

Sl. 45. Automatski izvrstilač. 1 regulacijska matica, 2 okidači, 3 prednji kraj turbinskog rotora, 4 opruga

Osjetnik zaštite od pobjega jest *automatski izvrstilač* (sl. 45), koji se pomoću prirubnice pričvršćuje na turbinsko vratilo i postavlja u kućište prednjega ležajnog bloka. Osnovni su elementi izvrstioca dva jednaka okidača smještena u radialnim provrtima. Prilikom vrtnje turbinskog vratila centrifugalna sila nastoji izvući okidače iz provrta, čemu se opire sila opruge. Pomoću regulacijske maticе opruge se zbijaju tako da centrifugalna sila nadvisuje silu opruge pri brzini vrtnje većoj za $10 \dots 12\%$ od nominalne.

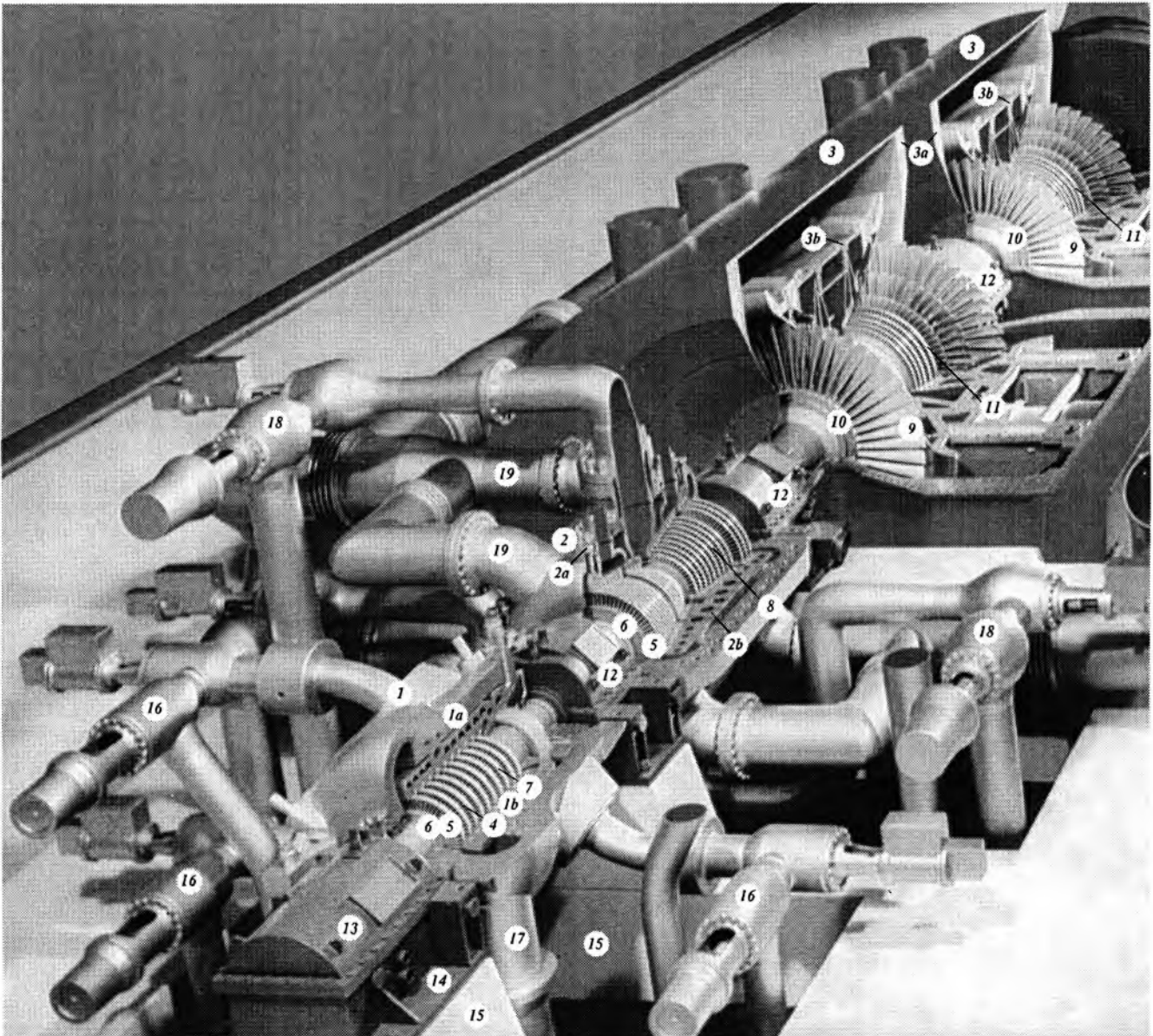
Okidači tada izlaze iz provrta i uključuju brzozatvarajući ventil.

Zaštita od aksijalnog pomaka rotora. Impuls za aktiviranje zaštite od prekomjernog aksijalnog pomaka rotora nastaje većim pomicanjem diska odzivnog ležaja, npr. prilikom taljenja bijele kovine s odzivnih segmenata, a pritom se primjenjuju hidraulični ili električni osjetnici. Princip rada hidrauličnog osjetnika jednak je kao u regulatora brzine vrtnje (sl. 39), samo što ulogu odbojne pločice koja se premješta ima odzivni disk. Impuls o padu tlaka ispred hidraulične sapnice zbog pomicanja grebena odzivnog diska služi za zatvaranje brzozatvarajućih, regulacijskih i protupovratnih ventila.

Zaštita plinskoturbinskog agregata. Plinskoturbinski agregat zaštićuje se od pobjega turbine, od loma elemenata agregata pri nepravilnom posluživanju i od pregrijavanja turbine pri prekomjernom povećanju temperature plinova izgaranja na ulazu u turbinu. U tu svrhu služe automatski izvrstilač (jednak onome u parnoj turbini), relej za zaustavljanje i granični regulator temperature, koji mogu brzo prekinuti dovođenje goriva u komoru za izgaranje.

KONSTRUKCIJA TOPLINSKE TURBINE

Konstrukcija toplinske turbine prikazana je presjekom parne turbine snage 785 MW za pogon električnog generatora u nuklearnoj elektrani (sl. 46). Turbina se sastoji od četiri kućišta: jednostrujnog visokotlačnog (1), dvostrujnog srednjotlačnog (2) i dva dvostrujna niskotlačna kućišta (3). Sva su kućišta izvedena s dvije stijenke (s pripadajućim vanjskim dijelom kućišta (1a, 2a, 3a) te



Sl. 46. Presjek parne turbine

unutrašnjim dijelom kućišta (1b, 2b, 3b). Kućišta su u horizontalnoj ravnini podijeljena na gornju polovicu (poklopac) i donju polovicu, koje su međusobno spojene priрубnicama s vijčanim spojem. Visokotlačna i srednjotlačna kućišta (unutrašnja i vanjska) izrađena su lijevanjem, a niskotlačna lijevanjem i zavarivanjem. U pojedinim unutrašnjim kućištima učvršćene su dijafragme sa statorskim lopaticama (4). Rotorske lopatice (5) visokotlačnog i srednjotlačnog kućišta pričvršćene su na diskove jednake debljine (6) izrađene zajedno s vratilima, pa tako čine monoblok-rotore za visoki (7) odnosno srednji (8) tlak. Rotorske lopatice (9) posljednja dva stupnja dvostrujnih niskotlačnih kućišta pričvršćene su na diskove koničnog oblika (10). Diskovi su navučeni na vratilo, pa tako čine niskotlačne rotore (11) kombiniranog tipa, zajedno s diskovima jednake debljine izrađenima skupa s vratilom i pripadajućim lopaticama. Rotori su međusobno spojeni, kao i cijeli rotor turbine s rotorom električnog generatora, i to preko krutih spojki smještenih u kućištima nosivih ležaja (12).

U prednjem ležajnom bloku (13), uz nosivi ležaj, smješten je i odzivni (aksijalni) ležaj. Prednji blok može se pomicati po temeljnoj ploči (14) prilikom toplinskog rastezanja turbine za vrijeme upuštanja u pogon (zagrijavanja) i prilikom stezanja za vrijeme zaustavljanja iz pogona (hlađenja). Čitava se turbina preko temeljne ploče oslanja na armiranobetonski temelj (15) turboagregata. Para se privodi turbini preko regulacijskih ventila visokog tlaka (16). Nakon visokotlačnog dijela para se odvodi parovodom (17) na sušenje i pregrijavanje u separator (paropregrijač), a zatim se preko regulacijskih ventila srednjeg tlaka (18) uvodi u srednjotlačno kućište. Iz njega se parovodima (19) para odvodi u niskotlačna kućišta, gdje ekspanzira do tlaka u kondenzatoru.

Rotorske lopatice

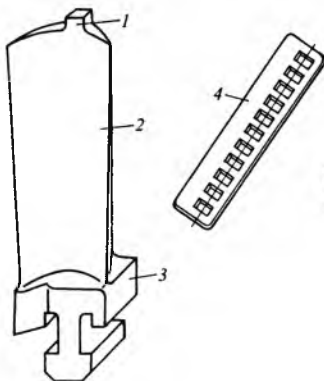
Uvjeti rada rotorskih lopatica. Zbog velike brzine vrtnje rotora centrifugalna sila u lopaticama uzrokuje velika vlačna naprezanja u spojevima lopatica i oboda diska. Obodna sila, koja stvara korisni zakretni moment na vratilu turbine, savija lopatice u ravnini diska. Zbog razlike tlaka ispred i iza lopatica, one se dodatno savijaju u ravnini osi vratila turbine.

Savojne sile koje djeluju na rotorske lopatice nisu stalne, već se neprekidno mijenjaju zbog nejednolichnosti toka radnog fluida. Osobito se velike promjene opterećenja javljaju na rotorskim lopaticama u turbinskim stupnjevima s djelomičnim privodom radnog fluida. Kada prolaze ispred statorskih lopatica iz kojih istrujava para, na rotorske lopatice djeluje puno savojno opterećenje, a kada izađu iz dijela kojim se privodi para, to opterećenje gotovo nestaje.

Rotorske lopatice prvih stupnjeva visokotlačnih i srednjotlačnih kućišta parnih turbina i sve lopatice plinskih turbina rade pri visokim temperaturama, što uzrokuje puzanje materijala.

Erozijsko djelovanje vlažne pare, koje je uzrokom trošenja površine lopatica, posebno je izraženo u parnim turbinama nuklearnih elektrana i u posljednjim stupnjevima kondenzacijskih turbina klasičnih termoelektrana. Osim toga, agresivne primjese radnog fluida, posebno plinovi izgaranja kod plinskih turbina, uzrokuju visokotemperaturnu koroziju i smanjuju otpornost lopatica prema stalnim i promjenljivim naprezanjima te povećavaju energetske gubitke.

Konstrukcija rotorskih lopatica. Rotorska se lopatica sastoji od radnog dijela ili lista i korijena ili noge (sl. 47). List je



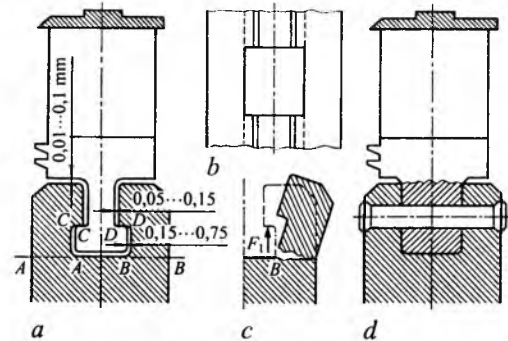
Sl. 47. Jednostavna rotorska lopatica. 1 izdanak za bandažu, 2 radni dio, 3 korijen, 4 bandaža

profiliran, pa uz određeni korak i ugradbeni kut oblikuje rotorske kanale. Korijen služi za pričvršćenje lopatice na disk. Na vrhu lista može biti izdanak za pričvršćenje bandaže zakivanjem.

Radni se dio lopatice izrađuje valjanjem ili kovanjem do prikladnog sirovog oblika, zatim glodanjem ili blanjanjem na posebnim kopirnim alatnim strojevima, te poliranjem do zrcalnog sjaja. Poliranje površine lista lopatice smanjuje gubitke zbog trenja radnog fluida i smanjuje opasnost od zamora materijala. Lopatice plinskih turbina zbog velike se tvrdoće toplinski otpornih materijala izrađuju preciznim lijevanjem, a velike serije i preciznim kovanjem.

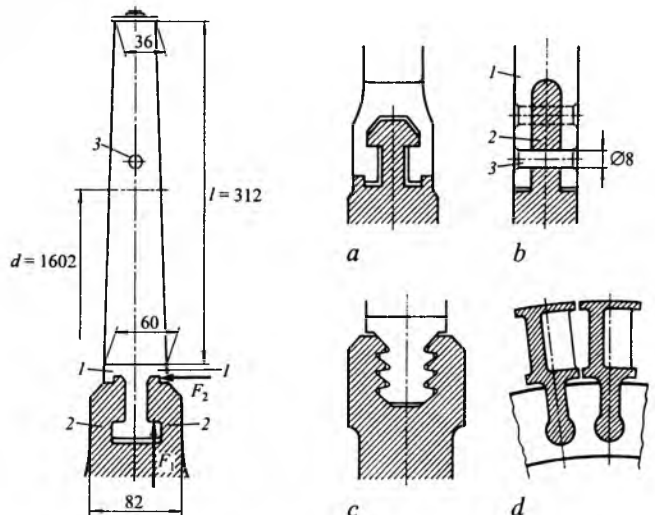
Korijen je najopterećeniji dio rotorske lopatice. Izbor tipa korijena ovisi o opterećenju lopatice i o tehnologiji izradbe. Za kratke se lopatice upotrebljava T-korijen, jahači, viličasti, ozubljeni i Lavalov korijen.

T-korijen učvršćuje se u obod diska stavljanjem u utor koji ima profil jednak profilu korijena (sl. 48). Lopatice se uvode u obod diska na mjestu proširenja njegovog utora i vode po utoru do svoga mjesta. Posljednje se ugrađuju završne lopatice, koje se obično na proširenju pričvršćuju na disk zakovicama. Što su lopatice dulje, masa lopatica je veća pa je veća i centrifugalna sila. Ona djeluje na dodirne površine C-C i D-D, zbog čega su u presjecima diska A-A i B-B velika savojna naprezanja, pa debljina oboda diska mora biti veća.



Sl. 48. Rotorska lopatica s T-korijenom. a korijenski spoj, b proširenje za uvođenje lopatica, c savijanje oboda diska, d pričvršćenje završne lopatice zakovicom

Da bi se smanjila naprezanja u obodu diska, korijen lopatice ima dva izdanka koja obuhvaćaju obod diska (sl. 49). Zbog centrifugalne sile F_1 na dodirnom se mjestu pojavljuje sila F_2 koja smanjuje naprezanja u presjeku B-B stvaranjem momenta suprotnog smjera.



Sl. 49. Primjer rotorske lopatice s T-korijenom s izdancima. 1 izdanci, 2 obod diska, 3 provrt za spojnu žicu

Sl. 50. Tipovi korijena kratkih rotorskih lopatica. a jahači, b viličasti, c ozubljeni, d Lavalov korijen

Jahači korijen ima gljivast utor, a na obodu diska nalazi se ispušt jednakog oblika (sl. 50 a). Na mjestu gdje se lopatice uvode

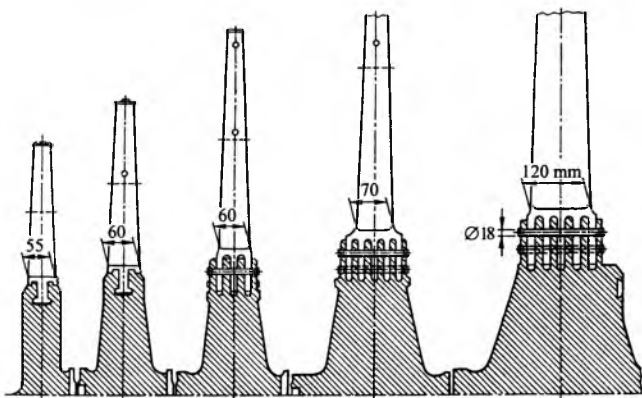
na obod ispust je ravan, a završne se lopatice pričvršćuju za obod zakovicama.

Viličasti korijen nasađuje se ili uosađuje na disk i pričvršćuje s dvije zakovice (sl. 50 b). On ne traži posebnu završnu lopaticu i omogućuje jednostavnu zamjenu oštećene lopatice bez demontiranja ostalih lopatica, kao što je to potrebno za zamjenu lopatice s T-korijenom ili jahaćim korijenom.

Ozubljeni korijen prikazan na slici 50 c ulazi se u obod diska u tangencijalnom smjeru. Centrifugalna se sila s lopatice prenosi na disk preko površina oslanjanja na zubima. Ozubljeni korijen omogućuje svladavanje velikih dodirnih naprezanja bez povećanja širine oboda diska i neutraliziranje momenta savijanja u pričvršnom dijelu diska.

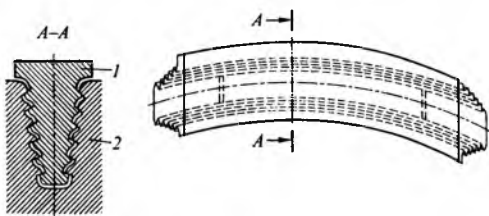
Više povijesnu nego praktičnu važnost ima korijen kojim je de Laval pričvrstio rotorske lopatice na svojoj prvoj turbini 1883. godine (*Lavalov korijen*, sl. 50 d).

Na slici 51 prikazani su korijeni rotorskih lopatica niskotlačnog kućišta višestupanjske turbine jedinične snage 300 MW. Počevši od trećeg niskotlačnog stupnja, umjesto T-korijena koji se upotrebljavao i za sve prethodne turbinske stupnjeve visokog i srednjeg tlaka, primjenjuje se viličasti korijen s više vilica i s tangencijalnim ulaganjem u obod diska. Lopatice posljednjeg stupnja, kojima je duljina 960 mm, imaju snažan viličasti korijen s pet vilica. Ako se poveća broj vilica, povećava se i broj površina opterećenih na odrez zakovice kružnog poprečnog presjeka kao najslabijeg dijela spoja. Tako viličasti korijen može služiti i za vrlo dugačke lopatice.



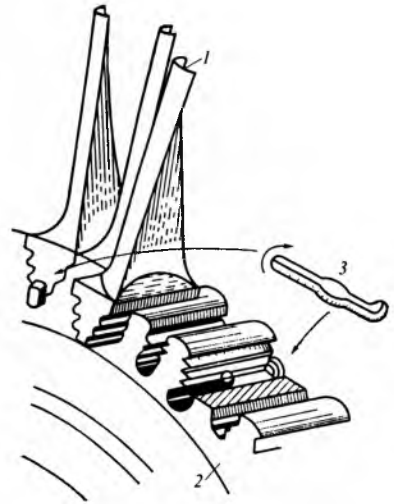
Sl. 51. Korijeni rotorskih lopatica niskotlačnog kućišta višestupanjske turbine snage 300 MW

Lopatice posljednjih stupnjeva kondenzacijskih turbina i lopatice plinskih turbina imaju tzv. *jela-korijen* (sl. 52), koji se tako naziva zbog sličnosti s oblikom istoimenog drveta. On se aksijalno ulazi u obod diska, a mnoge površine na koje se oslanja (nosive površine) osiguravaju mu veliku nosivu sposobnost. Kad se korijen i utor u disku izrađuju u obliku luka, da bi se korijenski presjek lopatice nalazio na samom vrhu korijena bez prijelaznog dijela, a ujedno da bi se zbog zakrivljenosti ostvarile veće nosive površine uz jednaku širinu oboda diska. Lopatica se učvršćuje u aksijalnom smjeru pomoću dvaju osigurača. Prije uvođenja lopatice u utor jedan se kraj osigurača savija prema tijelu korijena, a drugi prema površini diska (sl. 53). Uz već poznatu veliku čvrstoću, velike dosjedne površine, laku zamjenjivost bez demontiranja ostalih lopatica i mogućnost precizne obradbe utora, taj je tip korijena veoma pogodan s obzirom na hlađenje



Sl. 52. Jela-korijen lopatice posljednjih stupnjeva kondenzacijske turbine. 1 korijen, 2 disk

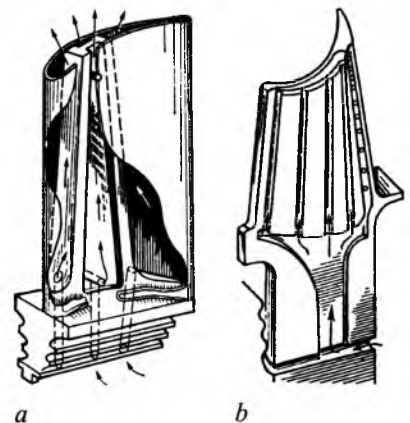
Sl. 53. Masivne rotorske lopatice plinske turbine s jela-korijenom. 1 lopatica, 2 disk, 3 osigurač



diskova i lopatica strujom zraka kroz radijalne unutrašnje šupljine ili provrte (sl. 54).

Bandaža smanjuje prestrujavanje radnog fluida iz jednog kanala u drugi i tako povećava korisnost, a *spojna žica* služi za povećanje vibracijske sigurnosti lopatičnog aparata. Za rotorske lopatice iz visokotlačnih i srednjotlačnih kućišta, do duljine od 350 mm, primjenjuju se perforirane trake koje povezuju u paket 6·14 lopatica, a postavljaju se na izdanke na vrhu lopatica (sl. 47). S povećanjem snage turbine povećava se i tetiva lopatice i masa trake, pa se zbog veće centrifugalne sile traka izrađuje kao dio vrha lopatice.

Sl. 54. Rotorske lopatice plinske turbine s unutrašnjim hlađenjem. a šuplja lopatica, b lopatica s radijalnim kanalima



Dugačke se lopatice često povezuju u pakete spojnom žicom koja se lemi srebrnim lemom za list lopatice ili se samo postavlja kroz provrt na listu lopatice. Zbog centrifugalne sile nelemjena žica u provrtu čvrsto priliježe, pa se zbog trenja prigušuju vibracije lopatica.

Erozijsko djelovanje vlažne pare. U turbinskim stupnjevima koji rade s vlažnom parom često nastaje erozija površine rotorskih lopatica. Erozijskim odnošenjem metala površina lopatice postaje neravna i hrapava, a mogu nastati i kaverne. Čak i neznatna erozija mijenja vibracijske karakteristike i čvrstoću lopatice, a smanjuje i korisnost. Jača erozija zahvaća veći dio lopatice, što može biti uzrok loma.

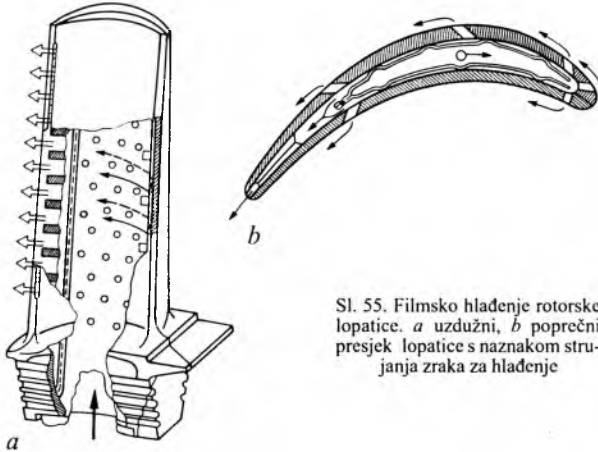
Aktivne su mjere zaštite od erozije: smanjenje vlažnosti ispred turbinskog stupnja, povišenje temperature pare i sniženje tlaka na ulazu u turbinu, primjena međupregrijanja pare, djelotvorna vanjska i unutrašnja separacija, smanjenje udarnog djelovanja kapljica vlage povećanjem aksijalnog zavora između statorske i rotorske rešetke, postizanje krupno porozne strukture ili radijalnih kanala na ulaznim bridovima lopatice, gdje film kapljevine ublažava nalet kapljica, te smanjenje obodne brzine na vanjskom promjeru stupnja uz nepromijenjene ostale parametre.

Pasivne su mjere zaštite od erozije: primjena lopatica od tvrdih materijala, ugradnja pločica od stelita (vrlo tvrde i otporne slitine na osnovi 60·65% kobalta, 25·28% kroma i 4·5% volframa)

na mjestu izložena eroziji, zatim toplinska obradba kaljenjem nekih dijelova ili cijele lopatice, te nanošenje tvrdog zaštitnog sloja.

Hlađenje rotorskih lopatica. Rotorske su lopatice izrađene od vatrootpornih čelika i slitina koje obično nemaju veliku toplinsku provodnost, pa je djelotvorno samo izravno unutrašnje i vanjsko hlađenje lopatica zrakom ili kapljevinom.

U turbinama s plinovima izgaranja kojima je na ulazu temperatura $\sim 1100^\circ\text{C}$, unutrašnje konvektivno hlađenje (sl. 54) može se kombinirati s tzv. filmskim hlađenjem. To je dovođenje tankog sloja zraka za hlađenje kroz provrte na vanjsku površinu lopatice (sl. 55), posebno na njezine toplinski najopterećenije dijelove.



Sl. 55. Filmsko hlađenje rotorske lopatice. a uzdužni, b poprečni presjek lopatice s naznakom strujanja zraka za hlađenje

Učinak hlađenja mogao bi se poboljšati primjenom tzv. poroznog hlađenja. Površinski dio lopatice treba biti od poroznog ili perforiranog materijala s finim porama kroz koje istrujava rashladno sredstvo. Ostvarenje takvog hlađenja ovisi o razvoju pogodnih materijala i izradbi permeabilnih lopatica, a praktičnu primjenu ograničava i onečišćenje pora zbog nedovoljne čistoće rashladnog medija.

U lopaticama hlađenim vodom voda struji kroz kanale lopatica i vraća se u spremnik otvorenog sustava za hlađenje. Protok vode ostvaruje se pumpom, ali voda struji i zbog razlike u gustoći između hladne vode koja protječe u radialnom smjeru prema vrhu lopatica i zagrijane vode koja se vraća prema središtu rotatora.

Pri *termosifonskom hlađenju* nepropusno zatvorene šupljine u lopaticama ispunjene su kapljevinom s velikom toplinom isparivanja (voda, kapljevita slitina natrija i kalija). Kapljevina u lopaticama intenzivno cirkulira samo zbog djelovanja centrifugalne sile i razlike u gustoći kao posljedice temperaturne razlike. Hladniji dijelovi kapljevine, koji imaju veću gustoću, odlaze prema vrhu lopatica, a topliji se dijelovi vraćaju prema korijenu. Da bi se povećala površina za izmjenu topline, dio se korijena u obliku radijatora hladi zrakom. Nedostatak je termosifonskog hlađenja što je potrebno odvoditi veće količine topline s korijenskog radijatora.

Materijali za izradbu rotorskih lopatica. Za izradbu lopatica parnih turbina najčešće se upotrebljavaju čelici legirani s 12...14% kroma koji su otporni prema koroziji i dobro prigušuju vibracije. Upotreba tih čelika moguća je do temperature od 480°C , dok se za više temperature primjenjuju čelici legirani molibdenom i vanadijem, a također i volframom i niobijem.

Za izradbu lopatica plinskih turbina upotrebljavaju se vatrootporne niklene slitine (v. *Nikal*, TE 9, str. 344) te metalokeramika. Suvremeni vatrootporne čelici i slitine omogućuju dugi radni vijek plinske turbine uz temperature plinova izgaranja na ulazu u turbinu sve do 1100 K . Mogu se upotrijebiti i plinovi viših temperatura ako se elementi turbine hlade ili ako im je na površinu nanesen zaštitni sloj. Lopatice turbina za zrakoplove difuzijski se prevlače aluminijem ili njegovom smjesom s kromom ili silicijem. Tako se na površini stvara sloj debljine $40\cdots 60\mu\text{m}$, koji je vrlo otporan na toplinu, eroziju i koroziju, pa se radni vijek takvih lopatica, uz temperature plinova izgaranja na ulazu u turbinu od $1100\cdots 1200\text{ K}$, produljuje $2\cdots 3$ puta.

Metalokeramički materijali (kermeti, v. *Sinteriranje*, TE12, str. 108) jeftiniji su od slitina i austenitnih čelika, imaju malu

toplinsku provodnost i manju gustoću. Međutim, sklони su pucaju pri udarnom opterećenju, vibracijama i naglim temperaturnim promjenama, pa se upotrebljavaju za turbinske elemente koji su opterećeni samo statički, npr. za statorske lopatice uz postupnu promjenu temperature.

Turbinski rotor

Turbinski se rotor sastoji od vratila i od radnih kola, koja čine diskovi i rotorske lopatice.

Uvjeti rada turbinskog rotora. Rotor se vrti velikom brzinom vrtnje, pa, s obzirom na izmjere i masu rotora, nastaju velika naprezanja zbog djelovanja centrifugalne sile. Prilikom eksploatacije turbine za pogon električnih generatora brzina vrtnje smije za 10%, a prilikom pobjega i do 20%, kratkotrajno prijeći nominalnu brzinu vrtnje. Nominalna brzina vrtnje nekih industrijskih turbina za mehanički pogon i plinskih turbina može biti i nekoliko puta veća. Najveća naprezanja nastaju u središnjem području glavina i na obodu gdje su pričvršćene rotorske lopatice. Osim toga, pri radu u području visokih temperatura može se pojaviti puzanje materijala u prvim kolima rotora parne turbine i u svim elementima rotora plinske turbine.

Turbinski vratilo zbraja zakretne momente pojedinih redova rotorskih lopatica te ukupni moment predaje rotoru generatora ili drugog pogonjenog stroja. Pri nekim eksploatacijskim režimima, npr. pri kratkom spoju generatora, zakretni moment može $4\cdots 6$ puta premašiti nominalnu vrijednost, a rukavac izlaznog turbinskog vratila treba taj veliki zakretni moment prenositi bez oštećenja.

Turbinski rotor trpi sve temperaturne promjene u protočnom dijelu turbine. Brze temperaturne promjene uzrokuju naprezanja, a njihovo periodično ponavljanje uzrok je toplinskom zamoru materijala i pojavi pukotina.

Rotor višekućišne parne turbine. Rotorom turbine s više kućišta smatraju se svi rotori pojedinih kućišta koji su međusobno spojeni pomoću spojki.

Najvažnija je karakteristika rotora *niskotlačnog kućišta* parne turbine što je velikih izmjera. Razlog je tome velika izlazna strujna površina posljednjeg turbinskog stupnja, koja je potrebna radi povećanja snage turboagregata ili smanjenja gubitaka zbog izlazne brzine radnog fluida. Rotor niskotlačnog kućišta izrađuje se navlačenjem diskova na vratilo (montažni rotor) ili zavarivanjem diskova (zavareni rotor).

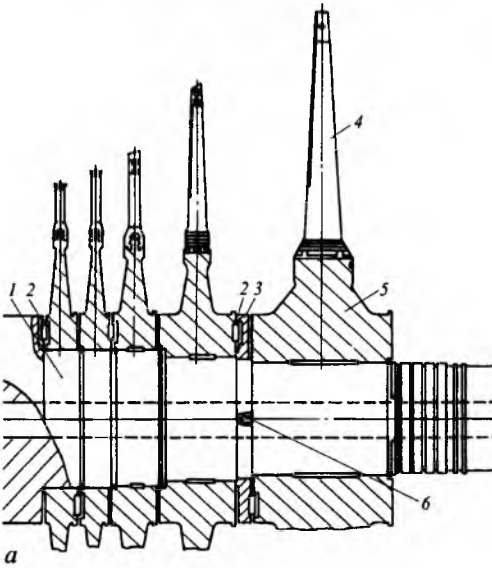
Montažni rotor sastoji se od stupnjevitog vratila, na koje su simetrično s obje strane navučeni diskovi (sl. 56 a). Disk se sastoji od oboda u kojem se nalaze kanali za smještaj korijena rotorskih lopatica, od tijela (profilnog dijela) i od glavine, kojoj je unutrašnji provrt u kontaktu s dosjednom površinom vratila. Tijelo se diska tako oblikuje da osigura dopuštena naprezanja diska pri najvećoj mogućoj brzini vrtnje koju dopuštaju regulacijski uređaji, odnosno uređaji za zaštitu od prekoračenja određene brzine vrtnje.

Prije navlačenja na vratilo promjer provrta diska nešto je manji od promjera dosjedne površine vratila. Neposredno prije navlačenja disk se zagrije da bi se njegov provrt povećao i da bi se disk mogao navući na vratilo. Poslije hlađenja disk čvrsto dosjeda na vratilo, a na mjestu dodira pojavljuje se kontaktni tlak, koji se opire okretanju diska po vratilu i omogućuje prijenos zakretnog momenta s diska na vratilo.

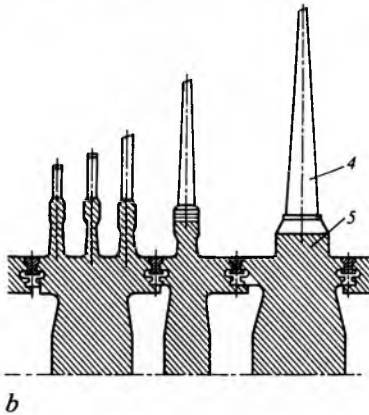
Tijekom rada moguće je da spoj diska i vratila popusti, npr. prilikom naglog povećanja temperature u protočnom dijelu, kada se disk progrijava brže od vratila, ili pri nedopuštenom povećanju brzine vrtnje. Međutim, zakretni se moment tada prenosi na vratilo, i to pomoću aksijalnog klina. Utori za klin povećavaju naprezanja u disku, što može uzrokovati iznenadni kruti lom diska. Zato se aksijalni klinovi ugrađuju samo u manje opterećene diskove. Za jako opterećene diskove kao što su, npr., diskovi posljednjih turbinskih stupnjeva, upotrebljavaju se bočni radijalni klinovi. Klinovi u prvom redu služe da se disk nakon nedopuštenog proširenja provrta vrati u prijašnji položaj kako se ne bi poremetilo uravnoteženje rotora.

Prednost je montažnog rotora što se može izgraditi do velikih izmjera, s visokom kvalitetom diskova i vratila i iz manjih otkivaka proizvedenih u manjim kovačnicama. Osim toga, oštećeni

se disk može pojedinačno zamijeniti novim. Nedostaci su montažnog rotora velika naprezanja u navučnim diskovima, mogućnost slabljenja diskova i pojava pukotina zbog korozije uzrokovane naprezanjem u utorima za klinove.



Sl. 56. Dio montažnog rotora (a) i zavarenog rotora (b). 1 vratilo, 2 bočni radijalni klinovi, 3 prsten, 4 lopatice, 5 diskovi, 6 aksijalni klin



Zavareni rotor izrađuje se od međusobno zavarenih diskova i prstenastih dijelova (sl. 56 b). Kao i u montažnom rotoru, radijalne izmjere zavarenog rotora nisu ograničene tehnološkim mogućnostima izradbe velikih i kvalitetnih otkivaka.

Naprezanja zbog rotacije u zavrenom su rotoru upola manja nego u montažnome, pa se disk oblikuje tako da mu se naprezanja malo mijenjaju po polumjeru. Zbog zavarivanja i naknadnog popuštanja zavareni se rotor ne gradi od austenitnih čelika velike čvrstoće. Nedostatak je zavarenog rotora otežana kontrola stanja materijala prilikom generalnog remonta.

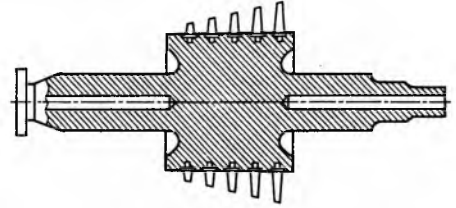
Osnovna karakteristika rada rotora visokotlačnog kućišta parne turbine jest visoka temperatura u području dovođenja pare ($> 530^\circ\text{C}$ na ulazu u turbinu), pri kojoj nastaje intenzivno pužanje. Zbog toga je osnovni tip rotora za visokotlačno kućište kovani monoblok-rotor, koji se sastoji od vratila i diskova izrađenih u jednom komadu. Zbog malog specifičnog obujma pare ti su rotori manjih izmjera i mogu se kovati u cjelini. Oni se često izrađuju sa središnjim provrtom, koji, pomoću periskopa i metodama ultrazvučne defektoskopije, omogućuje provjeru površine provrta i otklanjanje pogrešaka koje se najčešće nalaze na središnjoj liniji otkivka. Moguća je i periodična kontrola pogreške tijekom eksploatacije. Glavni je nedostatak monoblok-rotora nemogućnost zamjene oštećenih dijelova.

Kao rotor srednjotlačnog kućišta parne turbine može poslužiti jedan od opisanih tipova rotora, a njegov izbor ovisi o temperaturi pare na ulazu u kućište i o omjeru protoka na ulazu i izlazu kućišta.

Rotor plinske turbine. Za plinsku turbinu rotor može biti od diskova, zatim u obliku bubnja (sl. 57) ili kombinacija diskova i

bubnja. Rotor od diskova najčešće je bez središnjeg provrta, pa je čvršći, a izrađuje se od manjih pojedinačnih otkivaka. Primjenjuje se u jako opterećenim turbinama, posebice u turbinama mlaznih zrakoplovnih motora. Ako ima više stupnjeva, izrađuje se spajanjem pojedinačnih diskova vijcima, zavrtnjima i klinovima, radijalnim klinovima koji omogućuju temperaturne dilatacije spojenih elemenata te ozubljenjem koje osigurava centričnost i sprečavanje dodatnih naprezanja pri brzim temperaturnim promjenama.

Sl. 57. Rotor plinske turbine u obliku bubnja

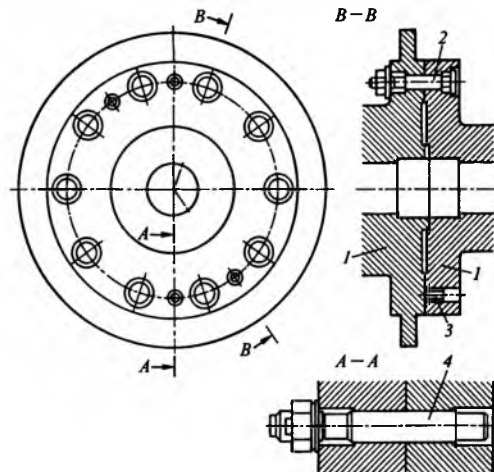


Rotor u obliku bubnja i kombinacija diskova s bubnjem konstrukcijom su veoma slični rotoru parnih turbina. Oni se mogu u potpunosti izraditi kovanjem ili zavarivanjem.

Rotor toplinski vrlo opterećene plinske turbine često se treba hladiti, što je moguće na tri načina: a) radijalnim puhanjem zraka na središnji dio diska i radijalnim širenjem prema periferiji, čime se sprečava dodir površine diska s vrućim plinovima; b) dovođenjem mlaza zraka na obod diska kroz niz provrta, cijevi ili malih sapnica smještenih u kućištu turbine; c) dovođenjem zraka kroz zatore između korijena lopatica i proreze u rotoru, uz intenzivno hlađenje i korijena lopatica i oboda diska.

Spojke. Spojke povezuju odvojene rotore pojedinih kućišta turbine te turbinu i pogonjeni stroj (generator, kompresor ili pumpu) u jednu cjelinu. One prenose zakretni moment s rotora na rotor, pa kakvoća njihove izradbe, montaže i centriranja uvelike određuje vibracijske karakteristike turboagregata.

Razlikuju se krute, polukrute i elastične spojke. Da bi se spriječile vibracije, krute spojke trebaju imati gotovo apsolutnu centričnost, da ne bi dopustile ni pomicanje ni lom linije progiba spojenih rotora. Najjednostavnija kruta spojka, koja najčešće služi za spajanje rotora pojedinih kućišta, prikazana je na slici 58. Poluspojke su izrađene zajedno s vratilima rotora koji se spajaju. Centriranje poluspojki postiže se pomoću prstenastog izdanka na jednoj poluspojki i utora na drugoj. Poluspojke se pritežu vijcima, koji se umeću u strogo osno simetrične, pažljivo obrađene provrte u poluspojka sa zazorom od $0,01 \dots 0,025 \text{ mm}$. Točan položaj i izmjere provrta postižu se zajedničkim razvrtanjem. Zakretni se moment predaje na račun trenja između čelnih površina poluspojki, koje se pojavljuje zbog pritezne sile ostvarene vijcima.



Sl. 58. Jednostavna kruta spojka. 1 poluspojke, 2 vijak, 3 provrta vijaka za razdvajanje poluspojki pri demontaži, 4 kontrolni vijci za točnost ponovne montaže

Polukrute i elastične spojke rjeđe se upotrebljavaju. Polukrute (poluelastične) spojke dopuštaju mali lom osi spojenih vratila, ali ne i njihovo aksijalno pomicanje, dok elastične spojke omogućuju aksijalni pomak i lom osi spojenih rotora.

Materijali za izradbu rotora. Za izradbu turbinskog rotora i vratila upotrebljavaju se čelici velike čvrstoće legirani s 1...3,5% kroma, molibdena, vanadija i nikla, koji trebaju biti vrlo otporni prema puzanju i toplinskom zamoru. Materijal rotora niskotlačnog kućišta treba imati veliku statičku čvrstoću, koja omogućuje siguran rad rotora pri velikim naprezanjima zbog djelovanja centrifugalne sile lopatica i samog rotora, veliku žilavost koja daje sigurnost od krugog loma te veliku otpornost prema koroziji.

Za izradbu diskova montažnog rotora upotrebljavaju se visokolegirani čelici s niklom ili molibdenom i vanadijem. Povećanim udjelom nikla, do 3,5%, poboljšavaju se mehanička svojstva, kakvoća toplinske obradbe i homogenost strukture diskova.

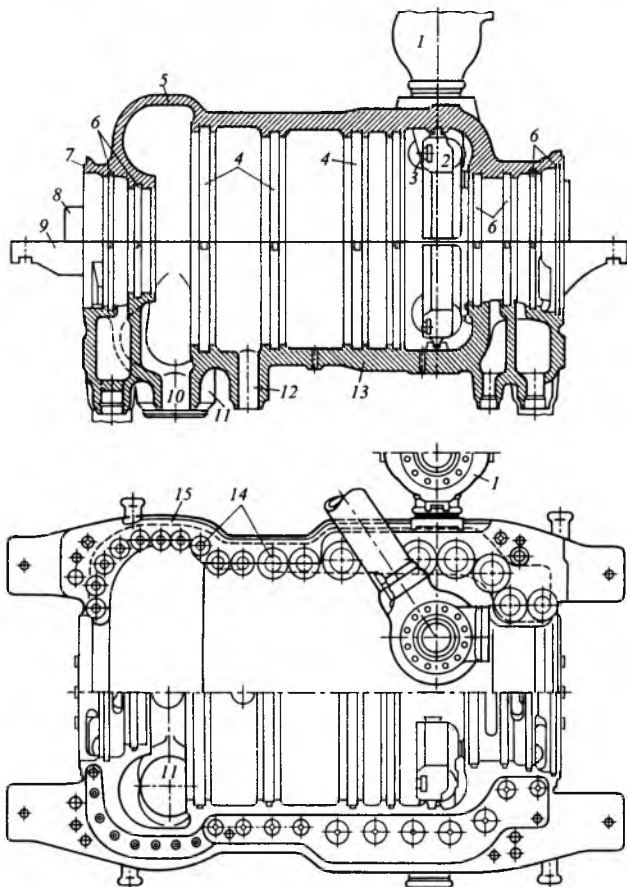
Turbinski stator

Pod statorskim se dijelom turbine razumiju nepomični dijelovi turbine: kućišta turbine s u njih ugrađenim kućištima ležajeva, umetci (unutrašnja kućišta) za učvršćenje dijafragmi, same dijafragme sa statorskim lopaticama i segmenti brtvi.

Uvjeti rada turbinskog statora. Uvjeti za rad statora povoljniji su nego uvjeti rada rotora stoga što stator nije izložen centrifugalnoj sili. Osnovno opterećenje koje djeluje na statorske dijelove jest razlika tlaka. Pod tim djelovanjem oni trebaju očuvati krutost i nepropusnost, a također i čvrstoću pri visokoj temperaturi kada nastaje puzanje.

Puzanje materijala uzrok je izobličenja prirubničkog spoja razdjelne ravnine te trajnog progiba dijafragmi i unutrašnjih kućišta. Relaksacijom napreznja u vijcima slabi pritezna sila i propušta razdjelna ploha.

Nedovoljna krutost može uzrokovati velika uzajamna pomicanja rotora i statora i njihovo međusobno zapinjanie. Zbog velikih izmjera osobito je teško osigurati krutost niskotlačnog



Sl. 59. Visokotlačno kućište s jednom stijenkom. 1 regulacijski ventili, 2 sapničke komore, 3 utori za sapničke segmente regulacijskog stupnja, 4 utori za umetke za dijafragme, 5 gornja polovica kućišta (poklopac), 6, 7 utori za umetke segmenata vanjskih brtvi, 8, 15 prirubnice gornje i donje polovice kućišta, 9 noga kućišta, 10, 12 priključci oduzimanja pare za regenerativno predgrijavanje kondenzata, 11 izlazni priključak (ispuh), 13 donja polovica kućišta, 14 provrti s navojem za vijke za spajanje prirubnice

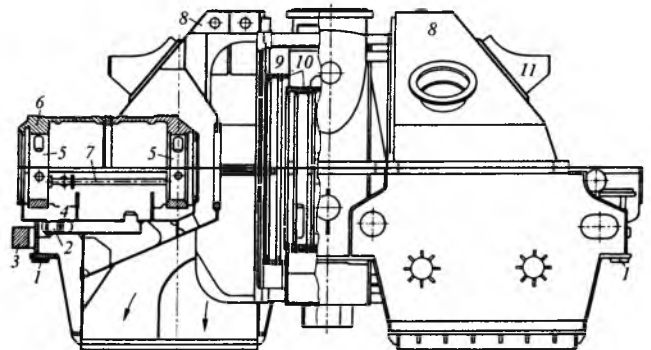
kućišta kondenzacijskih turbina velikih snaga, posebice onih u nuklearnim elektranama.

Kao posljedica nedovoljne nepropusnosti nastaje štetno prostrujavanje pare i smanjuje se korisnost. Posebno je opasno prostrujavanje pare u turbini koja radi sa zasićenom parom, gdje kapljice vlage, koje se gibaju velikom brzinom, mogu uzrokovati eroziju statorskih elemenata. Nepropusnost se osigurava prirubničkim spojem od dviju uzdužnih prirubnica spojenih vijcima i najčešće uvrnutih u donju polovicu kućišta.

Prilikom brzih puštanja u rad i naglih promjena opterećenja, što je popraćeno brzim temperaturnim promjenama u protočnom dijelu, u elementima statora, u prvom redu u visokotlačnom i srednjotlačnom kućištu, nastaju temperaturna napreznja, a posljedice su njihova periodičnog ponavljanja zamor materijala i pukotine.

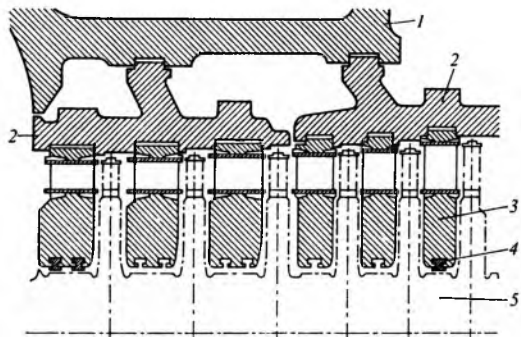
Visokotlačno i srednjotlačno kućište. U parnoj turbini s umjerenim ulaznim parametrima visokotlačno kućište ima jednu stijenku (sl. 59), a takvo je i srednjotlačno kućište gotovo svih parnih turbina. S povećanjem ulaznih parametara konstrukcija s jednom stijenkom postaje neracionalna, jer radi postizanja nepropusnosti treba izvesti glomazan prirubnički spoj. To otežava slobodno toplinsko rastezanje kućišta pri brzim promjenama režima rada i povećava toplinska napreznja u prirubnici. Pri tim promjenama nastaju ujedno i razlike u brzini istezanja rotora oplakivanog u potpunosti radnim fluidom i glomaznog kućišta koje radni fluid tek djelomice oplakuje. To se sprečava visokotlačnim kućištem s dvije stijenke. Na svaku stijenku djeluje samo dio razlike tlaka, što omogućuje gradnju kućišta s tanjim stijenka i lakšim prirubnicama. Visokim temperaturama izložena je samo stijenka unutrašnjeg kućišta. Zagrijavanje vijaka prirubničkog spoja kućišta omogućuje brži start turbina iz hladnog stanja.

Niskotlačno kućište. Osnovna je karakteristika niskotlačnog kućišta parne turbine njegove velike izmjere, koje su potrebne zbog velikog obujma pare i zbog težnje da se što više smanji gubitak uzrokovan izlaznom brzinom pare. Lijevano kućište, kakva su i visokotlačna i srednjotlačna, imalo bi preveliku masu, pa se niskotlačno kućište kondenzacijske turbine gradi zavarivanjem od tankih čeličnih ploča. Iako razlika tlaka koja djeluje na niskotlačno kućište nije velika, zbog velikih izmjera treba ugraditi mnogo rebra i podupirača da bi se postigla potrebna krutost, te, osim horizontalne, i nekoliko vertikalnih razdjelnih ravnina s prirubnicama. Niskotlačno je kućište najčešće s jednom stijenkom (sl. 60), a rjeđe s dvije stijenke.



Sl. 60. Niskotlačno kućište s jednom stijenkom. 1 uzdužni klinovi, 2 odvod ulja iz kućišta ležaja, 3 vertikalni klin, 4 donja polovica kućišta ležaja, 5 utori za ugradnju blazinica nosivih ležajeva, 6 poklopac kućišta ležaja, 7 cjevovod za dovod ulja, 8 ispušna kućišta, 9 umetak za dijafragme, 10 utori za ugradnju dijafragmi, 11 atmosferski ventili sustava zaštite

Umetci za dijafragme. Dijafragme parne turbine ugrađuju se izravno u kućište ili u umetke koji udružuju nekoliko dijafragmi (sl. 61). Kućište s umetcima ima niz prednosti: veliki prstenasti prostor između oslonaca susjednih umetaka čini komore koje su pogodine za oduzimanje pare pri regenerativnom predgrijavanju napojne vode, brze se temperaturne promjene u protočnom dijelu turbine prenose usporeno na unutrašnju površinu kućišta, a montaža je turbine jednostavnija, pa se stoga umetci katkad ugrađuju i u turbini bez oduzimanja pare. Nedostatak je kućišta s umetcima veći promjer kućišta, a time i veća sila razdjeljanja na prirubnicama, što povećava izmjere prirubničkog spoja.



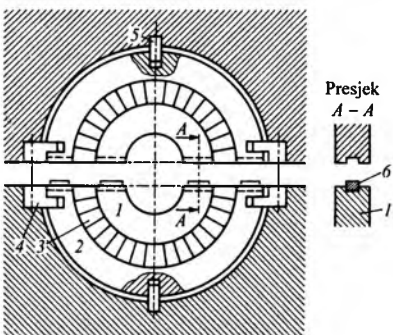
Sl. 61. Kućište s umetcima. 1 kućište, 2 umetci, 3 dijafragme, 4 brtva, 5 rotor

Kućišta plinske turbine. U plinskoj je turbini, u usporedbi s parnom, kućište izloženo višim temperaturama, ali i mnogo nižim tlakovima, koji iznose $1 \dots 3$ MPa. Ono se najčešće izrađuje od perlitnog čelika, i to zavarivanjem pojedinačnih komada. Veća plinska turbina ima horizontalnu razdjelnu ravninu, kućišta s više stupnjeva zbog lakše obradbe i vertikalnu razdjelnu ravninu, ili se sastoji od prstenastih dijelova spojenih prirubničkim spojem. Zbog naglih promjena toplinskog opterećenja potrebno je postići što veću krutost kućišta uz što manje debljine stijenke, što bitno otežava zadatak konstruktora.

Kućišta je simetričnog poprečnog presjeka i jednolične debljine stijenke, kako temperature deformacije, koje se mogu pojaviti pri čestim i naglim temperaturnim promjenama, ne bi na unutrašnjoj strani kućišta uzrokovale lom. Zbog toga se kućište turbine s jednim stupnjem ili s malim brojem stupnjeva gradi bez horizontalne razdjelne ravnine, uz mogućnost aksijalnog montiranja i demontiranja (tzv. tip *barrel*).

Da bi se snizila temperatura stijenke, kućište je zaštićeno zaslonom od vatrootpornog austenitnog čelika, a prostor između stijenke kućišta i zaslona ispunjen je materijalom za toplinsku izolaciju. Zaslon je perforiran kako bi se izbjeglo naprezanje zbog djelovanja razlike tlaka. Temperatura materijala kućišta može se sniziti i strujanjem rashladnog zraka kroz prostor između oplata i kućišta. Neke turbine imaju zrakom hlađeno kućište s dvije stijenke. Unutrašnja stijenka toga kućišta izložena je višoj temperaturi i manjoj razlici tlaka, a vanjska stijenka bitno nižoj temperaturi i većoj razlici tlaka.

Dijafragme i sapnički segmenti. Turbinske dijafragme prstenaste su pregrade sa statorskim lopaticama, a sastoje se od tijela, statorskih lopatica i oboda preko kojeg su u dodiru s umetcima ili s kućištem. Dijafragma je građena od dviju polovica, dviju poluprstenastih ploča s horizontalnom razdjelnom plohom, kako bi se mogao ugraditi rotor (sl. 62). Međusobni položaj polovica dijafragmi u aksijalnom se smjeru učvršćuje klinom ugrađenim u razdjelnoj ravnini, a u poprečnom smjeru posebnim zatikom ili malim vertikalnim klinom.



Sl. 62. Turbinska dijafragma. 1 tijelo, 2 obod, 3 statorske lopatice, 4 držači za ovjes dijafragme u kućište, 5 radijalni klin, 6 klin u razdjelnoj ravnini

Donja je polovica dijafragme slobodno ovješena u kućište ili umetak pomoću držača, tako da se njezina horizontalna razdjelna ravnina podudara s istom ravninom kućišta ili umetka. Uzdužnim se klinom učvršćuje vertikalna ravnina i osigurava centriranje. Gornje se polovice većine dijafragmi ovjese u gornju polovicu kućišta ili umetka, pa prilikom njihova zatvaranja slobodno leže na razdjelnoj ravnini donje polovice. Gornja i donja polovica di-

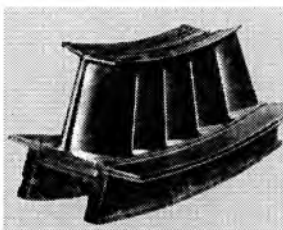
jafragmi posljednjih stupnjeva, koje imaju velike radialne izmjere, često se prije zatvaranja kućišta povezuju vijcima.

Glavno opterećenje na dijafragmu jest razlika tlaka u smjeru strujanja pare. U prvim stupnjevima visokotlačnog i srednjotlačnog kućišta, gdje je temperatura visoka, pod djelovanjem razlike tlaka nastaje puzanje i dijafragma dobiva trajni progib u smjeru strujanja pare.

Lijevane dijafragme upotrebljavaju se u niskotlačnim kućištima pri nižoj temperaturi, pa se izrađuju od sivog lijeva. Čelične, odvojeno izrađene lopatice umeću se u kalup i zalijevaju u obod i tijelo dijafragme. Potom se obrađuje razdjelna ravnina, preko nje se spajaju dvije polovice dijafragme i dalja se obradba provodi u sastavljenom stanju. Lijevane dijafragme s dugim lopaticama izrađuju se s kosom razdjelnom ravninom da se lopatica koja se u njoj nalazi ne bi morala rezati, što bi izobličilo tok pare i uzrokovalo dodatne vibracije rotorskih lopatica.

Zavarene dijafragme upotrebljavaju se za područje visokih tlakova i temperatura, za koje je visina statorskih lopatica malena. Prvo se odvojeno od valjanog profila ili glodanjem izrađuju statorske lopatice, a zatim prešanjem bandaže, u kojima se štančanjem načine otvori istovjetni s profilom lopatice s potrebnim korakom i kutom ugradnje. Zatim se ti elementi međusobno zavaruju, a k njima se privaruju obod i tijelo dijafragme.

Statorske lopatice prvih regulacijskih stupnjeva, *sapnice*, u parnoj su turbini pričvršćene izravno u kućište ili u međuelemente za pričvršćenje. Statorske lopatice plinske turbine pričvršćuju se zavarivanjem, zakivanjem ili na koji drugi način u dijafragmu ili se nekoliko lopatica (4...6) spoji u segment (sl. 63) uz mogućnost toplinskog širenja lopatica. Statorske lopatice prvih stupnjeva često se hlade zrakom. Zrak s oboda (1) ulazi u šuplju lopaticu i izlazi kroz otvore (2) na bridu lopatice (sl. 64). Na ulaznom bridu i izlaznom dijelu lopatice stvara se zračni film koji štiti njezinu površinu od dodira vrućih plinova.



Sl. 63. Segment statorskih lopatica plinske turbine



Sl. 64. Zračno hlađenje statorskih lopatica

Materijali za izradbu statorskih elemenata. Zbog visoke temperature upotrebljavaju se za ulazne dijelove visokotlačnog i srednjotlačnog kućišta legirani vatrootporni čelični ljevovi. Za unutrašnja se kućišta katkad uzima nehrđajući čelični ljev legiran kromom, molibdenom, vanadijem i niobijem. Taj je ljev vrlo otporan prema eroziji, pa je prikladan za unutrašnja kućišta turbina koje rade sa zasićenom parom. Za vanjska se kućišta primjenjuju i jeftiniji čelični ljevovi, dok se upotrebom boljih čelika smanjuju izmjere stijenke i prirubnice.

Toplinski manje opterećeni lijevani dijelovi izrađuju se od ugljičnih čeličnih ljevova. Za dijafragme koje rade pri temperaturama nižim od 250°C uzima se sivi ljev, dok se pri nešto višim temperaturama upotrebljavaju legirani sivi ljevovi. Statorske lopatice i bandaže zavarenih dijafragmi izrađuju se od nehrđajućih čelika legiranih kromom.

Najopterećeniji su elementi visokotlačnog i srednjotlačnog kućišta vijci prirubnica. Za vijke koji se nalaze u temperaturnom području od $\sim 535^\circ\text{C}$ upotrebljavaju se čelici legirani kromom, molibdenom i vanadijem, za temperaturu manju od 400°C krom-molibdenski čelici, a manju od 300°C ugljični čelici.

Brtve i brtvljenje

U turbini se primjenjuje vanjsko i unutrašnje brtvljenje te brtvljenje dijafragmi i rotorske rešetke. Vanjsko brtvljenje spre-

čava istjecanje radnog fluida iz turbine na mjestu gdje vratilo prolazi kroz kućište, unutrašnje brtvljenje odvaja prostore protočnog dijela kućišta s različito usmjerenim tokovima pare, brtvljenje dijafragme sprečava prostrujavanje pare između dijafragme i vratila, a brtvljenje rotorske rešetke omogućuje brtva iznad bandaže.

U turbinama se upotrebljavaju *labirintne brtve*. One trebaju osigurati minimalno prostrujavanje, zazoru trebaju biti što manji, ali ipak dovoljno veliki da se brtveni šiljci ne dodiruju s rotorom. Dopušten je samo dodir koji uzrokuje lagano trošenje šiljaka, dok intenzivnim dodirivanjem nastaje trajni progib vratila zbog toplinskih deformacija. Slučajno zapinjanje, koje se npr. pojavljuje pri vibriranju kada rotor prelazi kritičnu brzinu vrtnje, ne bi smjelo biti razlogom intenzivnog trošenja brtvi ili zagrijavanja vratila. Detaljnije o tom načinu brtvljenja v. *Elementi strojeva*, TE 5, str. 308.

Ležajevi i ugradnja na temelj

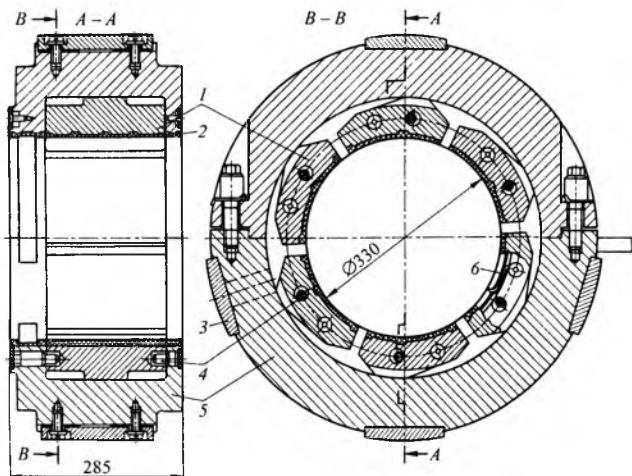
Ležajevi služe za održavanje stabilnog položaja turbinskog rotora. Obično se pod turbinskim ležajem razumije ukupnost statorskih elemenata, koji uključuju blazinicu, njezin umetak, kad postoji, te kućište ležaja. Često se u jednom kućištu ležaja nalazi nekoliko blazinica za susjedne rotore, spojka i određeni elementi za regulaciju, zaštitu i upravljanje. Međutim, ležajem se katkada označuje samo blazinica ležaja, tj. element koji neposredno preuzima radijalno i aksijalno opterećenje.

U parnoj se turbini upotrebljavaju samo klizni ležajevi (nosivi i odzivni), u kojima u normalnom radu između rotirajućih i mirujućih dijelova uvijek postoji tanki uljni film. Klizni ležajevi imaju potrebnu sigurnost tijekom dugotrajnog radnog vijeka i uz pravilnu izradbu i pažljivu eksploataciju dobro podnose djelovanje statičkog i dinamičkog opterećenja. U plinskoj se turbini uz klizne ležajeve, zbog manjih promjera rukavaca vratila, upotrebljavaju i standardni ili specijalni kotrljajući ležajevi (v. *Elementi strojeva*, TE 5, str. 245).

Već prema broju rotorskih vratila i načinu njihova spajanja, turboagregat može imati od tri do dvanaest nosivih ležajeva i jedan ili dva odzivna ležaja.

Nosivi ležaj prima i prenosi na elemente statora radijalno opterećenje od vlastite mase rotora, od neuravnoteženih centrifugalnih sila i decentriranja te od aerodinamičkih sila, koje se pojavljuju u protočnom dijelu turbine i u brtvama. Konstrukcija nosivog ležaja i režim rada trebaju osigurati dopuštene zapore u protočnom dijelu i u brtvama zbog očuvanja velike ekonomičnosti, te ujedno isključiti mogućnost radijalnog zadiranja.

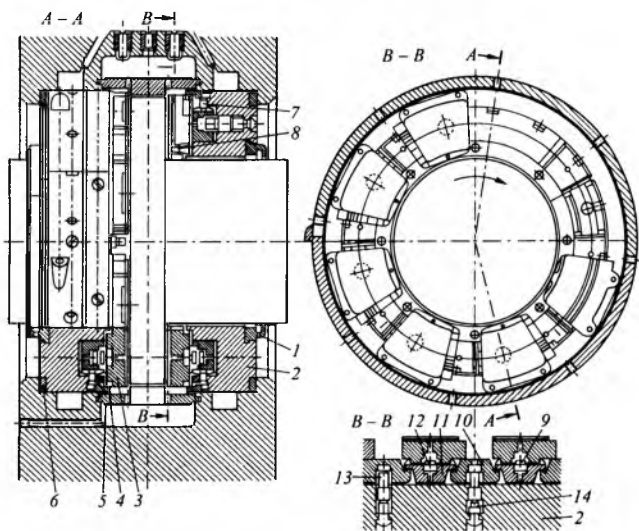
Osim cilindričnih nosivih blazinica s jednim uljnim klinom i eliptičnih s dva uljna klina, u novije se vrijeme, posebno za velike obodne brzine rukavaca, upotrebljavaju segmentni ležajevi s više klinova (sl. 65). Rukavac vratila smješten je između nekoliko segmenata, koji se mogu zakretati oko nosivog rebra. Na dodirnu se površinu rukavca vratila i segmenata dovodi ulje, pa se prilikom rotacije stvaraju uljni klinovi.



Sl. 65. Segmentni nosivi ležaj sa šest segmenata. 1 segmenti, 2 uljna brtva, 3 ugradbene pločice, 4 zatik, 5 blazinica, 6 termopar

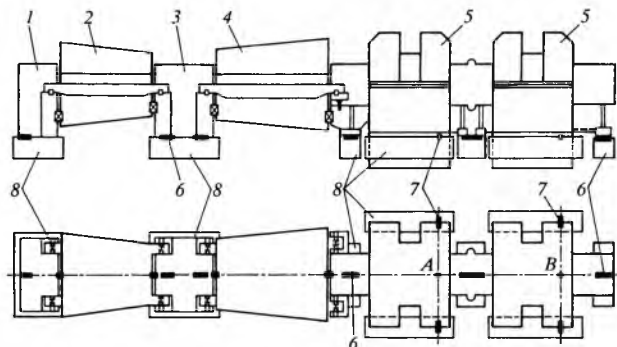
Odrivni ležaj preuzima rezultantnu aksijalnu silu koja djeluje na rotirajući rotor i prenosi je na statorske elemente. On istodobno učvršćuje položaj rotora u turboagregatu i aksijalne zapore u protočnom dijelu turbine i u brtvama. Odrivni se ležaj najčešće smješta u kućište zajedno s blazinicom jednog od nosivih ležaja.

U parnoj se turbini primjenjuju samo segmentni odzivni klizni ležajevi (sl. 66). Optimalan broj odzivnih segmenata s jedne strane ležaja iznosi 6-8. Iako je u gotovo svim turbinama aksijalna sila koja djeluje na rotor uvijek usmjerena u jednu stranu, ipak se nastoji spriječiti mogućnost pomaka rotora u suprotnom smjeru, jer pomak od nekoliko milimetara pri montaži ili namještanju zazora može biti uzrok oštećenja brtvenih šiljaka. Stoga gotovo uvijek odzivne segmente treba ugraditi i s druge strane odzivnog diska aksijalnog ležaja, pa i u turbinama u kojima se smjer aksijalne sile u pogonu ne mijenja. Veću nosivu sposobnost imaju segmenti od dva ili više slojeva koji se sastoje od čelika, bakra i bijele kovine i koji se hlade izravno uljem za podmazivanje.



Sl. 66. Odrivni ležaj. 1 brtveni prsten, 2 umetak, 3 odzivni segment, 4 prsten, 5 prstenasti štit, 6 ugradbeni prsten, 7 radijalni zatik, 8 sapnica, 9 ravni oslonac, 10 nosač, 11 nosač segmenta, 12 kuglasti oslonac, 13 oslonac na umetku, 14 osjetnik aksijalnih sila

Ugradnja turbine na temelj. Način ugradnje odvojenih turbinskih kućišta na temelj ovisi o uvjetima njihova rada. Na slici 67 prikazana je ugradnja višekucišne turbine koja se sastoji od jednog visokotlačnog i srednjotlačnog kućišta i od dvaju niskotlačnih kućišta. Visokotlačno i srednjotlačno kućište oslanjaju se na samonosive ležajeve, a niskotlačna kućišta imaju ugradbene ležajeve. Na prvo niskotlačno kućište zavarene su horizontalne ploče, na koje se preko nogu oslanja srednjotlačno kućište. U vertikalnim ravninama svih turbinskih kućišta i kućišta ležajeva smještenih između njih te u temeljnim pločama ugrađeni su uzdužni klinovi, uzduž kojih se turbina može pomicati. Na temeljnim su pločama ugrađeni i poprečni klinovi, pa presjeci horizontalne ravnine temeljnih ploča, vertikalne ravnine turbine i osi po-



Sl. 67. Ugradnja višekucišne turbine na temelj. 1 prednji ležaj, 2 visokotlačno kućište, 3 srednji ležaj, 4 srednjotlačno kućište, 5 niskotlačna kućišta, 6 uzdužni klinovi, 7 poprečni klinovi, 8 temeljne ploče

prečnih klinova čine tzv. *mrtve točke*. To su točke u prostoru u kojima je turbina nepomična i od kojih se toplinski širi i pomiče. Turbina prikazana na slici 67 ima dvije mrtve točke. Od prve od njih (točka A) sva se turbinska kućišta izduljuju ili skraćuju uzduž uzdužnih klinova kao jedna cjelina. Druga mrtva točka (točka B) učvršćuje položaj drugog niskotlačnog kućišta. Da ne bi ometalo međusobno premještanje niskotlačnih kućišta, kućište ležaja, smješteno između njih, opremljeno je elastičnim elementom.

Mrtva se točka postavlja u području izlaznih niskotlačnih kućišta. Time se u kondenzacijskim turbinama sprečava jače pomicanje kondenzatora, kojemu masa zajedno s vodom može biti veća od mase turbine, a u protutlačnim se turbinama sprečava pomicanje teško deformabilnih parovoda velikog promjera. Prilikom izbora broja i položaja mrtve točke za visokotlačna i srednjotlačna kućišta treba uzeti u obzir nekompenzirane toplinske dilatacije parovoda svježje pare i parovoda međupregrijanja.

PROIZVODNJA I PRIMJENA TOPLINSKIH TURBINA

Parne turbine. Glavno je područje primjene parnih turbina pogon generatora za proizvodnju električne energije. Više od 84% instalirane snage električnih mreža krajem XX. st. otpada na toplinske turbine, a pritom više od 95% električne energije proizvedene u toplinskim turbinama daju parne turbine (kondenzacijske turbine ili turbine s oduzimanjem pare).

Razvoj parnih turbina, prema veličinama stanja pare, jediničnoj snazi i izvedenim konstrukcijama moguće je podijeliti u nekoliko etapa. Zbog toga što nije postojao materijal za visoke tlakove i temperature, do Prvoga svjetskog rata gradile su se turbine niskih parametara pare, tlaka $1,2 \cdot 1,6$ MPa i temperature $300 \cdot 350$ °C. Za izradbu turbina primjenjivalo se uglavnom lijevano željezo. Jedinčna snaga iznosila je do 6000 kW pri brzini vrtnje 50 s^{-1} , 15000 kW pri brzini vrtnje 25 s^{-1} i 30000 kW pri brzini vrtnje $16,6 \text{ s}^{-1}$ i $12,5 \text{ s}^{-1}$.

U razdoblju između Prvoga i Drugoga svjetskog rata naglo se povećavaju jedinčna snaga, veličine stanja radnog fluida i ekonomičnost parnih turbina. Ustanovilo se da se najveća korisnost može postići preradbom manjega toplinskog pada u pojedinom stupnju. Teži se povećanju broja stupnjeva i pri nižim parametrima pare. Radi većeg broja stupnjeva grade se turbine s dva, tri i više kućišta. Za izradbu turbina primjenjivao se uglavnom lijevani čelik, a zatim i legirani čelik.

Turbine snage veće od 50 MW postižu u tom razdoblju brzinu vrtnje 25 i 30 s^{-1} , a turbine sa snagom većom od 85 MW obično imaju više osovine. Tvrtka Brown Boveri već je 1928. za termoelekttranu u New Yorku proizvela dvoosovinsku parnu turbinu snage 160 MW. S povećanjem snage pojavljuje se i težnja za povećanjem brzine vrtnje. Godine 1937. Lenjingradski metalni zavod (LMZ) prvi je u svijetu proizveo dvokucišnu parnu turbinu snage 100 MW i brzine vrtnje 50 s^{-1} .

Istodobno s usavršavanjem konstrukcija parnih turbina većih snaga, umjerenog tlaka od $2 \cdot 3$ MPa i temperature do 400 °C, u razdoblju od 1920. do 1940. teži se povećanju veličina stanja pare. One dostižu tlak od $12 \cdot 18$ MPa i temperature od $500 \cdot 550$ °C zahvaljujući primjeni legiranih čelika. Turbine tlaka do 18 MPa obično su bile protutlačne, manje snage, od kojih je izlazna para služila za turbine nižeg tlaka. To su bile tzv. turbine prethodnice. One su omogućile prijelaz na rad s višim veličinama stanja pare, a da se pritom nije moralo obnavljati cijelo postrojenje, dok su nova postrojenja većih snaga imala više veličine stanja. Tako npr. do 1940. jednoosovinske dvokucišne parne turbine američke tvrtke Westinghouse dostižu snagu 165 MW, tlak 9 MPa, temperaturu 500 °C i brzinu vrtnje 30 s^{-1} .

Poslije Drugoga svjetskog rata u svim tehnički razvijenijim europskim zemljama i u Americi, naglo se razvija energetika. To uzrokuje sve veći rast jediničnih snaga parnih turbina. Istodobno se teži visokim parametrima pare i međupregrijanju pare primjenom visokolegiranih čelika, tako da se danas u svijetu grade termoelektre s kondenzacijskim parnim turbinama jedinične snage 1200 i 1300 MW. Veličine stanja pare na ulazu u turbinu klasične termoelektre iznose danas $12 \cdot 25$ MPa (katkad i 35 MPa) te $520 \cdot 580$ °C, a u posebnim slučajevima do 650 °C. Temperature veće od 565 °C zahtijevaju primjenu još uvijek sku-

pih austenitnih čelika. Zbog toga se danas uglavnom za turbine većih snaga uzima para temperature 540 °C.

Turbine većih jediničnih snaga grade se danas s više kućišta, s visokotlačnim, srednjotlačnim i, već prema snazi, s jednim ili više niskotlačnih kućišta. Kućišta mogu biti povezana u seriju koja najčešće pokreće samo jedan generator. Zbog poteškoća oko gradnje velikih generatora, najveće jedinice turboagregata imaju katkad dvije osovine i pokreću dva generatora. Turbine srednjih snaga, od $150 \cdot 300$ MW, radi smanjenja ukupne duljine obično imaju visokotlačni i srednjotlačni dio u jednom kućištu. Niskotlačno se kućište, zbog smanjenja duljine zadnjih lopatica, izvodi dvoprotočno. Turbine većih snaga grade se s dvoprotočnim srednjotlačnim kućištem, a turbine najvećih snaga i s dvoprotočnim visokotlačnim kućištem. Visokotlačna i srednjotlačna kućišta akcijske turbine obično imaju $6 \cdot 12$ stupnjeva, a reakcijske turbine do 18 stupnjeva. Dvoprotočno niskotlačno kućište ima $3 \cdot 8$ stupnjeva u jednom protoku u oba tipa turbina.

Jedinčna snaga turbina povećavala se poslije Drugoga svjetskog rata vrlo brzo. To razdoblje karakterizira i nagli razvoj turbina sa zasićenom parom za nuklearne elektrane. Prva nuklearna elektrana puštena je u pogon 1954. godine u tadašnjem SSSR, a imala je snagu 5 MW. Danas se za nuklearne elektrane grade turbine sa zasićenom parom najvećih snaga 1300 i 1400 MW, tlaka $4 \cdot 7$ MPa, brzine vrtnje u Europi 25 s^{-1} (u Americi 30 s^{-1}) i duljine rotorskih lopatica zadnjeg stupnja do 1450 mm. Gradnjom turbina velikih jediničnih snaga sa zasićenom parom svladani su problemi strujanja velikih protočnih volumena, separacije vlage, međupregrijanja nakon separacije vlage i strujanja vlažne pare u visokotlačnom dijelu turbine.

Parna turbina nije ograničavajući faktor veličine turbopostrojenja, već je to veličina ukupne instalirane snage u električnoj mreži i veličina električnoga generatora. S obzirom na mogućnost ispada bloka, njegova maksimalna snaga može biti 10% od snage u mreži. S povećanjem veličine bloka povećava se korisnost i djelotvornost konverzije energije, a smanjuje se specifična potrošnja topline i investicijski troškovi na jedinicu snage. Povećanjem snage bloka relativno najviše pojeftinjuju elektronička oprema i sustavi upravljanja, te građevinski dio elektrane, a poskupljuju jedino cjevovodi i armatura.

Osnovne su smjernice daljeg razvoja parnih turbina povećanje jedinične snage i korisnosti pri velikoj pouzdanosti i prilagodljivosti suvremenim potrebama eksploatacije, što zahtijeva velike znanstvene, konstrukcijske i tehnološke napore. Primjena visokih natkritičnih parametara i međupregrijanja pare do početne temperature izmijenila je konstrukciju turbina velikih jediničnih snaga i povećala broj kućišta. S povećanjem jedinične snage turbina ulazu se i naporu za smanjenje broja niskotlačnih kućišta povećanjem duljine lopatica zadnjeg stupnja. Granična snaga turbine određena je najvećim mogućim protokom pare kroz zadnji stupanj pri usvojenom tlaku u kondenzatoru. U današnjim je turbinama moguće uz tlak u kondenzatoru do 12 kPa postići snagu do 2000 MW.

Ako se ograniči broj kućišta turbine zbog duljine rotora, koji se lakše vibracijski uzbuđi što je dulji, jedini je put daljeg povećanja snage povećanje izlazne površine zadnjeg stupnja, tj. povećanje duljine rotorskih lopatica. Omjer srednjeg promjera zadnjeg stupnja i duljine lopatica nije u posljednje doba manji od 2,5. Povećanje jedinične snage pomoću dvoosovinskih turbina nije rješenje, jer su ekonomski pokazatelji dokazali prednost jednoosovinskih turbina. Bez obzira što su se 1957. godine u SAD ugrađivale dvoosovinske turbine od 500 MW, 1962. godine od 1000 MW i 1967. godine od 1300 MW, a jednoosovinske ih turbine stizale, ne treba očekivati dalje povećanje snage pomoću dvoosovinskih turbina.

U posljednje su doba proizvođači turbina razradili projektne varijante jednoosovinskih turbina snage $1800 \cdot 2400$ MW. Te turbine imaju 4 i 6 izlaza, s duljinom rotorskih lopatica zadnjeg stupnja 1800 mm i 1900 mm. Smanjenjem brzine vrtnje od 50 s^{-1} na 25 s^{-1} pri jednakim naprezanjima stupnja moguće je povećati duljinu zadnjih rotorskih lopatica, a time i propusnu moć i snagu turbine. Međutim, postoji stalna težnja da se maksimalne snage postignute pri nižoj brzini vrtnje ostvare i pri brzini vrtnje od 50 s^{-1} , dakle pri manjoj masi i manjim izmjerama turbine.