

Sl. 24. Smještaj skeleta i obloge. *a* skelet u vanjskoj stijeni, *b* skelet pred vanjskom stijenom, *c* skelet iza vanjske stijene

Ispuna se vanjske stijene može staviti u ravninu stupova skeleta, može biti uvučena iza skeleta ili stajati ispred skeleta ako je stropna konstrukcija konzolno istaknuta.

Kad je ispuna u ravnini stupova, skelet je uključen u vanjsku stijenu (sl. 24a) pa je potrebno osigurati dobro povezivanje skeleta i ispune i toplinski ga izolirati da ne bi nastao hladan most i da bi se spriječilo znojenje i korozija skeleta. Kad je ispuna uvučena iza skeleta (sl. 24b), skelet iskače ispred vanjske stijene i potrebno ga je zaštititi od požara i korozije. Kad se skelet nalazi u unutrašnjem prostoru (sl. 24c), dovoljno ga je zaštititi od požara. Vanjska stijena tada stoji na konzolnoj istaci stropne konstrukcije, pa može imati pun parapet i prozore ili se može izraditi od stakla i metala.

Podvlake i nosači zaštićuju se kao i stupovi betonskom oblogom ili prevlakom od Rabciove mreže s perlitnom žbukom. Osim toga, može se ispod stropa ovjesiti poseban pogled od mreže rebrastog metala ili Rabciove mreže na koju se nanosi 25 mm debeo sloj perlitne žbuke i zagladi tankim slojem produžne žbuke.

Manje montažne pretfabricirane stijene, visoke ~ 3 m, izrađuju se od lamela čeličnog lima debela 3 mm i široka 100 cm. Lamelle su na svim rubovima svinute i u lamelu je unutar rubova uložena toplinska izolacija i unutrašnja glatka ploča. Takve se pretfabricirane stijene proizvode i u obliku okvirnih stijena s okvirom od laganih čeličnih profila u koji je uložena toplinska izolacija i koji je s obje strane obložen limom.

LIT.: D. Smiljanić, Arhitektonske konstrukcije. Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo 1963. – M. Mitag, Baukonstruktionslehre. Verlag Bertelsmann, Göttingen 1965. – Z. Vrkljan, Građevne konstrukcije II. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1967. – E. Neufert, Bau-Entwurfslehre. Ulsteinverlag, Berlin 1969. – H. Schmidt, Hochbaukonstruktion. O. Maierverlag, Ravensburg 1975. – Đ. Peulić, Konstruktivni elementi zgrada. Tehnička knjiga, Zagreb 1975. – W. Henn, Entwurfs- und Konstruktionsatlas. Verlag G. D. W. Callwey, München 1976. – K. Götz, Holzbau Atlas. Institut für internationale Dokumentation, München 1978.

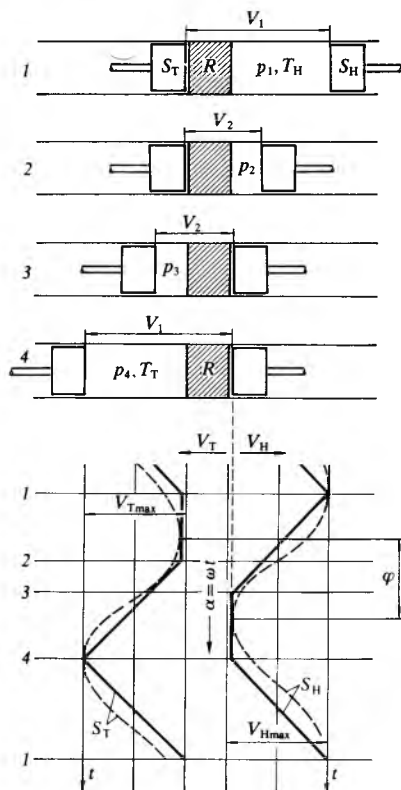
Z. Vrkljan

STIRLINGOV MOTOR, motor s vanjskim izgaranjem gdje kao radni medij trajno radi isti plin koji je s okolišem povezan samo toplinski. Taj je motor nastao od Stirlingova stroja na topli zrak što ga je škotski protestantski svećenik Robert Stirling patentirao 1816. Teoriju je toga toplinskog stroja obradio G. Schmidt (1861).

Nizozemska tvornica radioaparata Philips, u težnji da poveća prodaju tih aparata, u doba kad još nije bilo pouzdanih električnih baterija, a elektrifikacija se u mnogim zemljama polagano provodila, počela je 1925. razvijati stroj na topli zrak kao mali i jeftini izvor električne energije. Otuda je nastao Philipsov Stirlingov motor koji osim sa zrakom može raditi i s vodikom ili helijem. Licenciju gradnje takva motora preuzelo je više evropskih tvornica koje su ga dalje razvijale. Do sada je napravljeno više takvih eksperimentalnih motora s volumenima cilindara do 500 cm³. Praktične primjene Stirlingova motora, međutim, još nema, jer je njegova proizvodnja dva do tri puta skuplja od proizvodnje motora s unutrašnjim izgaranjem (v. *Motori s unutrašnjim izgaranjem*, TE 9, str. 1) jednake snage. Osim toga, regulacija snage Stirlingova motora nije tako jednostavna kao regulacija motora s unutrašnjim izgaranjem. Sposobnost Stirlingova motora da radi s bilo kojim izvorom topline može u budućnosti imati izrazitu vrijednost, pogotovo što mu je radni medij odvojen od okoliša pa svojim radom ne onečišćuje atmosferu štetnim plinovima. To, međutim, ne znači da izvor topline potrebne za pogon motora ne bi onečišćavao okoliš.

Proces u Stirlingovu motoru, u osnovi, jednak je procesu stapnoga parnog stroja (v. *Parni stapni stroj*, TE 10, str. 202). Da bi se ostvario proces u stapnom parnom stroju, voda se pojmom pumpom tlačí (kompresija) u parni kotao (v. *Parni kotao*, TE 10, str. 164), gdje joj se dovodi toplina, te se ona u kotlu isparuje i pregrijava, pa se ekspanzijom pare u parnom stroju dobiva rad, a u kondenzatoru se preostala toplina odvodi u okoliš. U Stirlingovu stroju sva su ta četiri uređaja ujedinjena u jednome. Da bi se kao u svakom toplinskom stroju omogućila pretvorba topline u mehaničku energiju, potrebno je proces voditi između gornje i donje temperature radnog medija (v. *Termodinamika*). Zbog toga mora Stirlingov motor imati topli prostor sa stalno visokom temperaturom T_T i hladni prostor sa stalno niskom temperaturom T_H . Između tih prostora, određenim ritmom, struji radni medij (plin), i to jednom iz hladnoga u topli, a drugi put iz toploga u hladni prostor. Na putu toga strujanja

ugrađen je regenerator topline. Topli se plin strući kroz regenerator hladi predajući toplinu regeneratoru, a kad malo poslije kroz regenerator struji hladni plin, on se zagrijava preuzimajući u regeneratoru pohranjenu toplinu. U hladnom se prostoru plin komprimira, a u toplome ekspanzira. Hlađenjem hladnog prostora ostvaruje se izotermna kompresija (v. *Termodinamika*), dok se grijanjem toplog prostora osigurava izotermna ekspanzija. Budući da topli plin ima veću entalpiju, rad je ekspanzije veći od rada kompresije, pa se dobiva višak rada koji se može iskoristiti za pogon npr. električnog generatora.



Sl. 1. Prikaz rada Stirlingova motora. S_T stap toplog prostora, S_H stap hladnog prostora, $T_T = \text{const.}$ temperatura toplog prostora, $T_H = \text{const.}$ temperatura hladnog prostora, p_1 i p_2 tlakovi u hladnom prostoru, p_3 i p_4 tlakovi u toplom prostoru, V_1 i V_2 volumeni plina, $V_{T\max}$ i $V_{H\max}$ maksimalni volumen toplog i hladnog prostora, α kut zakreta koljenastog vratila, φ kut prethodjenja

Na sl. 1 prikazan je rad Stirlingova motora. Desno je hladni prostor u kojem je trajno temperatura T_H , a lijevo je topli prostor u kojem je trajno temperatura T_T . Oba su cilindrična prostora smještena jedan iza drugoga i čine zajednički cilindar. Prostori su s vanjske, otvorene strane zatvoreni stapovima, a u sredini, između ta dva prostora, ugrađen je regenerator. U položaju 1 (sl. 1) stap desnoga, hladnog prostora nalazi se u vanjskoj mrtvoj točki (tada je volumen hladnog prostora V_H), a stap lijevoga, toplog prostora u unutrašnjoj mrtvoj točki. Između oba stapa nalazi se volumen plina V_1 pod tlakom p_1 . Pomicanjem desnog stapa ulijevo, uz nepomičan lijevi stap, smanjuje se volumen plina od V_1 na V_2 (položaj 2) uz povećanje tlaka od p_1 na p_2 . Budući da je kompresija izotermna, što se postiže hlađenjem, održavat će se temperatura T_H konstantnom te vrijedi relacija

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (1)$$

U Stirlingovu je motoru često $V_1 \approx 2V_2$, pa je faktor kompresije $\varepsilon \approx 2$.

Kad desni stap stigne u položaj 2, oba se stapa počinju sinkrono gibati ulijevo, tako da se volumen plina V_2 ne mijenja. Pritom se plin protiskuje kroz regenerator gdje se

ugrije na temperaturu T_T . Odvija se, dakle, izohorna promjena stanja (v. *Termodinamika*) uz povišenje tlaka plina na p_3 . To se povišenje tlaka postiže kad desni stap stigne u unutrašnju mrtvu točku (položaj 3). Za takvu promjenu stanja vrijedi izraz

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_T}{T_H}. \quad (2)$$

Nakon što desni stap dođe do unutrašnje mrtve točke, lijevi se stap nastavi gibati do svoje vanjske mrtve točke (položaj 4); tada volumen toplog prostora iznosi V_T koji je jednak V_H . Za vrijeme toga gibanja plin izotermno ekspanzira od volumena V_2 do V_1 uz smanjenje tlaka od p_3 do p_4 . Da bi se ostvarila izotermna ekspanzija, potrebno je grijati lijevi cilindar. Za takvu promjenu stanja vrijedi izraz

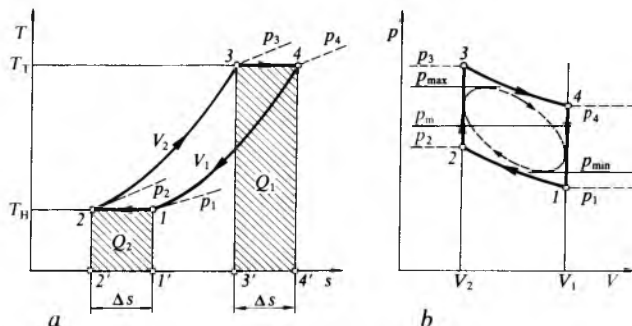
$$p_3 V_2 = p_4 V_1. \quad (3)$$

Nakon toga počinje sinkrono gibanje obaju stapova udesno, tako da volumen plina V_1 ostaje nepromijenjen. To se gibanje nastavlja sve dok lijevi stap ne stigne u unutrašnju, odnosno desni stap u vanjsku mrtvu točku. To je, dakle, stanje koje odgovara položaju 1 na sl. 1. Pri tome sinkronom gibanju obaju stapova plin temperature T_T struji kroz regenerator hladeći se na temperaturu T_H uz zagrijavanje regeneratora. Tijekom gibanja stapova nastaje izohorna promjena stanja uz smanjenje tlaka plina od p_4 na p_1 . Za takvu promjenu stanja vrijedi izraz

$$\frac{p_1}{p_4} = \frac{T_H}{T_T}. \quad (4)$$

Nakon toga proces se ponavlja.

U donjem dijelu sl. 1 prikazano je gibanje stapova kao funkcija vremena t . Horizontalni pravci odgovaraju položajima u gornjem dijelu slike.



Sl. 2. T, s i p, V -dijagram Stirlingova procesa. T_T temperatura toplog prostora (gornja temperatura procesa), T_H temperatura hladnog prostora (donja temperatura procesa), Q_1 dovedena toplina tijekom ekspanzije, Q_2 odvedena toplina tijekom kompresije, Δs prirast entropije, p_{\max} najviši tlak u realnom procesu, p_m srednji tlak u realnom procesu, p_{\min} najniži tlak u realnom procesu

Proces u Stirlingovu stroju odvija se po dvjema izotermama ($T_H = \text{const.}$ i $T_T = \text{const.}$) i po dvjema izohorama ($V_1 = \text{const.}$ i $V_2 = \text{const.}$). Taj proces, prikazan u T, s -dijagramu, vidi se na sl. 2a. Tijekom jednog radnog ciklusa toplina se dovodi za vrijeme izohorne promjene stanja uz $V_2 = \text{const.}$ (dovedena toplina Q_1' proporcionalna površini $2'-2-3-3'$ na sl. 2a) i za vrijeme izotermne promjene stanja uz $T_T = \text{const.}$ (dovedena toplina Q_1 proporcionalna površini $3'-3-4-4'$), dok se toplina odvodi za vrijeme izohorne promjene stanja uz $V_1 = \text{const.}$ (odvedena toplina Q_2' proporcionalna površini $1'-1-4-4'$) i za vrijeme izotermne promjene stanja uz $T_H = \text{const.}$ (odvedena toplina Q_2 proporcionalna površini $2'-2-1-1'$). Tijekom strujanja plina temperature T_T kroz regenerator, za vrijeme gibanja stapa tople strane od vanjske (položaj 4) do unutrašnje mrtve točke (položaj 1), plin predaje regeneratoru toplinu Q_2' . Kad, međutim, plin struji u suprotnom smjeru, za vrijeme gibanja stapa hladne strane od položaja 2 do unutrašnje mrtve točke (položaj 3), hladni plin temperature T_H preuzima od regeneratora toplinu Q_1' i ugrije se na temperaturu T_T , pa se tako toplina akumulirana u regeneratoru ponovno uvodi u

proces. Budući da se izmjena topline između plina i regeneratora, odnosno između regeneratora i plina, odvija između jednakih temperatura, iznosi su toplina Q'_1 i Q'_2 jednaki.

Termička je korisnost procesa određena izrazom

$$\eta_t = \frac{Q'_1 + Q_1 - (Q'_2 + Q_2)}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (5)$$

jer je $Q'_1 = Q'_2$, a Q_1 je toplina izvana dovedena u proces. Topline Q_1 i Q_2 jednake su umnošku prirasta entropije i temperature. Prirasti su entropija jednaki za obje izotermne promjene stanja jer se one odvijaju između jednakih volumena. Taj je prirast određen izrazom

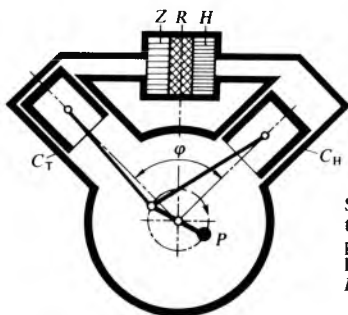
$$\Delta s = R \ln \frac{V_1}{V_2}, \quad (6)$$

gdje je R plinska konstanta (v. *Termodinamika*). Izraz za η_t , dakle, glasi

$$\eta_t = \frac{\Delta s T_T - \Delta s T_H}{\Delta s T_T} = 1 - \frac{T_H}{T_T}. \quad (7)$$

Prema tome, termička je korisnost procesa u Stirlingovu motoru jednaka onoj Carnotova procesa (v. *Motori s unutrašnjim izgaranjem*, TE 9, str. 3, sl. 9), koja je najveća moguća termička korisnost u toplinskim procesima (v. *Termodinamika*). To je jedna od značajki Stirlingova motora. Druga je značajka toga motora ugradnja regeneratora.

Izvedbe Stirlingova motora. Stirlingov motor prikazan na sl. 1 radi intermitentno. Da bi mogao obavljati neki rad, mora se tako izvesti da radi kontinuirano. To se može postići pogodnim stapnim mehanizmom koji bi rad dobiven ekspanzijom plina u cilindru prenosio na koljenasto vratilo koje bi rotiralo konstantnom brzinom vrtnje. Tada se gibanje stapova može prikazati sinusoidom, što se vidi na donjem dijelu sl. 1 (sinusoida S_T za stap u toplom prostoru, a S_H u hladnome). Kad su topli i hladni prostor smješteni u cijevi kao na sl. 1, potreban je kompliciran stapni mehanizam kojemu su nedostatak velike inercijske sile masa koje se pravocrtno gibaju.



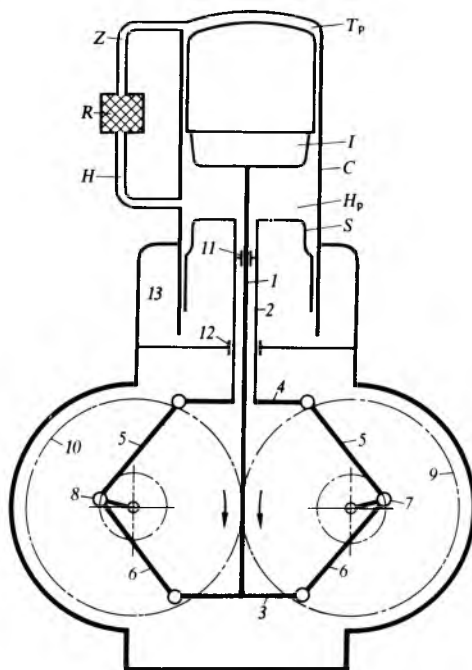
Sl. 3. Stirlingov motor s cilindrima toplog (C_T) i hladnog (C_H) prostora postavljenim u obliku slova V u kojem krakovi zatvaraju kut φ . Z zagrijač, R regenerator, H hladnjak, P protuuteg

Zbog toga je cilindar po sredini rastavljen u dva dijela, koji su tako postavljeni da njihove osi čine kut φ (sl. 3). Ojnice su obaju stapova spojene na isto koljeno koljenastog vratila. Pri rotaciji u smjeru kazaljki na satu procesi u lijevom toplom cilindru C_T prethode za kut φ procesima u desnom, hladnom cilindru C_H . Na koljeno koljenastog vratila postavlja se protuuteg da bi se osigurala ravnomjernija rotacija. Cilindri su spojeni sustavom cijevi u koji je ugrađen regeneratorski R (sl. 3) tako da je spojen s oba cilindra. Između regeneratorskog i toplog cilindra nalazi se zagrijač Z kojim se dovodi toplina Q_1 , a između regeneratorskog i hladnog cilindra hladnjak H kojim se odvodi toplina Q_2 . U zagrijač se dovodi toplina iz nekog vanjskog izvora, a hladnjak se hladi vodom. Volumeni zagrijača, regeneratorskog i hladnjaka te spojnih cijevi ne sudjeluju u radu kao volumeni cilindara V_T i V_H , pa su zapravo štetni prostor V_0 kao u parnom stapnom stroju. Štetni prostor može biti velik i jednak volumenu V_T . Sav se štetni prostor nalazi izvan cilindara.

Umjesto da su cilindri smješteni kao na sl. 3, oni se mogu postaviti jedan do drugoga s paralelnim osima. Tada su potrebna dva koljenasta vratila. Da bi se osiguralo njihovo

sinkrono okretanje, na svakom je vratilu po jedan zupčanik koji se međusobno tako zahvaćaju da promjene u toplom cilindru prethode za kut φ promjenama u hladnom cilindru.

Konstruktori tvornice Philips pošli su drugim putem. Oni su postavili topli i hladni prostor jedan pored drugog u isti cilindar, a zagrijač, regeneratorski i hladnjak oko cilindra (sl. 4). Stapni je mehanizam tako izveden da promjene u toplom prostoru prethode promjenama u hladnome. Topli je prostor odvojen od hladnoga klipom istiskivača koji je tako izveden da što manje topline prijeđe iz toplog u hladni prostor. Donji je kraj hladnog prostora zatvoren radnim stapom. Budući da u svakom trenutku u svim prostorima vlada jednak tlak, to je i iznad i ispod klipa istiskivača tlak jednak, pa klip, kad se zanemare gubici kroz sustav cijevi, ne obavlja rad. Prema tome, klip istiskivača ima zadatak samo da istisne radni medij. Dovodom i odvodom topline i promjenama volumena u toplom i hladnom prostoru, što se postiže gibanjem klipa istiskivača i radnog stapa, tlak se mijenja pri svakom okretanju od maksimalne do minimalne vrijednosti, pa radni stap obavlja rad.



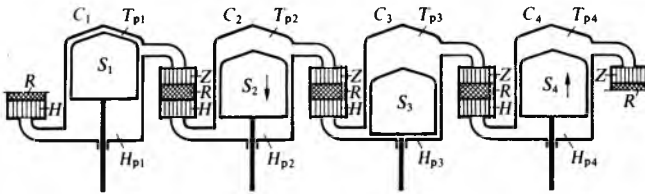
Sl. 4. Jednoradni Stirlingov motor s romboidnim stapnim mehanizmom (izvedba Philips). T_p topli prostor, H_p hladni prostor, C zajednički cilindar, I klip istiskivača, S radni stap, Z zagrijač, R regeneratorski, H hladnjak, 1 stapajica istiskivača, 2 stapajica radnog stapa, 3 jaram istiskivača, 4 jaram radnog stapa, 5 ojnice radnog stapa, 6 ojnice istiskivača, 7 i 8 koljena koljenastog vratila, 9 i 10 zupčanici na koljenastom vratilu, 11 i 12 brtvenice, 13 dodatni prostor za regulaciju srednjeg tlaka u cilindru

Radni stap i klip istiskivača gibaju se sinkrono pomoću stapnog mehanizma (sl. 4). To se postiže dvama koljenastim vratilima koja su međusobno spojena zupčanicima koji se okreću suprotno. Svako je koljeno spojeno parom ojnice sa dva jarma, od kojih je gornji povezan s radnim stapom, a donji s klipom istiskivača. Rotacijom koljena dva para ojnice tvore romboid kojem se kutovi stalno mijenjaju. Taj se mehanizam naziva *romboidni stapni mehanizam*. Takvim se mehanizmom sprečava bočni pomak klipa istiskivača i radnog stapa pa se smanjuje trenje o stijenke cilindra. To ujedno olakšava brtvljenje oko stapajice.

Takav se motor s gledišta izvedbe motora s unutrašnjim izgaranjem može smatrati jednoradnim dvotaktnim motorom.

Za povećanje snage motora potrebno je više cilindara koji su nanizani jedan do drugoga (sl. 5), a svaki je od njih posebna jedinica. Topli i hladni prostor nalaze se u istom cilindru, topli prostor u gornjem, a hladni u donjem dijelu cilindra. Topli prostor jednog cilindra spojen je cijevima

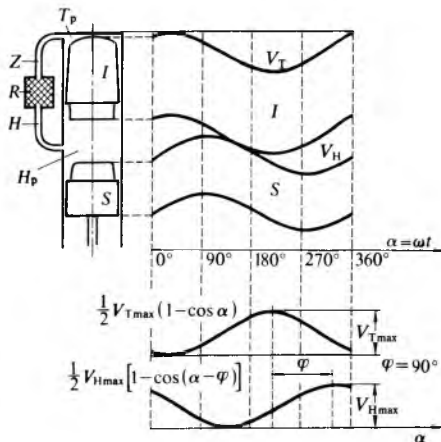
preko zagrijača, regeneratora i hladnjaka s hladnim prostorom drugog cilindra. Tada je nepotreban romboidni stapni mehanizam, a dovoljno je samo jedno koljenasto vratilo, pa je stap svakog cilindra preko stapajice, križne glave i ojnice spojen s pripadnim koljenom koljenastog vratila. Kut φ kojim se određuje vremenski razmak promjena u toplom i hladnom prostoru pojedinih cilindara odabire se tako da se postigne što jednoličnija rotacija koljenastog vratila. Tako za četverocilindarski motor kut φ iznosi 90° , što je četvrtina od 360° . U svakom paru prostorâ što ih čine topli prostor prvoga i hladni prostor drugog cilindra, zatim topli prostor drugoga i hladni prostor trećeg cilindra itd. radi masa plina koja je odvojena od mase drugog para prostorâ. Krug se zatvara preko toplog prostora četvrtoga i hladnog prostora prvog cilindra. U takvoj izvedbi stap preuzima ulogu klipa istiskivača. Povrh stapa vlada tlak različit od tlaka ispod stapa. Zbog toga stapovi moraju biti dugački da bi se na njima mogli smjestiti stapni prsteni za sprečavanje propuštanja plina iz jednog para prostorâ u drugi.



Sl. 5. Dvornadni četverocilindarski Stirlingov motor. $C_1 \dots C_4$ cilindri, $T_{p1} \dots T_{p4}$ topli prostori, $H_{p1} \dots H_{p4}$ hladni prostori, $S_1 \dots S_4$ stapovi, Z zagrijač, R regeneratorski hladnjak

Koljeno koljenastog vratila može se zamijeniti *teturavom pločom* koju zahvaćaju ojnice četiriju cilindara. Ta ploča okreće vratilo smješteno između cilindara kojima su osi paralelne s osi vratila. Takav je motor razmjerno uzak pa bi se mogao upotrijebiti za pogon automobila.

Snaga Stirlingova motora određuje se iz rada u jednom kružnom procesu, prikazanom u p, V -dijagramu (sl. 2b), i broja kružnih procesa u sekundi. Za to je potrebno poznavati promjene volumena i tlaka u motoru.



Sl. 6. Promjena volumena toplog (V_T) i hladnog (V_H) prostora u jednoradnom Stirlingovu motoru u ovisnosti o sinusoidnom gibanju klipa istiskivača (I) i radnog stapa (S). T_p topli prostor, H_p hladni prostor, Z zagrijač, R regeneratorski hladnjak, α kut zakreta koljena koljenastog vratila, φ kut prethodjenja

Na sl. 6. prikazan je motor sa sl. 4 s promjenama položaja klipa istiskivača i radnog stapa, te s promjenama volumena toplog i hladnog prostora u ovisnosti o položaju (kut α) koljena koljenastog vratila. Zanimari li se duljina ojnice, položaji klipa istiskivača i radnog stapa odgovaraju sinusoidi, pa su i krivulje promjena toplog i hladnog prostora sinusoidne. Da bi Stirlingov motor davao rad, mora promjena volumena toplog prostora prethoditi za neki kut φ promjeni volumena hladnog prostora. Kad bi kut φ bio jednak 0° ili 180° , motor ne bi davao rada. Kut φ mora iznositi $\sim 90^\circ$, odnosno između

60° i 120° . Volumeni toplog i hladnog prostora mijenjaju se prema izrazima:

$$V_T = \frac{1}{2} V_{T\max} (1 - \cos \alpha), \quad (8)$$

$$V_H = \frac{1}{2} V_{H\max} [1 - \cos(\alpha - \varphi)]. \quad (9)$$

U svim prostorima motora u svakom je trenutku tlak jednak. Taj tlak ovisi o dovedenoj toplini Q_1 , o promjenama volumena toplog i hladnog prostora, te o odvedenoj toplini Q_2 . Za promatrani motor, karakteriziran konstantom K , tlak u motoru iznosi

$$p = \frac{K}{V}, \quad (10)$$

gdje je V promjenljivi volumen koji je jednak zbroju volumena toplog (V_T), hladnog (V_H) i štetnog (V_0) prostora. Izraze li se svi volumeni pomoću maksimalnog volumena toplog prostora, dobiva se da je

$$p = \frac{K}{1 - \delta \cos(\alpha - \vartheta)}, \quad (11)$$

gdje su δ i ϑ veličine koje ovisi o temperaturama T_T i T_H , o omjeru maksimalnih volumena hladnog i toplog prostora, te o kutu φ .

Rad dobiven u jednom okretaju iznosi

$$A = \eta_t \pi V_{T\max} p_m \frac{\delta}{1 + (1 - \delta^2)^{1/2}} \sin \vartheta, \quad (12)$$

gdje je p_m srednji tlak procesa. Za brzinu vrtnje n (min^{-1}) teorijska snaga jednoradnog cilindra iznosi

$$P_0 = \frac{1}{2} \eta_t V_{T\max} \frac{\pi n}{30} p_m \frac{\delta}{1 + (1 - \delta^2)^{1/2}} \sin \vartheta. \quad (13)$$

Srednji tlak p_m ovisi o najvećem tlaku procesa p_{\max} i veličini δ prema izrazu

$$p_m = p_{\max} \left(\frac{1 - \delta}{1 + \delta} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Efektivna snaga motora P_e manja je od teorijske, jer se ne može ostvariti teorijski proces prema izohornim i izotermnim promjenama stanja i zbog mehaničkih gubitaka koji se uzimaju u obzir mehaničkom korisnošću η_m . U p, V -dijagramu (sl. 2b) ucrtana je u teorijski proces ($1-2-3-4$) i crtkana približna elipsa koja prikazuje stvarni, indicirani proces.

Efektivna snaga P_e određuje se kočenjem motora, pa se iz tog podatka može izračunati efektivni tlak p_e za jednoradni motor pomoću izraza

$$P_e = \frac{1}{2} \frac{d_T^2 \pi}{4} p_e \frac{s_T n}{30}, \quad (15)$$

gdje je s_T hod klipa istiskivača, pa je

$$\frac{d_T^2 \pi}{4} s_T = V_{T\max} \quad (16)$$

stapajni volumen toplog prostora.

Planimetričanjem površine stvarnog p, V -dijagrama (crtkana krivulja na sl. 2b) dobiva se proizvedeni rad A . Ako se taj rad podijeli razlikom volumena $V_1 - V_2$, dobiva se srednji indicirani tlak p_i , koji pomnožen s mehaničkim stupnjem djelovanja η_m daje srednji efektivni tlak p_e . Taj se tlak može odrediti iz izraza

$$p_e = \eta_s \eta_m \eta_t \pi p_m \frac{\delta}{1 + (1 - \delta^2)^{1/2}} \sin \vartheta, \quad (17)$$

gdje je η_s stupanj savršenstva procesa.

Srednji efektivni tlak u Stirlingovu motoru, uz jednake ostale parametre, veći je nego u motorima s unutrašnjim izgaranjem bez nabijanja. To znači da je specifična snaga Stirlingova motora veća.

Konstrukcija Stirlingova motora slična je konstrukciji motora s unutrašnjim izgaranjem uz dodatak zagrijača, regeneratora i hladnjaka. Na sl. 7 prikazan je uzdužni presjek Stirlingova motora s romboidnim stapnim mehanizmom. Da bi u relativno mali prostor cilindra stalo što više plina, jer više plina može preuzeti i više topline Q_1 , plin se za vrijeme mirovanja motora uvodi u cilindar pod tlakom od ~ 15 MPa. Da bi, osim toga, termička korisnost bila što veća, a s njom i što veća teorijska snaga (13), odabire se gornja temperatura T_T tolika koliko može sigurno podnijeti materijal uz taj tlak. Za legirane čelike ta temperatura iznosi 1000 K. Donja je temperatura jednaka temperaturi rashladne vode. Zbog prolaza topline kroz materijal stijenki temperature su plina ~ 900 K i ~ 360 K, pa je termička korisnost (7) $\sim 0,60$. Efektivna je korisnost, međutim, niža i iznosi $0,30 \dots 0,37$.

brtvenice u pogonu stalno savijaju pa im je trajnost malena. Zbog toga se upotrebljavaju i prstenaste brtvenice s više prstena.

Zagrijač plina sastoji se od snopa dugih tankih cijevi unutrašnjeg promjera $3 \dots 5$ mm. One se izvaju zagrijavaju plamenom plinovitog ili tekućeg goriva (sl. 7), krutim gorivom koje izgara u fluidiziranom sloju ili bilo kakvim drugim izvorom topline.

Regenerator se sastoji od metalne mreže ispletene od žice promjera ~ 50 μm , kako bi otpor strujanju kroz mrežu bio što manji. Mreža ima vrlo veliku dodirnu površinu i raspoređena je u više posuda koje su smještene oko cilindra između cijevi zagrijača i hladnjaka. Prijelaz topline od plina na mrežu i s mreže na plin mora biti vrlo velik, jer se u motorima s brzinom vrtnje od 3000 min^{-1} mora temperatura plina sniziti, odnosno povisiti za ~ 400 K u stotinki sekunde.

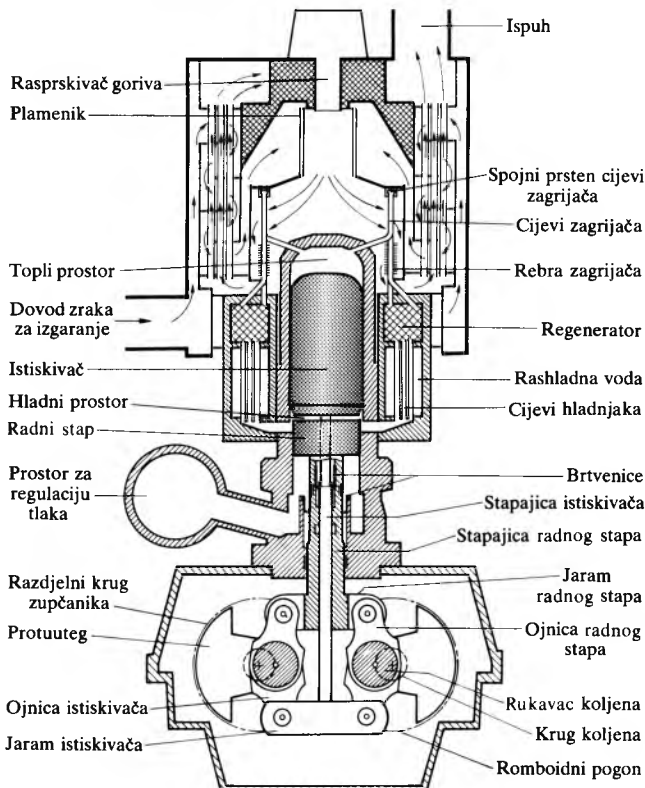
Hladnjak se sastoji od tankih cijevi oko kojih struji voda.

Spojne cijevi zagrijača i hladnjaka s cilindrom i regeneratom spajaju se zavarivanjem. Budući da su temperature u spojnima cijevima zagrijača visoke i budući da u njima vlada visok tlak koji se tijekom svakog okretaja mijenja, spojna su mjesta tih cijevi podvrgnuta velikim toplinskim i mehaničkim naprezanjima.

Podmazivanje je cilindara Stirlingova motora jednostavnije nego motora s unutrašnjim izgaranjem, jer ulje ne dolazi u dodir s produktima izgaranja pa se ne onečišćuje.

Rad motora. Romboidnim stapnim mehanizmom (sl. 4) potpuno se izjednačuje pravocrtno gibanje masa, pa motor radi vrlo mirno. Stirlingov motor, osim toga, radi bez ventila i u njemu nema eksplozivnog izgaranja kao u motorima s unutrašnjim izgaranjem, pa motor radi vrlo tiho.

Regulacija snage Stirlingova motora može se ostvariti na više načina. Iz izraza (13) vidi se da se, uz konstantnu termičku korisnost, snaga može regulirati promjenom volumena toplog prostora $V_{T\text{max}}$ i promjenom srednjeg tlaka p_m procesa. Volumen $V_{T\text{max}}$ može se mijenjati kad se upotrijebe stapni mehanizam s promjenljivim stapajem. Jednostavnija je regulacija promjenom srednjeg tlaka p_m , ali je za to potreban kompresor i spremnik za komprimirani plin. Tada se snaga povećava dovođenjem u motor dodatnog plina iz spremnika pod tlakom većim od maksimalnog tlaka u cilindru (~ 20 MPa), dok se snaga smanjuje odsisavanjem dijela plina iz cilindra. Odsisani se plin tlačí u spremnik pomoću kompresora. Smanjenje je snage polaganom, pa je rasterećenje motora presporo. Zbog toga se snaga smanjuje i kratkotrajnim spajanjem hladnog prostora s prostorom izvan motora (sl. 7, prostor za regulaciju tlaka) u koji se ispušta dio plina da bi se smanjio tlak.



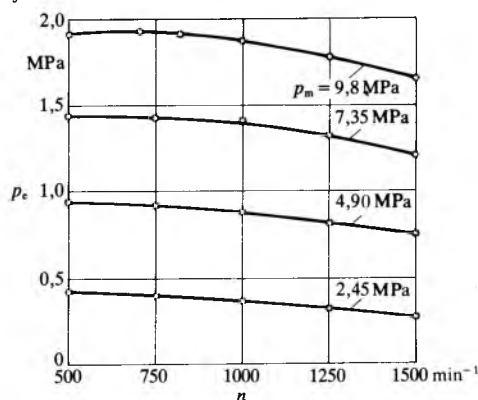
Sl. 7. Uzdužni presjek Stirlingova motora s romboidnim mehanizmom

Kao radni medij može se upotrijebiti zrak, helij ili vodik. Otpori strujanju, pogotovo kroz zagrijač, regenerator i hladnjak, razmjerni su kvadratu brzine strujanja i gustoći plina. Brzina strujanja ovisi o brzini vrtnje motora koja u izvedenim eksperimentalnim motorima iznosi od $400 \dots 4000 \text{ min}^{-1}$. Gustoća je plina

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (18)$$

Ona ovisi o tlaku p koji se stalno mijenja, o temperaturi T koja je konstantna u toplom odnosno hladnom prostoru i o plinskoj konstanti R koja ovisi o upotrijebljenom plinu. Zbog različitih vrijednosti plinske konstante, otpori su strujanju zraka 7,2 puta veći nego otpori strujanju helija, a otpori strujanju helija 2 puta veći nego otpori strujanju vodika. Iz toga slijedi da Stirlingovi motori s vodikom mogu raditi s najvećom, a oni sa zrakom s najmanjom brzinom vrtnje. Do sada izvedeni eksperimentalni motori (tabl. 1) rade s helijem ili vodikom, a projektiran je motor za lokomotive snage 1 MW koji bi radio sa zrakom.

Upotreba helija i vodika traži takve brtvenice na stapajicama koje ne propuštaju plin. Propuštanje je vodika opasno jer može nastati eksplozivna smjesa sa zrakom. Nepropusne brtvenice imaju oblik čirape koja je jednim krajem pričvršćena na stapajicu, a drugim na nepomično kućište. Te se



Sl. 8. Ovisnost srednjeg efektivnog tlaka p_e o brzini vrtnje Stirlingova motora uz različite srednje tlakove p_m

Na sl. 8 vidi se utjecaj promjene srednjeg tlaka p_m na promjenu srednjega efektivnog tlaka p_e u nekom Stirlingovu motoru. Poznajući efektivni tlak p_e , može se prema izrazu (15) odrediti i efektivna snaga P_e .

Stanje razvoja Stirlingova motora. U tabl. 1 nalaze se karakteristike nekih izvedenih Stirlingovih motora. Iz navedenih podataka o ukupnom volumenu i masi Stirlingovih motora

Tablica 1
KARAKTERISTIKE NEKIH IZVEDENIH STIRLINGOVIH MOTORA

		Konstrukcija						
		Philips A-235		MAN-MWM	Philips-Ford	United Stirling Sweden	MAN-MWM	British Stirling Engine Consortium
Godina objavljenih podataka		1971.		1973.	1977.	1977.	1977.	1982.
Snaga	kW	73	147	85	125	75	22	10...20
Cilindar, d/s	mm	77,5/49,8						90/60
Broj cilindara		4		4	4	4	4	1
Volumen cilindara	cm ³	4 × 234		4 × 499	4 × 215	4 × 189	4 × 100	381
Brzina vrtnje	min ⁻¹	3 000		1 500	4 000	2 400	1 500	1 500...3 000
Srednji tlak procesa, p_m	MPa	11,0	22,0	9,8	20,0	15,0	12,0	15,0
Radni medij		He		He	H ₂	H ₂	He	He
Temperatura prostora								973, cijev 873, plin
– toplog	K	973		903, plin	973	973		313, voda 358, plin
– hladnog	K	333		313, voda				
Efektivna korisnost, η_e		0,3			0,33	0,35...0,37	0,34	
Efektivni srednji tlak, p_e	MPa	1,565		1,76	1,24			1,05
Izvedba		Romboidni stapni mehanizam; jednoradan		Romboidni stapni mehanizam; jednoradan	Teturava ploča; dvoradan	Dvoradan	Dvoradan	Jednoradan; dva paralelna cilindra
Primjena		Pogon autobusa sa 31 sjedalom						
Dimenzije motora	m	1,25 × 0,52 × 1,1				0,92 × 0,55 × 0,98	0,6 × 0,55 × 0,75	
Masa	kg	760				350		

može se zaključiti da su oni veći i teži od motora s unutrašnjim izgaranjem jednake snage. Zbog skupe konstrukcije i nedovoljno brze regulacije snage nema, za sada (1989), izgleda da će Stirlingovi motori uskoro zamijeniti motore s unutrašnjim izgaranjem.

Svi su motori navedeni u tabl. 1 eksperimentalni. Oni su izvedeni radi pronalazanja najpovoljnijeg rješenja sa stajališta proizvodnje i pogona. Većina je konstruktora, nakon preuzimanja licencije od Philipsa, započela s jednoradnim motorom i romboidnim stapnim mehanizmom (sl. 4), da bi poslije prešla na dvoradne motore (sl. 5).

Efektivne korisnosti izvedenih Stirlingovih motora nekoliko su puta veće nego u stapnih parnih strojeva, a približno su jednake onima manjih Ottovih motora, ali ne dostižu efektivne korisnosti današnjih velikih Diesellovih motora ($\eta_e = 0,42 \dots 0,50$). Stirlingov motor, međutim, može raditi s bilo kakvim gorivom ili izvorom topline. Osim toga, taj motor svojim radom neposredno ne onečišćuje okoliš, iako se njime ne eliminira onečišćenje okoliša zbog izgaranja goriva potrebnog za pogon motora. To bi u budućnosti moglo utjecati na zamjenu motora s unutrašnjim izgaranjem Stirlingovim motorom. Zbog toga su u toku opsežna istraživanja da bi se pronašla što povoljnija izvedba Stirlingova motora.

Stirlingov rashladni stroj. Opisani Stirlingov motor pretvara toplinsku energiju u mehaničku. Ako se, međutim, pokreće energijom dovedenom izvana (npr. električnom energijom), a kut φ se izmijeni tako da zbivanja u hladnom prostoru prethode zbivanjima u toplom prostoru, te ako se izvrše još neke preinake, dobiva se rashladni stroj. U njemu se ekspanzijom plina mogu postići tako niske temperature da će se zrak koji oplakuje cijevi zagrijača plina ukapljiti. Tada je u prostoru ekspanzije niža temperatura nego u prostoru kompresije. Za takav se stroj mora upotrijebiti helij ili vodik kao radni medij. Kad se Stirlingov motor upotrebljava kao rashladni stroj, topli se prostor naziva ekspanzijskim prostoro-

rom i u njemu je niža temperatura, dok se hladni prostor naziva kompresijskim prostorom i u njemu je viša temperatura.

LIT.: A Passenger Coach Powered by a Philips Stirling Engine. Philips, Eindhoven 1971. – G. Walker, Stirling-cycle Machines. Clarendon Press, Oxford 1973. – B. B. Сутыгина, Двигатели Стирлинга. Издательство Мир, Москва 1975. – M. Mikuličić, Motori I. Školska knjiga, Zagreb 1976. – J. Kolin, Isothermal Stirling Cycle Engine. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Liber, Zagreb 1983. – M. Mikuličić, J. Kamenarović, Termički stupanj djelovanja Stirlingova motora. Tehnički fakultet, Rijeka, Zbornik radova VIII, Rijeka 1985.

M. Mikuličić

STOHAŠTIČKI PROCESI, slučajni procesi (prema grčkom *στοχαστικός* stohastikos *vješt u pogadanju, naslučivanja*), matematičke apstrakcije stvarnih procesa, koji se odvijaju po vjerojatnosnim zakonima. Stoga se teorija stohastičkih procesa može smatrati i dijelom teorije vjerojatnosti koji je povezan s praktičnim primjenama. Na stvaranje i razvitak teorije stohastičkih procesa utjecale su pojave u fizici (Brownovo gibanje), biologiji (proces razmnožavanja) i posebno u različitim područjima tehničkih znanosti, osobito u elektrotehnici (problemi smetnja u telekomunikacijama, problemi pouzdanosti i dr.).

Teorija stohastičkih procesa, kao samostalna znanstvena disciplina, razvila se u posljednjih pedesetak godina. Fundamentalne doprinose njenu razvitku dali su A. A. Markov, A. N. Kolmogorov, P. Lévy, J. L. Doob, H. Cramer, W. Feller, N. Wiener i dr.

Danas je teorija stohastičkih procesa veoma razgranata matematička disciplina koja ima veliku primjenu u tehničkim znanostima, gdje se mnoge teorije osnivaju i opisuju upravo pomoću pojava i metoda teorije stohastičkih procesa (*teorija pouzdanosti, teorija repova, teorija informacija, teorija upravljanja* itd.).