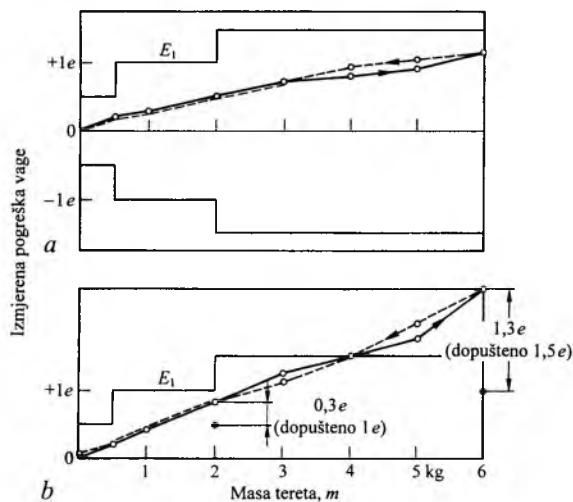


Sl. 53. Ovisnost pogreške trgovачke stolne vase nosivosti 6 kg pri temperaturama  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+40^{\circ}\text{C}$  i  $-10^{\circ}\text{C}$

me, da se u jednom ovjernom razdoblju vaga prvog razreda optereći do  $\text{Max}$  i rastereti do ništice  $\sim 50$  tisuća puta, vaga drugog do četvrtog razreda  $\sim 200$  tisuća do 500 tisuća puta, a uređaj za iskazivanje cijene oko milijun puta. Tolikim se promjenama opterećenja u neprekinutom pokusu izlažu vase prilikom ispitivanja izdržljivosti. Pošto je prije spomenuta stolna vaga s digitalnom pokaznom napravom 230 tisuća puta opterećena i rasterećena petkilogramskim utegom, prvotna se krivulja pogreške (sl. 54 a) bitno podigla (sl. 54 b), ali nije prekoračila propisima dopuštene granice. Dvije pune točke označuju pogrešku vase prije ispitivanja izdržljivosti.



Sl. 54. Pogreška vase prije (a) i nakon (b) 230 tisuća opterećenja i rasterećenja petkilogramskim utegom

Međunarodne preporuke OIML i državni mjeriteljski propisi nalažu da se prilikom tipnog ispitivanja vase provjere ili izmjere brojna svojstva. Tako se u sklopu funkcionalnog ispitivanja utvrđuju: mogućnosti uporabe, djelotvornost pokaznih naprava, tipkovnica, uređaja za tariranje, uređaja za namještanje ništice, uređaja za isključivanje i uključivanje utega, tiskaljki itd., možebitne mogućnosti pogrešnog posluživanja i upravljanja, mogućnosti otkrivanja pogrešaka, odzivi na poneke vanjske utjecaje kao što su kosi položaj, udarno opterećivanje i rasterećivanje, podizanje mosta vase, vodoravno udarno opterećenje, elektromagnetski poremećajni utjecaji.

U sklopu pak mjeriteljskog dijela tipnog ispitivanja mjerjenjem se doznaju: mjerena pogreška vase pri najmanje tri temperature, mjerena pogreška pri raznim tarama, pokazna pogreška pri najvećem teretu, pomak nultočke u ovisnosti o temperaturi, ponovljivost, osjetljivost, razlučivost, osjetljivost na bočno opterećenje, osjetljivost na kosi položaj, svojstva vase tijekom osmosatnog ili četverosatnog ispitiva, odziv na uključivanje itd.

M. Brezinšćak

LIT. za svjetski vagarski temelj: *M. Thiesen, Kilogrammes prototypes. Travaux et mémoires du BIPM 9(1898), 3–21.* – *M. J. R. Benoit, L'étalonnage des séries de poids. Travaux et mémoires du BIPM 13(1907), 1–48.* – *Ch. Éd. Guillaume, L'œuvre du Bureau international des poids et mesures. Gauthier-Villars, Paris 1927.* – *A. Bonhoure, Kilogrammes prototypes. Travaux et mémoires du BIPM 22(1966), C1–82.* – *M. Brezinšćak, Mjerjenje i računanje u tehniči i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971.* – *H. E. Almer, National Bureau of Standards One Kilogram Balance NBS No. 2. Journal of Research of the NBS 76 C(1972), No. 1–2, 1–10.* – *M. Brezinšćak, Procjenjivanje mjerne nesigurnosti (Razmotreno na metodama preciznog mjerjenja mase). Savezni zavod za mjeru i dragocjene kovine, Beograd 1976.* – *J. Skákala, F. Silný, Metrologie hmotnosti (Presne vážení v laboratořích). UNM, Praha 1976.* – *R. S. Davis, Recalibration of the U. S. National Prototype Kilogram. Journal of Research of the NBS 90(1985), No. 4, 263–283.* – *M. Brezinšćak, Nestalnost mase vrhunskih etalona. Mjeriteljski vjesnik 5(1987), No. 4, 637–642.* – *M. Kochsiek, Derzeitige Genauigkeitsgrenzen bei 1 kg-Komparatorwaagen. PTB-Mitteilungen 97(1987), No. 3, 179–186.* – *T. J. Quinn et al., A 1 kg Mass Comparator Using Flexure-Strip Suspensions: Preliminary Results. Metrologia 23(1986/87), No. 2, 87–100.* – *D. Baumgärtel, New Weighing Center at the Office of Weights and Measures for Legal Metrology in West-Berlin. Bulletin OIML 30(1989), No. 116, 11–20.* – *M. Kochsiek, Handbuch des Wägens. Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden 1989.* – *S. L. Lewis et al., An Intercomparison of Standards of Mass and Mass Measurement Techniques at 50 g and 10 g. Between Four European National Standards Laboratories. Metrologia 27(1990), No. 4, 233–244.* – *J. G. Ulrich, Ein Spezialgewichtsatz zur Bestimmung von OIML-Gewichtssätzen und dessen Anwendung. PTB-Mitteilungen 100(1990), No. 2, 113–118.* – *M. Gläser et al., Automation of High-Accuracy Weighing at some Western European National Measurement Laboratories. PTB-Mitteilungen 102(1992), No. 3, 163–171.* – *G. Girard, The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992). Metrologia 31(1994), No. 4, 317–336.*

LIT. za tehničke izvedbe vase: *K. E. Haeberle, Zehntausend Jahre Waage. Bizerba, Balingen 1967.* – *M. Brezinšćak, Mjerjenje i računanje u tehniči i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971.* – *J. Skákala, F. Silný, Metrologie hmotnosti. UNM, Praha 1976.* – *D. Profos, Handbuch der industriellen Messtechnik. Vulkan Verlag, Essen 1978.* – *J. Hasselbach, Betriebsmesstechnik, u djelu: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Band 5. Verlag Chemie, Weinheim 1980.* – *C. I. Gayushev, C. C. Kubiluc, A. P. Osokina, A. H. Pavlovskij, Izmerenie massy, obema i pliostnosti. Izdatelstvo staničarow, Moskva 1982.* – *NBS Handbook 44, Specifications, Tolerances, and other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices (as adopted by the 69th National Conference on Weights and Measures 1984).* National Bureau of Standards, Gaithersburg 1984. – *M. Kochsiek, Handbuch des Wägens. Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden 1989.*

LIT. za međunarodno normirane utege: *Recommendation OIML Nos 111, 33, 47, 52.* – *S. L. Lewis et al., An Intercomparison of Standards of Mass and Mass Measurement Techniques at 50 g and 10 g. Between Four European National Standards Laboratories. Metrologia 27(1990), No. 4, 233–244.* – *J. G. Ulrich, Ein Spezialgewichtsatz zur Bestimmung von OIML-Gewichtssätzen und dessen Anwendung. PTB-Mitteilungen 100(1990), No. 2, 113–118.* – *M. Gläser et al., Automation of High-Accuracy Weighing at some Western European National Measurement Laboratories. PTB-Mitteilungen 102(1992), No. 3, 163–171.*

M. Brezinšćak Z. Jakobović Z. Šoljić

**VAKUUMSKA TEHNIKA**, grana tehnike koja se bavi proračunom i izradbom uređaja za ostvarivanje, mjerjenje i održavanje vakuma. Pod vakuumom se razumijeva prostor u kojem se plin ili para nalaze pod tlakom nižim od atmosferskoga. Naziv potječe od latinske riječi *vacuum* praznina, prazan prostor.

Vakuumska se tehnika široko primjenjuje u industriji pri različitim tehnološkim postupcima. Važna je njezina primjena u metalurgiji, kemijskoj, farmaceutskoj i prehrabenoj industriji, elektrotehnici, elektronici, medicini itd. Glavne su prednosti primjene vakuma što se pri nižim tlakovima neki procesi odvijaju na temperaturama mnogo nižim od onih koje su potrebne kad vlada atmosferski tlak, pa se tako sprečava toplinska razgradnja materijala i šteti energija, vakuum se smatra tzv. čistom atmosferom u kojoj je bitno smanjena mogućnost onečišćenja i reakcije materijala s nepoželjnim tvarima i nečistoćom iz okoliša, vakuum olakšava transport materijala, pa se iz sirovina ili proizvoda lakše uklanjaju nečistoće, u vakuumu je mnogo manji broj sudara među česticama, tj. mnogo je veći njihov srednji slobodni

put, što omogućuje tehničku primjenu pojava i procesa koji se temelje na nesmetanu gibanju iona, elektrona i elementarnih čestica, a koji nisu mogući pri atmosferskom tlaku.

Prvi zabilježeni pokusi s vakuumom poječu od Herona iz Aleksandrije (I. st.), a počeci vakuumske tehnike datiraju od 1644., kada je E. Torricelli, talijanski fizičar i matematičar, uočio da se voda iz bunara ne može cipiti s dubine veće od 10 metara pa je pretpostavio da je tome uzrok vanjski, atmosferski tlak. U svojim znamenitim eksperimentima s cijevi ispunjenom živom pokazao je da u gornjem dijelu zatvorenog kraka cijevi, kad se tlak živina stupca izjednači s atmosferskim tlakom, ostaje vakuum. To je i dokazao jednostavnim pokusima s gorenjem u tom prostoru.

Torricellijev je rad nastavio i unaprijedio B. Pascal, a postojanje i djelovanje atmosferskog tlaka javno je pokazao O. von Görlicke 1654. u Magdeburgu. On je klipnom sisaljkom isisao zrak iz prostora što su ga zatvarale dvije šupljie polukugle, koje zatim nisu uspjele razdvojiti ni dvije konjske zaprege, što je u to doba bila velika senzacija.

U sljedećih je dvije stotine godina postignut bitan napredak u eksperimentalnim i teorijskim spoznajama o ponašanju plinova, što je rezultiralo definiranjem plinskih zakona. Primjena je tog znanja, što se vakuumu tiče, uslijedila 1810. u prvoj vakuumskoj poštanskoj liniji. T. A. Edison je 1879. razvio električnu žarulju zahvaljujući jednostavnim živinim pumpama koje su konstruirali H. Geissler i Töpler (1850) te Sprengel (1865). Precizno mjerjenje vakuuma omogućio je H. McLeod (1874) izumom kompresijskog vakuummetra. Primjenom vakuuma u žaruljama uočila se tehnička korisnost uklanjanja zraka, a W. Crookes je konstrukcijom katodne cijevi (1879) pokazao i prednost povećanja srednjeg slobodnog puta čestica u vakuumu. J. Deward je 1893. primjenio vakuum za toplinsku izolaciju u posudama koje se i danas upotrebljavaju.

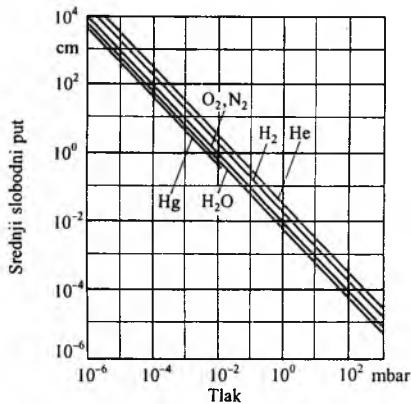
Izumom vakuumske diode (1902) i triode (1907) započela je primjena vakuuma u elektronskim cijevima. Dalji razvoj na tom polju zahtijevao je i bolji vakuum. W. Gaede je 1905. konstruirao vakuumsku pumpu, 1913. molekulnu, a 1915. i difuzijsku pumpu. Uljnu difuzijsku pumpu konstruirao je K. Hickman (1936). Uspoređeno se razvijalo i mjerjenje vakuuma (M. Pirani, 1906, O. E. Buckley, 1916. i F. M. Penning, 1937).

Nakon 1940. godine vakuumska se tehnika počinje primjenjivati u nuklearnim istraživanjima (ciklotron, odjeljivanje stabilnih izotopa), metalurgiji i prehrabnoj industriji. Oko 1950. otvara se područje ultravisokog vakuuma zahvaljujući novim vakuummetrima (R. T. Bayard, D. Alpert, 1950) i ionskim pumpama (H. J. Schwartz, R. G. Herb, 1953), a u posljednjih je tridesetak godina razvoj vakuumske tehnike vezan uz napredak u svemirskim istraživanjima.

Tablica 1  
VAKUUMSKA PODRUČJA

Područje	Tlak mbar	Srednji slobodni put cm	Gustoća molekula cm <sup>-3</sup>
Niski (grub) vakuum	1000...1	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-2</sup>	~10 <sup>19</sup> ...10 <sup>16</sup>
Srednji vakuum	1...10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>1</sup>	~10 <sup>16</sup> ...10 <sup>13</sup>
Visoki vakuum	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-7</sup>	10 <sup>1</sup> ...10 <sup>5</sup>	~10 <sup>13</sup> ...10 <sup>10</sup>
Ultravisoki vakuum	<10 <sup>-7</sup>	>10 <sup>5</sup>	<10 <sup>10</sup>

Prema tome koliko je tlak u određenom prostoru niži od atmosferskog tlaka, razlikuju se vakuumska područja (tabl. 1). Za primjenu je vakuuma važan *srednji slobodni put* čestica u vakuumu; to je srednja vrijednost udaljenosti koju prijeđe čestica plina (molekula ili atom) između dvaju uzastopnih sudara s drugom česticom (sl. 1). O srednjem slobodnom putu ovise i uzajamno djelovanje među česticama u vakuumu. Većinom se to uzajamno djelovanje nastoji sprječiti, ali je katkad i poželjno, npr. za ostvarenje koje kemijske reakcije.



Sl. 1. Ovisnost srednjega slobodnog puta o tlaku u živim i vodenim parama te u nekim plinovima (20°C)

Sniženi tlak izražava se, dakako, jedinicicom tlaka. U sustavu SI jedinica je tlaka paskal (znak Pa), a iznimno dopuštena jedinica

tlaka bar (bar = 10<sup>5</sup> Pa). Prije se upotrebljavala jedinica tor (Torr), nazvana prema Torricelliju, a odgovarala je tlaku jednog milimetra živina stupca. U angloameričkoj je literaturi i praksi česta jedinica psi (prema engl. pounds per square inch). Budući da je i danas u upotrebi oprema i instrumentarij različita podrijetla i starosti, a i zbog snalaženja u starijoj literaturi, treba napomenuti da je 1 Torr = 1 mm Hg ≈ 133 Pa, a 1 psi ≈ 6 894,76 Pa.

### MATERIJALI ZA GRADNJU VAKUUMSKIH UREĐAJA

Prilikom projektiranja i gradnje vakuumskog uređaja vrlo je važan izbor konstrukcijskog materijala. Kako s jedne strane stjenke vakuumske komore vrla atmosferski tlak, materijal od kojeg se izrađuje komora mora biti prikladne mehaničke čvrstoće. Osim toga, svojim karakteristikama isplinjavanja (otpuštanje adsorbiranog ili apsorbiranog plina) i tlakom para ne smije kvariti kvalitetu vakuuma, a spojevi između različitih sastavnih komponenata ne smiju biti propusni.

Materijali za gradnju vakuumskih uređaja jesu metali, staklo, keramika i polimerni materijali, a upotrebljavaju se još masti, ulja i plinovi.

Metalni za izradbu vakuumskih uređaja i komponenata glavni su konstrukcijski materijali, a najkvalitetniji je nehrđajući čelik (Č4571 ili Prokron 11). On se nakon obrade pasivira uranjanjem u razrijedenu dušičnu kiselinu. Tako na njegovoj površini ostaje tanak zaštitni sloj kroma koji se ne smije čistiti čeličnom vunom ili sličnim grubim sredstvima. Kvalitetne su i ostale vrste nehrđajućeg čelika, ali ne smiju sadržavati elemenata s visokim tlakom para na običnoj temperaturi (npr. sumpor).

Bakar se vrlo često upotrebljava u vakuumskoj tehnici. Neoporozan je i plastičan, pa zbog toga služi za izradbu brtava među metalnim vakuumskim komponentama. Najpogodniji je bakar bez kisika koji se pripravlja žarenjem do temperature mekšanja (1450 °C). Bakar se može meko i tvrdno lemiti te zavarivati u zaštitnoj atmosferi.

Aluminij se često upotrebljava u izradbi vakuumskih uređaja. Iako se ne preporučuje za ultravisokovakuumske sustave, ipak je pogodan za mnoge primjene, posebno zbog svoje otpornosti prema agresivnim sredstvima (osim prema HF, NaOH, KOH i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) i zbog male brzine isplinjavanja. U tablici 2 uspoređene

Tablica 2  
BRZINA ISPLINJAVANJA MATERIJALA ZA VAKUUMSKU TEHNIKU

Materijal	Način obrade	Trajanje ispisivanja h	Brzina isplinjavanja mbar L s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
Čelik	nepoliran poliran	8 8	2 · 10 <sup>-8</sup> 2 · 10 <sup>-9</sup>
Nehrdajući čelik	obradeni lijev odmašćen u alkoholnim parama	5	2 · 10 <sup>-9</sup>
	odmašćen u alkoholnim parama	24	9 · 10 <sup>-10</sup>
	grijan na 400 °C	16	2 · 10 <sup>-10</sup> 3 · 10 <sup>-14</sup>
Aluminij	poliran	5	7 · 10 <sup>-10</sup>
	odmašćen alkoholom	24	1,5 · 10 <sup>-10</sup>
	grijan na 400 °C	16	2 · 10 <sup>-14</sup>
Neopren	negrijan	24	5,4 · 10 <sup>-8</sup>
Silikonski kaučuk	negrijan	24	4,4 · 10 <sup>-9</sup>
Butilni kaučuk	negrijan	24	1,1 · 10 <sup>-8</sup>
Guma od prirodnog kaučuka	negrijana	24	2,0 · 10 <sup>-8</sup>
Viton A	negrijan	15	2 · 10 <sup>-7</sup>
	drugo isisavanje	15	1 · 10 <sup>-7</sup>
	grijan, 150 °C, 4 h	15	0,01 · 10 <sup>-8</sup>
	grijan, 200 °C, 16 h nakon izlaganja zraku 64 h	15	0,01 · 10 <sup>-8</sup> 10
Teflon	negrijan	24	2,5 · 10 <sup>-8</sup>

su brzine isplinjavanja čelika i aluminija koji služe kao konstrukcijski materijali u vakuumskoj tehnici. Isplinjavanje se može smanjiti zagrijavanjem u vakuumu. Na temperaturi  $300\cdots400^{\circ}\text{C}$  otpušta se (desorbira) vodena para, a na višoj temperaturi vodik, ugljični monoksid i ugljični dioksid.

Od ostalih se metala upotrebljavaju volfram, tantal, molibden, indij i dr.

U vakuumskoj se tehnici primjenjuju mnoge slitine željeza, bakra, aluminija i drugih metala. Posebno je važna slitina *kovar*. To je najpoznatija slitina za izradbu spoja stakla i metala, jer joj je koeficijent toplinskog širenja gotovo jednak onome u tvrdih stakala. Kovar se najčešće sastoji od 53% Fe, 29% Ni, 17% Co, <0,5% Mn, 0,2% Si, <0,2% Al, Mg, Zr i Ti, ali mu se sastav može i mijenjati radi prilagodbe različitim vrstama stakla. Kovar se može obradivati, lemiti i zavarivati, a otporan je na djelovanje živinih para.

*Staklo* je vrlo česta komponenta vakuumskih uređaja. Odlično se toplinski obrađuje, postupno se stvarajuje i omekšava, kemijski je inertno i nepropusno za većinu plinova. Električna otpornost stakla može jako varirati. Otpornost je čistog stakla vrlo velika, ali je adsorbirane ili naparene nečistoće na površini stakla drastično smanjuju. Za vakuumsku je tehniku prikladno borosilikatno i kremeno staklo zbog malog koeficijenta toplinskog širenja, koji dopušta razmjerne velike toplinske udare i primjenu visokih temperatura (za kremen i više od  $1250^{\circ}\text{C}$ ). Kako je već spomenuto, staklo se veže s metalom preko slitine kovara, te stvara čvrstu vezu koja je i vakuumski vrlo kvalitetna.

*Keramika* se u vakuumskoj tehnici primjenjuje kao električni izolator i za izradbu visokotemperaturnih komponenata. Većinom se obrađuje prije konačne toplinske obradbe, no danas se već upotrebljava i keramika koja se može obradivati poput metala. Međutim, keramika je porozna pa joj se apsorpcijom vlage smanjuje električna otpornost (posebno silikatnoj keramici). To se može sprječiti njezinim pocakljivanjem, posebno keramike za komponente gdje je važna stalna velika električna otpornost.

Vrlo je kvalitetna keramika tvrtke Corning pod nazivom *Macor*. To je proizvod dobiven kontroliranom kristalizacijom fluoro-flogopita u matrici od boroalumosilikata. Osim što se može mehanički obradivati, odlikuje se i neporoznošću, neapsorbira vodu i velike je električne otpornosti ( $\sim 10^{12} \Omega \text{ cm}$ ). Često se upotrebljava i borni nitrid, kristalni spoj koji ima svojstva slična keramici. Osim velike električne otpornosti, on pokazuje i izvrsnu toplinski vodljivost te veliku otpornost prema nagloj promjeni temperature. Kemijski i mehanički vrlo je stabilan u vakuumu na visokoj temperaturi (do  $1650^{\circ}\text{C}$ ), ali je osjetljiv na vlagu. Za posebne primjene upotrebljava se pirolitički borni nitrid, koji je još tvrdi, izvrstan je izolator i ne propušta vodu.

Važna skupina materijala za vakuumsku tehniku jesu *polimerni materijali*. Oni služe za izradbu brtava za nepokretne i pokretne dijelove vakuumskog sustava, a od njih se izrađuju i savitljive cijevi za niski vakuum. Nedostaci su tih materijala razmjerne visok tlak para, osjetljivost na povišenu temperaturu i propusnost za plinove. Najčešće ih treba podmazivati, pa su to dodatno teškoće za vakuumski sustav.

Od polimernih su materijala za vakuumsku tehniku najvažniji *elastomeri* (v. *Kaučuk i guma*, TE 6, str. 742) od kojih se izrađuju elastične brtve (tabl. 2). Najkvalitetniji je *Viton A*, proizvod tvrtke E. I. du Pont, koji se danas nalazi u svakom kvalitetnijem vakuumskom uređaju. U komprimiranom stanju, kao brtva, *Viton A* podnosi trajno zagrijavanje na  $125^{\circ}\text{C}$ , a u neopterećenom stanju i do  $270^{\circ}\text{C}$ . To je kopolimer viniliden-fluorida i heksafluoropropilena, služi za izradbu brtava za ultravisoki vakuum jer omogućuje brtljenje i pri tlaku manjem od  $10^{-9}$  mbar. Međutim, on nakon isplinjavanja dosta brzo ponovno adsorbira i apsorbira plinove (tabl. 2), pa ga nakon duljeg izlaganja zraku treba ponovno zagrijavati u vakuumu. Otporan je na većinu ulja i maziva, te na kisik i vodikov peroksid. Osim *Vitona A*, za izradbu se elastičnih brtava upotrebljavaju i prerađeni neoprenski, silikonski i butilni kaučuk. Brtve od tih materijala često se nazivaju i *gumenim brtvama*.

*Teflon* je plastomerni materijal koji se također mnogo primjenjuje u vakuumskoj tehnici (v. *Polimerni materijali*, TE 10, str. 600). Nema izrazito talište, već se na temperaturi višoj od  $327^{\circ}\text{C}$

pretvara u amorfni žele koji se može oblikovati, a na približno  $400^{\circ}\text{C}$  razgrađuje se na otrovne fluorne spojeve. Osobito je dobar izolator, otporan je prema svim kiselinama i lužinama i ne apsorbira niti adsorbira vodenu paru. Nedostatak mu je što se ne smije opteretiti tlakom većim od  $3,5 \text{ MPa}$  jer tada gubi elastična svojstva.

*Masti* za podmazivanje često se upotrebljavaju za poboljšanje svojstava čvrstih i pokretnih elastomernih spojeva (brtve, rotacijski i translacijski uvodnici i sl.), te ventila i pipaca u staklenim vakuumskim sustavima (tabl. 3). Nedostatak im je razmjerne visok tlak para, posebno kad su svježe. Zagrijavanjem u vakuumu masti se mogu isplinjavanjem oslobođiti apsorbiranih plinova.

Tablica 3  
SVOJSTVA VAKUUMSKIH MASTI

Mast	Tlak para ( $25^{\circ}\text{C}$ ) mbar	Maksimalna radna temperatura $^{\circ}\text{C}$
Apiezon L	$10^{-9}\cdots10^{-10}$	30
Apiezon T	$10^{-8}$	110
Dow Coming	$10^{-7}$	200
Leybold R, svježa	$10^{-6}$	30
Leybold R, isplinjena na $90^{\circ}\text{C}$	$10^{-8}$	
Vacuseal	$10^{-5}$	40

Izvrsno je sredstvo za podmazivanje vakuumskih kliznih elemenata i *molibdenov disulfid*,  $\text{MoS}_2$ . Podmazivanjem tim prahom umjesto grafitom postiže se manje trenje. Osim što mu je tlak para vrlo nizak, može izdržati temperature do  $400^{\circ}\text{C}$ .

*Voskovi, smoile i ljeplila* također se upotrebljavaju kao brtvila za privremene i stalne spojeve. Neka su sredstva vrlo mekana i mogu se lako ukloniti (Picein i Apiezon Q), a neka su tvrda i služe za čvrste spojeve (tabl. 4).

Tablica 4  
SVOJSTVA VAKUUMSKIH BRTVILA

Naziv	Tlak para ( $25^{\circ}\text{C}$ ) mbar	Temperatura mekšanja $^{\circ}\text{C}$	Maksimalna radna temperatura $^{\circ}\text{C}$
Picein	$8 \cdot 10^{-4}$	80	60
Apiezon Q	$10^{-4}$		30
Apiezon W-100	$<10^{-7}$	80	50
Araldit	$<10^{-6}$		60
Srebreni klorid	$<10^{-8}$	455	300

*Ulja* se u vakuumskoj tehnici (tabl. 5) pretežno rabe u rotacijskim, difuzijskim i ejektorskim pumpama. Tlak u vakuumskoj komori iz koje se isisava uljnim pumpama ne može biti niži od tlaka uljnih para na temperaturi posljednjeg stupnja u liniji za isisavanje. Zato je posljednji stupanj obično hladna stupica s ukapljenim duškom. Ulja za rotacijske pumpe trebaju imati tlak para niži od  $10^{-3}$  mbar, uz odgovarajuću viskoznost. Ulja za difuzijske pumpe trebaju udovoljavati mnogo strožim zahtjevima. Tlak njihovih para ne smije biti viši od  $10^{-6}$  mbar, ali na temperaturi ključanja treba biti što viši, jer je tada pumpa djelotvorna. Osim toga, ulja za difuzijske pumpe moraju biti otporna prema oksidaciji.

Tablica 5  
SVOJSTVA ULJA ZA DIFUZIJSKE VAKUUMSKE PUMPE

Ulje	Tlak para ( $25^{\circ}\text{C}$ ) mbar	Palište $^{\circ}\text{C}$	Kinematička viskoznost $\text{m}^2/\text{s}$
Octoil	$10^{-7}$	196	$7,5 \cdot 10^{-5}$
DC-704	$10^{-8}$	216	$4,7 \cdot 10^{-5}$
Apiezon C	$4 \cdot 10^{-9}$	265	$2,95 \cdot 10^{-4}$
DC-705	$5 \cdot 10^{-10}$	243	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Santovac 5	$1,3 \cdot 10^{-9}$	288	$2,5 \cdot 10^{-3}$

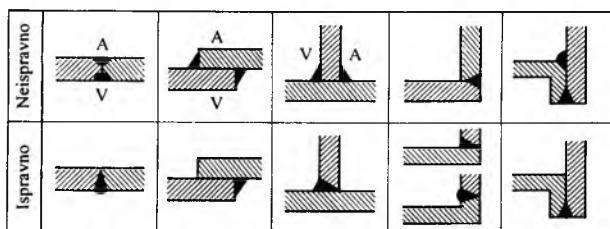
## SPAJANJE MATERIJALA I KOMPONENTA U VAKUUMSKOJ TEHNIKI

Prilikom sastavljanja vakuumskih sustava obično se spajaju komponente načinjene od materijala različitih fizikalnih svojstava. Takvi se vakuumski spojevi razvrstavaju prema materijalima (npr. spoj stakla i metala), prema tehnički kojom su načinjeni te prema svojoj trajnosti i funkciji. Prema funkciji uvodnici mogu biti za struju, napon, gibanje, vodu, plinove i sl. Vakuumski se spoj bira prema funkcionalnim zahtjevima i potrebnom vakumu, a neadekvatna tehnika brtvljenja može uzrokovati velike teškoće.

### Čvrsti vakuumski spojevi

Čvrsti se vakuumski spojevi postižu zavarivanjem, mekim ili tvrdim lemljenjem, lijepljenjem i drugim postupcima, već prema namjeni vakuumskog sustava. Često se meko lemljeni spoj naziva i polučvrstom jer se može rastaviti a da se ne oštete dodirne plohe komponenata.

Zavarivanje je način spajanja kojim nastaje ne samo mehanički već i vakuumski kvalitetan spoj. Današnje metode defektoskopije omogućuju kvalitetnu kontrolu zavara, ali se kvaliteta konačno ispituje tek u uvjetima kojima će zavar biti izložen tijekom rada. U vakuumskoj se tehniči uglavnom primjenjuje zavarivanje u zaštitnoj atmosferi (v. Zavarivanje). Prije zavarivanja valja dijelove pomnivo očistiti i odmastiti, najbolje ultrazvučnom tehnikom čišćenja u otopini detergenata i pranjem u vodi. Zavar mora biti, ako je ikako moguće, s vakuumsko strane komore (sl. 2). Zavarene komponente za ultravisokovakuumsku tehniku poželjno je nakon zavarivanja žariti na 1100°C u suhom vodiku.



Sl. 2. Ispravno i neispravno zavarivanje karakterističnih vakuumskih spojeva.  
A atmosferska, V vakuumsko strana komore

**Tvrdo lemljenje** postupak je spajanja pri temperaturi koja je niža od tališta materijala koji se spajaju, a za spajanje služi treći metal ili slitina, nazvan punilom ili lemom (tabl. 6). Za vrijeme lemljenja metali i punilo međusobno difundiraju i stvaraju čvrstu vezu u obliku slitine (tabl. 7). Prilikom tvrdog lemljenja važno je sprječiti oksidaciju metala, za što služe posebni dodaci punilu. Treba nastojati da tvrdo lemljeni spojevi ne sadrže metale s visokim tlakom para na nižim temperaturama (npr. olov, bizmut, cink, kadmij). Najkvalitetniji spojevi nastaju induktičkim zagrijavanjem u atmosferi vodika. Talište punila treba biti za ~100°C niže od točke mekšanja metalâ koji se spajaju.

Tablica 6  
PUNILA ZA TVRDO LEMLJENJE

Broj punila	Punilo (sastav u masenim udjelima, %)	Talište °C
1	Bakar	1083
2	Zlato	1063
3	Srebro(90)-paladij(10)	1065
4	Bakar(62)-zlato(35)-nikal(3)	1030
5	Nikal(82,6)-krom(7)-silicij(4,5)-željezo(3)-bor(2,9)	1000
6	Bakar(60)-zlato(40)	980
7	Zlato(82)-nikal(18)	950
8	Zlato(58)-bakar(32)-paladij(10)	852
9	Zlato(72)-bakar(28)	780
10	Srebro(63)-bakar(27)-indij(10)	730

Tablica 7

MEĐUSOBNO SPAJANJE METAŁA I SLITINA TVRDIM LEMLJENJEM\*

Metal ili slitina	Volfram	Molibden	Nikal	Monel	Kovar	Nehrđajući čelik	Bakar
Bakar	4, 7	6, 7, 8	6, 7, 9	4, 9	6, 7, 9	7, 8	8, 9, 10
Nehrđajući čelik	5, 7	3, 5	5, 7	1	2, 7, 9	1, 8	
Kovar	4, 7	7	2, 6, 7	4, 9	2, 9		
Monel	4, 7	4	4, 9	4, 9			
Nikal	4, 7	4, 7	4, 6, 9				
Molibden	4, 7, 8	4, 7, 8					
Volfram	7, 8						

\*Brojevi označuju punila navedena u tablici 6.

**Meko lemljenje** u vakuumskoj se tehniči rijetko primjenjuje jer meko lemljeni spoj ne podnosi zagrijavanje na temperaturu višu od 200°C, a ima i razmjerno visok tlak para već na niskim temperaturama. Zbog toga se obično meko lemi samo na malim površinama hladnih komponenata ili u predvakuumskom dijelu uređaja.

**Spoj metala i stakla** bio je vrlo čest dok su u širokoj upotrebi bili stakleni vakuumski sustavi. S uvođenjem metala kao primarnog konstrukcijskog materijala važnost je toga spoja sve manja, ali je on i dalje bitan za prozore na vakuumskim komorama. Takav spoj nije jednostavno ostvariti zbog općenito velike razlike između toplinskog širenja stakla i metala. Stoga je i izbor prikladnih metala ograničen (tabl. 8).

Tablica 8  
METALI I SLITINE PRIKLADNI ZA SPAJANJE SA STAKLOM

Metal ili slitina	Sastav, %				Koefficijent toplinskog širenja 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
	željezo	nikal	kobalt	krom	
Volfram					4,5
Platina					9...9,5
Molibden					5,5...5,8
Tantal					6,5
Kovar I	54	29	17	—	4,5...5
Kovar III	42	20	38	—	9
Vakon	49...54	28	18...23	—	
Konel	7,5	71	18,5	—	11
Nikrom	—	80	—	20	14

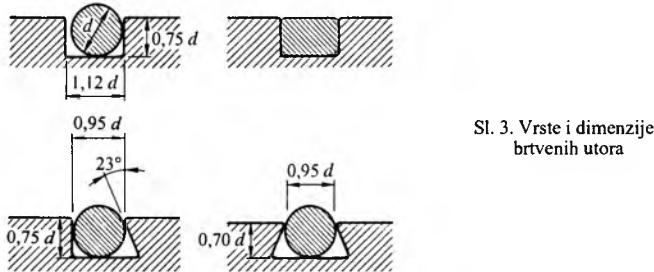
Za izradbu električnih uvodnika za male struje i napone u staklenim stijenkama, kao npr. u električnim žaruljama, najviše se upotrebljava volfram jer mu je toplinski širenje pogodno, a osim toga rastaljeno ga staklo dobro moći pa se ostvaruje kvalitetan spoj.

**Spoj metala i keramike** postaje sve važniji zbog izvrsnih izolacijskih svojstava, kemijske otpornosti i otpornosti na toplinski i mehanički udar. Zbog toga se najviše rabi za razne vrste vakuumskih električnih uvodnika za visoke struje i napone. Najzastupljenija je keramika s mnogo aluminijskog oksida. Spoj metala i keramike ostvaruje se u dva stupnja: metalizacijom keramike i zatim tvrdim lemljenjem metala na taj metalizirani dio. Obično se na površinu keramike nanosi smjesa molibdenskog i manganskog praha i veziva, pa se ta smjesa sinterira u atmosferi vodika na temperaturi 1300...1600°C. Na sinteriranu se dio zatim nanosi tanak sloj paste koja sadrži bakreni ili nikleni prah i ponovno se sinterira u vodiku na 1000°C. Tako nastaje metalizirani sloj koji čvrsto prianja na keramiku i može se tvrdim lemljenjem spojiti s metalom.

### Rastavljni vakuumski spojevi

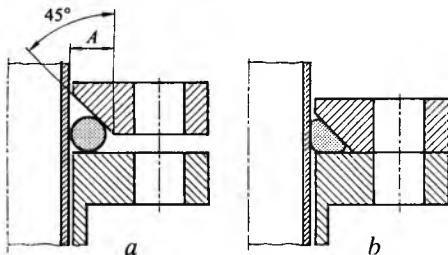
Vakuumski spojevi koji se mogu rastaviti nalaze se na onim mjestima gdje je potreban pristup u vakuumski sustav i gdje se često mijenjaju dijelovi. Ti se spojevi ostvaruju brtvljenjem među metalnim ploham, i to elastomernim brtvama za tlakove do 10<sup>-6</sup> mbar, a metalnim brtvama za niže tlakove.

**Elastomerne brtve.** Najčešće su brtve prstenasta oblike (tanki torus, tzv. O-prsten). Tlak je prilikom kompresije obično  $\sim 2,5 \text{ MPa}$ . Daljnjim tlačenjem mogla bi se brtva plastično deformirati i oslabiti brtvljenje. Zbog toga je konstrukcija brtvenih utora posebno važna. Utori moraju biti fino polirani, s neravninama ne većim od  $1\mu\text{m}$  (sl. 3).



Sl. 3. Vrste i dimenzije  
brtvenih utora

Brtvljenje cijevi pritiskom brtve na njezinu stijenu prikazuje slika 4. Obujam prostora u kojem se brtva tlači mora biti  $\sim 10\%$  veći od obujma brtve. Ako je promjer cijevi koja se brti mnogo veći od promjera presjeka brtve, veličina  $A$  treba biti 30% veća od promjera presjeka brtve.



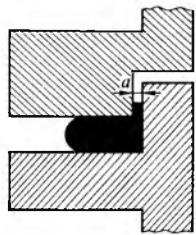
Sl. 4. Brtvljenje cijevi. a neopterećena,  
b opterećena brtva

**Metalne brtve.** Za brtvljenje vakuumskih uređaja koji se radi isplinjavanja materijala zagrijavaju do  $400^\circ\text{C}$  rabe se bakrene, aluminijske i zlatne brtve te brtve od indija. U usporedbi s brtvama od elastomera metalne su brtve manje propusne, manje otpiljavaju i podnose više temperature.

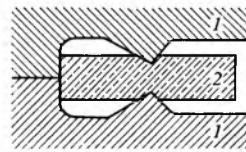
**Indij** je prikladan za brtvljenje kad temperatura vakuumskih komora ne prelazi  $156^\circ\text{C}$  i kad su dovoljni mali brtveni tlakovi. Indiju se, naime, s porastom tlaka naglo snižava talište pa se on napokon rastali, ispunji sve pukotine i odlično brtvi.

**Aluminij** se upotrebljava za brtvljenje pri većim brtvenim tlakovima. Bez posljedica se može zagrijavati do  $400^\circ\text{C}$ , no na višoj temperaturi stvara međumetalne spojeve sa željezom na mjestima dodira s prirubnicama od nehrđajućeg čelika. Za aluminijske je brtve dopušteno da tlačenjem postanu tanje  $15\cdots20\%$ .

**Zlato** služi kao brtva u obliku žice. Plohe za brtvljenje trebaju biti vrlo kvalitetno obradene, a izbočenja (hrapavost) ne smiju im biti veća od  $2\mu\text{m}$ . Spojevi sa zlatnim brtvama mogu se zagrijavati do  $450^\circ\text{C}$ . Promjeri su zlatne žice obično  $0,5\cdots1\text{mm}$ , a brtve se deformiraju tako da dimenzija iznosi  $\sim 50\%$  prvobitnog promjera (sl. 5). Preporučljiva vrijednost dimenzije  $a$  na slici 5 iznosi  $0,03\cdots0,08\text{ mm}$ .



Sl. 5. Brtvljenje zlatnim  
brtvama



Sl. 6. Brtvljenje prirubnicom  
tipa ConFlat. 1 prirubnice,  
2 bakrena brtva

**Bakar** je najčešći materijal za metalne brtve. Obično su to prstenovi debljine  $\sim 2\text{ mm}$  od visokokvalitetnog bakra bez kisika. Vrlo kvalitetno brtvljenje postiže se prirubnicama tipa ConFlat, što je patent američke tvrtke Varian (sl. 6). Prilikom stezanja klin se prirubnice urezuje u bakar i tako ostvaruje brtvljenje, a zarobljeni zrak izlazi kroz načinjene utore koji služe i za kontrolu

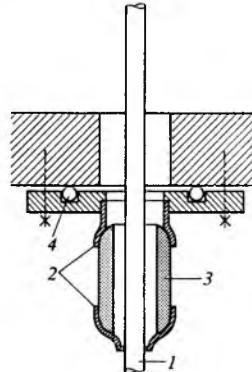
brtvljenja. Takvi su spojevi pouzdani do temperatura 300 do  $350^\circ\text{C}$ . Posebno su kvalitetne brtve s nekoliko postotaka srebra.

### Vakuumski uvodnici

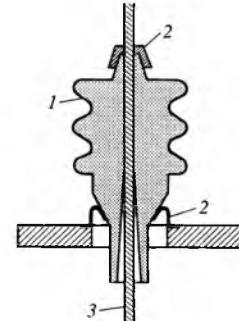
Vakuumski su uvodnici dijelovi vakuumskog uređaja koji omogućuju uvođenje tvari ili energije u vakuumski sustav. Najčešće se dijele na električne uvodnike, uvodnike mehaničkog gibanja, vode, plinova i sl. Često se među uvodnike svrstavaju i porozri za promatranje unutrašnjosti vakuumske komore.

**Električni uvodnici.** Uvodnici za električnu struju razlikuju se prema naponu i struci koju provode. Prilikom uvođenja velikih struja ( $50\cdots200\text{ A}$ ) naponi najčešće nisu viši od  $50\text{ V}$ , pa ni zahtjevi glede električne izolacije nisu strogi. Za uvođenje struje u vakuumsku komoru rabe se šipke od bakra bez kisika, promjera  $6\cdots20\text{ mm}$ . Uvodnici za veće struje hladne se vodom.

Za visokonaponske uvodnike bitan je probojni napon izolatora. Izolator je obično od keramike koja se može spajati s metalom. Za napone do  $10\text{ kV}$  prikladan je uvodnik prema slici 7, a za više napone i struje (do  $25\text{ kV}$  i  $50\text{ A}$ ) uvodnik prema slici 8. Za uvođenje radiofrekventnih struja u vakuumsku komoru služe uvodnici s vodičima od bakrenih cijevi kojima strui voda, a za uvođenje malih struja niskog napona rabe se jednostavniji uvodnici sa spojem stakla i metala, kao što je to u električnim žaruljama. Najbolje se spaja volfram sa stakлом Pyrex.

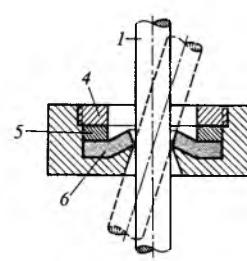
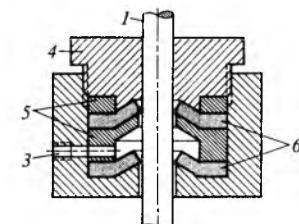
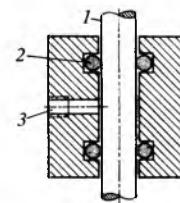


Sl. 7. Električni uvodnik za male  
struje. 1 vodič, 2 metal, 3 keramički  
izolator, 4 brtva



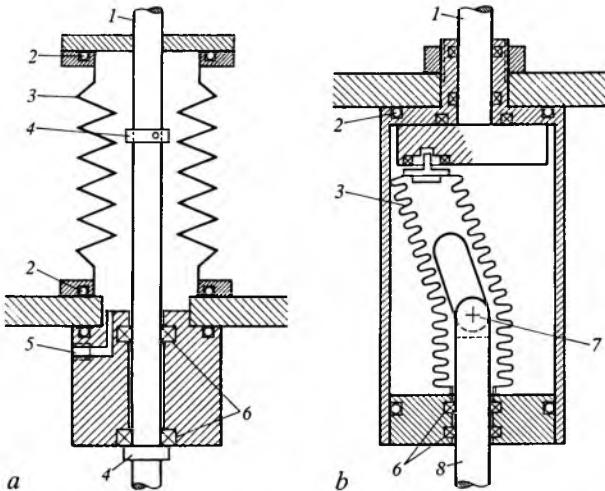
Sl. 8. Uvodnik za visoke napone i velike struje. 1 keramički izolator, 2 spoj metal-a i keramike, 3 vodič

**Uvodnici mehaničkog gibanja.** *Uvodnici s brtvama od polimernih materijala* služe za prijenos linearnog ili rotacijskog gibanja (sl. 9). Linearno se gibanje ostvaruje utiskivanjem šipke u vakuumski sustav, a rotacijsko gibanje okretanjem osovine. Prilikom šipka ili osovine kližu po brtvi, pa se klizne površine redovito podmazuju silikonskom masti.



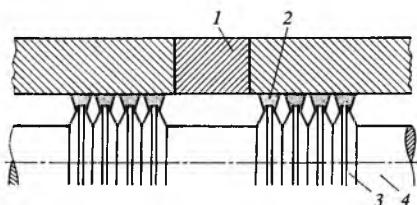
Sl. 9. Uvodnici mehaničkog gibanja s brtvama od polimernih materijala. 1 osovinu ili šipka, 2 okrugle brtve, 3 otvor za isisavanje, 4 matica, 5 metalni prstenvi, 6 plosnate brtve, 7 učvršćenje

*Uvodnici s metalnim mijehom* izrađuju se zavarivanjem više metalnih prstenova (sl. 10 a) ili deformacijom tanke metalne cijevi (sl. 10 b). Metalni se prstenovi najčešće izrađuju od nehrđajućeg čelika ili niklenih slitina, a takvi se mijehovi odlikuju velikim omjerom duljine u rastegnutom i duljine u stisnutom stanju, koji može iznositi i do 6 : 1. Za izradbu mijeha od metalne cijevi upotrebljava se fosforna ili berilijska bronca i takav je mijeh pogodniji za savijanje.



Sl. 10. Uvodnici mehaničkog gibanja s metalnim mijehom od prstenova (a) i od tanke cijevi (b). 1 osovina, 2 gumene brtve, 3 metalni mijeh, 4 prsten s vijkom za učvršćivanje, 5 otvor za isisavanje, 6 ležaji, 7 zglob, 8 vanjska osovina

Zanimljiv je vakuumski *uvodnik s magnetičnom suspenzijom* za prijenos rotacijskog gibanja (sl. 11). U njemu se nalazi trajni kružni magnet koji s unutrašnje strane cijevi drži gustu magnetičnu suspenziju sitnih čestica feromagnetičnog materijala u ulju za difuzijsku pumpu. Izbočenja na osovinu stalno su uronjena u suspenziju, pa se tako i prilikom rotacije osovine ostvaruje brtvljenje. Takvi uvodnici omogućuju prijenos rotacijskog gibanja uz velike brzine vrtnje.



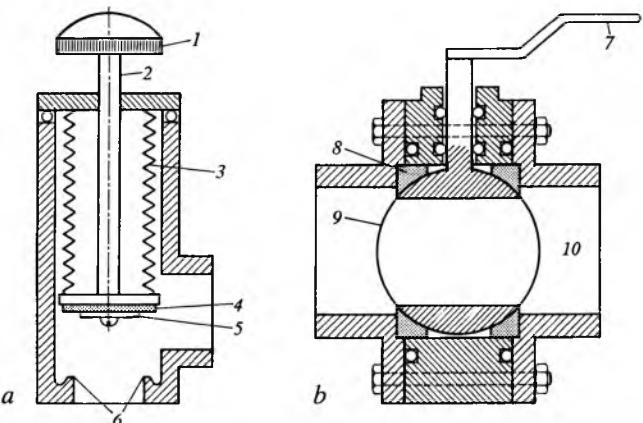
Sl. 11. Uvodnik rotacijskog gibanja s magnetičnom suspenzijom. 1 trajni magnet, 2 magnetična suspenzija, 3 izbočenja, 4 osovina

Ostali se uvodnici izrađuju razmerno jednostavno, već prema radnim uvjetima u komori. Cijevi uvodnika rashladne vode najpogodnije se spajaju s prirubnicom tvrdim lemljenjem, a uvodnici optičkih vlakana epoksidnim smolama.

### Vakuumski ventili

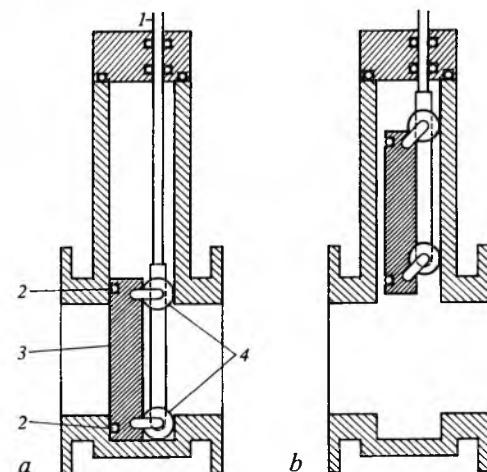
Vakuumski ventili odvajaju dijelove vakuumskog sustava jedne od drugih, a čitav sustav od okolne atmosfere. Sastavni je dio svakog ventila uvodnik rotacijskog ili linearne gibanja kojim se pomici mehanizam za otvaranje i zatvaranje ventila. Ventili se pokreću ručno, motornim pogonom ili pneumatski.

*Ventili za grubi vakuum* služe za povezivanje pumpe za grubi vakuum s vakuumskom komorom ili s pumpom za visoki vakuum. Dva su osnovna tipa takvih ventila. U jednoga od njih prolaz se zatvara gumenom brtvom koja se nalazi u utoru potisne pločice i pritiskuje se na dosjed (sl. 12 a). Drugi tip ventila ima metalnu kuglu s provrtom, a brtvljenje se ostvaruje s dvama prstenima od polimernog materijala po kojima se kugla okreće (sl. 12 b). Budući da se trebaju podmazivati vakuumskom masti, takvi se ventili u vakuumskoj tehnici sve manje upotrebljavaju.



Sl. 12. Ventili za grubi vakuum s prstenastom brtvom (a) i s kuglom (b). 1 kolo, 2 osovina, 3 mijeh, 4 brtva, 5 pločica, 6 dosjed, 7 ručica, 8 prsten od polimernog materijala, 9 metalna kugla, 10 provrt

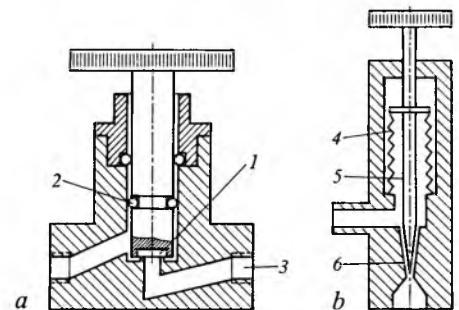
*Ventili za visoki vakuum* (sl. 13) nalaze se između pumpe za visoki vakuum i vakuumske komore. Promjer tih ventila treba biti primjerene veličine da se omogući što veća brzina isisavanja i viši konačni vakuum u komori.



Sl. 13. Ventil za visoki vakuum. a zatvoren, b otvoren; 1 osovina, 2 elastomerne brtve, 3 potisna ploča, 4 zglob

*Ventili za ultravisoki vakuum* moraju izdržati zagrijavanje do 400°C i u njima se ne mogu upotrijebiti elastomerne brtve. Na potisnoj se pločici takvih ventila nalazi polirana oštrica od tvrdog metala, a s druge je strane bakar ili koji drugi meki metal. Brtvljenje se ostvaruje urezivanjem oštrog ruba u meki metal. Prilikom je potrebna prilično velika sila, pa su takvi ventili razmjerno malena promjera (< 50 mm). Zbog plastične deformacije mekog metalata vrlo je ograničen broj otvaranja i zatvaranja takva ventila (od nekoliko stotina do samo desetak).

*Ventili za upuštanje plinova* primjenjuju se za upuštanje zraka prije otvaranja vakuumske komore ili za kontrolirano upuštanje plinova u komoru. Za upuštanje većih količina plinova upotrebljavaju se ventili s plosnatom elastomernom brtvom (sl. 14 a), a za malene količine plinova služi igleni (igličasti) ventil (sl. 14 b), koji omogućuje vrlo precizno doziranje.



## VAKUUMSKE PUMPE

Vakuumske pumpe (crpke, sisaljke) temeljne su komponente vakuumskog uređaja, a funkcija im je da izbacivanjem plinskih čestica stvore i održavaju vakuum u vakuumskoj komori. Njihove su najvažnije značajke učin i moć isisavanja. *Učin isisavanja* određuje se izrazom

$$Q = \frac{PV}{t}, \quad (1)$$

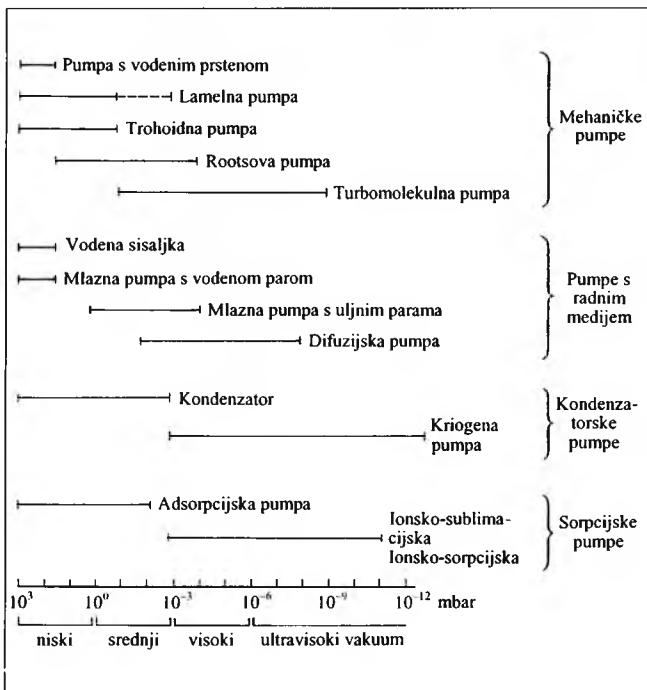
a obično se izražava jedinicom mbarL/s. Moć isisavanja u vakuumskoj se tehnički naziva i *brzinom isisavanja*:

$$S = \frac{Q}{P} = \frac{V}{t}, \quad (2)$$

a njezina je jedinica L/s ili  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Osim brzine isisavanja važne su i druge značajke vakuumskih pumpa, npr. tzv. *konačni vakuum*, što je najmanji tlak koji pumpa sama može postići (kada nije priključena na vakuumski sustav), zatim tlak para radne tvari u pumpi (ulje u mehaničkim ili difuzijskim pumpama), najveći parcijalni tlak para (npr. vode) koji pumpa podnosi bez promjene radnih karakteristika, te otpornost na korozivne pare, što je posebno važno u kemijskoj industriji i metalurgiji.

Vakuumske se pumpe razlikuju po mnogim parametrima. Prema načinu rada mogu se razvrstati u više skupina: mehaničke pumpe, pumpe s mlazom fluida, kondenzacijske i sorpcijske pumpe (sl. 15).



Sl. 15. Vakuumsko područje primjene vakuumskih pumpi

Sve se *mehaničke vakuumske pumpe* temelje na rotaciji radnog dijela, a klipne se pumpe u vakuumskoj tehnički više ne upotrebljavaju. Razlikuju se volumenske rotacijske i dinamičke rotacijske pumpe. Volumenske pumpe (uljne pumpe, pumpe s rotirajućim krilima, pumpa s vodenim prstenom) na usisnoj strani periodički zahvaćaju određeni obujam plina, koji na drugoj strani izbacuju, a to može biti praćeno i kompresijom tijekom rotacije. Većina tih pumpa može započeti isisavanje od atmosferskog tlaka. U dinamičkim pumpama (molekulna i turbomolekulna pumpa) većina se plinskih čestica usmjeruje prema izlaznom otvoru nakon jednog ili više sudara s rotorom.

*Pumpe s mlazom fluida* nemaju pokretnih dijelova. Podtlak stvoren na mjestu sušenja mlaza privlači čestice plina, a mlaz ih

zahvaća i povlači sa sobom prema izlazu iz pumpe. U tu se skupinu ubrajaju mlazne i difuzijske pumpe.

U *kondenzacijskim pumpama* čestice se plina ili pare uklanjuju kondenzacijom na ohlađenim plohama. Pritom se može hladiti pomoću jednostavne stupice u koju se stavlja rashladna tekućina ili pomoću posebnog rashladnog uređaja.

*Sorpcijske pumpe* vežu čestice plina fizikalno ili kemijski na nekoj plohi, katkad i pomoću površinski aktivnih tvari. Pritom se radi o sublimacijsko-adsorpcijskim procesima, često uz pretvodnu ionizaciju.

U vakuumskoj se tehniči radi u uvjetima velikih raspona tlakova i gustoča plina, jer isisavanje najčešće počinje pri atmosferskom tlaku, a nastavlja se do područja visokog ili ultravisokog vakuma. Cijelo se to područje ne može obuhvatiti samo jednom vakuumskom pumpom, jer su na različitim tlakovima principi i načini postizanja vakuuma različiti.

Uobičajeni sustav za isisavanje do visokog vakuuma sastoji se od najmanje jedne pumpe za početno isisavanje i jedne pumpe za visoki vakuum, najčešće difuzijske pumpe. Takva je kombinacija potrebna zbog toga što difuzijska pumpa ne može plinske čestice izbacivati izravno u atmosferu, nego samo u područje nižeg (slabijeg) vakuuma (tzv. *predvakuum*). Pomoćna pumpa koja stvara potreban predvakuum za drugu, difuzijsku pumpu naziva se *predvakuumskom pumpom*. To je najčešće jednostavna mehanička pumpa.

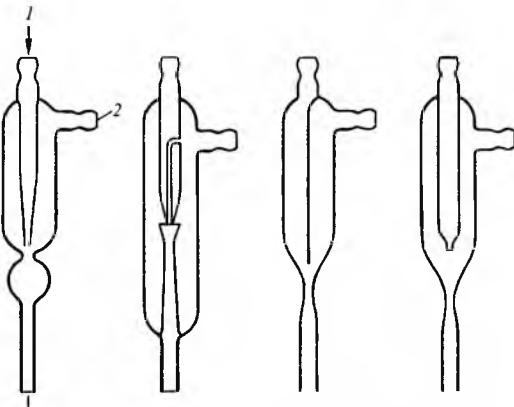
Predvakuumska pumpa uklanja približno 99,99% plinskih čestica iz komore iz koje se isisava. Pošto se postigne takav niski, grubi vakuum, uključuje se difuzijska pumpa koja isisava čestice iz komore u predvakuumsku pumpu, a ona ih zatim izbacuje u atmosferu.

U sorpcijskim se pumpama isisane čestice ne izbacuju u atmosferu, nego ostaju uhvaćene u pumpi. Tako se sustav lakše izolira od okolišnog tlaka i nije mu potrebno predisisavanje, ali je uređaj ograničena kapaciteta i treba ga regenerirati.

U ovome su članku vakuumske pumpe razvrstane prema području vakuuma koji mogu ostvariti.

## Pumpe za niski i srednji vakuum

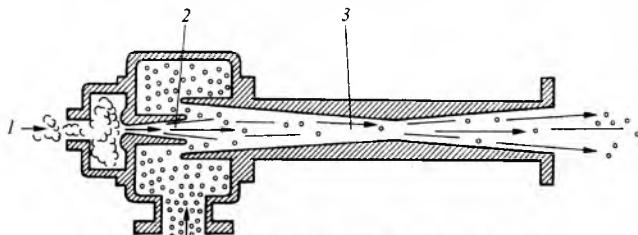
**Mlazne pumpe.** Pri strujanju fluida kroz cijev smanjuje se statički tlak na njezinim suženjima. Tu je pojavu iskoristio R. W. Bunsen sredinom XIX. st., kad je konstruirao vodenu sisaljku i plinski plamenik. U *vodenoj sisaljci*, koja se naziva i Bunsenovom pumpom, brzim se strujanjem vode na suženom dijelu cijevi stvara vakuum koji usisava zrak iz vakuumskog komora (sl. 16). Konačni vakuum, koji se uz stalni presjek sapnice može postići, ovisi o tlaku vode na ulazu u sisaljku, ali je rijetko niži od 100 mbar. Takve su sisaljke pogodne za potrebe kemijskih laboratorijskih i za sušenje uzoraka jer im ne smeta voda iz preparata koji se suši.



Sl. 16. Vodene sisaljke. 1 voda, 2 priključak na vakuumsku komoru

U *mlaznoj pumpi s vodenom parom* ubrizgava se pod visokim tlakom vodena para (sl. 17) koja pri prolasku kroz sapnicu postiže brzinu strujanja veću od brzine zvuka. Molekule vodene pare imaju veliku kinetičku energiju, dio koje prilikom sudara predaju

plinskim česticama iz komore i usmjeruju ih prema izlaznom otvoru pumpe. U području oko mlaza pare nastaje podtlak koji usisava plin iz komore, a vodena para koja naglo ekspandira hlađi se, ukapljuje i odvodi. Brzina isisavanja ovisi o tlaku u komori koja se evakuira. Naime, nakon izlaska iz sapnice mlaz je pare na početku isisavanja uzak zbog difuzije čestica uz stijenke difuzora, pa je i brzina isisavanja mala. Kada tlak u komori padne na vrijednost manju od 1 mbar, mlaz pare ispunjuje skoro cijav difuzor, protuštrujanje čestica postaje minimalno, a brzina isisavanja najveća. Daljim smanjenjem tlaka mlaz se pare nastavlja širiti, ali isisavanje ponovno postaje manje djelotvorno i brzina mu se smanjuje. Mlazne se pumpe mogu spojiti u niz, pa se tako s više stupnjeva postiže i viši konačni vakuum.



Sl. 17. Mlazna pumpa. 1 vodena para, 2 sapnica, 3 difuzor

Slična je i pumpa u kojoj kroz sapnicu velikom brzinom struje uljne ili živine pare. To se postiže zagrijavanjem i isparivanjem ulja ili žive s velike površine. Pumpa se odlikuje velikom brzinom isisavanja, a konačni vakuum može biti u  $10^{-4}$  mbar.

**Uljne rotacijske pumpe.** Te pumpe izbacuju plinske čestice izravno u atmosferu. Prilikom rotacije njihova ekscentrično smještenog rotora u jednom se dijelu kućišta stalno otvara prostor u kome nema plinskih čestica, pa one u njega ulaze iz komore koja se isisava. Daljom rotacijom taj se prostor zatvara, a čestice u njemu potiskuju se prema izlaznom otvoru i kroz izlazni ventil izbacuju u atmosferu.

Kompresijski omjer uljnih rotacijskih pumpi definira se kao omjer tlaka na izlazu i na ulazu pumpe. Tlak na izlazu pumpe za niski vakuum približno je jednak atmosferskom, dok se na ulazu pumpe s jednim stupnjem postiže tlak  $0,01$  mbar, pa je kompresijski omjer takve pumpe približno  $100\,000 : 1$ .

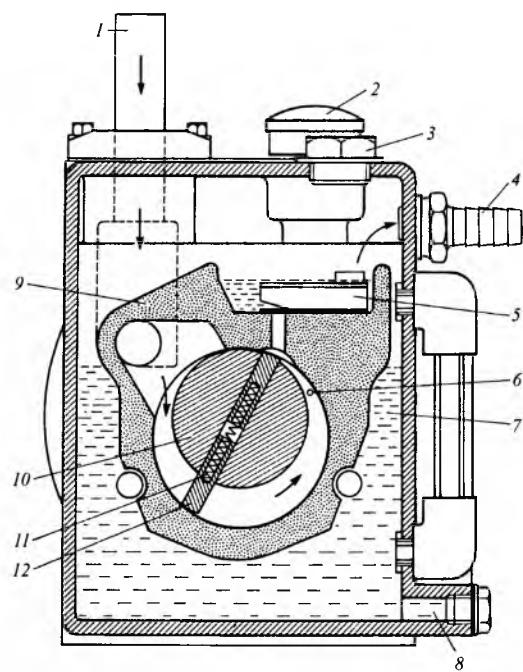
Radi što boljeg brtvljenja pumpe se pune tzv. *vakuumskim uljem* koje mora imati što niži tlak para ( $\sim 10^{-3}$  mbar) i propisanu viskoznost. Cijeli je stator s rotorom uronjen u komoru s uljem. Ulje sprečava ulazak zraka iz atmosfere kroz izlazni ventil u pumpu, podmazuje sve dijelove pumpe i omogućuje da se između statora i rotora stvari tanak sloj ulja.

Na konačni vakuum koji pumpa može postići utječe i topljivost zraka u ulju. Naime, dio zraka koji se isisava otapa se u ulju i vraća u kompresijski prostor pa tako narušava vakuum.

Voda u ulju također narušava konačni vakuum. Ako se isisava iz komore koja sadrži vodenu paru, tada se u kompresijskom prostoru pumpe para ukapljuje i s uljem tvori emulziju. Tlak para takve emulzije mnogo je viši od tlaka para čistog ulja i katkada može potpuno onemogućiti ispravan rad pumpe. Problem se rješava tzv. *plinskim opterećenjem* (engl. gas balast). U trenutku kad se zatvori usisni otvor, otvara se ventil kojim se u pumpu uvodi malena količina zraka iz atmosfere. Zbog toga se ranije otvara izlazni ventil i smanjuje parcijalni tlak vodene pare, pa se ona teže kondenzira.

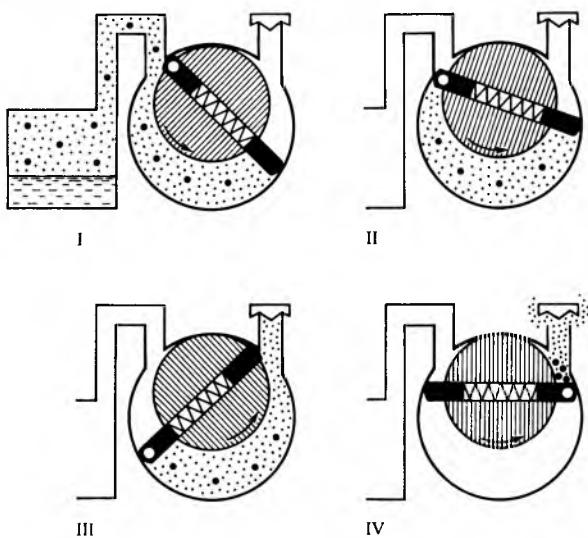
**Lamelna pumpa.** U sredini ekscentrično smještena rotora nalaze se pokretnye lamele koje, potiskivane perima, stalno kližu po fino poliranoj stijenci statora. Tako je prostor u cilindru podijeljen na dva odvojena dijela (sl. 18). Zbog dobrog brtvljenja između lamele i statora, na jednoj se strani cilindra prilikom rotacije stvara podtlak i crpi zrak, a na drugoj se strani cilindra plin koji je zatvoren između dviju lamele izbacuje u atmosferu (sl. 19).

Pumpa s jednim stupnjem postiže konačni vakuum približno  $2 \cdot 10^{-2}$  mbar, a s dva stupnja  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar. Brzina joj je isisavanja  $2 \cdots 650 \text{ m}^3/\text{h}$ , a podnošljivost vodene pare  $20 \cdots 30$  mbar, što se definira kao maksimalan tlak na ulazu u pumpu uz koji ona može trajno isisavati i izbacivati vodenu paru. Brzina je vrtnje od  $350 \text{ min}^{-1}$  za veće pumpe do  $2800 \text{ min}^{-1}$  za manje pumpe.



Sl. 18. Lamelna pumpa. 1 usisni otvor, 2 ventil za plinsko opterećenje, 3 otvor za punjenje uljem, 4 izlazni otvor, 5 ispušni ventil, 6 otvor za plinsko opterećenje, 7 ulje, 8 otvor za ispuštanje ulja i nečistoća, 9 stator, 10 rotor, 11 opruga, 12 lamela

Lamelne su pumpe vrlo rasprostranjene i to su najčešće predvakuumskе pumpe. Upotrebljavaju se u laboratorijima gdje su potrebne male brzine isisavanja, ali i u industriji kad u atmosferi koja se isisava nema većih količina vodene pare.

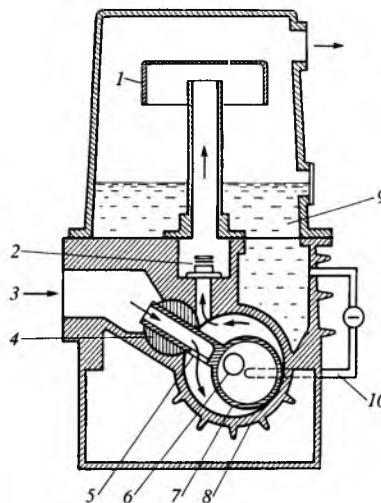


Sl. 19. Radne faze lamelne pumpe

**Pumpa s ekscentričnim valjkom.** Valjak koji je u svojoj unutrašnjosti ekscentrično spojen s osovinom pogonskog motora giba se po unutrašnjosti cilindra te usisava plin, komprimira ga i izbacuje u atmosferu (sl. 20). Konačni vakuum pumpe s jednim stupnjem iznosi  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  mbar, a s dva stupnja  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar. Takve su pumpe pogodne za primjenu u procesima sušenja i impregniranja u kemijskoj industriji i metalurgiji. Tipične su im brzine isisavanja  $100 \cdots 250 \text{ m}^3/\text{h}$ , brzina vrtnje  $\sim 500 \text{ min}^{-1}$ , a podnošljivost vodene pare  $\sim 60$  mbar.

**Trohoidna pumpa.** Princip je rada trohoidne pumpe isti kao u lamelne, samo što njezin stator ima u presjeku oblik trohoide, a rotor oblik elipse (sl. 21).

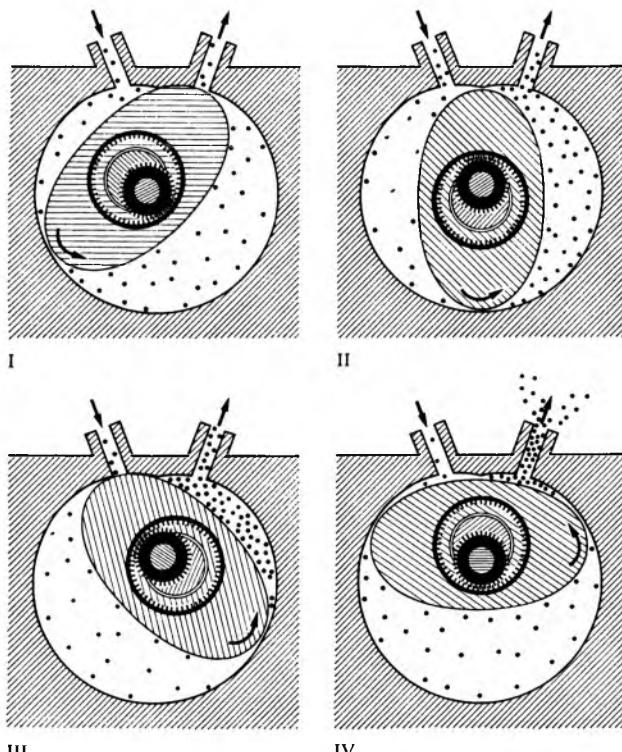
Trohoidnim se pumpama postiže konačni vakuum od  $7 \cdot 10^{-2}$  mbar, brzina je isisavanja  $400 \cdots 700 \text{ m}^3/\text{h}$ , a podnošljivost



Sl. 20. Pumpa s ekscentričnim valjkom. 1 zaštitna kapica, 2 izlazni ventil, 3 usisni otvor, 4 klizač, 5 ulazni otvor, 6 pogonska osovinica, 7 valjak, 8 cilindar, 9 ulje, 10 dovod ulja

vodene pare  $\sim 66$  mbar, dakle najveća među rotacijskim uljnim pumpama. Tipična je brzina vrtnje  $\sim 1000$  min $^{-1}$ . Trohoidne pumpe zahtijevaju vodeno hlađenje.

Trohoidne se pumpe odlikuju razmjerno malenim dimenzijama i velikim brzinama isisavanja, pa se upotrebljavaju u procesnoj industriji za isisavanje velikih količina plina. Obično imaju i ventil za plinsko opterećenje pomoću kojeg se mogu isisavati veće količine vodene pare.



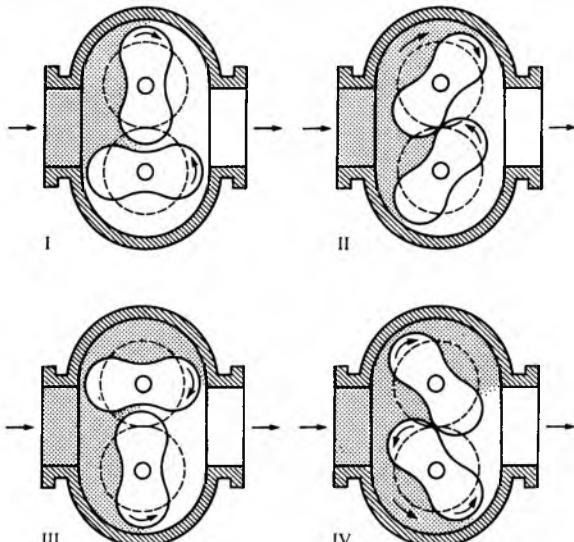
Sl. 21. Radne faze trohoidne pumpe

**Pumpe s rotirajućim krilima.** To su pumpe s dva rotora koji se vrte u suprotnim smjerovima. Od njih se u vakuumskoj tehnici češće upotrebljavaju pumpa Roots i tzv. suha pumpa.

U pumpi Roots (sl. 22) rotori ne dodiruju stator te nema trenja, pa je moguća mnogo veća brzina vrtnje nego u ostalim rotacijskim pumpama (do nekoliko tisuća okretaja u minuti). Za rad pumpe potreban je predvakuum bolji od 1 mbar, pa se na njezin izlaz spaja predvakumska pumpa, a njihovi kapaciteti trebaju biti uskladjeni. Konačni je vakuum  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  mbar, a brzina isisavanja  $250 \cdots 25000$  m $^3$ /h.

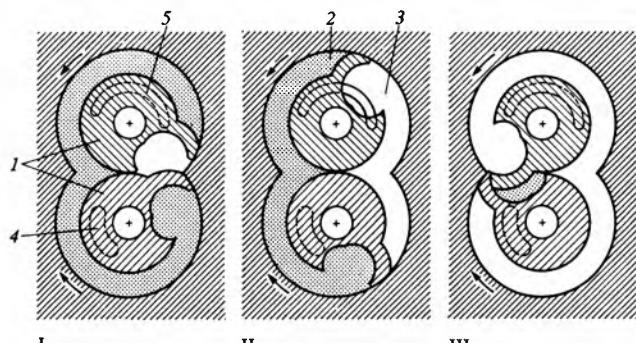
Pumpa Roots upotrebljava se u industriji kad je potrebna velika brzina isisavanja, posebno za plinove s mnogo vodene pare. Za isisavanje vlažnih plinova i za vakuum u području  $10^{-3}$  do

$10^{-4}$  mbar najbolja je kombinacija pumpe Roots i pumpe s vodenim prstenom.



Sl. 22. Radne faze pumpe Roots

**Suha pumpa** naziva se tako jer ne sadrži ulja, a namijenjena je potrebama poluvodičke industrije, gdje uljne pare smetaju i u tragovima. Osim toga, ona služi i za isisavanje korozivnih plinova koji inače štetno djeluju i na ulje u pumpi. Periodička promjena radnog obujma ostvaruje se vrtnjom dvaju rotora u obliku pandži (sl. 23). Brzina im je isisavanja  $25 \cdots 160$  m $^3$ /h, konačni vakuum  $\sim 1 \cdot 10^{-2}$  mbar, a brzina vrtnje rotora  $\sim 3000$  min $^{-1}$ .



Sl. 23. Rad suhe pumpe s dva rotora. 1 rotor, 2 radni obujam, 3 usisni obujam, 4 izlazni otvor, 5 ulazni otvor

**Pumpa s vodenim prstenom.** Metalno kućište pumpe djelomično je ispunjeno vodom koju rotor potiskuje na prstenasto kruženje uz obod statora. Zbog ekscentrično smještenog rotora u jednom se dijelu između rotornih lopatica i vodenog prstena stvara prostor bez plinskih čestica. U njega se usisava određena količina plina, koja se zatim počinje komprimirati zbog približavanja vodenom prstenu i konačno se istiskuje iz komore (v. Pumpe, TE 11, str. 338). Konačni vakuum (10 mbar) ovisi o tlaku vodene pare. Iako postignuti vakuum nije osobito nizak, ipak se pumpe s vodenim prstenom zbog svoje velike brzine isisavanja ( $1000 \cdots 8000$  m $^3$ /h) često primjenjuju u kemijskoj industriji za brzo sušenje, vakuumsku destilaciju, pročišćavanje i sl. Takve su pumpe pogodne i za isisavanje nečistih plinova u kojima može biti i većih čestica, jer je razmak između statora i rotora i u najbližoj točki dovoljan da se pumpa ne troši. Pumpa je prikladna i za isisavanje vrućih para, koje se u vodi hlađe i kondenziraju.

Pumpa s vodenim prstenom započinje isisavanje od atmosferskog tlaka, pa može poslužiti i za postizanje predvakuumâ koji su potrebni za rad ostalih pumpa. Za iznimno veliku brzinu isisavanja upotrebljavaju se dvostupanjske pumpe s vodenim prstenum, a u posebnim primjenama moguća je uporaba i drugih tekućina, npr. alkohola.

**Kondenzacijska stupica.** Princip je rada isisavanja stupice kondenzacija parâ na njezinim površinama. Kondenzacijske se

površine hlađe vodom ako se želi djelomično kondenzirati vodena para, dok se niže temperature postižu cirkulacijom ohlađenog freona, etanola ili trikloretilena. Stupice se najviše upotrebljavaju za uklanjanje vlage u industrijskim postrojenjima za sušenje, gdje se smještaju između vakuumskih komora i glavne pumpe.

**Adsorpcijska pumpa.** Rad se takve pumpe temelji na adsorpciji plina ili pare na poroznoj čvrstoj tvari (adsorbensu). To je najčešće aktivni ugljen ili koji od zeolita (v. Silicij, TE 12, str. 89). Te se tvari odlikuju velikom aktivnom površinom, oko  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ , na koju se lako adsorbiraju plinovi kad se ona ohladi na temperaturu ukapljenog dušika.

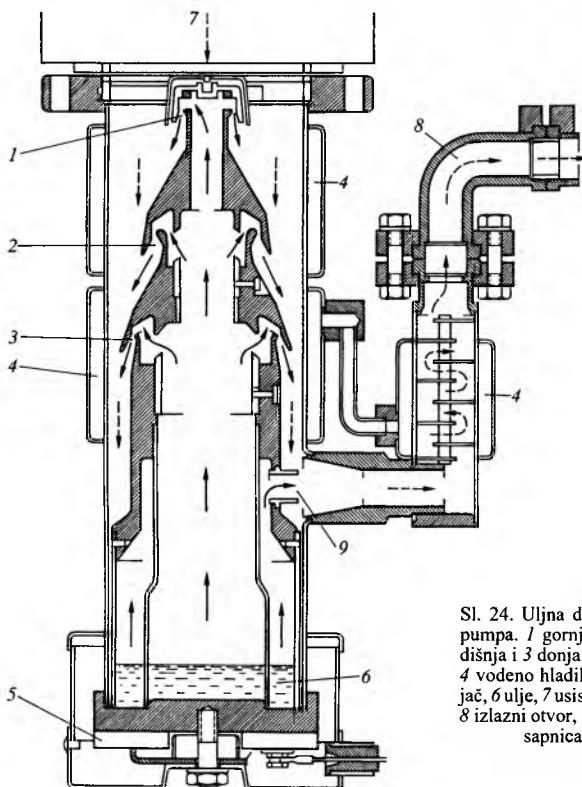
Adsorpcijska pumpa često ima i grijač za regeneraciju kojim se, nakon završena rada, adsorbens zagrijava do  $200^\circ\text{C}$  (zeolit i do  $400^\circ\text{C}$ ) kako bi se uklonili adsorbirani plinovi. Regeneracija se pospješuje istodobnim isisavanjem kojom drugom predvakuumskom pumpom.

Adsorpcijskoj pumpi nije prijeko potreban predvakuum i može početi isisavanje od atmosferskog tlaka. Međutim, tada ona može postići vakuum od samo nekoliko desetina milibara, jer se aktivna površina brzo zasiti plinovima. Zato se često kombinira nekoliko adsorpcijskih pumpa. Kad prva pumpa dosegne svoj konačni vakuum, uključuje se druga itd. Tako se može postići vakuum i do  $10^{-5} \text{ mbar}$ .

Adsorpcijskim se pumpama najslabije uklanjuju plemeniti plinovi, a najbolje vodena para. Osim za uklanjanje vodene pare, adsorpcijske pumpe mogu poslužiti i kao pretpumpe za visokovakuumske i ultravisokovakuumske pumpe.

### Pumpe za visoki vakuum

**Difuzijska pumpa.** Današnje su difuzijske pumpe uljne, a razvile su se od živinih, prvih takve vrste. U pumpi se nalazi posebno ulje niskog tlaka para na sobnoj temperaturi. Ulje se zagrijava do vrelišta, a nastale uljne pare struje velikom brzinom kroz sapnice u prostor koji se hlađi vodom, tu se kondenziraju i vraćaju na dno pumpe. Molekule iz zraka ili plina iz vakuumskih komora difundiraju prema tom mlazu, sudaraju se s uljnim parama, preuzimaju njihov impuls i odlaze prema izlaznom otvoru pumpe (sl. 24). Za taj proces treba strujanje biti molekulno, tj. srednji slobodni put čestica mora biti jednak unutrašnjem promjeru pumpe ili veći od njega. Stoga je za rad difuzijske pumpe potreban predvakuum.



Sl. 24. Uljna difuzijska pumpa. 1 gornja, 2 srednja i 3 donja sapnica, 4 vodenome hladilo, 5 grijač, 6 ulje, 7 usisni otvor, 8 izlazni otvor, 9 bočna sapnica

Brzina isisavanja difuzijske pumpe ovisi o tlaku plina koji se isisava. Od tlaka  $10^{-2} \text{ mbar}$  do kojih  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ mbar}$ , već prema vrsti pumpe, brzina isisavanja raste, zatim ima stalnu vrijednost sve do tlaka od  $10^{-7} \text{ mbar}$ , a potom se opet smanjuje jer je srednji slobodni put velik pa je malena vjerojatnost sudara čestica s molekulama uljnih para. Pri tlakovima višim od  $10^{-2} \text{ mbar}$  brzina se isisavanja naglo smanjuje zbog povratne difuzije čestica prema vakuumskoj komori.

Danas su u upotrebi uglavnom pumpe s više stupnjeva isisavanja, jer se tako smanjuje povratna difuzija čestica plina koji se isisava. Pritom je brzina isisavanja nekog stupnja za red veličine veća od brzine sljedećeg stupnja.

Konačni vakuum difuzijskih pumpa ovisi o svojstvima ulja i o djelotvornosti hladne stupice koja se nalazi između vakuumskih komora i pumpe. Svrlja je stupice da kondenzira uljne pare koje bi povratnom difuzijom mogle dospijeti u vakuumsku komoru. Ako se stupica hlađi ukapljenim dušikom, moguć je konačni vakuum od  $5 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$ . Brzina isisavanja uljnih difuzijskih pumpa iznosi  $40 \dots 50000 \text{ L/s}$ .

Iz povijesnih razloga treba spomenuti i živine pumpe kao prve difuzijske pumpe (1915). U početku su bile od stakla, s brzinom isisavanja od nekoliko litara u sekundi, a poslije od metalâ koji sa životom ne stvaraju amalgame, npr. od nehrđajućeg čelika. Takve su pumpe bile veće od staklenih i postizale su brzinu isisavanja do  $10000 \text{ L/s}$ , a stvarale su konačni vakuum  $\sim 10^{-4} \text{ mbar}$ . Obvezna je bila uporaba hladnih stupica između živine pumpe i vakuumskih komora. Zbog nedostataka žive kao sredstva (razmjerno visok tlak para od  $10^{-3} \text{ mbar}$  na sobnoj temperaturi) živine difuzijske pumpe danas su zamijenjene uljinama.

**Ionska pumpa.** Te su se pumpe pojavile na tržištu poslije 1950., a rade na principu ionizacije atoma i molekula u komori, koji se zatim kao pozitivni ioni pomoću električnog polja uklanjaju iz vakuumskih komora i pumpe. Ionizacija se ostvaruje sudsrima s elektronima koji se emitiraju iz užarene katode i ubrzavaju do anode. U nastavku putanje elektroni nailaze na drugu katodu koja ih vraća natrag, pa tako osciliraju između dviju katoda, čime se ionizacija poboljšava. Da bi ionizacija bila djelotvornija, ionizacijska se komora nalazi u magnetnom polju kojemu su silnice paralelne s njezinom osi. Nastali pozitivni ioni ubrzavaju se na katodi i izlaze iz pumpe.

Brzine isisavanja mogu biti od desetak do nekoliko tisuća litara u sekundi. Optimalni vakuum pri kojem te pumpe postižu najveću brzinu isisavanja ovisi o konstrukciji pumpe, a iznosi  $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ mbar}$ . Glavna im je prednost što za vrijeme rada ne trebaju mehaničke pretpumpe, ali se mogu uključiti tek kad je vakuum bolji od  $10^{-5} \text{ mbar}$ .

### Pumpe za ultravisoki vakuum

**Sublimacijska pumpa.** Ta se vrsta pumpe naziva i geterskom pumpom, a u vakuumsku je tehniku komercijalno uvedena nakon 1960. pod nazivom titanska sublimacijska pumpa. *Geter* je naziv za tvar koja kemijskom reakcijom veže komponente plina i uklanja ih tako što se nastali spoj taloži na stijenkama pumpe. Najpoznatija je takva tvar titan, a slična svojstva imaju barij i cirkonij. U titanskoj se sublimacijskoj pumpi na temperaturi  $\sim 1500^\circ\text{C}$  isparuje titan, a njegove pare zatim vežu oksidacijom kisik u oksid  $\text{TiO}_2$ , nitriranjem dušik u nitrid  $\text{TiN}$  itd. Najslabije vežu vodik stvaranjem hidrida  $\text{TiH}_2$ , koji je vrlo nestabilan na temperaturi višoj od  $20^\circ\text{C}$ , pa stjenke titanske pumpe valja hladiti.

Vrijeme rada takve pumpe ovisi o količini titana, a pumpa se uključuje tek pri tlaku nižem od  $10^{-6} \text{ mbar}$ . Brzina isisavanja sublimacijske pumpe stalna je na tlakovima  $10^{-6} \dots 10^{-9} \text{ mbar}$  i iznosi, već prema konstrukciji,  $5000 \dots 10000 \text{ L/s}$ . Za svaki je plin brzina isisavanja različita, što je jedan od nedostataka tih pumpi.

**Ionsko-sorpcijska pumpa.** U toj se pumpi čestice plina ioniziraju i tada ubrzavaju do energije od nekoliko stotina elektronvolta, a zatim se ugrađuju u stjenke pumpe. Vijek je takve pumpe razmjerno kratak i završava kad se brzina ugradivanja čestica izjednači s brzinom njihove desorpkcije sa stjenke. Zato se takve pumpe uključuju tek pri tlaku nižem od  $10^{-6} \text{ mbar}$  i upotrebljavaju se za isisavanje prostora malog obujma. Maksimalne su brzine isisavanja nekoliko litara u sekundi, a konačni je vakuum do  $10^{-12} \text{ mbar}$ .

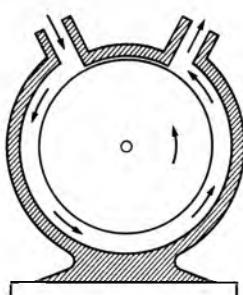
**Ionsko-sublimacijska pumpa.** To je kombinacija ionske i sublimacijske pumpe. Čestice se plina ioniziraju, a titan koji se isparuje u pumpi naparuje se zatim na njezinim stijenkama i pri tom veže prisutne ione. Time se uklanja nedostatak sublimacijske pumpe: nejednolika brzina isisavanja različitih plinova. Međutim, dio čestica koji se nije ionizirao veže se kao u sublimacijskoj pumpi. Kao materijal na stijenkama upotrebljava se u prvom redu titan, pa cirkonij i volfram.

Upotreboom dodatnog magnetskog polja znatno se povećava broj ioniziranih čestica i brzina isisavanja, koja može iznositi i do nekoliko tisuća litara u sekundi. Konačni je vakuum vrlo visok,  $\sim 10^{-11}$  mbar.

**Kriogena pumpa.** Princip je djelovanja kriogene pumpe jednostavan i temelji se na kondenzaciji plinova na niskim temperaturama. Već ulijevanjem ukapljenog dušika u stupicu između difuzijske pumpe i komore iz koje se isisava uočava se znatan pad tlaka. Uzrok je tome kondenzacija i smrzavanje vodene pare iz vakuumskog komora te kondenzacija uljnih para. Najjednostavnija je *Meissnerova stupica*, spiralna bakrena cijev kojom cirkulira ukapljeni dušik na temperaturi od 77,4 K. Budući da je njezina hladna površina razmjerno velika ( $\sim 1\text{m}^2$ ), ona vrlo brzo i djelotvorno kondenzira vodenu paru i uljne pare.

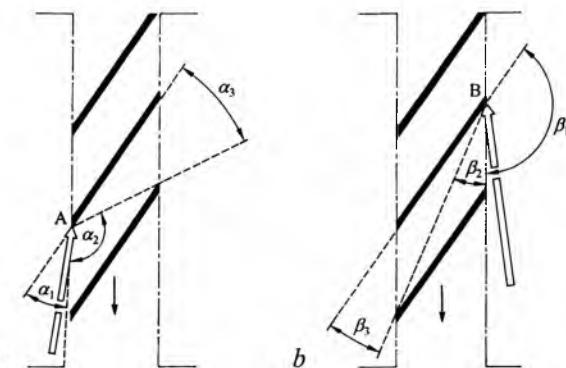
Pumpa u kojoj se kondenzira većina atmosferskih plinova obično ima dva stupnja. Prvi je stupanj stupica s ukapljenim duškom, a u drugom se stupnju hlađi strujanjem rashladnog sredstva temperature 20 K u zatvorenom krugu koji je u vezi s rashladnim strojem (v. *Rashladna tehnika*, TE 11, str. 430). Na toj se temperaturi kondenziraju svi plinovi iz atmosfere, osim helija i vodika. U kondenzatoru je najčešće aktivni ugljen koji plinove veže kriosorpcijom. Pumpa se uključuje tek pri vakuumu boljem od  $10^{-3}$  mbar. Isisavanje može trajati vrlo dugo, i više dana, a brzina isisavanja može biti i nekoliko tisuća litara u sekundi. Konačni je vakuum takvih pumpa bolji od  $10^{-10}$  mbar. Učinak je još bolji prilikom hlađenja ukapljenim helijem na temperaturi od 4,2 K. Na toj temperaturi ostaje nekondenziran samo helij.

**Molekulna pumpa.** Rad se molekulne pumpe temelji na prijenosu mehaničkog gibanja na čestice plina i usmjerivanju toga gibanja prema izlaznom otvoru pumpe. Između statora i rotora na jednom je dijelu vrlo malen razmak (0,01 mm) koji pruža velik otpor prolasku plina (sl. 25). Tako se ne mogu isisati samo one molekule kojima je brzina veća od obodne brzine rotora. Taj je princip isisavanja poznat od 1913., kad ga je objavio W. Gaede.



Sl. 25. Jednostavna molekulna pumpa

Molekulno je isisavanje poboljšano 1957. konstrukcijom rotora u obliku turbine (v. *Pumpe*, TE 11, str. 311). Rotor takve *turbomolekulne pumpe* vrlo se brzo okreće ( $12\ 000 \cdots 60\ 000 \text{ min}^{-1}$ ) i sudara se s molekulama plina koje se nađu u njegovoj blizini. Djelovanje turbine kao pumpe temelji se na nejednakoj vjerojatnosti da molekule s jedne i s druge strane turbineskog rotora prijeđu na suprotnu stranu. Uzrok je tome različit kut pod kojim se molekule sudaraju s lopaticama i od njih reflektiraju. Kako je brzina lopatica mnogo veća od brzine molekula, skoro sve molekule koje s lijeve (vakuumske) strane dođu do lopatice sudarit će se s njom u blizini točke A (sl. 26 a). Ako se pretpostavi difuzna refleksija, molekule koje se reflektiraju pod kutom  $\alpha_1$  vratiti će se natrag na lijevu stranu, one pod kutom  $\alpha_2$  reflektirat će se na obje strane, a one pod kutom  $\alpha_3$  prijeći će na desnu stranu rotora. Slično vrijedi i za molekule s desne (vanjske, nevakuumske) strane (sl. 26 b), samo što je njihov kut prijelaza mnogo manji  $\beta_3 < \alpha_3$  a povratni kut mnogo veći  $\beta_1 > \alpha_1$ , pa je zbog toga manja vjerojatnost prijelaza na suprotnu stranu. Turbina sadrži više redova lopatica, a svaki red predstavlja jedan stupanj isisavanja.

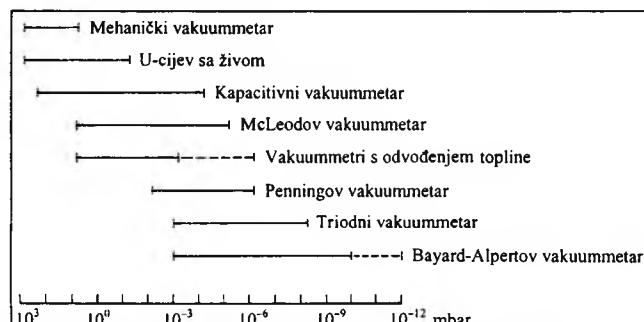


Sl. 26. Princip rada turbomolekulne pumpe. a kutovi refleksije na vakuumskoj strani i b na vanjskoj strani

Za rad turbomolekulne pumpe potreban je predvakuum od  $10^{-2}$  mbar, jer je u slabijem vakuumu otpor plinskih čestica prevelik. Brzina isisavanja stalna je pri tlaku manjem od  $10^{-3}$  mbar. Ona je veća za čestice veće mase, jer je njihova brzina manja, pa ih je takvim isisavanjem lakše ukloniti. Prosječne su brzine isisavanja komercijalnih pumpa  $30 \cdots 5\ 500 \text{ L/s}$ , a konačni je vakuum u području  $\sim 10^{-11}$  mbar. Za trajan rad u novije se vrijeme primjenjuju magnetski lebdeći ležaji. Ranije je opasnost za turbomolekulne pumpe bila mogućnost naglog porasta tlaka u komori, no danas je to otklonjeno uređajem za kočenje rotora.

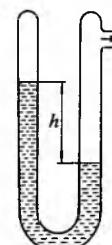
### MJERENJE VAKUUMA

Sniženi se tlak mjeri apsolutnim i relativnim metodama. Apsolutnim se metodama tlak mjeri izravno, što se može primijeniti samo za niski vakuum. Relativnim se metodama tlak određuje nakon mjerena ostalih veličina, pa se tako određuje visoki vakuum. Na slici 27 prikazano je vakuumsko područje primjene pojedinih vakuummetara.



Sl. 27. Vakuumsko područje primjene vakuummetra

**U-cijev sa živom.** Najjednostavniji je vakuummetar U-cijev sa živom. Cijev je s jedne strane zatvorena, a druga se strana priključuje na vakuumsku komoru (sl. 28), pa razlika živinih razina ( $h$ ) u cijevi daje izravno vrijednost tlaka u milimetrima živina stupca. Tlok je u zatvorenom dijelu cijevi jednak tlaku živinih para na šobnoj temperaturi, a budući da se ne mjeri fini vakuum, taj se tlak može zanemariti. Točnost je očitavanja tim jednostavnijim uređajima  $\sim 1\text{mm}$  živina stupca, no ona se povećava do  $0,1\text{mm}$  ako je U-cijev nagnuta.



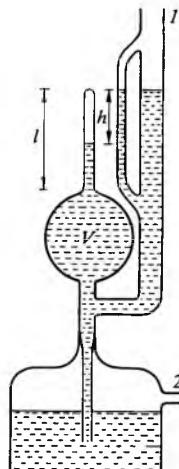
Sl. 28. U-cijev sa živom za mjerjenje grubog vakuuma

Radi postizanja još veće točnosti, a posebno za mjerjenje nižih tlakova, može se zatvoreni dio cijevi otvoriti i priključiti na refe-

rentni vakuum. Ako se uz to živina razina određuje plovkom sa zrcalom, može se mjeriti s točnošću do tisućinke milimetra.

U-cijevi mogu umjesto žive sadržavati ulje. Budući da ono ima mnogo niži tlak para i manju gustoću, moguće je mjeriti tlak do  $10^{-4}$  mbar.

**McLeodov vakuummetar.** H. McLeod je još 1874. opisao i načinio uređaj koji je i danas najbolji apsolutni vakuummetar, a koji može služiti i za umjeravanje (baždarenje) drugih vakuummetara. To je živin kompresijski vakuummetar, sav od stakla (sl. 29).



Sl. 29. McLeodov vakuummetar. 1 prema vakuumskoj komori, 2 priključak na nadtlak za podizanje živine razine

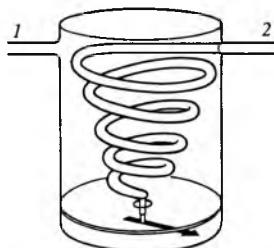
Na početku rada vakuummetar se priključuje na vakuumsku komoru u kojoj se mjeri tlak, a živa se nalazi na dnu, u spremniku uređaja u kojem posvuda vlada tlak jednak onome u vakuumskoj komori. Zatim se nadtlakom razina žive podigne tako da se od vakuumske komore odijeli posuda obujma  $V$  i kapilara iznad nje kojoj je duljina  $l$  i presjek ploštine  $s$ . Daljim podizanjem žive do razine koja odgovara vrhu kapilare tlači se plin zatvoren u kapilari, pa je njegov novi obujam  $h \cdot s$ . Primjenom Boyle-Mariotteova zakona, uz pretpostavku da se zrak ponaša kao idealan plin, dobiva se vrijednost tlaka (u mm Hg):

$$p = \frac{h^2}{\left(\frac{V}{s}\right) + (l - h)}. \quad (3)$$

Obično je  $l = 100$  mm, a  $V/s$  približno  $10^4 \dots 10^6$  mm, što odgovara opsegu tlakova  $10^{-4} \dots 1$  mbar za prvu i  $10^{-6} \dots 10^{-2}$  mbar za drugu vrijednost.

**Mehanički vakuummetar.** Najjednostavniji i najgrublji mehanički vakuummetar sadrži membranu koja je sustavom preciznih zupčanika povezana s kazaljkom. Deformacija membrane zbog razlike tlakova prenosi se na skalu, pa se nakon umjeravanja tlak izravno odčitava.

Od mehaničkih vakuummetara najpoznatiji je Bourdonov. Sastoji se od spiralne kremene ili metalne cijevi koja je mehanički spojena s kazaljkom (sl. 30). Zbog razlike tlakova u posudi i u cijevi takva se cijev deformira, što se očituje pomakom kazaljke.



Sl. 30. Bourdonov vakuummetar. 1 prema referentnom vakuumu, 2 prema vakuumskoj komori

**Kapacitivni vakuummetar.** Pomak membrane u vakuummetru zbog tlačne razlike moguće je registrirati mjeranjem promjene kapaciteta između membrane i čvrste elektrode. Kako su ta mjeranja vrlo točna, kapacitivnim se vakuummetrom mjeri tlak sve do  $10^{-4}$  mbar.

**Vakuummetri s odvođenjem topline.** Najjednostavniji i najpoznatiji uređaj te vrste jest Piranijev vakuummetar (prema M. Piraniju), konstruiran 1906. godine. Sastoji se od tankе platinske, volframne ili niklene žice razapete unutar staklene ili metalne cijevi. Dovođenjem topline žica se zagrijava, ali se toplina istodobno odvodi sudarima s česticama plina. Kada snižavanjem tlaka srednji slobodni put čestica postane jednak promjeru cijevi ili veći od njega, odvođenje topline sa žice postaje razmjerne toplinskog provodnosti plina, a ona je razmerna tlaku plina u cijevi. Žica se hlađi i zračenjem te vođenjem topline na njezinim krajevima. Tanka žica, kojoj se električni otpor mijenja razmerno s promjenom temperature, spojena je u jednoj grani Wheatstoneova mosta, kojim se mijere male promjene otpora. Piranijevim se vakuummetrom mjeri tlak do  $10^{-3}$  mbar.

Sličan je i vakuummetar s termičkim priključkom kojim se mijeri promjena elektromotorne sile, koja je obrnuta razmerna tlaku. Taj vakuummetar mjeri tlak do  $10^{-3}$  mbar.

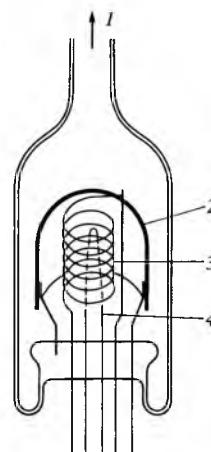
Na istom principu radi i termistorski vakuummetar. Termistori, poluvodiči kojima se otpor mijenja s temperaturom, odlikuju se time što im je toplinski koeficijent promjene otpora po apsolutnoj vrijednosti desetak puta veći od odgovarajućeg koeficijenta platine ili volframa, što omogućuje mjerjenje tlaka i do  $10^{-6}$  mbar.

Svi se spomenuti vakuummetri te skupine moraju umjeriti nekim apsolutnim vakuummetrom.

**Ionizacijski vakuummetri.** Razlikuju se ionizacijski vakuummetri s hladnom i vrućom katodom, a kao indikator vakuuma služi im struja u tinjavu izboju.

**Penningov vakuummetar.** Ideju da struja tinjavog izboja može biti mjerila tlaka prvi je primijenio F. M. Penning 1937. godine. Penningov je vakuummetar uređaj s hladnom katodom, a sastoji se od središnjeg prstena (anode) i dviju simetričnih ploča (katodâ) s obje strane prstena. Anoda i katode nalaze se u jakom magnetnom polju. U međukatodnom prostoru, u simetričnom električnom polju, elektroni osciliraju sve dok ih ne zahvati anoda. Zbog magnetnog polja elektroni se gibaju po dugim spiralnim putanjama, a uloga je magnetnog polja da te putanje učini što duljim kako bi se povećala vjerojatnost ionizacije sudarima elektrona s molekulama u mernoj cijevi. Nastali ioni na svom putu prema katodama proizvode sekundarne elektrone i tako nastaje samodrživ tinjavi izboj. Već prema jakosti magnetnog polja, tim se vakuummetrom mogu mjeriti tlakovi do  $10^{-6}$  mbar.

**Triodni vakuummetar s vrućom katodom.** Elektrone emitirane iz žarne niti privlači rešetka koja je na višem potencijalu. Elektroni prolaze kroz rešetku, ulaze u električno polje obrnutog smjera, mijenjaju smjer gibanja i tako osciliraju sve dok ih rešetka ne uhvati (sl. 31). Pritom se sudaraju s molekulama plina i ioniziraju ih. Stvoreni pozitivni ioni, uhvaćeni na kolektor, čine malu struju (pri tlaku  $10^{-6}$  mbar ta je struja  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  A), a ona je mjerila količine čestica, odnosno postignutog vakuuma. Mjerno je područje tog vakuummetra  $10^{-3} \dots 10^{-8}$  mbar.



Sl. 31. Triodni vakuummetar s vrućom katodom. 1 prema vakuumskoj komori, 2 kolektor iona, 3 rešetka, 4 žarna nit

**Bayard-Alpertov ionizacijski vakuummetar.** Za razliku od triodnog vakuummetra, u ovom je tipu kolektor iona samo tanka žica koja se nalazi unutar spiralne rešetke. Zbog bitno manje površine kolektora manje je nepoželjno stvaranje rentgenskog

zračenja male energije koje bi uzrokovalo emisiju fotoelektrona i tako neutraliziralo ionsku struju. Zbog toga se mogu mjeriti tlakovi do  $10^{-10}$  mbar, a posebnim konstrukcijama i do  $10^{-12}$  mbar.

## PRIMJENA VAKUUMA

**Primjena vakuuma u metalurgiji.** Nepoželjne primjese u čeliku (nečistoće) uzrokuju promjene njegovih mehaničkih svojstava zbog utjecaja na strukturu. Najčešće su primjese kisik, fosfor i njihovi spojevi, te ugljikovi spojevi. Oni se mogu ukloniti isparivanjem s rastaljene površine čelika pri sniženom tlaku. Kroz talinu čelika propuhuje se inertni plin, najčešće argon, koji istjeruje mlaz rastaljenog čelika u evakuirani prostor. S mnoštva sitnih čeličnih kapljica velike ukupne površine plinovi se isparuju i odvode, najčešće uljnim ejektorskim pumpama koje imaju veliku brzinu isisavanja pri tlaku  $\sim 1$  mbar.

Varijanta je tog postupka lijevanje rastaljenog metala u kalupe u evakuiranom prostoru. Tako se uklanja otopljeni kisik iz bakra koji se upotrebljava za rentgenske cijevi i u vakuumskoj tehnici.

Vakuum se u metalurgiji primjenjuje i prilikom spajanja metalnih dijelova. On je pokatkad potreban pri tvrdom lemljenju metala jer se tako sprečava otapanje plinova iz atmosfere u rastaljenom materijalu lema. Budući da su i površine materijala čistije, dobivaju se kompaktni spojevi koji su mehanički stabilni i otporni na lom. Spajanje metala u vakuumu primjenjuje se kad je potrebna velika mehanička čvrstoća spoja, kao npr. u zrakoplovnoj industriji.

**Primjena vakuuma u kemijskoj, farmaceutskoj i prehrabenoj industriji.** Vakuum se često primjenjuje prilikom priprave nestabilnih kemijskih spojeva. To su obično tvari bioškog podrijetla koje su sklone raspadu na višim temperaturama ili one koje lako ulaze u kemijske reakcije sa sastojcima zraka na povišenom tlaku i temperaturi. Tipičan je takav primjer vakuumska destilacija, jer se vrelište tvari koja je nestabilna na povišenoj temperaturi može pri manjim tlakovima sniziti do sobne, pa i još niže temperature. Osim toga, prednost je vakuumske destilacije u tim uvjetima i to što se smanjuje broj sudara molekula u plinovitoj fazi pa i vjerojatnost kemijskih reakcija i time stvaranje nečistoća tijekom destilacije.

Vakuum se primjenjuje i u frakcijskoj destilaciji, jer se time sprečava raspad osjetljivih tvari ili nepoželjne kemijske reakcije. Tako se dobivaju neki čisti vitamini, enzimi, sintetizirani i prirodni spojevi složena sastava, različiti farmaceutski proizvodi itd.

U svakodnevnom je životu dobro poznata primjena vakuuma u prehrabenoj industriji za pakiranje hrane, koja u tom stanju mnogo dulje zadržava kvalitetu i nije izvrgnuta kvarenju. Prilikom liofilizacije radi se o isušivanju preparata u smrznutom stanju sublimacijom, s namjerom da se on konzervira a da se ne oštete njegova osnova struktura i svojstva (v. *Konzerviranje hrane*, TE 7. str. 278). Materijal se zamrzava na što nižoj temperaturi u što kraćem vremenu i pri niskom tlaku, a voda se iz preparata sublimira i uklanja odsisavanjem. Tim se postupkom udio vlage smanjuje na  $\sim 1\%$ . Tako se konzerviraju mnogi antibiotici i krvna plazma, kojima je prije upotrebe dovoljno samo ponovno dodati potrebnu količinu vode.

**Primjena vakuuma u elektrotehnici i elektronskoj industriji.** Vrlo je česta i općepoznata primjena vakuuma u izradbi svjetlosnih izvora kao što su vakuumirane žarulje ili žarulje punjene plinovima pod niskim tlakom. Žaruljni se baloni višestruko isisavaju i propuhuju inertnim plinovima da bi se uklonio kisik i sprječila oksidacija volframne niti u žarulji. Neki se svjetlosni izvori prvo isisavaju, a zatim se, radi veće trajnosti, pune smjesom inertnih plinova. Za evakuaciju žaruljnih balona najčešće se primjenjuju kombinacije rotacijskih pumpa i pumpa Roots.

Česta je primjena vakuuma za sušenje transformatorskih ulja, za koja je važno da udio vlage bude što manji da bi se sačuvala njihova izolacijska svojstva. Isušuje se pri temperaturi 27 do 127 °C i pri smanjenom tlaku od  $\sim 10^{-2}$  mbar. Pritom se upotrebljavaju pumpe većih brzina isisavanja (rotacijske i pumpe Roots), pri čemu se pred ulaz u pumpu postavlja kondenzacijska stupica za uklanjanje vodene pare.

Poznata je primjena vakuuma u elektroničkoj industriji za izradbu elektronskih cijevi. U različitim katodnim cijevima,

među njima i cijevima za televizijske prijamnike i monitore na računalima, vakuum treba omogućiti nesmetan dolazak elektrona do ekrana. Pritom se mora postići vrlo visok vakuum, za što je potreban složen proces evakuacije i isplinjavanja dijelova koji se ugrađuju u elektronske cijevi.

Vakuum se u elektroničkoj industriji mnogo primjenjuje prilikom različitih procesa kojima se fizikalnim putem na podlogu naparuju i talože tanki slojevi određenih materijala. Pritom je važno da srednji slobodni put molekula u vakuumskoj komori bude veći od dimenzija komore, da ne bi materijal koji se naparuje reagirao s molekulama zaostalim u komori.

**Primjena vakuuma u ostalim područjima.** Česta je primjena vakuuma u transportu materijala. Obično se upotrebljavaju posebne hvataljke iz kojih se može isisati zrak i smanjiti tlak na  $1 \dots 100$  mbar, tako da one čvrsto prianjuju uz glatku plohu zbog razlike između unutrašnjeg i vanjskog, atmosferskog tlaka. Takve hvataljke služe za prijenos većih limenih i staklenih ploča. Tako hvataljka površine  $1\text{dm}^2$  s unutrašnjim tlakom od 1 mbar može podići željeznu ploču debljine 10 mm i površine  $1\text{m}^2$ .

Veliki uređaji za kemijsku analizu (spektometar masa, spektometri emitiranih, odbijenih ili prolaznih elektrona, spektometri raspršenih iona i ostali, v. *Spektometrija*, TE 12, str. 150) i drugi složeni instrumenti (npr. elektronski mikroskop) nužno rade pod vakuumom, bilo zato da se izbjegne istodobno mjerjenje komponenata zraka ili da se uklanjanjem zraka, tj. višestrukim povećanjem srednjeg slobodnog puta, sprječe sudari čestica (elektrona, iona).

U nuklearnoj je tehnici visoki ili ultravisoki vakuum potreban u akceleratorima, jer putanje čestica koje se ubrzavaju mogu biti duge i nekoliko kilometara, a pritom se čestice ne smiju sudarati s česticama zraka zaostalog u tome prostoru. To je posebno važno za akceleratorske uređaje gdje se ubrzane čestice održavaju u putanjama dulje vrijeme.

Grubi se vakuum primjenjuje u bolnicama za usisavanje pršine u operacijskim dvoranama, za odvođenje i prijenos tekućina, u porodiljstvu i sl.

LIT.: Glossary of Terms Used in Vacuum Technology. Pergamon Press, New York 1958. – A. E. Barrington, High Vacuum Engineering. John Wiley, New York 1963. – G. Lewis, Fundamentals of Vacuum Science and Technology, McGraw-Hill, New York 1965. – A. Roth, Vacuum Sealing Techniques. Pergamon Press, New York 1966. – G. L. Wessler, R. W. Carlson, Vacuum Physics and Technology, u zborniku: Methods of Experimental Physics. Academic Press, New York 1979. – J. Gasperić (urednik), Osnovne vakuumske tehnike, Zbornik predavanja. Društvo za vakuumsko tehniku Slovenije, Ljubljana 1984.

H. Zorc

**VANADIJ** (Vanadium, V), kemijski element s atomnim brojem 23 i relativnom atomnom masom 50,9414. Nalazi se u četvrtoj periodi i V.A podskupini periodnog sustava elemenata, pripada skupini prijelaznih elemenata i ubraja se među teške metale. Prirodna izotopna smjesa vanadija sadrži dva stabilna izotopa:  $^{50}\text{V}$  (0,24%) i  $^{51}\text{V}$  (99,76%). Od radioaktivnih izotopa najdulje vrijeme poluraspada, 330 dana, ima izotop  $^{49}\text{V}$ . Elektronska je konfiguracija vanadijeva atoma  $[\text{Ar}]3d^34s^2$ .

U industrijskoj se praksi vanadij najviše upotrebljava kao sačtojak slitina. Najvažnija je njegova slitina sa željezom (ferovalnadij) koja služi za dobivanje specijalnog vanadijskog čelika.

Još 1801. godine otkrio je A. M. del Rio u meksičkoj olovnoj rudni novi element, koji daje obojene soli s kiselinama, ali se u njega posumnjalo pošto je H. V. Collett-Descombes 1804. izvjestio da je ta ruda olovni kromat. N. G. Sefström otkriva 1830. u švedskom željezu i troski element koji naziva vanadijum (prema nordijskoj boginji Vanadis), a iste godine F. Wöhler utvrđuje da meksička ruda sadrži olovni vanadat. J. J. Berzelius je od Sefströmovega materijala pripravio više vanadijevih spojeva, ali je metalni vanadij prvi pripravio H. E. Roscoe tek 1867. zagrijavanjem vanadijeva diklorida u strui vodika.

Prosječni je maseni udio vanadija u litosferi  $\sim 1,35 \cdot 10^{-20}\%$ , što je razmjerno mnogo, više od poznatijih metala kao što su bakar i cink. Široko je rasprostranjen, pa je poznato više od 60 minerala koji sadrže vanadij. Najvažniji su minerali složeni vanadijev sulfid *patronit* (koloidna smjesa  $\text{V}_2\text{S}_5$  i sumpora,  $\sim 17\%$  V), koji