

Tükröm, tükröm...

A Meteor olvasói közül sokan próbálkoztak már tükrörcsiszolással, többnyire 10–20 cm-es üvegkorongokkal, egyesek nagyobbakkal is. A távcső világa c. könyvből jól ismert mozdulatok, technikák azonban legalább annyira eltérőek a 6–8 méteres tükrök készítésétől, mint amennyivel kisebbek azoknál. Az LBT 8,4 méteres tükreit is legyártó Stewart Observatory Mirror Laboratory egyik munkatársa mondta nekem: „Amatőr csillagászkodtam a hivatalos katonai szolgálat mellett, s nyugdíjazásom után azért jöttem ide, hogy többet tudjak meg a távcsőtükrök készítéséről. Már az első napokban látnom kellett, tévedtem, hiszen ez inkább hasonlít egy hajógyárhoz, olyan mint a tengerészetnél. Óriási tömegű és méretű alkatrészeket mozgatunk, sokszor életveszélyes a munka, és hónapokig tart egy-egy lépés, illetve annak előkészítése. Ma sem tudok többet arról, hogyan kell elkészíteni egy 20 cm-es Dobson-tükrét, mint két évvel ezelőtt.” Mi, azt hiszem, inkább ez utóbbitól tudunk többet, s talán érdeklődésre tarthat számot az óriástükrök készítése. Jómagam sokat olvastam erről, s miután az év márciusában volt szerencsém ellátogatni a világ egyik leghíresebb tükrökészítő műhelyébe, úgy gondoltam, megosztom az Olvasóval mindazt, amit láttam, hallottam, olvastam.

A fémtükröktől a fémtükrökig

Valamikor az 1860-as években történt, hogy a fémből készült tükröket felváltották az öntött üvegkorongból csiszolt tükrök. A legutolsó nagyobb fémtükrő az 1,2 méter átmérőjű melbourne-i reflektor számára készült 1869-ben. (Ezt a távcsövet alakították át a 20. sz. végén a gravitációs lencsét kereső MACHO programhoz, s az eredeti fém segédtükrő ott függött a kupolában, a falon. 1996-ban volt szerencsém látni a homályosodó domború korongot, amely azóta sajnos a Mt. Stromlo Observatory-t elpusztító tűz martalékává vált.) Az üveg hatalomátvétele a kémiai ezüstözés megjelenésével történt, ami sokkal nagyobb reflexióképességet hozott, mint a kifényezett fémkorongok. Emellett könnyebbek is voltak az üvegkorongok, s nem kellett újrapolírozni, csak újra beezüstözni a tükröket, amikor elhomályosodtak. A Ritchey–Chrétien távcsőtípus nevéből jól ismert *Ritchey*, a híres 2,5 méteres Mt. Wilson-i reflektor alkotója azonban jól tudta, hogy a több méteres üvegtömbök hőtágulása és magas hőkapacitása problémákat okozhat. Akkoriban még nem ismerték a kis hőtágulású üvegeket, üvegkerámiákat, egyedül a klasszikus koronaüveget gyártották jó minőségben s azt is csak Franciaországban. A Palomar-teleszkóp tervezése kapcsán elkezdett kísérletek vezettek 1932-ben az első kis hőtágulású Pyrex korong elkészítéséhez (2,08 méteres optika a McDonald Observatory részére). Az 5 méteres Palomar-tükrő a könnyített (méhsejt) szerkezetnek, valamint a szabályozható alsó és oldalsó támasztásnak köszönhetően nagy siker volt a hőtágulásból adódó deformációkkal vívott harcban. A Pyrex azonban még mindig nem volt elég jó nagy méretű, monolitikus tükrök készítésére, a legnagyobb ilyen vállalkozás nem is nevezhető igazán sikerresnek (Zelencsuk, 6 m). A nagyon kis hőtágulású olvasztott kvarc, illetve a gyakorlatilag zéró hőtágulású üvegkerámiák megjelenése az 1970-es években azonban lehetővé tette az olyan kiváló távcsőtükrök készítését, mint a William Herschel Telescope optikája.

Annak idején maga *Herschel* volt az első, aki a hőmérséklet változásának távcsőtükörre, ill. a képkalkotásra gyakorolt hatását vizsgálta. *Ritchey* leírta a szférikus aberráció megjelenését, amit a koronaüveg-tükör egészének lassú, de a peremen gyorsabb hűlése okoz, s jól megfigyelhető volt a 100 hüvelykes teleszkópnál. *Couder* megmutatta, hogy a tükör fényezett és hátsó oldala közötti hőmérsékletkülönbség és a lassú hőterjedés miatt a fókuszváltozás 100-szorosa az egyszerű *Gay-Lussac*-féle hőtágulási törvényből adódónak, s a szférikus aberráció leírása is sokkal komplikáltabb az üvegben lévő belső feszültségek miatt. E termális probléma szempontjából a sokkal jobb hővezetésű fémek előnyösebbek voltak. *Couder* bevezette a „termális alkalmasság” fogalmát: $q_1 = l_1 \cdot (a_1 c_1 r_1)$, ahol l_1 a hővezetési, a_1 a hőtágulási tényező, c_1 a fajhő, r_1 pedig a sűrűség. (a_1 nélkül az előbbi kifejezés $A_1 = l_1 \cdot (c_1 r_1)$ a hődiffúziós képességet, $1/a_1$ pedig az adott anyag hőváltozással szembeni érzéketlenségét fejezi ki.) Minél nagyobb q_1 értéke, annál alkalmasabb távcsőtükörnek az adott anyag (l. a mellékelt táblázatot). *Makszutov* hasonló számításokat végezve szintén előnyösnek találta fémeket, s mind tömör, mind könnyített szerkezetű fémtükrök gondolatával foglalkozott, demonstrációként elkészítve a pulkovói obszervatórium 0,7 méteres acéltükri teleszkópját.

Anyag	r_1 [g/cm ³]	l_1 [W/m ² K]	A_1 10 ⁻⁶ [m ² /s]	a_1 10 ⁻⁶ [1/K]	q_1 [°K m ² /s]	q_1 [relatív]	Szilárdság 10 ⁷ [J/kg]
BK7	2,51	1,11	0,52	8,3	0,063	4,0	3,2
Zerodur	2,52	1,63	0,79	0,10	7,90	1000	3,6
Fused Silica	2,20	1,38	0,81	0,4	2,0	126	3,2
ULE	2,21	1,3	0,77	0,03	25,7	1620	3,1
Pyrex	2,23	1,17	0,63	3,3	0,19	12	2,8
alumínium	2,70	221	89,0	23,8	3,74	237	2,6
acél	7,86	25	6,6	10,5	0,63	40	2,7
Invar (36% Ni)	8,13	13	3,2	1,2	2,67	170	1,7
berillium	1,84	162	88,0	12	7,33	465	16,3

Különbféle távcsőtükör-anyagok fizikai tulajdonsága (bővebben I. szövegben)

Ma az üvegkerámiák és a króm- vagy alumínium-gőzölt fémtükrök (alumínium, rozsdamentes acél, berillium) ismét versenyre keltek. Előbbiek ugyanis relatíve érzéketlenek a hőmérsékletváltozással szemben, viszont lassan veszik át a környezet hőmérsékletét, nagy hőmérsékleti különbségek léphetnek fel, amik lassan egyenlítődnek ki. A fémből készített tükrök ugyan sokkal érzékenyebbek a hőváltozásokra, de gyorsan is reagálnak, így a szabályozott hűtéssel ellátott, aktív anatómasztott, vékony vagy könnyűszerkezetű, merevített fémtükrök igen alkalmasak lehetnek csillagászati célokra. A mai üvegtükrök mindezen aktív hőmérsékleti és alakellenőrző/beállító rendszereket alkalmazzák, vagyis a technológia kipróbált és működőképes. (A VLT 8,2 méteres, ugyanakkor 18 cm-es vastagságú tükre a többpontos, számítógép-kontrollált alátámasztás nélkül teljesen használhatatlan lenne. E tükör azért ilyen vékony, hogy gyorsabban reagáljon a hőmérsékleti változásokra. Egy hasonló fémtükörnél sokkal jobban megoldható lenne a termikus szabályozás.) A legérdekesebb anyag a kis sűrűségű, könnyen megmunkálható alumínium kémiaiilag vagy elektromos úton nikkellel bevonva (e mintegy 0,2–0,5 mm vastag bevonatot políroz-

Az üveg főként amorf szilícium-dioxidból áll, amelynek kristályos (trigonális, hatlapú piramisokból álló) formája a kvarc. A természetben sokkal ismertebb polikristályos megjelenése a homok. Mivel a homok olvadáspontja túl magas (2000 °C), ezért azt nátrium (Na₂CO₃) hozzáadásával csökkentik 1000 °C körülire. Mivel az oldhatóvá teszi az üveget, az ellenállóképességet kalcium-oxid segítségével nyerik vissza. Különbféle adalékanyagokkal egyéb tulajdonságok szabályozhatóak, mint pl. a bárium növeli a törésmutatót vagy a cérium csökkenti az átlátszóképességet infravörösben. Bór hozzáadásával 1924-ben a Corning cég állította elő elsőként a kis hőtágulású boroszilikát üveget (kb. egy harmada a hőtágulási tényezője a hagyományos üvegének), avagy Pyrex-et. A nagyon nagy tisztaságú, 99,9%-ban szilícium-dioxidot tartalmazó, de egybeolvasztással nyert s így amorf fázisú anyag (*fused silica*, vagy *fused quartz* az angol irodalomban) még kisebb hőtágulással rendelkezik. E nagy tisztaságú üvegből kis szennyezéssel és újramelegítéssel nyerik a csak részben amorf (kb. 70%), kisebb részben (kb. 30%) azonban kristályos szerkezetű üvegkerámiákat (ULE=Ultra Low Expansion, vagyis nagyon kis hőtágulású üveg; Zerodur; Astro-Sitall; Duran 50). A keramizálás során az elsődleges olvasztás (kb. 1500 °C) és hűtés után felmelegítik a nagy tisztaságú amorf üveget először 800 °C-ra, ahol a legnagyobb a kristálymagok kialakulásának sebessége. (A kristálymagok kialakulását elősegítő kis mennyiségű titánium-oxidot vagy cirkónium-oxidot adalékolnak) Ezután emelik a hőmérsékletet 1000 °C-ra, ahol a kristálymagok növekedése a leggyorsabb, s e fázis időtartamával állítják be a kristályok szükséges térfogati mennyiségét. Adott, szűk hőmérsékleti tartományra gyakorlatilag zéró hőtágulás érhető el, mivel az amorf és kristályos formában jelen lévő anyag hőtágulási tényezője ellenkező előjelű.

zák, majd gőzölik ezüsttel/alumíniummal), illetve a még könnyebb, de sokkal nagyobb szilárdságú berillium. Igaz, az utóbbi megmunkálása során keletkező por mérgező, valamint előállításra drága, így egyelőre kis méretekben és ritkán jelenik meg távcsövekben. A fémek csillagászati tükörként való alkalmazását talán a VLT 1,3 méteres segédtükréi bizonyítják a legjobban, amik, s talán ezt kevesen tudják, nem üvegből, hanem az igen ígéretes berilliumból készültek.

Tükörlaboratóriumok ma

Az üvegtükrök gyártása azonban nagyobb hagyományokkal rendelkezik jelenleg, s nem kis előny, hogy az üveg átlátszósága miatt a megöntött korongokban optikai úton egyszerűen ellenőrizhető feszültségek jelenléte, s a csiszolás során ebből felmerülő problémák eredményesen szűrhetőek ki. Három nagyobb boszorkánykonyhája van az óriástükrük készítésének. Az NTT 3,5 méteres tükrét, a Keck vékony, 1,8 méteres szegmenseit, a VLT különösen vékony, 4 db 8,2 méteres tükréit a Schott (Németország) készítette Zerodur üvegkerámiából. Az amerikai Corning az ULE kerámiát állítja elő, amiből a KPNO 4 méteres, az ESO 3,6 méteres, a HST 2,4 méteres, valamint a Subaru 8,3 méteres tükré készült. E fenti gyártók különféle eljárásokat használnak, melyekre részletesen helyhiány, illetve a közvetlen élmény hiánya miatt nem térnek ki. A következőkben inkább a harmadik jelentős tükörkészítő laboratóriumról, az arizonai Tucsonban található Stewart Observatory Mirror Laboratory-ról (későbbiekben ML) és az ott alkalmazott eljárásokról beszélnék részletesebben. Itt, a University of Arizona futballstadionja alatt készültek az MMT és Magellán távcsövek

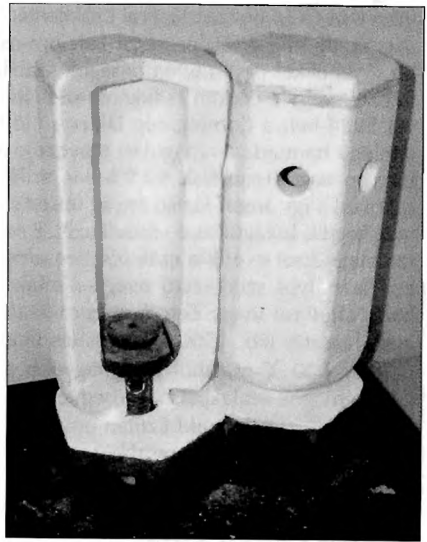
6,5 méteres tükrei, valamint az LBT két 8,4 méteres optikája (utóbbiak közül az egyik ma még csak a csiszolás fázisában van).

Modern tükörkészítés boroszilikát üvegből

A legnagyobb, tömör szerkezetű Pyrex tükör a már említett 6 méteres orosz óriás. Ez készítésekor, az 1970-es években is idejelműltnak számított, hiszen a korábban készített Palomar reflektor 5 méteres tükre is könnyített szerkezetű volt. Hiába jelentek meg azonban az üvegkerámiák, a méhsejt szerkezetű, könnyített tükrök esetében a boroszilikát üveg (Pyrex) még mindig igen jó megoldás. Elkerülhető ugyanis a keramizálás során szükséges újrahevítés, aminek során az esetleges nem egyenletes melegedés eltérő kristályosodást eredményezhet, s az így keletkezett feszültségek a csiszolás során akár ketté is repeszthetik a tükröt.

A ML-ban bórral szennyezett üveget használnak, melyet a japán Ohara cég szállít. Minden egyes, kb. 4–5 kg-os tömböt megtisztítanak és átvizsgálják fehér, valamint polarizált fényben feszültségeket, szennyezés és egyéb hibák nyomait keresve. A kiváló minőségű tömböket elkülönítik, ezek alkotják majd az optika tükröző felületét, a kevésbé jó minőségű üveg a méhsejt szerkezetű merevítő falakat és a hátlapot alkotják majd az olvasztás után. Az LBT egy-egy tükréhez például 18 821 kg-nyi üveget használtak fel (vagyis mintegy 5000 tömböt vizsgáltak át az előkészítés során.) A könnyített szerkezetnek köszönhetően (l. alább) ez az üvegmennyiség azonban a teljes tükör térfogatának alig 20%-a!

A megolvasztott üveg alakra öntésével szemben a tömböket egyesével helyezik el a tükör végleges alakját megadó formába. Ez a forma több szempontból is speciális. Először is talán azt kell megemlíteni, hogy a forma sok száz hatszögletű keresztmetszetet mutató, belül üreges, üvegszál kerámiából készített elemből áll. A híres 5 méteres Palomar tükrőnél sokkal finomabb méhsejt-szerkezet cellái kb. 20 cm átmérőjűek és a tükör szélén 80, közepén 40 cm magasak, ennyi a különbség ugyanis egy sík hátlaphoz képest a tükör vastagságában $f/1,2$ fényerő és 8 méter átmérő esetén. Az olvasztás során ugyanis nem plánparalel tömböt öntenek, hanem a kemence forgatásával elérik, hogy az olvadék felülete felvegye a tükör parabolikus alakját. A speciális forma miatt, amely a pontosan tervezett és megmunkált elemeknek köszönhetően szintén parabolát formáz, az olvasztás után csiszolásra kerülő homorú felület egyenletesen vastag lesz (25 mm). Ezzel az eljárással (spin casting, forgatva olvasztás) egy 6,5 méteres tükör esetében 12 tonna üveg lecsiszolását és elpazarlását kerüljük el, ami egyébként egy évig tartana.



1. ábra. Az öntőforma két eleme

De térjünk vissza a forma elkészítéséhez. A hatszögletű üvegszálás kerámia hasábokat precízen, egyesével gyártják le, s azok számozottan érkeznek a ML-ba. Minden darabnak megvan a maga helye. Elsőként az aljzatot „csempézik ki”, hatszögletű lapokból azokat szorosan egymás mellé helyezve egy folytonos felületet alkotnak. Ezen lapokra ragasztják rá a hatszögletű, a paraboloid alak által megszabott, eltérő magasságú oszlopokat. Az oszlopok külső felülete által alkotott méhsejt struktúra szilárdságát az adja, hogy az oszlopok a magasságuk kb. háromnegyedénél kis rudakkal támaszkodnak egymáshoz (1. ábra). E rudakat az alsó „csempékre” helyezett üreges oszlopok felső nyílása felől helyezik el és rögzítik ragasztással. Amikor minden oszlop a helyére került, az aljzathoz hasonló hatszögletű lapokkal zárják le az oszlopok tetejét. E lapok azonban nem alkotnak egybefüggő felületet, mivel a lapok nem nyúlnak túl az oszlopok permén (2. ábra). A fennmaradó, mintegy 15 mm széles résekben folyik majd le a megolvadt üveg, alkotván a falakat és kis lyukaktól eltekintve egybefüggő hátlapot. (A kis lyukak az oszlopokat kissé megemelő távtartók miatt alakulnak ki, és még fontos szerepet játszanak a későbbiekben.)



2. ábra. Az öntőforma készítése



3. ábra. Az üvegtömbök elhelyezése

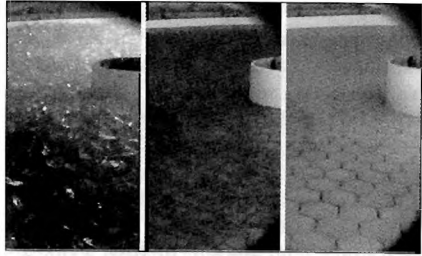
Miután befejeződött az öntőforma előkészítése, elhelyezik a gondosan megtisztított és átvizsgált üvegtömböket a homorú felületen (3. ábra). A kevésbé jó minőségűek kerülnek alulra, azok folynak majd le s alkotják a merev, hatszögletű struktúrát és a hátlapot. Nagyon fontos, hogy egyenletes legyen az üvegszönyeg vastagsága s hogy pontosan a megfelelő mennyiségű alapanyagot helyezték el, különben vagy túl vékony lesz a csiszolandó felület és emiatt nem alakítható, vagy pedig túl vastag s így termális tulajdonságai lesznek rosszak.

Amikor az üvegyanyag elhelyezésre került, kezdődhet az olvasztás. Ehhez egy egyedülálló kemencét használnak, mely 12 méter átmérőjű és 8 méter magas, legkülönösebb tulajdonsága pedig az, hogy nagyon pontosan szabályozható sebességgel forgatható. Az elektromos rendszereket tartalmazó „szív” egy függőleges tengely körül forgó lap alatt helyezkedik el. Erre a lapra építik fel a tükrös öntőformáját és ezt egy 28 tonnás, harang alakú felső résszel zárják le. Az egyenként 8000 W teljesítményű fűtőelemekből 270 darab található egyenletesen elosztva a harangon. Több megfigyelő kamera mellett 600 hőérzékelő biztosítja a megfelelő fokú kontrollt az olvasztási procedúra felett. A legmagasabb hőmérséklet elérésekor mintegy 1 megawatt teljesítményt jelent a teljes rendszer üzemeltetése. Mivel egy áramszünet végze-

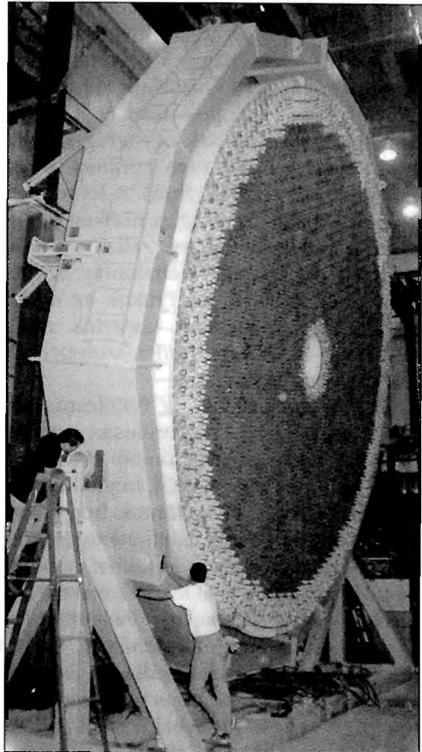
tes lenne, ezért direkt, többszörösen védett csatlakozása van a ML-nak a helyi erőműhöz, illetve hatalmas dízelgenerátorok állnak készenlétben egy áramkimaradás esetére.

Egy $f/1,25$ fényerejű 6,5 m átmérőjű tükör paraboloid felületének eléréséhez 7,4 fordulat/perc sebességgel kell forgatni a kemencét az olvasztás ideje alatt, ami több napig tart. A boroszilikát üveg olvadáspontja miatt öt nap alatt 1180 fokra hevítik a kemencét. 700 °C körül megkezdődik a tömbök olvadása, 830 °C hőmérsékletnél lekerednek a tömbök élei, s mint olvadó jégkockák látszanak a videókamerák képein. (4. ábra) Amikor a hőmérséklet eléri az 1000 °C-ot, a felszín egy egybefüggő olvadékká válik s mire beáll a legnagyobb hőmérséklet, lefolyik az üveg és kitölti a hatszögletű oszlopok közötti réseket. 1180 °C-on mintegy 5 órán át tartják az olvadékot, hogy az esetleg keletkezett buborékok a felszínre kerüljenek, és hogy a hátlap egyenletességét biztosítsák. Ezután megkezdődik a hűtés, a felmelegítéssel egyező ütemben csökkentve a hőmérsékletet egészen 600 °C-ig. Ekkor már csak 0,5 fordulat/perc a kemence forgási sebessége, amikor kezdetét veszi a feszültségmentesítés. A hűlés itt nagyon lassú, mindössze 0,1 °C óránként, egészen 430 °C eléréséig, amikor is 0,5 °C/óra hűlést engednek meg a továbbiakban, bár ez egyre lassul. Három hónap elteltével mintegy 0,2 °C óránként, amikor is eléri a tükör a 40 °C körüli hőmérsékletet

A sikeres olvasztás után leemelik a kemence tetejét és szilikonos ragasztóval bekenet tapadókorongokkal egy vázat rögzítenek a tükör majdani tükröző felületére. Hatalmas, vízzel teli tömlőket használva ellensúlyként leemelik a tükröt a kemence „szívéről” s egy vízszintes tengely körül elforgatható keretbe illesztik a tükröt tartó vázat. Ezután az élére állítják a hatalmas üvegkorongot s meg-



4. ábra. Az üvegtömbök gyorsan omlanak, olvadnak össze, s alakul ki a tükör egybefüggő felülete



5. ábra. Az oldalára állított tükrökből kimossák a távtartókat

kezdődhet az üvegszálás kerámia oszlopok eltávolítása a méhsejtek belsejéből. Ehhez nagynyomású vízsugarat használnak, amivel egyszerűen apró darabokra tördelik és kimossák az üregekből a fáradságos munkával legyártott és precízen elhelyezett térkitöltő oszlopokat (5. ábra).

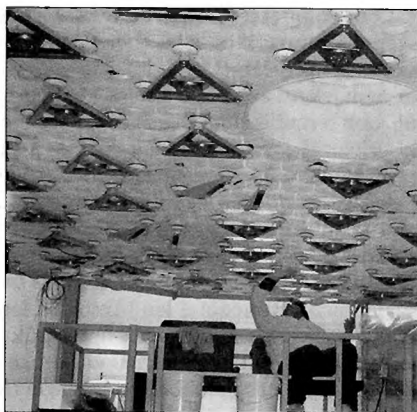
Csiszolás, fényezés

A belülről megtisztított üvegkorongnak elsőként a hátlapját csiszolják síkra és polírozzák ki. Teszik mindezt azért, hogy megvizsgálhassák az üveg szerkezetét, esetleges buborékokat, feszültségek nyomait keresve. Ha minden rendben van, akkor a hátlapra felszerelik az aktív tükörtartók csatlakozási pontjait (6. ábra).

Hiába ugyanis a merev méhsejtszerkezet, e tükrök olyan érzékenyek a deformációra, hogy a csiszolás és polírozás során is a távcsőben majdan lévő tükörtartó szerkezetre van szükség a további munkálatok során. Amikor ott jártam, épp az LBT második tükrét készítették fel a csiszolásra, így láthattam a száznál több aktivátort, valamint a hatalmas tükörtartó cellát (utóbbi belülről is, nagyobb mint egy lakótelepi lakás...).

A forgatva olvasztásnak köszönhetően igen kevés anyagmennyiséget kell eltávolítani a tükröző oldalról. A durva csiszolás azonban így is hónapokig tart, a tükör centrálása a forgó munkasztalon szintén heteket vesz igénybe. Gondoljunk csak bele, egy 8 méteres, 14 tonnás üvegdarabot a milliméter törtrészének pontosságával vízszintezni, centrálni a munkasztal forgástengelyével nem kis feladat. A forgó gyémántszerszámmal, melyet többszörösen szűrt folyadékkal hűtenek, először körbecsiszolják a tükör peremét és letörlik az éleket. A tükröző felület kialakításához egy kb. 30 cm átmérőjű, fejfelé lévő nyitott konzervdobozhoz hasonlítható gyémántfejet használnak, mint amivel pl. kis tükrök Cassegrain-furatát szokták átfúrni. Minden mozgást számítógép vezérel, a tükör alakját beprogramozva először óvatosan megközelítik a felületet, majd finom, tizedmilliméteres fogásokkal haladnak az egyik peremtől a másik felé.

A számítógépes vezérlésnél álljunk meg egy szóra. Nem kell a mai modern számítógépekre gondolni, hiszen a vezérlendő folyamatok viszonylag lassúak, habár bonyolult programozást igényelnek, főleg az aszférikus csiszolás/polírozás során (l. később). Azonban már a 70-es évek elejének igen kezdetleges számítógépei is képesek voltak ellátni ilyen feladatokat. Tulajdonképp az egész technológia, az olvasztástól a polírozásig már legalább két évtizede rendelkezésre áll, s ennek tükrében kissé furcsának tűnhet, miért csak most készülnek 8 méteres óriástávcsövek. A válasz talán fura amatőr szemmel nézve, számunkra ugyanis (főleg egy Dobson-szerelés esetében, de még egy ekvatoriális tengelykeresztre szerelt apokomátnál vagy jobb tükörnél is) az objektív a távcső lelke, legdrágább eleme. Az óriástávcsövek költségvetésében ez fordítva van, a főtükör a legolcsóbb, s talán ennek készítését, „működését” értjük a legjobban. Például a főtükör aktív felfüggesztése, állandó hőmérsékleten tartása sok-

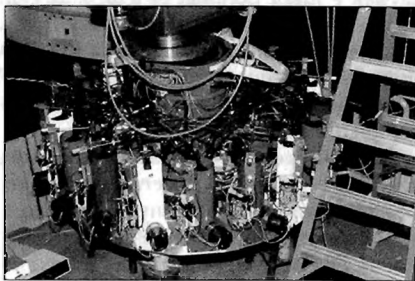


6. ábra. Az aktív tükörtartók csatlakozási pontjai

kal bonyolultabb és drágább rendszert igényel. A mai tükrök ezen cellák nélkül csak szépen polírozott hasznavehetetlen üvegdarabok lennének. Különösen igaz ez a VLT szinte „papírvékony” főoptikájára, vagy a Keck-teleszkóp szegmenseire. Ugyanakkor ez nem jelenti azt, hogy a tükrökészítés területén nincs már mit fejleszteni, újítani. Az új, jobb termális tulajdonságú, szilárdabb, könnyebben kezelhető anyagokkal történő kísérletezés fontos, azonban nem ez a szűk keresztmetszete a jelenlegi 8–10 méteres távcsőátmérő 30–50 méteresre növelésének.

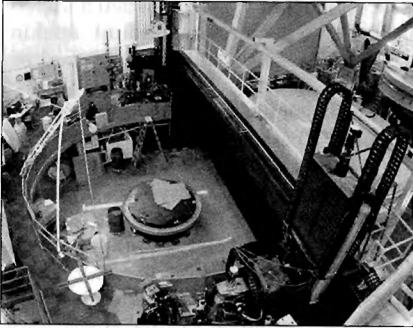
A kis kitérő után azonban kanyarodjunk vissza a tükrökészítés végső fázisához, ami talán érdemes a részletesebb ismertetésre. Amatőrtávcsövek tükréit a polírozás során szokás parabolizálni, hiszen az eltérés egy ideális gömbfelülettől igen kicsi. (Talán érdemes megemlíteni, hogy az üvegorongok első fejezetben tárgyalt hőmérsékleti érzékenységét e kis tükrőknél lehet úgy kompenzálni, hogy a parabolizálást csak a szükséges mérték 80%-ig visszük véghez. A használat során, a szabad ég alatt lassan kihűlő tükrő deformálódása okozta szférikus hiba adja majd a fennmaradó 20%-ot, tökéletes parabolává téve objektívünket.) Ez az eltérés azonban a tükrő átmérőjével egyenesen, a fényerő reciprokéval négyzetes arányban nő. Egy 3,5 méteres $f/2,2$ tükrőnél (NTT) mindössze 0,21 mm, az LBT 8 méteres tükrőinél kicsit fényerősebb $f/1$ -es tükrőnél azonban már 5,2 mm a peremen mérve! Ezt nyilván nem lehet csak a polírozással elérni, már a durva ill. finomcsiszolás során is figyelembe kell venni. Maga a polírozó szerszám a tükrő görbületi sugarának pontról pontra történő változása miatt nem lehet állandó alakú. Nem feltétlenül kell a szerszám alakját változtatni, többféle megoldást alkalmaznak aszférikus felületek polírozására, sajnos azonban helyhiány miatt itt csak a ML-ban használt eljárást mutatjuk be részletesen. Röviden csak annyit, hogy az eltávolított anyag mennyisége függ a csiszoló szerszám méretétől, a szerszám tükrőre gyakorolt nyomásától, a szerszám tükrőhöz képesti relatív sebességétől valamint a csiszolási időtől. Ezek közül bármelyiket változtatva szabályozható a tükrő alakja. A számítógép-vezérelt deformált szerszámú polírozás során mind a négy paramétert változtatják, amatőrként inkább a szuroktárcsa felületét módosítva egyenletes húzások mellett különböző ideig csiszoljuk a peremet, avagy homogén szerszámmal, de a húzások szabályozásával érjük el ugyanezt.

Talán nem is kell említeni, hogy nyilvánvalóan sokkal kisebb szerszámról van szó, mint maga a tükrő, hiszen a polírozó szerszámot igen precízen kell mozgatni, alakját pontosan ismerni, illetve, mint látjuk, szabályozni. Ezt csak viszonylag kis, méter körüli átmérő esetén lehet biztosítani. A ML-ban ezért az úgynevezett deformált szerszámmal történő polírozást (stressed lap polishing) alkalmazzák. A szerszám alapja egy kb. 20 mm vastag, mintegy másfél méter átmérőjű alumínium lap. Ennek peremére, keskeny külső palástjára 24 ponton finoman szabályozható feszítőhengereket szerelnek. Minden henger két, a korong közel átellenes oldalán lévő hengerrel áll kapcsolatban egy-egy fémszalag segítségével, l. a 7. ábrát. (Hosszas kísérletezés után a repülőgépekre feladott csomagok átfogására használt

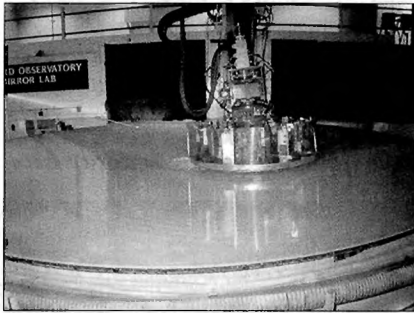


7. ábra. A deformálható polírozószerszám

acélszalagok bizonyultak a legjobbnak a célra.) A szalagok feszességét kis motorokkal másodpercenként többször állítva az alumínium korongot épp az adott pontban megfelelő alakra deformálják, magát a szerszámot pedig forgatják, pozícióját 5 tengely körül szabályozzák.



8. ábra. A polírozógép készen áll az LBT második tükrének fogadására



9. ábra. Munkában a polírozógép

ra stabilizálni a levegő hőmérsékletét, és még sorolhatnánk azokat a nem kis munkát igénylő „apróságokat”, amik elengedhetetlenek a polírozás és tesztelés sikerességéhez. Amatőr tükrökészítő lelünknek azonban talán megnyugtatója az, hogy hiába a számítógép kontrollálta környezet, több méteres átmérő, az utolsó interferogramok mutatta apró eltéréseket még az LBT tükrénél is hatalmas rudakra erősített apró szuroktárcsával, emberi kézzel korrigálják...

Sajnos működés közben nem volt alkalmam látni e fantasztikus szerkezetet, bár nagy valószínűséggel a polírozás alatt be sem engedtek volna, annyira ügyelnek a tisztaságra és a környezet teljes zavartalanságára. Az üresen álló gép is lenyűgöző volt (8. ábra), épp az LBT második tükrének befogadására készítették fel. A gyorsabb polírozás érdekében az eddigi egy szerszámmal szemben egy másodikat is üzembe helyeznek e tükrő készítéséhez, felére csökkentve így a legidőigényesebb fázist. (Lásd a 8. ábra alsó és felső pereméhez közel. A 8,4 méteres tükrő jobbra, kissé takarva látszik.) Ha minden igaz, szükség is lesz a második szerszámra, hiszen nagyon közel áll útjára indításához a Giant Magellan Telescope program, ami 7 db, 8 méteres tükrőből áll majd (+2 tartalék tükrő), amit a ML-ban terveznek elkészíteni.

A sok időt azonban nem is igazán a polírozás, mintsem a többszöri tesztelés igényli, amihez ki kell venni a tükröt a polírozó szerszám forgóasztaláról s a hatalmas csarnokban nem sokkal odébb található, teljesen izolált aljzattal rendelkező tesztpontra mozgatni. E felett egy kis kinyúló torony található az épületen, ami helyet ad a teszteléshez szükséges optikáknak. Ehhez azonban az egész csarnokot több napra be kell zárni, pár tized fok

FŰRÉSZ GÁBOR

Nagy felbontású képek a Mirror Laboratory-ról: <http://medusa.as.arizona.edu/mlab/mlab.html>

Reflecting Telescope Optics II., R.N. Wilson, Springer, 1999