

Szuperötvözet egykristályok

Drágakövek a gázturbinákban

A mai, korszerű repülőgépeket szinte kizárólag gázturbinákkal, vagy más néven sugárhajtóművekkel szerelik fel, de használnak gázturbinákat erőművekben is. A gázturbina az egyik legfejlettebb energiaátalakító berendezés. Működése során a gázturbina (1. ábra) környezeti nyomású gázt (sugárhajtómű esetén levegőt) szív be, amelyet kompresszorában nagy nyomásra sűrít, az égéstérben üzemanyagot kever hozzá, és meggyújtja a keveréket. Az így keletkező magas hőmérsékletű és nagy nyomású gáz forgatja a turbinát, majd a fúvókákon át a környezetbe távozik. Az első működő modelleket 1939-ben használták fel a repülőgépgyártásban és az energiatermelésben. Azóta, tervezők és kutatók generációinak munkája nyomán, a gázturbinák termikus hatásfoka az akkori 18-ról 60 százalékra nőtt. Mint minden hőerőgépnek, a gázturbinának is annál nagyobb a hatásfoka, minél nagyobb a munkaközeg legmagasabb és legalacsonyabb hőmérséklete közötti különbség. Ez azt jelenti, hogy a hatásfok növeléséhez az égéstérből a munkatermelő részbe kilépő gázkeverék hőmérsékletét a lehető legmagasabbra kell emelni. A turbina bemenő részére érkező gáz hőmérséklete a korszerű, nagyteljesítményű sugárhajtóműveknél elérheti az 1650 °C-ot (a nem repülési célú turbináknál ez a hőmérséklet alacsonyabb, 1500 °C alatt marad). Ezt a magas hőmérsékletet kell elviselniük a turbina terelőlemezeinek és a turbinalapátoknak. Ez utóbbiak ráadásul még percnként akár 10000-et meghaladó fordulatszámra forognak is. Gondoljuk végig, hogy ez milyen mechanikai igénybevételeket jelent! Olvadáspontjukhoz közeli magas hőmérsékleten, állandó erő hatására az anya-

gok – még a szilárdsági határuknál jóval alacsonyabb mechanikai feszültségek mellett is – időben lassan, de változtatják alakjukat: ezt a folyamatot kúszásnak, vagy tartósfolysnak nevezzük. A forgó alkatrészek az állandó terhelő erő mellett még időben periodikusan változó terhelésnek is ki vannak téve, ezt az igénybevételt fárasztásnak, a hatására elszennvedett károsodást fáradásnak nevezzük. A fáradás jellemzője, hogy a nagy ciklusszám miatt még a folyáshatárhoz képest igen alacsony amplitúdójú feszültség-ingadozások mellett is viszonylag hamar az anyag törésére vezethet. Mindehhez járul még a magas hőmérsékletű közeg igen agresszív korróziós hatása. Nyilvánvaló tehát, hogy a turbinalapátok konstrukciója – anyaguk és felépítésük – kulcskérdés a modern gázturbinák teljesítményének növelésénél.

Manapság a turbinákban a legmagasabb hőmérsékleteknek kitett terelőlemezeket és turbinalapátokat különlegesen magas olvadáspontú nikkeltötvözetekből, úgynevezett nikkeltötvözetekből készítenek, amelyekben összesen körülbelül 10at% titánt és alumíniumot ötvöznek a nikkellel. A szuperötvözetek legújabb generációi számos további adalékelemet (leggyakrabban krómot, molibdént, wolframot, tantal és réniomat) is tartalmaznak. Ezek az ötvözetek megőrzik szilárdságukat, és ellenállnak a korrózióknak extrém magas hőmérsékleteken is. (A szuperötvözetekről számos további információt találhatunk az interneten a <http://en.wikipedia.org/wiki/Superalloy> címről elindulva.) Mivel még ezek a szuperötvözetek is kilágyulnak és megolvadnak 1200–1350 °C közötti hőmérsékleteken, az égéstérhez legközelebb el-



helyezkedő alkatrészeket hűteni kell ahhoz, hogy üzemi hőmérsékletük ne haladja meg olvadáspontjuk 0,8–0,9-szeresét, itt ugyanis elveszítik szilárdságukat és tönkremennek. A hűtés miatt a turbinalapátok bonyolult öntött szerkezetek, amelyekbe jól megtervezett belső levegőjáratokat, felületükre pedig gondosan megtervezett elrendezésben lyukakat helyeznek el, hogy a kompresszorból odavezetett hideg levegő megfelelően hűtse a lapátok felületét. Az oxidáció és egyéb nemkívánatos szennyeződések elkerülésére az öntést vákuumkamrákban végzik. Öntés után a legmagasabb hőmérsékleteknek kitett lapátok felületét még hőszigetelő kerámiabevonattal is elláthatják, ami mintegy 150 fokkal hőmérséklet-emelést tesz lehetővé. Felmerül a kérdés, hogy miért nem készítik a turbinalapátokat, esetleg az egész turbinát teljesen kerámiából, ami hőálló és korróziósnak is ellenáll. Vannak ilyen próbálkozások, amelyeket azonban megnehezít a kerámiaanyagok ridegsége, ami miatt nem lehet hozzájuk egy meghatározott folyáshatárt rendelni. Ezzel a kérdéssel, a rideg anyagok mechanikai tulajdonságainak jellemzésével, majd sorozatunk egy későbbi cikkében foglalkozunk részletesebben.

A szokványos öntési eljárásokkal készített darabok az öntőformában

1. ábra. Egy gázturbina-hajtómű sematikus képe



végbemenő megszilárdulás során keletkező piciny (jellemzően 1 és 100 mikrométer közötti) egyenlőtengelyű kristályokból, úgynevezett szemcsékből felépülő háromdimenziós mozaikok (2.a ábra). Minden egyenlőtengelyű szemcse kristályrácsának orientációja eltér a szomszédjaitól. A szomszédos szemcséket az anyag belsejében lévő határfelületek, a szemcsehatárok választják el egymástól. Ezek a szemcsehatárokon – különösen magas hőmérsékleti igénybevétel során – olyan kellemetlen jelenségek lépnek fel, mint a szemcsehatár menti elmozdulás, üregesedés, repedésképződés, nagyobb kémiai aktivitás. Mindezek a jelenségek csökkentik a kúszással és fárasztással szembeni ellenállást, a kémiai aktivitás pedig növeli a korrózióérzékenységet.

Az üzembiztonságot – érthető módon – legjobban azok a szemcsehatárok veszélyeztetik, amelyek felülete a legnagyobb mechanikai igénybevételt jelentő centrifugális erőre közel merőleges (a hosszirányú centrifugális gyorsulás elérheti a 20000 g értéket is). Ezért vezették be 1966-ban az irányított kristályosítással megszilárdított oszlopos szemcseszerkezetű turbinalapátokat (2.b ábra). A vákuumkamrában az irányított megszilárdítás úgy történik, hogy szuperötözet-olvadékok öntenek egy, a turbinalapát alakjának megfelelő, függőleges kerámiaöntőformába, amelyet az olvadék hőmérsékletére hevítenek. Az öntőformát alulról egy vízzel hűtött rézlap zárja le, amelyen megindul a

kristályosodás, és a szilárd/olvadék határfelület az öntőforma hosszában halad alulról felfelé. Az öntőformát olyan hőmérséklet-szabályozott kemencével veszik körül, amely biztosítja, hogy a megszilárduláskor fel szabaduló látens hő a rézlap felé, tehát hosszirányban lefelé vezetődjön el. A megszilárdítás során a formát lassan süllyeszti lefelé a kemencéből. Az így megszilárdított turbinalapátban az oszlopos szemcsék közötti határfelületek a centrifugális erő irányában állnak, ennek köszönhetően megnő a kúszással és fárasztással szembeni ellenállás.

Az irányított kristályosítás továbbfejlesztéseként hozták létre az 1970-es évektől kezdődően a szemcsehatároktól teljesen mentes, egyetlen kristályból álló egykristály-turbinalapátokat (2.c ábra). Az öntés hasonló az irányított kristályosításnál alkalmazott módszerhez, a hűtött rézlapra oszlopos kristályok kezdenek nőni, de ez az alsó, indító tartomány felül egy spirál alakú, „malacfarok”-nak nevezett öntőcsatornába torkollik (3. ábra), amely a több növekvő szemcséből kiválaszt egyetlen egyet. Ez a malacfarokból kijutva belenő a lapát tövébe, és a forma megfelelően vezérelt süllyesztésével tovább növekedve felépíti az egész bonyolult turbinalapátot egyetlen kristályból. Ennél az eljárásnál különösen kritikus az egyirányú (lefelé történő) hőelvezetés, mivel bármilyen oldalirányú hővezetés másodlagos kristályszemcsék keletkezésére vezet, megghiúsítva az egykristálynövesztést. Az elmúlt 35 évben az eljárást számos részletében tovább tökéletesítették, elérve a 95%-ot meghaladó eredményességet. Ezzel együtt az egykristály-turbinalapátok még mindig a turbinák legmagasabb hozzáadott értéket tartalmazó alkatrészei, a gázturbinák „drágakövei”. Az első egykristálylapátokból felépített sugárhajtómű 1982-ben kapott repülési engedélyt, ma ilyen hajtóműveket építenek be például a Boeing 767 és az Airbus 310 típusú gépekbe.

Az egykristály-turbinalapátok a sugárhajtóművekben kilencszeres élettartamot érnek el kúszással és fáradással szemben az egyenlőtengelyű szemcsékből készített darabokhoz viszonyítva, korrózióval szembeni ellenállásuk is háromszoros. A mai magas hatásfokú és hosszú élettartamú (kb. 25000 óra üzemidő nagyjavítások között) sugárhajtóművek nem lennének lehetségesek az egykristály-turbinalapátok nélkül. A szemcsehatárok kiküszöbölésével megnőtt a turbinalapátok termikus és kifáradási élettartama, javult a korrózióállóságuk, vékonyabb falakkal gyárthatók (anyag- és súlymegtakarítás), és magasabb az olvadáspontjuk. Ezek a tényezők mind hatásfok-növekedést eredményeznek.

A történet újabb fejezete az egykristálylapátok bevezetése az áramtermelő gázturbinákban. A 200 és



3. ábra. Egykristály-turbinalapát a „malacfarokkal”

400 MW közötti villamos teljesítményt előállító berendezésekben használatos lapátok mérete ugyanis tízszerese a sugárhajtóművekben működőkének. Ilyen méretű lapátok egyirányú kristályosítással történő előállítása még a közelmúltban is csak magas selejthányaddal volt megvalósítható, és ez jelentősen emelte az amúgy sem alacsony gyártási költségeket. A kritikus egyirányú hőelvezetés biztonságának javításával értek el jelentős javulást az egykristálygyártásban. A világ egyik legnagyobb, közel 60%-os termikus hatásfok mellett 530 MW villamos teljesítményt adó, gázturbináját 2003-ban állították üzembe Walesben. A legmagasabb hőmérsékleten működő egykristály-turbinalapátok körülbelül 45 cm hosszúak (a repülőgéphajtóművekben 6–8 cm-es lapátok vannak), egyetlen egykristálylapát tömege körülbelül 15 kg.

Lendvai János
ELTE Anyagfizikai Tanszék

2. ábra. Különböző mikroszerkezetű turbinalapátok: a) egytengelyű szemcsék, b) oszlop-kristályok, c) egykristály

