko specifično odpornost, ki mora ostati med obremenitvijo konstantna, nadalje termoelektrične napetosti ne smejo vplivati na merilni rezultat, trak se mora dati dobro upogibati itd. Merilne trakove nalepljamo na elastične dajalnike s posebnim lepilom, ki mora v polnem obsegu prenašati vse premike dajalnika na trak. Pri tem je treba skrbno upoštevati navodila za lepljenje in sušenje, kakršna izdajajo dobavitelji merilnih trakov. Zelo važna je zaščita pred vlago, ki se pri meritvah na obdelovalnih strojih pojavlja zaradi hladilne tekočine ali olja. Dobro varovalo so vosek ali posebna zaščitna pokrivala iz gumija.

Vpliv temperature je potrebno iz meritve izločiti. Napetosti, ki nastajajo zaradi temperaturnih sprememb, je možno upoštevati računsko ali pa jih kompenziramo s korekturnim merilnim trakom. Tega je potrebno nameščati na povsem neobremenjeno mesto, ki pa je izpostavljeno enakim temperaturam kakor aktivni merilni trak. Za več merilnih mest je potreben samo en korekturni merilni trak. Pri velikih dinamičnih obremenitvah oziroma hitrih nihanjih ni potrebna temperaturna kompenzacija. Za merjenje napetosti v dveh oseh uporabljamo namestitve trakov v obliki rozete (slika 4 a).



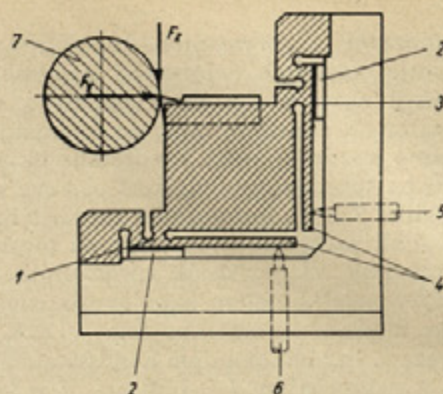
Sl. 3. Kapacitivni pretvorniki
a — sprememba razdalje h med ploščami
b — sprememba velikosti ploskve A
c — karakteristika kondenzatorja $I = f(F)$

Normalne izvedbe merilnih trakov imajo odpore $R = 120 \dots 1000 \Omega$ s toleranco 0,5 %. Zgornja raztezna meja, pri kateri se še ne pojavlja histereza, je pri 0,5 %. To ustreza enosni napetosti v jekleni palici okoli 100 kp/mm^2 . Merilni trakovi se lahko uporabljajo do temperatur do 150°C . S to metodo je merilna občutljivost zelo velika, in sicer znaša raztezek ϵ , ki ga je še mogoče meriti, $\epsilon = 5 \cdot 10^{-6}$. To ustreza napetosti v jeklu $\approx 0,1 \text{ kp/mm}^2$. S to metodo lahko spremljamo frekvence do $50\,000 \text{ Hz}$. Povrh omenjenih odlik kakor majhnih dimenzij, majhne lastne teže, širokega frekvenčnega območja itd. kaže merilni trak veliko stabilnost in ga je potrebno za vse meritve, statične in dinamične umerjati samo statično. Pomanjkljivo je samo to, da je treba upoštevati vpliv temperature na merilni rezultat, česar pri merilnikih za sile pri odrezavanju ni vedno mogoče rešiti najenostavneje. Veliko objavljenih izvedb merilnikov sil z merilnimi trakovi v zadnjih letih dokazuje izredno uspešnost te metode.

Induktivni pretvorniki. Sprememba indukcije oz. samoindukcije s spremembo razdalje h med elektromagnetom in kotvo zaradi vpliva sile F se lahko izrablja kot pretvornik (slika 5). Posebno v zadnjem času se je začela merilna tehnika v vedno večji meri posluževati induktivnih pretvornikov, ker so postali elementi, torej tuljave z jedri zelo majhne (v premeru do 3 mm in dolžini do 6 mm). Pri primerno dimenzioniranem induktivnem pretvorniku in velikih merilnih poteh (do 100μ) niso potrebni posebni ojačevalniki. Tuljave lahko neposredno priključujemo na kazalni instrument. Praktične izvedbe bomo obravnavali pri konstrukcijah merilnikov.

Razen navedenih električnih sistemov pretvarjanja elastičnih deformacij dajalnikov je znana v merilni tehniki sil še cela vrsta pretvornikov, ki delujejo po drugih fizikalnih načelih kakor n. pr.: pnevmatičnih, hidravličnih, optičnih itd. Razvojne težnje pri gradnji merilnikov sil in momentov se poudarjeno kažejo v izrabi električnih metod pretvarjanja. Zato ostalih možnosti ne bomo navajali na tem mestu.

V praktičnih izvedbah merilnikov se marsikdaj za merjenje deformacij dajalnikov uporabljajo le kombinacije vzvodov, zobnikov in vzmeti (glej iz-



Sl. 6. Dvokomponentni merilnik za sile pri struženju (E. Merchant [4])

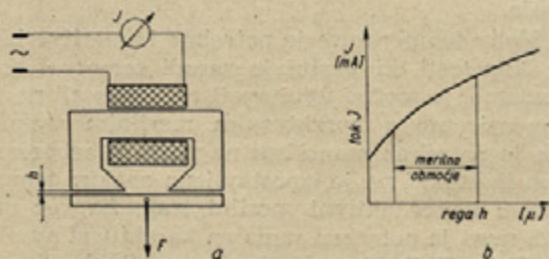
1 — vzmetni členek, 2 — dušilna plošča, 3 — oljni film, 4 — vzvoda, 5 — merilni indikator za silo F_y , 6 — merilna ura za silo F_z , 7 — obdelovanec

vedbo Merchantovega merilnika (slika 6)). Ti so združeni v tkzv. merilnih urah, ki omogočajo meritve deformacij do velikosti 1μ . Njihova naloga ni, da bi spreminjali merilno pot dajalnika v neko drugo fizikalno veličino, temveč le ojačevali majhne pomike dajalnika in jih registrirali. Teh elementov ne moremo prištevati k pretvornikom, temveč k ojačevalnikom in sprejemnikom oz. registrirnim napravam. Njihova uporaba je zelo enostavna in primerna za enostavnejše meritve sil, n. pr. pri struženju, kjer je potek sil približno konstanten.

Sprejemniki in registrirne naprave. Mimo vprašanj izoblikovanja elastičnih dajalnikov in pretvornikov je kazno na kratko vmes nakazati možnosti sprejemanja pretvorjenih električnih vrednosti in njihovega registriranja. Sprejemniki za merjenje s kapacitivnimi, ohmskimi in induktivnimi pretvorniki so izoblikovani večinoma kot Wheatstonovi mostiči. Ta vezava ustreza zahtevam po občutljivosti in natančnosti, ki sta potrebni pri omenjenih meritvah. Rezultati merjenja so odvisni od nihanj napajalne napetosti in frekvence toka. Zato so potrebne kombinacije s kapacitivnimi, ohmskimi in induktivnimi odpori, stabilizatorji napetosti itd. V določenih primerih je treba ojačiti tok ali povečati frekvenco. Nosilna frekvenca znaša običajno 50 Hz . Za zahtevnejša merjenja se uporablja tok s frekvenco $5\,000 \dots 50\,000 \text{ Hz}$.

Kot kazalne instrumente uporabljamo pri merjenjih:

1. miliampermeter; ta ima precejšno vztrajnost zaradi kazalca, s katerim lahko odčitujemo srednje vrednosti;
2. pisala za risanje merilne veličine, s katerimi lahko ugotovljamo nihanja sil pri frekvencah 1 do 10 Hz ;
3. oscilograf na pentljo za merjenje razmeroma hitro menjajočih se sil. Frekvence, ki jih lahko ugotovljamo tako, znašajo od 300 do 400 Hz ;
4. katodni oscilograf, s katerim je možno registrirati spremembe sil in momentov z zelo visokimi frekvencami.



Sl. 5. Induktivni pretvornik
a — izvedba z dušilno tuljavo
b — karakteristika pretvornika

Slednjič potrebujemo za registracijo najrazličnejše pisalne aparate, registrirne fotografske kamere itd.

2.2 Zahteve za merilno napravo za sile in momente

Naprava za merjenje sil in momentov pri obdelavi kovin mora ustrezati naslednjim zahtevam:

1. merilne poti δ naj bodo čimmanjše;
2. lastna frekvenca merilnika naj bo čimvišja;
3. elastični dajalniki naj bodo čimmanjši;
4. zelo natančno mora biti zmerom zagotovljena reproduciranje merilne vrednosti;
5. za pretvarjanje, ojačevanje in registriranje merilnih poti naj bodo v rabi postopki z majhno vztrajnostjo;
6. odvajanje toplote in odrezkov naj bo čimboljše;
7. izvedba merilnika naj bo čim enostavnejša.

Ad 1. Pri obdelavi kovin z odrezavanjem naj se čimmanj posega v obdelovalni postopek. Zato je potrebno elastične dajalnike dimenzionirati tako, da merilne poti ne vplivajo na potek odrezavanja. Pri majhnih merilnih poteh je zagotovljena tudi statična in dinamična togost merilnega instrumenta.

Ad 2. Dinamična togost je dana z lastno frekvenco in dušenjem merilnika. Pri struženju n. pr. nastajajo samovzbujena nihanja obdelovanca s frekvencami ~ 150 Hz. Merilna naprava mora biti dimenzionirana tako, da leži njena lastna frekvenca 3- do 4-krat višje ali nižje od frekvence samovzbujenega nihanja. Podrobno razmisliti je treba pri merilnikih za sile pri frezanju, brušenju itd. V praksi pa je težko dosegati zahtevane visoke lastne frekvence merilnika. Zato se merilni sistem duši, tako da se dosegajo nižje frekvence, ki naj leže v zahtevanem območju. Na praktičnih izvedbah merilnikov si bomo ogledali, kako se praktično izvaja dušenje sistema.

Ad 3. Ta zahteva izvira iz konstruktivnih razlogov. Merilna naprava naj bo čimmanjša, ker jo je le tako mogoče namestiti na mesta, kjer je le malo prostora. Vrh tega lahko dosegamo tako z majhnimi masami zelo visoke lastne frekvence merilnika.

Ad 4. Izvedba merilnika mora biti takšna, da se pri deformacijah dajalnikov pojavlja čimmanjša mehanična histereza. Po možnosti je treba izdelati napravo iz enega samega jeklenega kosa. S tem se namreč preprečuje vsako trenje na dotikalnih mestih in se ne morejo pojavljati vijačni efekti. To odločujoče vpliva na velikost histereze in s tem na natančnost reproduciranja merilnih vrednosti.

Ad 5. Kakor smo že omenili, je najprimernejše, da se za pretvarjanje, ojačevanje in spreminjanje uporabljajo električni načini. Ti delujejo brez vztrajnosti in omogočajo natančno zaznavanje časovnega poteka sil in momentov.

Ad 6. Konstruktivna izvedba merilnika naj bo takšna, da lahko odrezki prosto odtekajo. Če bo izpolnjena ta zahteva, niti toplota, ki se preko od-

rezkov dovaja v merilnik, ne bo v velikih količinah dotekala na elastične dajalnike.

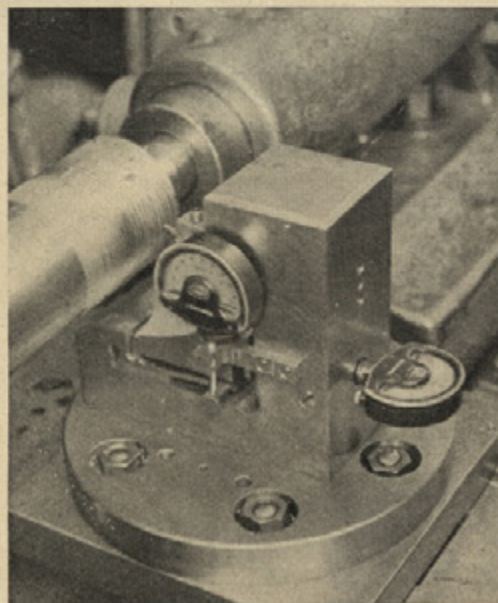
Ad 7. Zahteva po enostavni izvedbi je neogibna že spričo zahteve pod 4. Zato je priporočljivo graditi merilnike čim enostavneje, z manjnjim številom delov in po možnosti iz enega kosa. Čim enostavnejša je konstrukcija, tem cenejši bo merilnik.

2.3 Konstruktivne izvedbe merilnikov

V naslednjem bomo prikazali nekaj značilnih izvedb merilnikov sil in momentov, ki so se zelo dobro obnesli v praksi. Iz teh primerov je razvidno, kakšna pota lahko ubere konstrukter pri osnutku merilnika in kakšne so zanj možnosti kombinacij.

2.31 Merilniki pri struženju

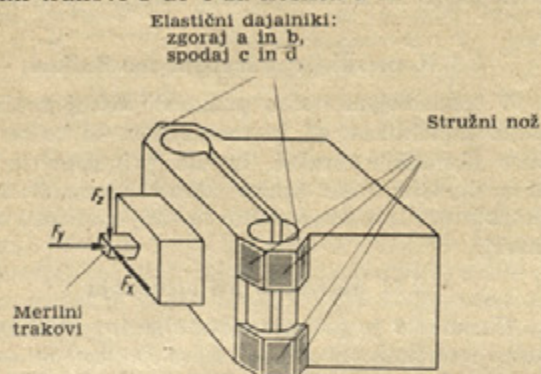
Na sliki 6 je prikazan Merchantov dvokomponentni merilnik sil [4]. Z njim je možno meriti glavno rezalno silo F_x in odzivno silo F_y . Kot elastična dajalnika služita dva vzmetna členka. Deformacije teh členkov se v povečavi preko vzvodov prenašajo na mehanske merilne indikatorje (merilne ure, mikrokator ali kakšen podoben instrument). Merilnik je izdelan iz enega jeklenega kosa. Za dušenje nezaželenih nihanj in varovanje merilnih indikatorjev so vstavljene v rege posebne dušilne plošče in oljni sloj. Da se oljni sloj obdrži v vertikalni legi, je bilo treba rešiti problem tesnjenja. Togost tega merilnika sil znaša $5 \text{ kp}/\mu$. Merilno območje leži med 20 in 200 kp. Na sliki 7 je merilnik prikazan na stružnici. Izvedba je enostavna, zanesljiva in robustna. Pomanjkljivo pa je predvsem to, da je treba med merjenjem odstranjevati zgornji suport na stružnici. To izvedbo merilnika lahko zelo priporočamo za obratne laboratorijske



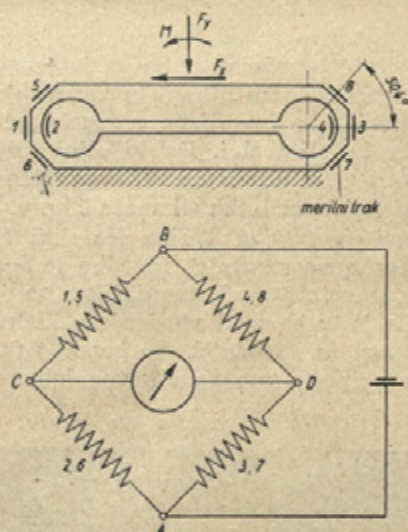
Sl. 7. Dvokomponentni merilnik za sile na stružnici

raziskave. Zaradi enostavne izvedbe si ga lahko zgradi vsak interesent brez posebnih težav.

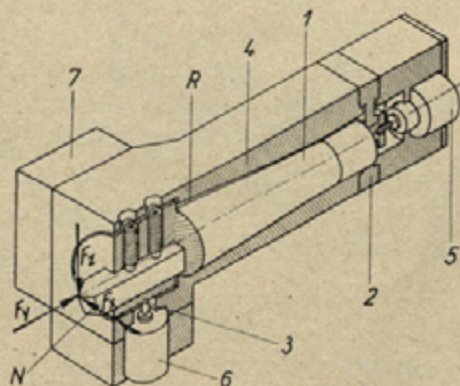
Trokomponentni merilnik za sile, ki je bil izdelan na tehnološkem inštitutu MIT v ZDA [5], je prikazan na sliki 8. Kot elastični dajalniki služijo štiri nosilci a, b, c in d. Nanje so prilepljeni merilni trakovi 1 do 8 za nosilca a in b in 9 do 16



Sl. 8. Trokomponentni merilnik za sile pri struženju (N. H. Cook, E. G. Loewen, M. C. Shaw [5])



Sl. 9. Nalepljenje in vezava merilnih trakov na trokomponentni merilnik sil



Sl. 10. Trokomponentni merilnik sil pri struženju (Sistem H. Opitz [2])

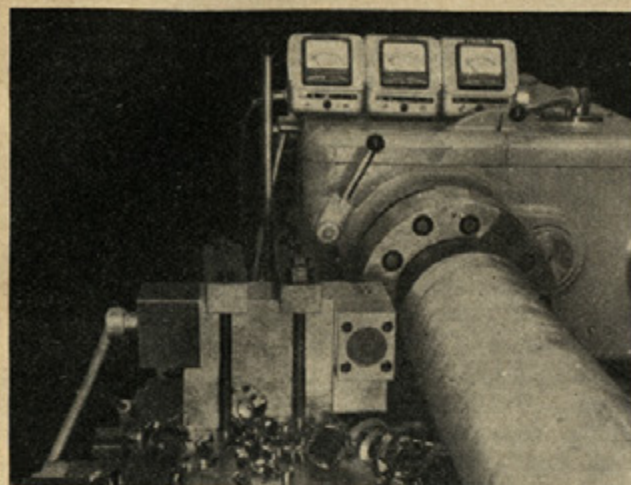
za nosilca c in d, kakor kaže slika 9. Ti merilni trakovi so zvezani med seboj v mostiščni vezavi, tako da so deformacije, ki nastajajo zaradi vseh treh rezalnih sil, prikazane v pravih velikostih v smeri x , y in z . Medsebojno vplivanje posameznih sil F_x , F_y in F_z kakor tudi temperaturni vplivi na meritev so zaradi načina vezave izključeni. Merilno območje tega merilnika znaša od 1 do 650 kp. Njegova togost je izredno velika in znaša $60 \text{ kp}/\mu$. Celoten merilnik je izdelan iz enega kosa jekla, vsaka mehanska histereza je s tem onemogočena. Izvedba je zelo enostavna in robustna. Za meritev v praksi je mogoče to izvedbo samo priporočati. Kot kazalne oz. registrirne instrumente lahko uporabljamo oscilografe na pentljo, katodne oscilografe itd.

Kot značilno izvedbo z induktivnimi pretvorniki navajamo še trokomponentni merilnik sil po H. Opitzu [2], ki je prikazan na sliki 10. Stružni nož N je pritrjen v plavajoči nosilec 1. Ta je vpet na njegovi zadnji strani v membrano 2, ki je elastični dajalnik za odzivno silo F_y . Glavna rezalna sila F_z se prenaša preko noža in člena 3 na membrano induktivnega pretvornika. Enako je izvedena membrana, ki lovi podajalno silo F_x . Kot elastični dajalniki služijo torej membrane, ki so vpete v nosilno telo. Kot pretvorniki služijo induktivni elementi 5 do 7, ki omogočajo kljub majhni merilni poti ($\delta \leq 0,1 \text{ mm}$) uporabo enostavnih sprejemnikov in brez elektronskih ojačevalnikov. Velikost sile se odčituje s kazalnimi instrumenti in je to zato zelo primerno za uporabo v praksi (slika 11). Prostor R med plavajočim nosilcem in zunanjim telesom merilnika 4 je izpolnjen z oljem. S tem je onemogočeno škodljivo nihanje med meritvami. Te merilnike gradijo za štiri merilna območja, in sicer do 1 000, 2 500, 6 000 in 15 000 kp. Togost znaša $10 \text{ kp}/\mu$. Konstruktivna izvedba je nekoliko bolj zapletena, vendar je ta sistem v praksi dal odlične rezultate. Pri gradnji takšnega merilnika je treba posebno paziti na izbiro toleranc pri posameznih sedežih za membrane, kakor tudi na velikosti rege med plavajočim nosilcem noža in zunanjim telesom merilnika. Ta naj znaša $\sim 0,5 \text{ mm}$.

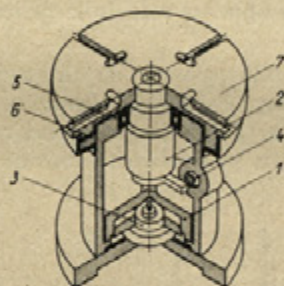
2.32 Merilniki za sile in momente pri vrtenju

Za istočasno merjenje sil in vrtilnih momentov pri vrtenju so bile razvite posebne merilne doze. Zahteve, ki jih je treba upoštevati zaradi posebnega značaja vrtenja, so naslednje: sveder ima razmerna majhna vzvojno togost. Zaradi tega je nagnjen k nihanjem, ki se posebno neugodno očitujejo pri meritvah vrtilnega momenta. Zategadelj je potrebno pri konstrukciji takšnega merilnika zelo paziti na pravilno dušenje in pravilno izbiro togosti merilne mize.

Na sliki 12 je prikazan klasični zastopnik merilne mize za vrtenje po sistemu H. Opitz [6]. Kot elastični dajalnik služijo za podajalno silo membrana 1, za torzijski moment pa jeklena os 2 z vzvodom. Kot pretvornika služita induktivna elementa 3 in 4. Torzijska palica je vodena v valjčnem



Sl. 11. Trokomponentni merilnik sil na stružnici pri obdelavi gredi
Trije miliampermetri kažejo velikosti posameznih komponent F_x , F_y , F_z



Sl. 12. Merilnik sil in momentov pri vrtanju (Sistem H. Opitz [6])

ležaju 5. Dušilni obroč 6 oz. dušilne ploskve so nameščene na velikem premeru. Merilna miza za sile in momente pri vrtanju se gradi v treh velikostih; ustrezajoče vrednosti so razvidne iz tabele.

Premer svedra mm	Obremenitev	
	podajalna sila kp	vrtlilni moment m kp
15	80	500
30	2 500	2 500
60	5 000	12 000

Maksimalne deformacije dajalnikov znašajo tudi tu po 0,1 mm. Kot kazalni instrumenti služijo miliampermetri. Izvedba tega merilnika je razmeroma enostavna in zelo zanesljiva. Na sliki 13 je prikazana merilna miza med merjenjem na vrtilnem stroju.

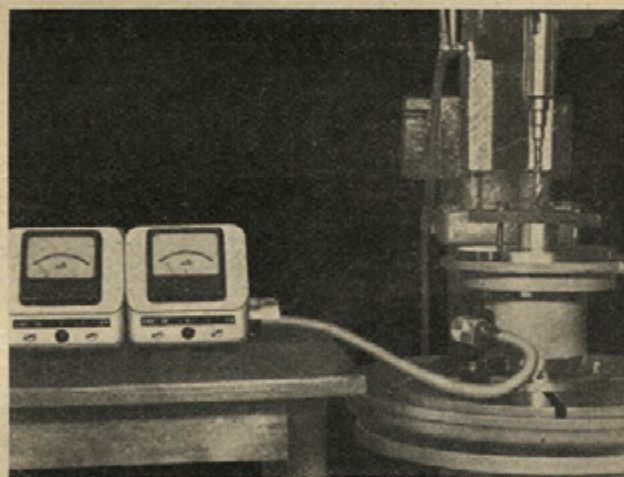
2.33 Merilniki za sile pri frezanju

Kakor je znano, lahko nastajajo pri frezanju tri komponente sil in vrtlilni moment M . Najvažnejša je glavna rezalna sila F_z , ki se pojavlja v isti smeri kakor rezalna hitrost v dotikalni ploskvi med zobom in obdelovancem. Znale so mnoge konstruk-

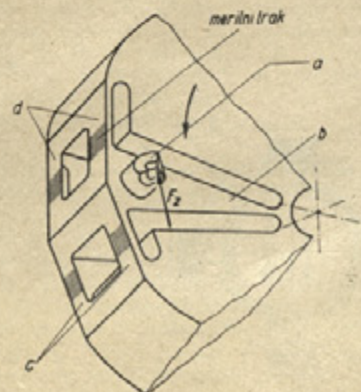
cije merilnikov za sile in momente pri frezanju, a se vse doslej v praksi ni nobena uveljavila z uspehom. Dve izvedbi, ki sta se izkazali kot uporabni, sta na kratko opisani nižje.

Na sliki 14 je prikazana izvedba merilne glave s tkzv. merilnim zobom [2]. En zob frezala je pritrjen v nosilec b. Ta pa je podprt z dvema vlečnima palicama c in dvema tlačnima palicama d. Na te palice so nalepljeni merilni trakovi. Preko drsalnih obročev se vodijo ustrezajoče spremembe tokov na katodni oscilograf, kjer se z registrirno komoro lahko zaznamujejo sile.

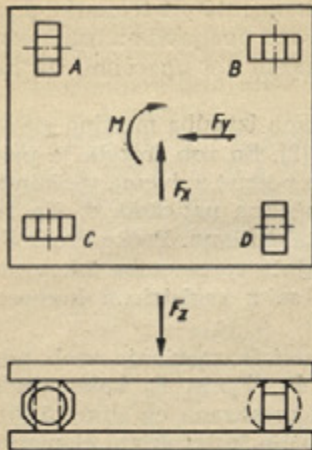
Merilna miza, ki omogoča merjenje vseh teh komponent rezalne sile F_x , F_y in F_z kakor tudi vrtlilnega momenta M , je prikazana na sliki 15 [5]. Kot elastični dajalniki služijo šesterokotni elementi z izvrtinami (sl. 2 e). Na straneh so prilepljeni merilni trakovi, ki merijo elastične deformacije. Merilno območje lahko spreminjamo od 2 do 1 600 kp, kar je odvisno od izvedbe elastičnih dajalnikov. Tudi togost se da spreminjati ustrezno, in sicer od $3 \cdot 10^{-3}$ do $3 \cdot 10^{-1}$ kp/ μ . V praksi se je ta izvedba merilne mize zelo dobro obnesla pri raziskovanjih frezanja.



Sl. 13. Merilnik sil in momentov pri vrtanju [6]



Sl. 14. Merilnik glavne rezalne sile pri frezanju (H. Opitz, K. J. Küsters [2])



Sl. 15. Merilna miza za sile in momente pri frezanju (N. H. Cook, E. G. Loewen, M. C. Shaw [5])

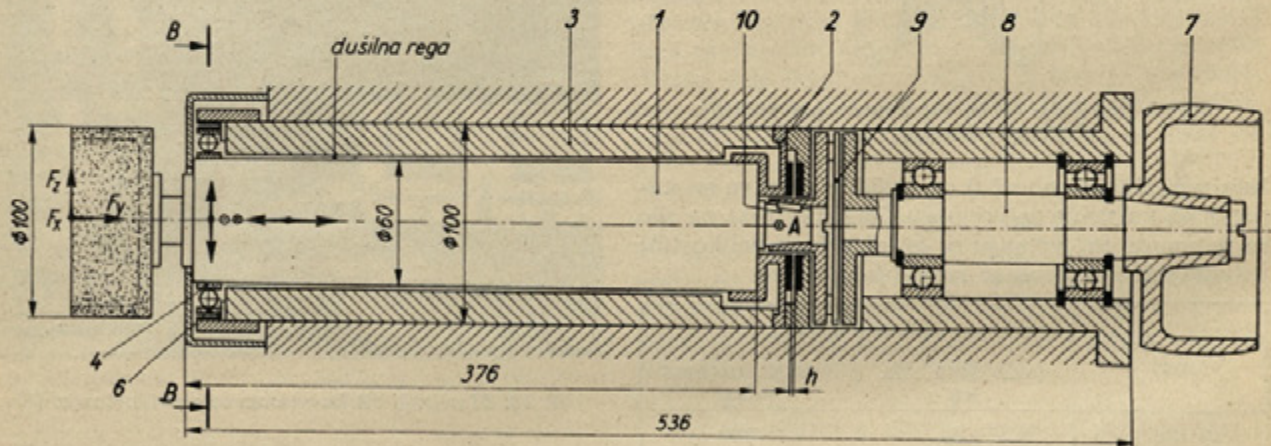
2.34 Merilniki za sile pri brušenju

Tudi pri brušenju je potrebno ugotavljati vse tri komponente rezalne sile. G. Schlesinger [7] je prvi raziskoval glavno rezalno komponento F_z pri brušenju. Nadalje so znane izvedbe Kurreina, H. Opitza, E. Saljeta [8, 9, 10] in drugih. Ti merilniki omogočajo merjenje samo ene komponente rezalne sile. Istočasno merjenje vseh treh rezalnih komponent pa je velikega pomena ravno pri brušenju, ker je zaradi spreminjajočih se lastnosti brusa zelo težko reproducirati vselej enake vprijemne pogoje.

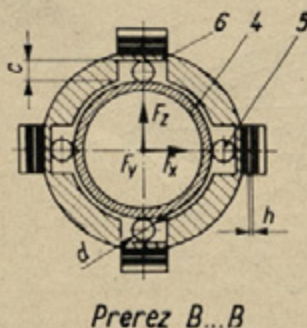
Na sliki 16 je prikazana izvedba trokomponentnega merilnika za sile po J. Pekleniku [3]. Brusilno vreteno 1 je vpeto preko membrane 2 v okrov 3. S tem so omogočeni elastični premiki vretena okoli točke A v vseh smereh. Na strani, kjer je vpet skledasti brus, je na vreteno natisnjen kaljeni obroč 4. Vreteno drže v določeni vnaprej napeti legi proti mostiščnim nosilcem 6 (prez B-B) štiri kroglice 5. Razdalje c med nosilci in vretenom je treba izbrati tako, da je premer krogel d za približno 0,1 mm večji od razdalje c ; $d > c$.

Membrana 2 in štirje mostiščni nosilci 6 so elastični dajalniki merilnika. S tem je omogočeno merjenje sil F_x , F_y , F_z ene od druge neodvisno. Vrtilni moment za pogon brusa se dovaja od motorja preko jermenice 7, gredi 8, sklopke 9 na vreteno gred 10. Vretenška merilna enota je razbremenjena jermenskih sil. Sklopka 9 je v aksialni smeri izvedena zelo mehko, tako da elastični premiki vretenške enote v tej smeri ne morejo biti izpostavljeni nikakršnim vplivom. Togost merilne enote je v vseh treh smereh enaka in znaša 2 kp/ μ . Na sliki 17 je opisani merilnik prikazan v posebnem stojalu.

Elastične deformacije dajalnikov se merijo s spremembo kapacitivnosti kondenzatorjev. Ena kondenzatorska plošča je pritrjena na mostiščnem nosilcu 6, druga pa izolirano nameščena na okro-



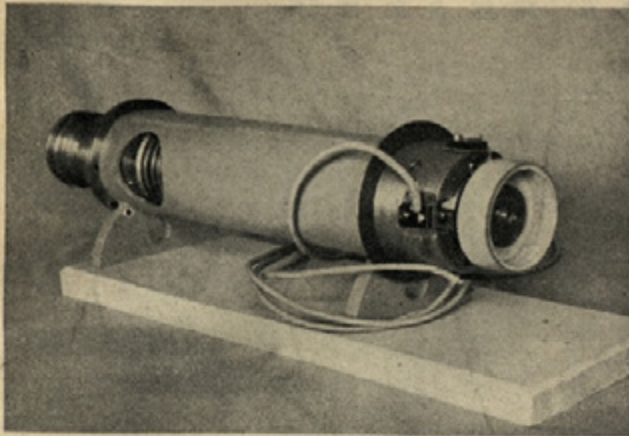
Sl. 16. Trokomponentni merilnik za sile pri brušenju (J. Peklenik [3])



Prerez B...B

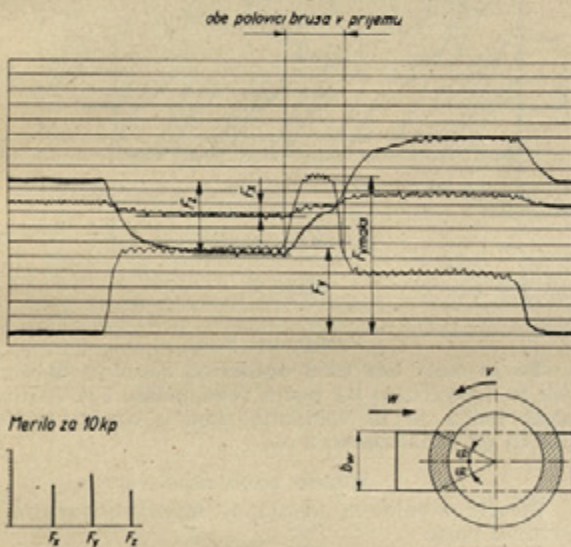
vu 3. Razdalja med ploščama znaša $h = 0,2$ mm. Z diferencialno vezavo kondenzatorjev je bilo mogoče povečati občutljivost meritev. Z oscilogramom s tremi pentljami se registrirata potek in velikost posameznih komponent rezalne sile. Za številčno ugotovitev velikosti sil je treba merilno napravo ustrezno umeriti. Slika 18 kaže merilni oscilogram sil z ustrežajočimi pogoji pri skledastem brušenju. Prikazani merilnik je izveden za merilno območje od 1 do 100 kp.

V zadnjem času so postale raziskave sil, ki nastajajo na posameznih brusnih zrnih med bru-



Sl. 17. Trokomponentni merilnik za sile pri brušenju

šenjem, zelo pereče. Izvedba takšnega merilnika po J. Pekleniku [11] je prikazana na sliki 19. Osnovna zamisel je podobna zgoraj opisani izvedbi. Razloček je le ta, da se merijo velikosti rezalnih sil, ki se pojavljajo na posameznih zrnih F_{zk} , F_{yk} , F_{zk} na obdelovancu in ne na orodju. Kot dajalniki služijo membrana 2 za odzivno silo F_{yk} ter dva para mostiščnih nosilcev 3, ki merijo glavno rezalno silo F_{zk} in podajalno silo F_{zk} . Nosilec obdelovanca 1



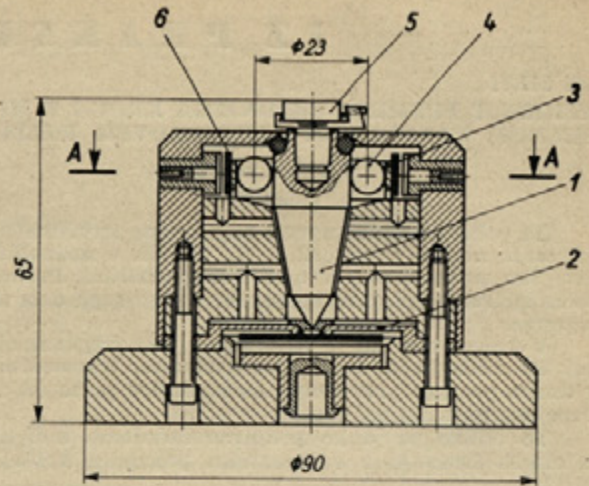
Sl. 18. Potek sil pri skledastem brušenju

Raziskovalni pogoji: brusilna hitrost $v = 10,4$ m/s, podajalna hitrost $w = 8$ m/min, širina obdelovanca $b_{w0} = 25$ mm, pristavitve $a = 20 \mu$, kot $\varphi_1 = \varphi_2$.

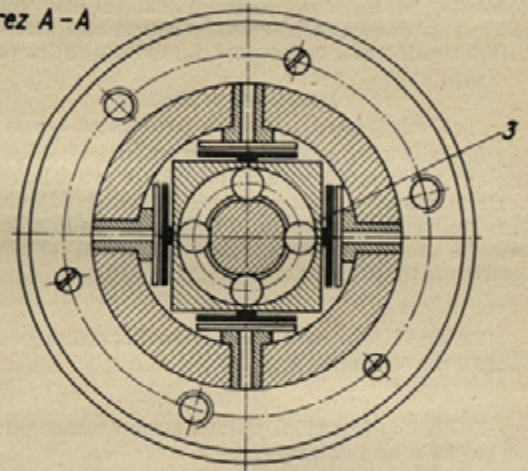
Razmerje sil $F_x : F_z : F_y = 3,0 : 13,6 : 23,5$; $F_{y \max} = 46$ kp

je vpet s štirimi krogli 4 v vnaprej napete mostiščne nosilce. Z ošiljenim koncem je uprt v membrano 2. Obdelovanec 5 je možno poljubno izmenjavati. Spremembe elastičnih deformacij se ugotavljajo s spremembo kapacitivnosti kondenzatorjev 6 — podobno kakor zgoraj.

Merilno območje merilnika znaša od 10 do 500 p pri togosti $0,05$ p/ μ .



Prerez A-A



Sl. 19. Trokomponentni merilnik za merjenje sil na enem brusilnem zrnu (J. Peklenik [11])

Literatura

- [1] Eisele, F.: Raziskave na T. H. München, 1932.
- [2] Opitz, H. — Küsters, K. J.: Meßgeräte zur Ermittlung der Schnittkraft und Schnitttemperatur bei Zerspanungsvorgängen. (Werkstatt und Betrieb, 1952, št. 2.)
- [3] Peklenik, J.: Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. (Doktorska disertacija na TVS Aachen, 1957.)
- [4] Merchant, M. E.: Basic Mechanics of the Metal Cutting Process. (Journ. Appl. Mech. 1944, Sept.)
- [5] Cook, N. H. — Loewen, E. G. — Shaw, M. C.: Machine — tool dynamometers a current appraisal. (Amer. Machinist, May 10, 1954.)
- [6] Opitz, H.: Forschungsbericht »Zerspanung«, 1955.
- [7] Schlesinger, G.: Das Versuchsfeld für Werkzeugmaschinen an der T. H. Berlin. (Z. VDI, 1912, S. 857/862.)
- [8] Kurrein, M.: Die Messung der Schleifkraft. (Werkstattstechnik, 1927/5.)
- [9] Opitz, H. — Starck, H.: Beitrag zur Erforschung des Schleifvorganges. (Wirtschaftliche Fertigung und Forschung, C. Hanser Verlag, 1949, S. 184/206.)
- [10] Salje, E.: Grundlagen des Schleifvorganges. (Werkstattstechnik u. Maschinenbau, 1953/2, 4.)
- [11] Peklenik J.: Raziskave na TVS Aachen, 1957.

Avtor: dr. ing. Janez Peklenik, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Technischen Hochschule Aachen.