

Visokovakuumski postopki za nanos uporovnih plasti

S. Stanković, M. Hudomalj, *Tovarna uporov in opreme, 68310 Šentjernej*

UVOD

Ker ogljiko-plastni upori niso mogli izpolnjevati vseh zahtev trga, smo v tovarni uporov uvedli proizvodnjo kovinoplastnih uporov, ki jih pripravimo z nanosom v visokem vakuumu. Uporabljamo naslednje metode nanašanja: metoda s preskakujočim elektronskim snopom (elektronski top), bliskovno napajanje in magnetronsko enosmerno (DC) napršenje. Tem novim tehnologijam nanašanja uporovnih plasti je bilo potrebno prilagoditi tehnologijo priprave podlag in dodelave uporov ter vpeljati merilne in testne metode.

Opisani so principi delovanja vakuumskih naprav za nanos tankih plasti. Posebej je predstavljena oprema vgrajena v razvojni napravi BA 510.

NANOS UPOROVNIH PLASTI

Visokovakuumska naprava proizvajalca Leybold-Heraeus za napajanje uporovnih plasti s preskakujočim elektronskim snopom je sestavljena iz črpalnega sistema z rotacijsko predčrpalko in difuzijsko črpalko ter iz vodoravno ležečega recipienta, v katerem so nameščeni elektronski top (10 kW), bakren lonček za dva različna napaževalna materiala in boben iz nerjavne jeklene mreže, postavljen nad izviro. Napajanje plasti NiCr poteka z istočasnim napajanjem dveh kovin iz dveh izvirov s pomočjo nastavljivega preskoka

elektronskega curka (slika 1). Vodno hlajen bakren lonček je oblikovan tako, da v srednji ločeni del vložimo Ni, v zunanji del lončka pa Cr.

Za ponovljiva napajanja osnovnih upornosti med 30 in 300 ohmi moramo zagotoviti:

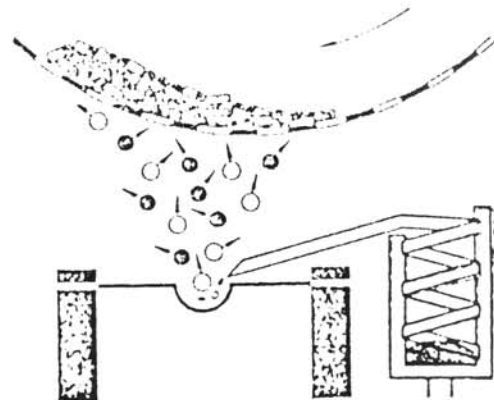
- ponovljivo hrapavost in sestavo podlag
- ponovljive polnitve bobna
- ponovljiv način in hitrost mešanja podlag v bobnu
- ponovljive tlake in sestave residualne atmosfere
- ponovljivo temperaturo podlag
- ponovljivo pripravo izvira napajanja
- konstantno moč elektronskega snopa
- ponovljivo fokusiranje elektronskega snopa
- konstantno temperaturo Ni in Cr

Temperaturni koeficienti upornosti (TKU), ki jih dosežemo v masovni proizvodnji so: $(\pm 25, \pm 50, \pm 100) \cdot 10^{-6}/K$.

Naprava za bliskovno (flash) napajanje uporovnih plasti na cilindrične podlage tip BAK 600, proizvajalca Balzers, vsebuje klasičen črpalni sistem, recipient in krmilno omaro. V recipientu je sistem za uporovno ogrevanje ladic in odgovarjajoč sistem za stresanje materiala za napajanje (slika 2). V bližini bobna s keramičnimi teleščki je nameščen nosilec za kremenov kristal za merjenje debeline plasti. Krmilna enota z mikroprocesorjem preko kremenove mikrotehnice uravnava bistvene parametre nanašanja. Naprava ima še sistem za natančno uvajanje O_2 , ki omogoča reaktivno napajanje.



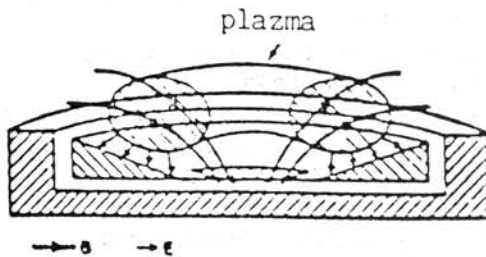
Slika 1 Napajanje s pomočjo preskakujočega elektronskega snopa



Slika 2 Bliskovno napajanje

Zahteve po ponovljivosti so podobne kot pri tehnologiji napajanja z elektronskim topom.

Magnetronsko naprševanje uporovnih plasti s S-puško (S-gun) izvajamo v napravi tipa 3119 R, proizvajalca Varian, ki ima vgrajena dva magnetrona z napajalniki moči 7kW (slika 3). V recipient so nameščeni mikro-tehnica s kremenovim kristalom in grelci za ogrevanje podlag ter planetarni nosilec podlag. Celoten potek delovanja (črpanje, naprševanje) kontroliramo in vodimo z mikroprocesorjem 5-TI. Napršuje se na ravne podlage.



Slika 3 Magnetronsko naprševanje

V izčrpan recipient uvajamo čist argon, ki se med elektrodama ionizira. Ioni argona iz nastale plazme se pospešujejo v močnem elektromagnetnem polju, izbijajo iz katodnega materiala atome, ki se naložijo na podlage. Zaradi velike energije atomov je adhezija uporabne plasti izredno dobra. Pri tej metodi moramo kontrolirati :

- dosežen vakuum pred uvajanjem argona ali reaktivnega plina
- moč na tarčah
- čistost plinov, ki jih uvajamo v recipient

Z opisanimi metodami nanosa NiCr uporovnih plasti izdelujemo kovinoplastne upore na cilindričnih substratih, katerih karakteristike so prikazane v Tabeli 1. Primerjalno so podane še karakteristike ogljenoplastnih uporov.

Tabela 1	KOVINOPLASTNI UPORI	OGLJIKOPLASTNI UPORI
upor.območje (Ω)	5.11 + 1M	1 + 100M, 10 + 1M
toleranca (%)	$\pm 2, \pm 1, \pm 0.5$	$\pm 5, \pm 2$
dimenzije (mm)	2.6 + 8.20	2.2.6 + 8.3.30
nazivne moči pri 70°C (W)	0.33 + 1.5	0.33 + 2
TKU ($\cdot 10^{-6}/K$)	$\pm 25, \pm 50, \pm 100$	$\pm 250, -150 + -600, -200 + -800$
el.obrem.pri 70°C 1000 ur $\Delta R/R(\%)$	< 0.5	< 0.5
temp.obrem. 1000ur na 155°C $\Delta R/R(\%)$	< 0.5	< 0.5

Visokovakuumski sistem BA 510, proizvajalca Balzers uporabljamo za razvojno delo. Sistem omogoča napajanje iz uporovno gretega izvira, bliskovno napajanje, napajanje z elektronskim topom, enosmerno (DC) in radiofrekvenčno (RF) naprševanje.

Aplikacije so naslednje:

- nanos kovinskih, polprevodniških in izolacijskih plasti

za izdelavo uporov, tankoplastnih kondenzatorjev, magnetnih plasti, kontaktnih plasti, mask itd.

- v optiki za zaščitne plasti, anti-refleksne plasti, zrcala, večplastne plasti za interferenčne filtre itd.

V napravo sta vgrajena dva planarna magnetrona, tip B 315, proizvajalca ION TECH. Nameščena sta v oddaljenosti 120÷240 mm od osnovne plošče. Permanentni magneti ustvarjajo močno magnetno polje, kar zagotavlja dobro delovanje magnetronov v področju od $5 \cdot 10^{-4}$ mbar do $6.5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Optimalno pa delujejo v področju od $8 \cdot 10^{-4}$ mbar do $1 \cdot 10^{-3}$ mbar. Z naprševanjem pri tako nizkih tlakih zmanjšamo prisotnost plinov, plasti so kompaktnjše, zelo čiste in imajo dobro adhezijo. Značilno za naprševanje v DC režimu pri nizkih tlakih v manjših sistemih je, da ni potreben katodni temni prostor, ker je ta dimenzijsko večji kot oddaljenost med negativno elektrodo in ozemljeno kovino.

Uporabljamo proste tarče debeline 1.5÷3 mm in premera 38 mm. Za ta premer tarč nam sistem omogoča dokaj enakomeren nanos na podlage. Zamenjava tarč je zelo preprosta, saj jo le dvignemo s centralnega obroča. Tarča prenese (odvisno od materiala) moč 100 do 300 W brez pregrevanja. Magnetroni omogočajo velike hitrosti nanašanja, tako je npr. pri delovni oddaljenosti magnetrona od podlag 50 mm hitrost naprševanja za baker 800 nm/min, za aluminij pa 350 nm/min. Pri maksimalni delovni moči in delovni oddaljenosti 70 mm "pade" na podlage le 8% moči plazme. Magnetroni so vodno hlajeni.

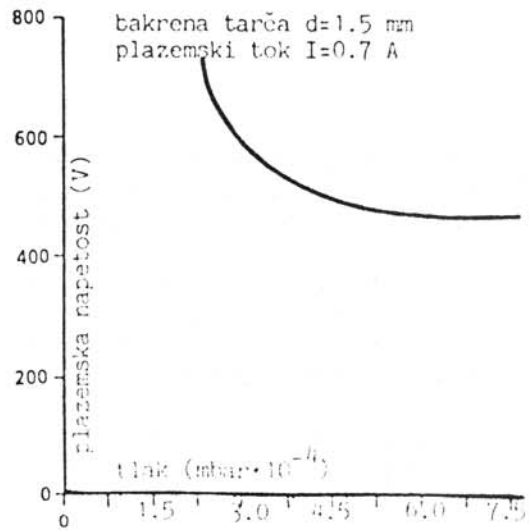
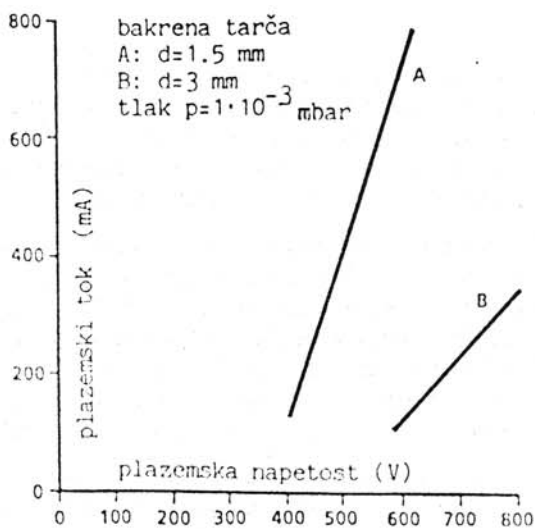
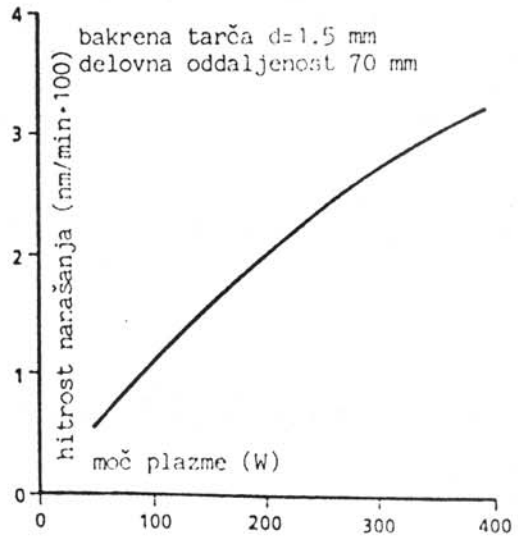
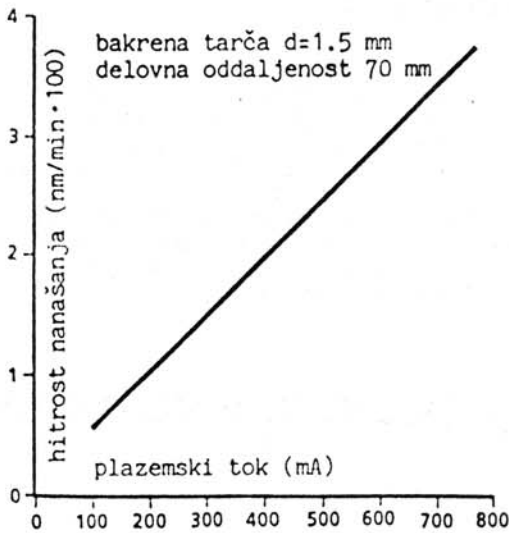
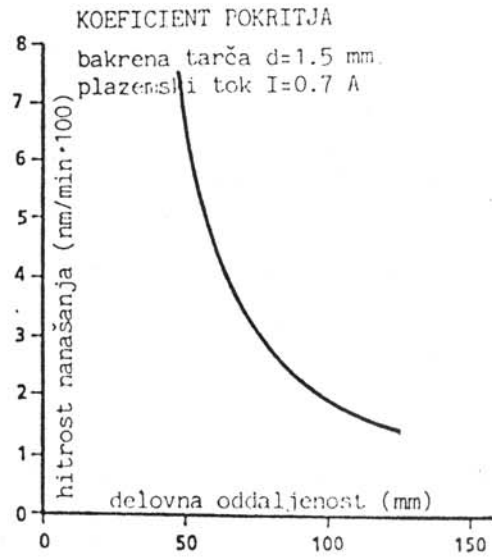
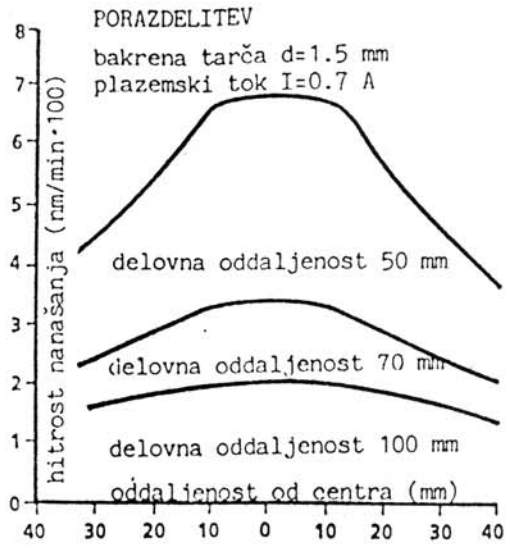
Delovne karakteristike planarnega magnetrona so prikazane na slikah 4A - F.

V sistem je vgrajen izvir hitrih atomov (Saddle Field Source), tip FAB 110, proizvajalca ION TECH, ki zagotavlja kontroliran širok direktni curek le-teh (slika 5). Z njim učinkovito očistimo podlage pred depozicijo, ne da bi povzročili nastanek poškodb ali vnesli nečistoče. Obstreljevanje lahko nadaljujemo tudi med potekom nanašanja. Na ta način izboljšamo adhezijo in optimiramo lastnosti plasti. Maksimalna oddaljenost izvira od podlag je 100 mm.

Izvir hitrih atomov nima termičnih katod in je zato imun na večino reaktivnih plinov. Princip delovanja izvira hitrih atomov je sledeč:

Izvir sestavlja par anod, ki je obdan s katodo. Elektrostatično polje prisili ujete elektrone, da dolgo stabilno oscilirajo, preden dosežejo površino anode. Oscilirajoči elektroni znotraj omejenega polja ionizirajo plin, ki ga uvajamo v izvir. Najpogosteje uporabljamo argon, lahko pa uporabimo tudi kisik, dušik, vodik. Elektrostatično polje zagotovi tudi energijo za pospeševanje ionov proti katodi. Veliko teh ionov trči s katodo in izbije sekundarne elektrone, ki nevtralizirajo ione, ki se gibljejo v nasprotni smeri. Tako ustvarjeni atomi zadržijo svoj izvorni moment in pridejo skozi luknje v katodi kot curek nevtralnih delcev.

Ionizacijsko in pospeševalno polje je eno in isto polje. Za pravilno delovanje ne potrebujemo dodatnih zunanjih elektrostatičnih ali magnetnih polj.



Slike 4 A - F: Delovne karakteristike planarnega magnetrona

Delovanje izvira hitrih atomov je odvisno le od toka plazme in množine plina. Napajanje je enosmerno s tokovno regulacijo. Hlajenje je vodno. Z izviro hitrih atomov je možno obdelovati prevodne, dielektrične in izolacijske površine. Uporablja se za :

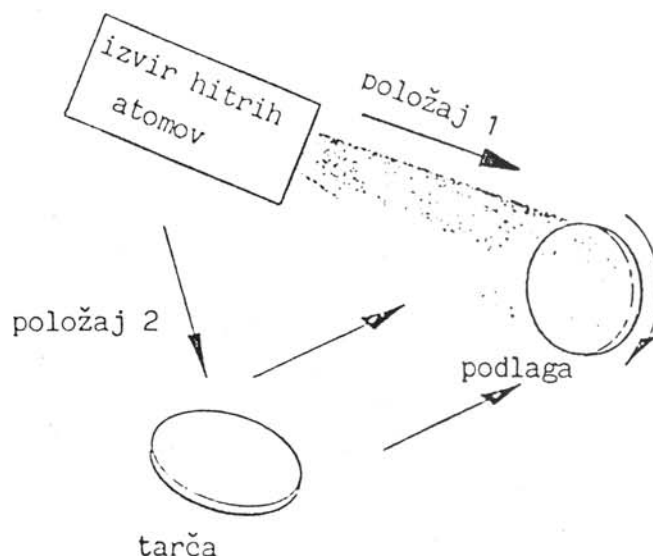
- atomsko jedkanje (tudi reaktivno)
- nanos plasti na podlage
- čiščenje podlag

Izvir hitrih atomov deluje pri istih tlakih kot planarni magnetroni.

ZAKLJUČEK

Vakuumski postopki nanašanja plasti v povezavi s temeljitim čiščenjem podlag (npr. z izviro hitrih atomov) predstavljajo pot k nanosu stabilne tanke plasti. Kvalitetne uporabne plasti nanešene na tehnološko neoporečno izdelane keramične podlage, laserska doravnava upornosti, osnovna zaščita, pritrjevanja kontaktov in končna zaščita nam omogočajo proizvodnjo kakovostnih uporov in drugih tankoplastnih komponent. Pomembni dejavniki za doseganje kakovostne uporabne plasti so čist klimatiziran prostor, visoka stopnja higijene v vakuumskem sistemu in tehnološka disciplina.

Sodobna oprema vgrajena v laboratorijsko napravo BA 510 (RF magnetroni, izvir hitrih atomov) skupaj z drugimi pripomočki omogoča široko razvojno dejavnost in maloserijsko proizvodnjo.



Slika 5 Možnosti uporabe izvira hitrih atomov

LITERATURA

- prospekt Leybold-Heraeus, 16 C 6.100 d
- Balzers Operating Instruction, BB 800 013 BE
- prospekt VAC 2436B (USA) 10/78 sec.14
- Frederic Turner, Varian, Operational Characteristics Of High Rate Sources VR-100
- Balzers, Operating Instructions, BG 800 089 BE
- Ion Tech, B 315 2 Inch Low Pressure Planar Magnetron Source
- Ion Tech, Application Notes : The Saddle Field Source and its Role in Thin Film Processing

Merjenje in kontrola plinskega pretoka v vakuumskih sistemih

A. Žabkar, Institut Jožef Stefan, 61000 Ljubljana, Jamova 39

UVOD

Sodobni tehnološki procesi praviloma zahtevajo zelo natančno določene okoliščine, saj je dobra ponovljivost postopka eden izmed osnovnih pogojev za zanesljivost in ekonomsko uspešnost neke tehnologije. V številnih industrijskih panogah, seveda pa tudi pri raziskavah, se zato vse bolj uveljavljajo postopki, ki so povezani z vakuumom. Le-ta namreč omogoča čistejše okoliščine in bolj natančno določene delovne parametre kot konkurenčni postopki. Ponavadi je seveda vakuum le osnova, tehnološki postopek pa je vezan na enega ali več delovnih plinov, ki jih je treba kontrolirano uvajati v sistem, da vzpostavimo zahtevane okoliščine.

Kontrolirano in natančno uvajanje plinov v vakuumske sisteme je precej težavna naloga in zahteva razmeroma drago opremo. Zlasti korozivni in reaktivni plini, ki jih uporabljamo v številnih procesih, so razlog za težave z

dolgotrajno stabilnostjo, oz. ponovljivostjo v odmerjanju izbranih količin. Sodobni postopki so navadno zasnovani na dinamičnih delovnih režimih. Zato nas ponavadi poleg skupnega in delnih tlakov zanimajo predvsem pretoki posameznih plinskih komponent.

Klasični merilniki pretoka, npr. rotametri imajo številne slabosti. občutljivi so na temperaturne spremembe in spreminjanje tlaka, saj merijo pravzaprav volumski tok. Kombiniramo jih z ročnim nastavljanjem igelnih ventilov. Takšne nastavitve so praviloma stalne in jih ne moremo avtomatizirano spreminjati. Ponovljivost je slaba in ne moremo jih prilagoditi računalniško vodenim procesom.

Termični merilniki masnega pretoka nadomeščajo rotametre zaradi večje natančnosti, hitrejšega odziva, boljše ponovljivosti in možnosti povezave z računalnikom.

TERMIČNO MERJENJE MASNEGA PRETOKA IN KONTROLA

Termični merilniki masnega pretoka ponavadi merijo pretok skozi tanko cevko - tanko v primerjavi z dolžino ($l/d > 100$), da je zagotovljen laminaren tok plina. Slika 1 prikazuje najenostavnejši primer, ko plin, ki teče po cevki (tipičen premer je 0,2 mm), segrevamo in z uporovnimi termometri merimo prenos toplote. V primeru, ko ni pretoka, je temperaturni profil simetričen, pretok pa simetrijo "pokvari". Spremembo zaznata uporovna termometra in primerna kalibracija ter ojačenje nam dasta električni signal, s katerim krmilimo kontrolni ventil. V večini praktičnih primerov lahko uporabimo idealiziran račun za laminaren pretok skozi kapilarno. Tedaj velja Poiseuille-Hagenova enačba:

$$Q = \text{konst.} \frac{P \cdot \Delta P}{\eta \cdot T}$$

$Q = \text{konst.}$ kjer je Q masni tok, P povprečje med vstopnim in izstopnim tlakom na kapilari, ΔP razlika obeh tlakov, η viskoznost plina in T njegova povprečna temperatura. V konstanti so skriti geometrijski parametri, molekulska masa in plinska konstanta. Veljavnost enačbe je omejena predvsem s turbulencami (Reynoldsovo število mora biti pod 10^3) in s povprečno prosto potjo, ki naj bo majhna v primeri s premerom kapilare.

Minimalni pretoki, ki jih lahko tako merimo, so velikostnega reda 10^{-3} mbar.l/s. Večje pretoke merimo tako, da primerno dimenzioniramo k merilni vzporedno linijo. Na ta način zmoremo meriti pretoke do 10^3 mbar.l/s.

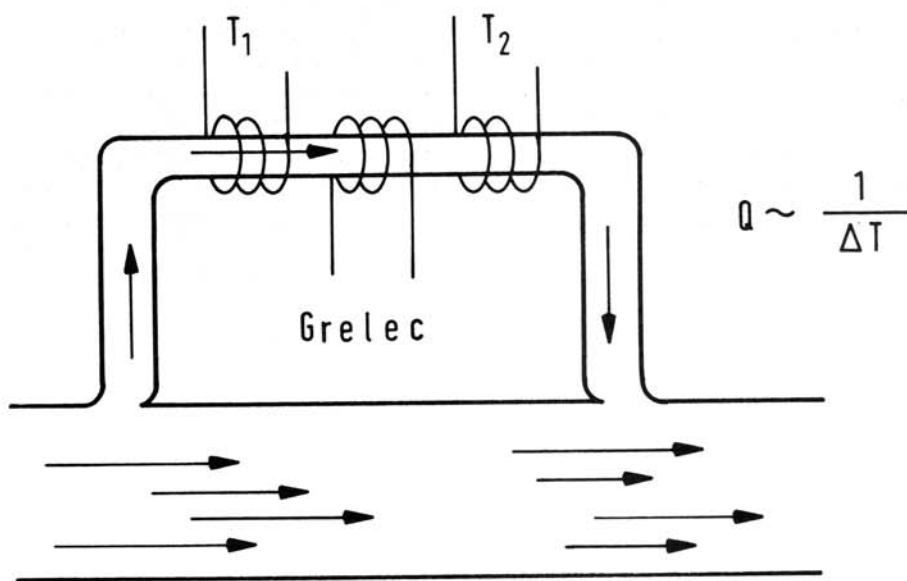
Glavni problem opisanega sistema je razmeroma počasen odziv ob spremembah, oz. dolg čas (2 do 10 s), ki je potreben za obnavljanje toplotnega ravnovesja. S temperaturno kompenzacijo (trije grelci vzdolž merilne linije) in avtomatičnim obnavljanjem temperaturnega

profila je mogoče skrajšati odziv pod 0,5 s. Časi okrog 1s so zdaj že kar standardni. Odzivni časi kontrolnih ventilov so precej krajši in niso ovira.

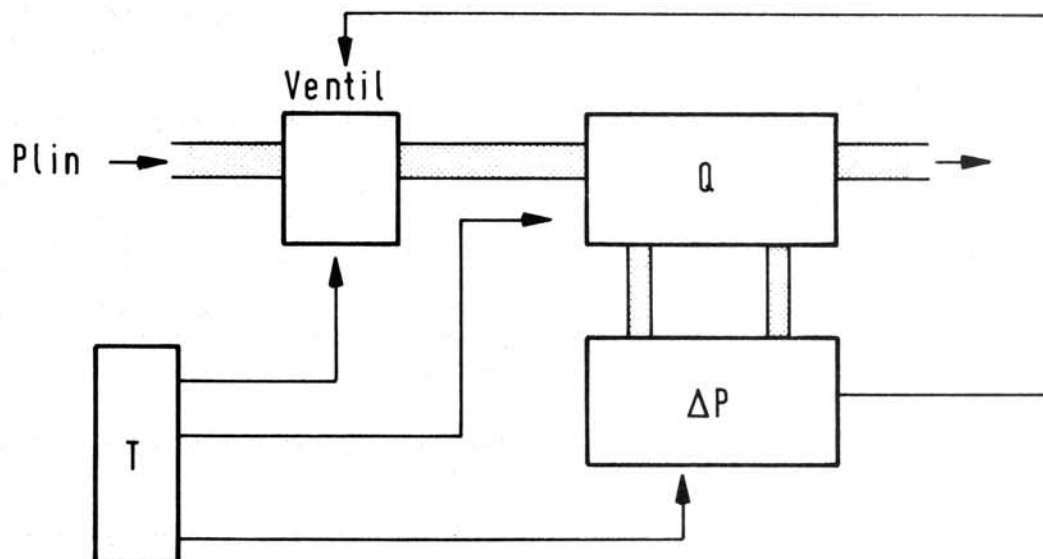
Delovanje termičnih merilnikov masnega pretoka je omejeno z vstopnim tlakom (nad približno 50 mbar). Merimo in ustrezno kontroliramo lahko pretoke v območju med 10^{-3} in 10^3 mbar.l/s, delovni tlaki pa so lahko med 10^{-4} mbar in 1 bar. Omejena je tudi delovna temperatura teh elementov (pod 50° C). Zaradi kalibracije moramo biti pri izbiri ob nakupu pozorni predvsem na vrsto plina in na delovno območje (pretok), ki ga želimo kontrolirati.

MERILNIKI MASNEGA PRETOKA Z MANOMETROM

Zaenkrat termični regulatorji pretoka zadoščajo za večino potreb. V posebnih primerih (npr. temperature okrog 150° C) pa uporabljajo kontrolne sisteme z diferencialnim merjenjem tlaka v vhodni liniji in temperaturno stabilizacijo posameznih elementov (ventil, manometer). Shematično je tak sistem prikazan na sliki 2. Osnova merilnika oz. kontrolne enote je merjenje tlaka (na vходу in izhodu elementa z definiranim pretokom) z diferencialnim manometrom. Glede na delovni tlak v sistemu moramo upoštevati različne režime pretoka. Za tlake med 10^{-4} in 10^{-2} mbar, ko imamo molekularen tok, zadostuje natančno merjenje tlačne razlike ΔP . Pomnožena s prevodnostjo nam da naravnost masni pretok. Pri tlakih med 10^{-2} in 50 mbar lahko ob pogoju, da je vstopni tlak vsaj dvakrat večji od izstopnega, uporabimo navadno odprtino. Molekule jo namreč tedaj prehajajo z nadzvočno hitrostjo, pretok pa je odvisen le od vstopnega tlaka. V tem primeru je torej dovolj, da natančno merimo tlak s kapacitivnim manometrom. Območje nadzvočnega režima lahko raztegemo vse do 1 bar, če zmoremo



Slika 1: Shematičen prikaz termičnega merilnika za pretok plinov



Slika 2: Kontrolni sistem z manometrom

na vstopni strani nadtlak 2 bar. Pogosto pa to ne gre. Z elementom, ki zagotavlja laminaren tok lahko znižamo vstopni tlak na 10 do 20 mbar. Pretok je zdaj sorazmeren produktu tlačne razlike in povprečnega tlaka v elementu, podobno kot pri termičnem merilniku. Odvisnosti od temperature se znebimo z natančno temperaturno kontrolo manometra, elementa za laminaren tok in ventila. Merilniki pretoka z manometrom se posebej odlikujejo po dobri kontroli ničle in dobri ponovljivosti pri kontroli pretoka.

SKLEP

Nekatere važne vidike merjenja in kontrole masnega pretoka sem že omenil. Hiter odziv je pomemben, ker sistem (npr. Si rezina) reagira tudi v času preden se okoliščine ustalijo; v tem času ponovljiva kontrola ni možna. S tem je povezan prehod iz stanja "zaprto" (ki ga nekatere kontrolne enote ne zmorejo) v položaj z vnaprej določenim pretokom. Važno je, da pri tem pretok čim manj preseže nastavljeno vrednost pa tudi, da merilnik zvesto sledi kontrolnemu ventilu. Nizki vstopni tlaki

so pogosti pri tekočinskih izvirih par. Pri le-teh je zelo težko kompenzirati spremembe temperature in vstopnega tlaka.

Na ponovljivost regulacije pretoka vplivajo predvsem stabilnost napajalne napetosti, kompenzacija temperaturnih sprememb, kompenzacija ničle in spremembe vstopnega tlaka. Tudi kontaminacija lahko povzroči nezanesljivo delovanje.

Razni proizvajalci z različnim uspehom premoščajo opisane težave. Vsi pa so praviloma precej samozavestni, zato je zelo koristno, če smo sposobni sami preveriti karakteristike. Občasno je treba preverjati zlasti kalibracijo in njeno linearnost, še posebno če delamo z reaktivnimi plini. Kot primarni standard se uporablja volumetrična tehnika, ker upošteva le osnovne količine (dolžina, masa, temperatura, čas). Kot sekundarni standard lahko porabimo naraščanje tlaka v znanem volumnu ali pa kar eno od zgoraj opisanih metod. Tako lahko ohranjamo natančnost nekaj desetink odstotka. Seveda moramo sekundarne standarde občasno preverjati s primarnimi, da zagotovimo zanesljivost postopka.