2. Za dovajanje zraka v sredino ni primerna votla turbinska cev, marveč je potrebna posebna cev, ki ga dovaja s spodnje strani. Zgoraj odprta cev sega do odprtine v kapi gonilnega kolesa, razen tega pa je na zgornjem koncu gosto perforirana v dolžini 1 d do 3 d, pri čemer velja večja vrednost za manjšo specifično vrtilno hitrost in obratno.

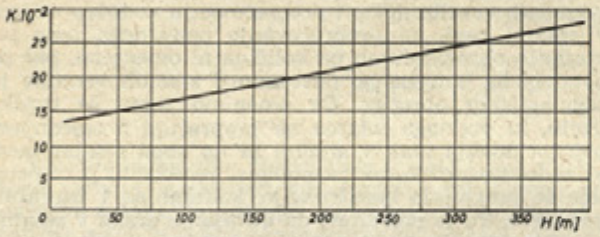
3. Na obodu naj bodo za dovod zraka vgrajena vsaj štiri kolena z izstopom aksialno navzdol z izmerami po sliki 4.

4. Oba dovajalna sistema nista združena, marveč imata dovodne cevi speljane ločeno v drenažo ali prostor zunaj strojnice. Cevi sta opremljeni s povratnima ventiloma, da ni mogoč izstop vode, pač pa vstop zraka ob vsakokratnem podtlaku.

5. Vsota dovodnih prerezov za oba sistema je dana s formulo:

$$S \geq K \frac{Q}{250},$$

pri čemer je vrednost koeficienta K, določena po dosedanjih izkušnjah, razvidna iz diagrama na sliki 5.



Sl. 5. *Vrednost koeficienta K, s katerim se določajo prerezi sistemov za dovod zraka v sesalno cev*

Prerez S [m²] pa se razdeli na centralnega (S_c) in obodnega (S_o) v razmerju

$$S_c/S_o = 7/3 \qquad S_c + S_o = S$$

Predlog je utemeljen z naslednjim:

— Turbinska gred ni primerna za dovajanje zraka, ker bi morebitno prelivanje vode škodovalo agregatu, žvižgajoče sesanje v strojnici pa je tudi neugodno.

— Cev v sredini sesalne cevi usmerja jedro vrtinca, ki zato manj opleta. S primernim perforiranjem je dosegljivo dovajanje zraka kjer koli niže, če se taka potreba izkaže kot uspešna.

— Najvažnejša pa je popolna ločitev obeh dovajalnih sistemov, saj bi se v nasprotnem primeru ob hkratnem tlaku v sredini in podtlaku na obodu (ali obratno) po cevih pretakala voda, ne pa sesal zrak.

— Pri nagli razbremenitvi turbine oba sistema skupaj omogočata sesanje zraka, ob povratku vodne mase pa ga zadržujeta in ustvarjata zračno blazino, ki povratni udarec vsaj ublaži.

Zaključek

Dovajanje zraka po dveh ločenih sistemih je prikazano na sliki 4. Predlog zadeva področje, ki kompleksno še ni raziskano in terja zato še laboratorijske raziskave v naslednjih smereh:

— primerjalna merjenja na modelni turbini in ustrezni industrijski izvedbi glede ukrepov in analogije vpliva na nemirni tek pri manjših obremenitvah;

— ugotovitve zakonitosti o poteku tlakov v sredini in na obodu sesalne cevi, odvisno od n_{ss}, obremenitve in lege spodnje vodne gladine;

— ugotovitev najugodnejšega načina za dovajanje zraka in njegove količine;

— konstrukcijsko izvedbo dovajanja zraka oz. vode.

Literatura

[1] P. Dériaz, A contribution to the understanding of flow in draft tubes of Francis turbines (AIRH, Symposium de Nice 1960, B-1).

[2] I. Vušković, Über Rotationsverluste hinter Laufrädern von Turbomaschinen, Escher Wyss Mitteilungen, 1941.

[3] M. Nechleba, Vodní turbiny, jejich konstrukce a příslušenství, Praha, SNTL 1964.

[4] N. Obradović, Pseudokavitacija, Tehnika, 1958/4, Beograd.

[5] W. Thuss, Betriebszustände von Kaplanturbinen, Voith 1958.

[6] Habilitacijsko delo dr. ing. Iva Vuškovića, Beograd, 1960.

Naslov avtorjev: prof. ing. Albert Struna, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani;
ing. Leopold Šote, Litostroj, Ljubljana

DK 537.533.35:681

Nekaj problemov fine mehanike pri konstrukciji elektronskih mikroskopov

ALEŠ STROJNIK

Uvod

Elektronski mikroskop (okrajšano EM) je bralcu »Strojnišega vestnika« že znan, saj je Leskovar [1] že opisal njegovo delovanje in poglavitna področja za uporabo. Verjetno pa je bralcu manj znano, da je EM v električnem in mehanskem pogledu ena najbolj zahtevnih konstrukcij, kar jih pozna sodobna tehnika. V ilustracijo naj že kar v uvodu navedemo dva primera, ki bosta pokazala, kaj terja EM od elektrotehnika in finomehanika.

Kakor je znano, je goriščna razdalja f elektronske leče, ki z magnetnim poljem gostote B krivi tir elektronov, pospešenih z napetostjo U, dana z obrazcem

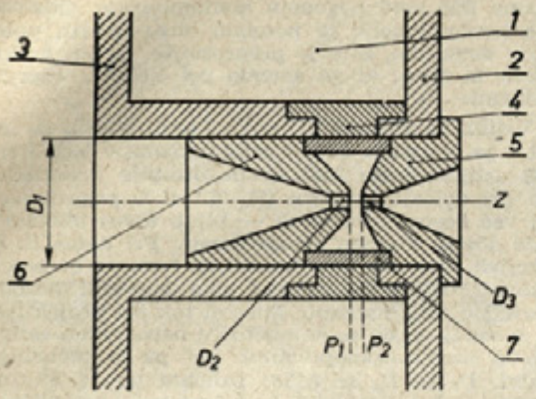
$$\frac{1}{f} = \frac{K}{U} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} B^2 \, dz,$$

pri čemer je K stalnica, ki vsebuje med drugim vpliv oblike leče, z pa je koordinata vzdolž optične osi leče. Če hočemo, da bo slika tudi pri velikih povečavah ostra, se sme f spreminjati za manj kakor 1 : 100 000. To pomeni, da smeta biti vsaka zase spremembi visoke napetosti U in magnetnega polja največ

$$\frac{\Delta U}{U} < 1 : 100\,000, \qquad \frac{\Delta B}{B} < 1 : 200\,000.$$

Ker pa se pojavljata oba skupaj, ju ocenimo na

$$\frac{\Delta U}{U} < 1 : 200\,000, \qquad \frac{\Delta B}{B} < 1 : 400\,000.$$



Slika 1

Magnetno polje v elektronski leči ustvarjamo običajno s tuljavo, ki ima N ovojev in teče skozenj tok I. Ta tok mora biti seveda tudi stabilen v razmerju

$$\frac{\Delta I}{I} < 1 : 400\,000 .$$

Da bo bralcu jasno, kaj pomeni vrednost 1:400 000 naj ga samo spomnim na našo mrežno napetost, ki pogostoma niha v razmerju 1 : 50.

Ker dobimo tako pospeševalno napetost U kakor tudi magnetilni tok I posredno iz našega omrežja 220 V, je jasno, da so potrebni specialni stabilizatorji, da iz 1 : 50 dobimo 1 : 200 000 in 1 : 400 000. Strojnik naj primerja stabilnost 1 : 400 000 z natančnostjo, ki jo je sposoben dosezati na svojih najboljših strojih. Ali zna na stružnici izdelati valj s premerom 10 mm natančno na ± 0,025 μ (pri čemer je všteta tudi eliptičnost premera valja)? Morda bo to mogel izmeriti z interferometrijskimi metodami v kakem laboratoriju. Vprašanje pa je, kako pojde stvar, če bo valj »v pogonu« kje v industriji. Tudi elektronski mikroskop mora namreč vzdrževati visoko stabilnost leto in dan, v rokah veščih (in neveščih) operaterjev. Ali je mogoče zgraditi cesto v širini 10 m, pri kateri se bo razdalja med pločnikoma spreminjala le za 25 mikronov? In slednjič čisto preprost primer: ali znamo potegniti po listu papirja dve vzporedni premici v razdalji npr. 100 mm, katerih medsebojna razdalja se bo spreminjala od enega konca lista do drugega le za 0,25 mikrona?

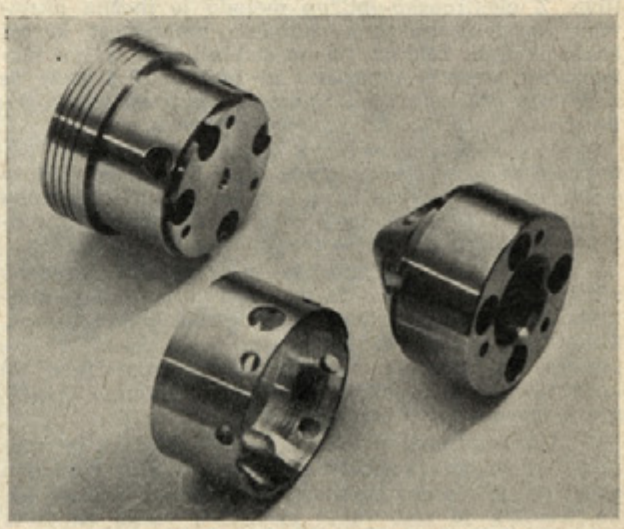
Če je bil že ta prvi primer, vzet iz elektrotehnike, prestrašljiv, je drugi, ki bo pa strojniku verjetno bližji, bolj zanimiv. Dandanes je ločilna sposobnost najboljših EM pod 10 Å, se pravi, da ločimo dve grudici materiala, ki sta oddaljeni med seboj le za nekaj premerov atoma. Preparat, ki ga raziskujemo, moramo vtakniti v mikroskop (torej iz zraka v skoraj brezzračni prostor), ne da bi bistveno poslabšali vakuum, moramo ga v notranjosti mikroskopa spustiti na določeno mesto in tam pritrditi tako, da se bo premikal za manj, kakor je ločilna sposobnost EM, torej precej manj kakor 5 premerov atoma. Pri tem pa mora biti držalo za preparat zgrajeno tako, da preparat od zunaj — zopet skozi vakuumsko tesne stene — premikamo v dveh, natanko pravokotnih smereh, za ± 1 mm, torej v razmerju 1 000 000 : 1 proti zahtevani mehanski stabilnosti. Pa ne samo to! Natančnost premika mora biti vsaj 0,1 mikrona, brez histereze in brez mrtvega giba. Če k tem problemom prištejemo še stalno in neenakomerno segrevanje preparata in njegovega držala zaradi elektronskega bombardiranja in segrevanja magnetilnih tuljav — in povemo, da moderni vrhunski EM vse te probleme še kar uspešno kroti — je jasno, kakšne finomehanske zahteve postavlja konstrukcija EM graditeljem. Na srečo so zahteve za drugorazredne, tako imenovane rutinske mikroskope, ki jamčijo za ločilno sposobnost 20 do 30 Å, precej milejše.

V naslednjih vrsticah želimo prikazati nekaj konstrukcijskih podrobnosti, ki so se obnesle pri dosedanjih domačih EM.

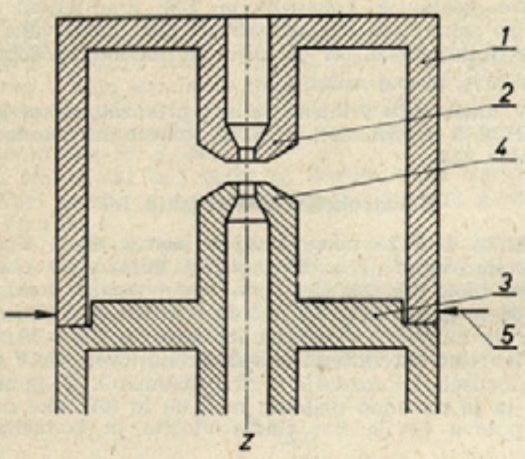
Konstrukcija elektronskih leč

Slika 1 kaže poenostavljen prerez skozi tipično elektromagnetno lečo. Magnetilno tuljavo (1) obdaja jekleni blok (2), (3), ki je na enem mestu prekinjen z obročem iz medi (4). Ta je trdo prilotan med (2) in (3), nakar je natančno obdelana izvrtina D_1 ($D_1 \approx 30$ mm). V to izvrtino sta vložena polova čevlja (5) in (6). V pravilni medsebojni razdalji ju drži distančnik (7) iz medi. Tudi ta je navadno prilotan med (5) in (6), tako da se oba polova čevlja kot celota vložita in izvlačita iz izvrtine. Toleranca D_1 v bloku (2) (3) (4) je $1 + \frac{1}{30\,000}$, v bloku (5) (6) (7) pa $1 - \frac{1}{30\,000}$. Ta zahteva na dobri stružnici kljub $1 = 100$ mm ni pretirana. Izvrtini D_2 in D_3 sta reda $D_2 = D_3 \approx 3$ mm in morata imeti eliptičnost $< 0{,}1$ mikrona in ploskvi P_1 in P_2 morata biti vzporedni na $< 0{,}1$ mikrona. Pri trdem lotanju (7) v (5) in (6) se pojavljajo deformacije reda 1 mikron, ki jih je težko meriti in nemogoče popraviti, zato smo pri prvem domačem EM (LEM — 1) (1), (6), (7) spojili med seboj s 3 vijaki iz medi (sl. 2).

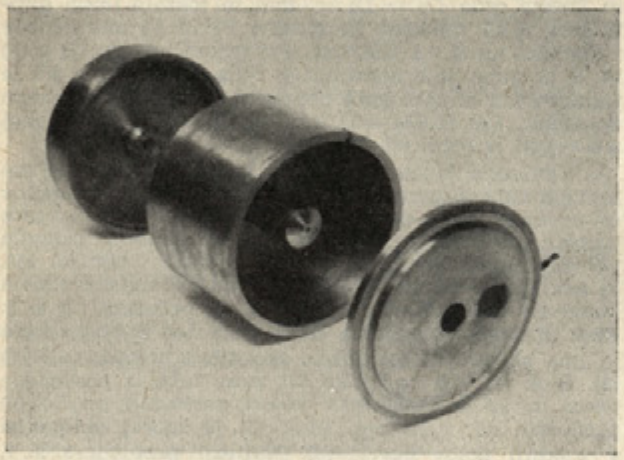
Dosledna izdelava leče po sl. 1 in 2 bi torej zahtevala nabavo posebnih strojev, merilnih instrumentov in prvorazrednih delavcev. Po LEM — 1 smo se zato odločili poiskati metodo, ki bi se čimbolj izognila velikim finomehanskim zahtevam. Sistem sestave leč, ki smo ga uvedli in prvič opisali na IV. mednarodnem kongresu EM v Berlinu 1958 [2], je prikazan na sl. 3. Blok iz specialnega jekla (1) je izstružen iz enega kosa in ima ob optični osi obliko zgornjega polovega čevlja (2). Blok (1) leži na bloku (3), prav tako iz posebnega jekla in ga je mogoče v smeri narisanih puščic (5) premikati za ± 0,5 mm. Blok (3) je zgoraj oblikovan v spodnji polov čevelj (4). Najtežji problem s sl. 1, stroga koaksialnost izvrtin D_2 in D_3, je tu rešen tako, da se medsebojna lega izvrtin nastavlja s 4 vijaki (5). Veliko natančnost pri merjenju koaksialnosti prevzamejo sedaj elektroni sami. Delovanje leče se kontrolira z elektronskim snopom. Znano je namreč, da elektro-



Slika 2



Slika 3



Slika 4

magnetne elektronske leče vrte sliko okrog optične osi *z*. Z vrtenjem vijakov (5) premikamo en del leče proti drugemu toliko časa, da je koaksialnost zadovoljiva. Z elektronsko-optično metodo je možna nastavitev na ± 0,1 mikrona natančno, natančnost, ki pri konstrukcijah, kakršni sta na sl. 1 ali 3, z našimi mehanskimi sredstvi praktično ni možna. Sl. 3 kaže še nadaljnjo poenostavitev. Namesto šestih sestavnih delov s sl. 1 (v resnici jih je več) sta tu dva.

Sl. 4 kaže primer nove sestave elektronskih leč, kakršne se sedaj vedno uporabljajo v laboratoriju za elektronsko mikroskopijo na fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leča je del visokonapetostnega elektronskega oscilografa za univerzo v Uppsali.

Vakuumsko tesnjenje je bilo na sl. 1 izvedeno s trdim lotanjem delov (2), (3), (4). Trdo lotanje je delikatno in zahteva naknadno obdelavo lotanih kosov. Mimo tega je možno, da se spremeni zaradi visoke temperature magnetna mikrostruktura materiala. Po konstrukciji na sl. 3 ni potrebno nikako lotanje. Tesnjenje je izvedeno med polovima čevljema (sl. 5).

Med frontnima ploščama polovih čevljev, ki morata biti že zaradi elektronskooptičnih zahtev gladko obdelana, je vložena standardna gumijasta tesnilka (6). Ta tesnilka je zelo rahlo stisnjena, vselej za 10 % svoje debeline. Z obročkom (7) je definirana njena lega. Ta obroček prevzema še eno važno nalogo: notranje površine EM med pogonom kontaminirajo. Odstranjevanje kontaminacije je posebno blizu izvrtin polovih čevljev delikatno, zato je preprostejše, da jih prekriva obroček iz medi, ki ga smemo pri čiščenju energično obdelovati.

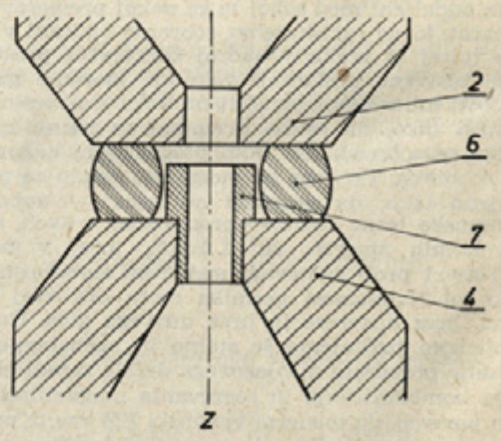
Velika natančnost pri oblikovanju izvrtin D_2 in D_3 na sl. 1 je potrebna zaradi astigmatizma v leči. Ker pa izvira astigmatizem tudi iz anizotropije materiala, je treba pri običajni izvedbi (5), (6) (sl. 1) pogostoma zavreči več kosov, preden se — kljub dobri obdelavi — doseže dovolj majhen astigmatizem. Pri domačih konstrukcijah zato nismo več težili za tem, da bi precizno oblikovali D_2 in D_3, temveč smo posvetili pozornost neposredno astigmatizmu. Miselni tok pri projektiranju leče je sedaj ta, da se kompenzira neposredno astigmatizem z elektronskooptičnimi, ne pa z mehanskimi sredstvi. D_2 in D_3 se sedaj izdelata na 10 mikronov natančno, iz te natančnosti in anizotropije materiala nastali astigmatizem pa se kompenzira z umetno deformacijo magnetnega polja med polovima čevljema. Princip konstrukcije kaže sl. 6. V spodnji polov čevelj (4) je vložen obroček iz medi (8). Ta nosi dva diametralno zavita jeklena vijaka (9). Vijaka deformirata magnetno polje med (2) in (4). S sukanjem (8) okrog *z* je mogoče nastaviti vsak azimut, s privijanjem (obeh vijakov naenkrat) ali odvijanjem pa jakost deformacije magnetnega polja. S to napravo, katere tehnično izvedbo kaže sl. 7, je mogoča kompenzacija astigmatizma do enake mere kakor obdelava izvrtine D_2 ali D_3 na 0,5 mikrona natančno. Za boljšo kompenzacijo astigmatizma skrbi dodatna cilindrična leča, elektrostatični stigmator, kakršno imajo zdaj že vsi boljši EM po svetu.

Opozoriti je treba, da je velika mehanska natančnost potrebna le v objektivu. V drugih lečah so zahteve manjše.

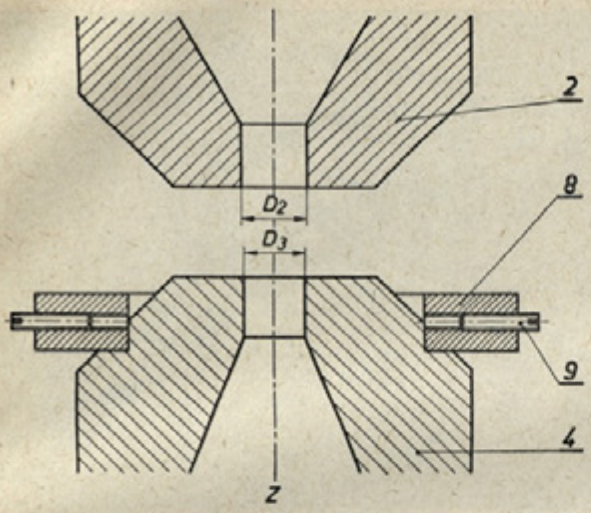
Nova konstrukcija leč ima eno navidezno pomanjkljivost: od operaterja zahteva znanje centriranja elektronskih leč. Izkušnje kažejo, da je centriranje preprosto, ker slika na fluorescenčnem zaslonu sama kaže, kje leži središče leče. V domačih EM je namreč vgrajena naprava, ki avtomatično »vrti« sliko okrog optične osi. Na zaslonu je torej samo ena točka, ki miruje, namreč ona na optični osi leče, vse ostale opisujejo loke. Centrirne vijake je treba vrteti toliko časa, da gre optična os leče skozi središče fluorescenčnega zaslona. Sicer imajo tudi inozemski EM potrebo po centriranju leč, ki pa je tam manj elastično.

Vlaganje preparatov v EM

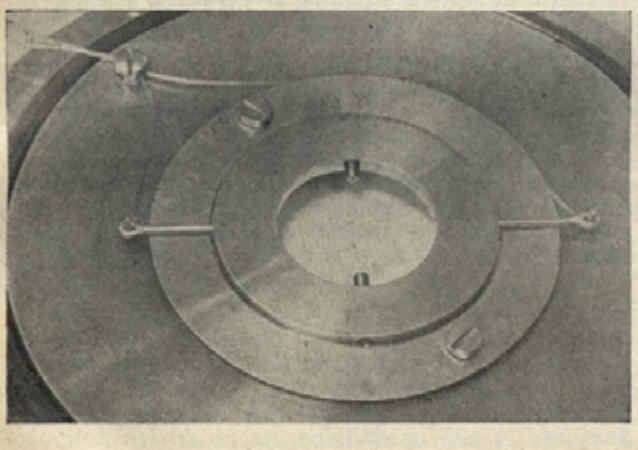
Kakor je že omenjeno, je treba preparat (navadno ležeč na bakreni mrežici debeline 0,05 mm in premera 2,2 mm) vložiti v EM brez bistvenega poslabšanja va-



Slika 5



Slika 6



Slika 7

kuuma. Pri starejših EM, in še zmeraj pri nekaterih ameriških, preprosto spustimo zrak v EM, odpremo steber nad objektivno lečo, vložimo preparat, zapremo steber in izčrpamo zrak. Ta operacija je dolgotrajna, zahteva nenavadno močne črpalke in vedno sproti lahko vnaša v EM vlago in prah. Večina modernih EM uporablja zato tako imenovane zračne zaklopnice, katerih delovanje je podobno uporabi zavešenih predsob v fotografskih temnicah: najprej vstopiš v predsobo, zapreš za seboj vrata ali zagrneš zaveso, nakar odpreš vrata v temnico oz. odgrneš zaveso, ki loči predsobo od temnice. Tudi EM imajo »predsobo« za preparat. Če je ta velika, je potrebna še dodatna vakuumska črpalka, da izčrpa to »predsobo«, preden odpremo »vrata« v steber. Pri večini EM so zaklopnice velike in zapleteno grajene. V EM firme Zeiss, ki ga imajo na Nuklearnem inštitutu »Jožef Stefan« v Ljubljani, ima zaklopnica, skupaj z vakuumskimi napeljavami, več sestavnih delov kakor ves steber jugoslovanskega EM LEM — 2 (eden je instaliran na fakulteti za strojništvo v Ljubljani). Ker so bila razen tega v napoto tudi patentna vprašanja, je laboratorij za EM na fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani razvil nov tip zaklopnice, ki se je izvrstno obnesla in se uporablja pri vseh domačih EM.

Zahteve, ki jim je bilo treba ustreči, so bile naslednje:

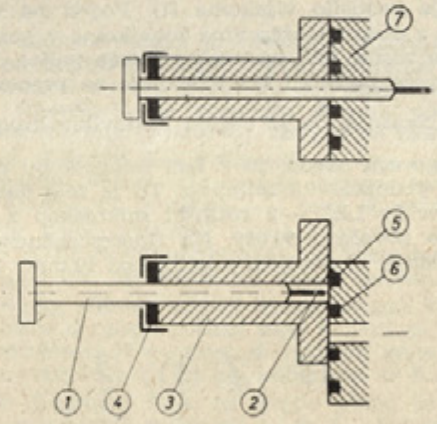
1. vložitev preparata sme poslabšati delovni vakuum le za 30 s,
2. konstrukcija mora biti preprosto izvedljiva in
3. konstrukcija mora biti robustna.

Princip nove zaklopnice, ki ustreza tem zahtevam, je viden na sl. 8.

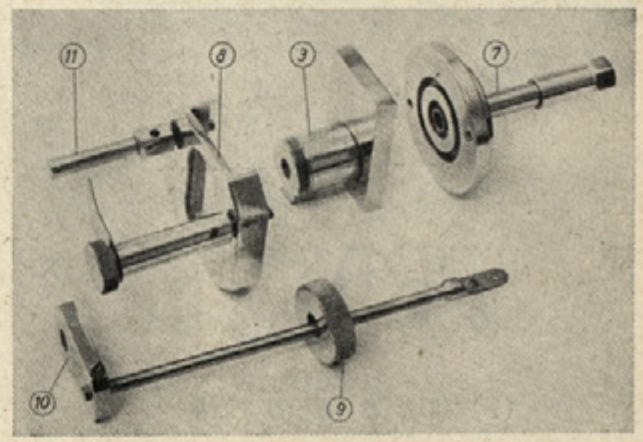
Spodnji del slike kaže preparatni nosilec v obliki palice iz medi (1), na katere notranjem koncu leži preparat (2). Palica je deloma potisnjena v tulec (3) in na zunanjem koncu zatesnjena (4). Tulec more drseti navzgor in navzdol ob dveh parih standardnih krožnih tesnilk (5) in (6).

Ko je palica s preparatom vložena, kakor kaže spodnji del slike, tulec skupaj s palico potisnemo navzdol, dokler ni njegova os identična z osjo v mikroskop vgrajenega notranjega dela (7). Zdaj potisnemo palico v notranjost mikroskopa (zgornji del slike), dokler ne sede v mizico, ležečo med polovima čevljema objektiva. Pri prehodu iz enega položaja v drugega prihaja v EM okrog 0,5 cm^3 zraka, ki ga sistem izčrpa v 30 s.

Konstruktivno izvedbo tega principa kaže sl. 9. Vidna sta pritrditev preparata na palici in sanke (8), ki tišče obe polirani ploskvi (3) in (7) skupaj. Tesnilka (4) leži v pokrovni matici (9). Ploščica (10) se vleže v vodilo (11), ki deluje tudi kot spenjalni vijak za (3) in (7).



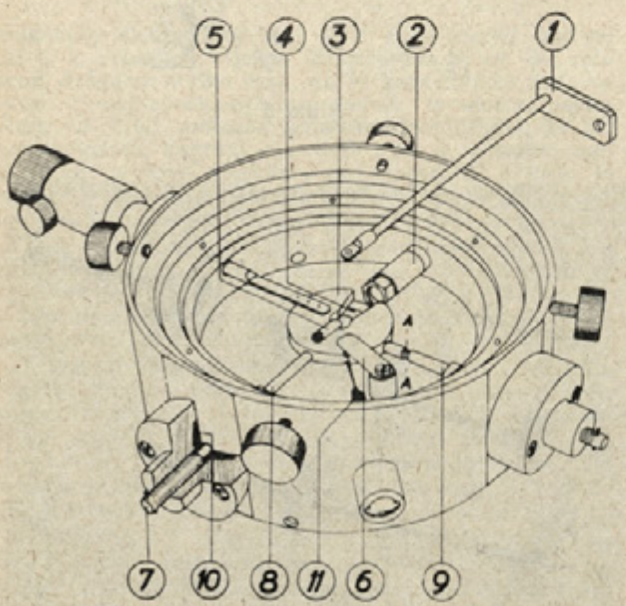
Slika 8



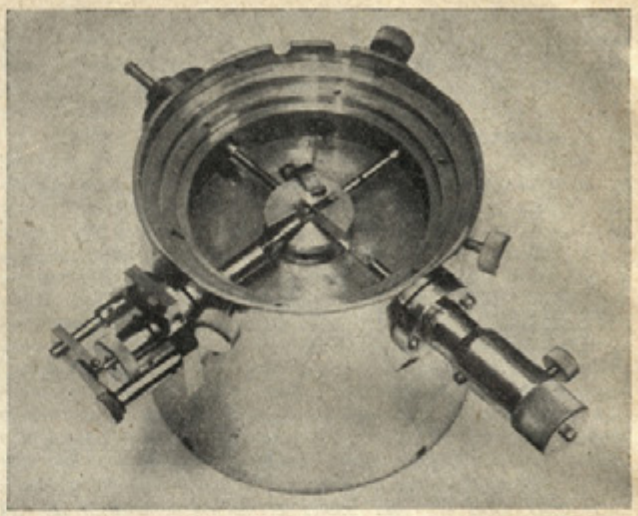
Slika 9

Premik objekta

Kakor je že povedano, je konstrukcija premika objekta ena najbolj delikatnih nalog v EM. Dejansko je le malo mikroskopov, pri katerih bi bila ta naloga rešena povsem zadovoljivo. V vseh mikroskopih tujih konstrukcij pa je rešitev izdelana z zapletenimi, zelo dragimi in občutljivimi mehanizmi. Konstrukcija, ki se standardno uporablja v domačih EM, zadovoljuje uvodoma postavljene zahteve, je pa povrh tega preprosta in robustna. Slika 10 prinaša — deloma poenostavljeno — pogled v odprt zgornji del stebra EM LEM — 2, izdelanega za fakulteto za strojništvo v Ljubljani. Nosilec preparata (1) potisnemo skozi (2) v preparatno mizico (3). Vzmet (5) tišči preparatni nosilec k zgornjemu polovemu čevlju (4), mizico samo pa vzmet (6). Vloga vzmeti (6) je nadvse pomembna: prevelik pritisk otežuje premik preparata, premajhen pritisk slabi trenje med preparatnim nosilcem (1) in polovim čevljem (4) ter s tem veča občutljivost za mehanske tresljaje. V mizico, ki je iz aluminija, sta priviti palici (8) in (9), med seboj premaknjeni za 90°. Palica (9) je prekinjena na mestu A—A z vzmetjo in tako dopušča mizici rotacijo okrog osi A—A. Vsaka od palic sega skozi tesnilko na zrak, kjer nanjo pritiska vijak (7) s finim navojem 0,5 mm. Tesnilka ne tesni samo notranjosti mikroskopa, ampak pomeni tudi ležaj za celotni sistem (1) — (3) — (8) — (9). Tako leži ta sistem na treh »točkah«: na čelni plošči zgornjega polovega čevlja in na obeh tesnilkah. Trenje se pojavlja samo na tistem mestu, kjer je potrebno. Vzmet (11) daje protisilo vijakoma (7). Pogon na vijaka je izveden z dvema stožčastima zobnikoma v prestavi 1 : 4 tako, da zasuk 360° vertikalno ležeče palice ob stebru EM ustreza premiku 125 mikronov na preparatu. Ker kažejo izkušnje, da je možna nastavitev kroga na $\frac{1}{400}$ del njegovega oboda, je v tem mikroskopu najmanjši premik približno 0,3 mikrona. To je zelo dobra vrednost, ker je LEM — 2 rutinski mikroskop z največjo direktno povečavo 30 000. Na fluorescenčnem zaslonu je najmanjši nastavljeni premik pod 10 mm.



Slika 10



Slika 11

Slika 11 kaže fotografijo konstrukcije s sl. 10.

Razen že opisanih elementov je vidna na desni strani spodaj palica z zaslonko 30 mikronov, ki se v EM uporablja za povečanje kontrasta (kontrastna zaslonka). Ker je nemogoče okroglo izvrtino 30 mikronov natančno vgraditi v EM, zlasti, ker jo je treba pogostoma izvleči iz EM in očistiti, jo je v tu opisani konstrukciji mogoče z dvema vijakoma od zunaj centrirati. Na sliki so obenem vidni trije centrirni vijaki (četrti je bil odvit, da se bolje vidi vijak za premik objekta), opisani na sl. 2 (št. 5).

V zvezi s premikom objekta je morda zanimiva še naslednja podrobnost, ki kaže, da gre pri konstrukcijah te vrste za cel niz malenkosti, od katerih je odvisno zanesljivo obratovanje: med razvijanjem sistema po sl. 10 rezultati dolgo niso bili zadovoljivi. Vselej se je izkazalo, da je vzmet (6) ali preveč ali premalo trda. Nazadnje je bilo ugotovljeno, da ne gre za premagovanje trenja med mizico (3) in polovim čevljem (4), ampak za trenje med palicama (8) in (9) in njunima tesnilkama (10). To težavo smo rešili tako, da smo dali tesnilkama (10) možnost za majhen premik v smeri osi palic (8) in (9). Prostor za izboklino navzven je viden na sl. 9. Tako tesnilka pri majhnih premikih — reda mikron — s l e d i premiku, šele pri velikih premikih mora palica drseti s k o z i tesnilko. Ko se premik konča, se tesnilka sama od sebe počasi vrne v srednjo lego. Mazanja tesnilke v dobesednem pomenu seveda ni; najboljša vakuumska mast povzroča umazanijo znotraj EM. Zato so palici in tesnilki mazane samo zunaj — na zračni strani. Množina masti, ki pri premikanju palic skozi tesnilki prodre ob stenah v notranjost, je majhna in je s preprostimi sredstvi ni mogoče zaznati. Palici sta seveda na mestih, kjer se gibljeta skozi tesnilki, polirani.

Literatura:

1. P. Leskovar, Elektronska mikroskopija. Strojniški vestnik, VIII (1962), 3, str. 63—69.

2. A. Strojnik, IV. Int. Kongr. Elektronenmikroskopie, Berlin 1958. Zal. Springer-Verlag, Berlin.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Aleš Strojnik, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana