2. A Nagyintenzitású Kisülőlámpák

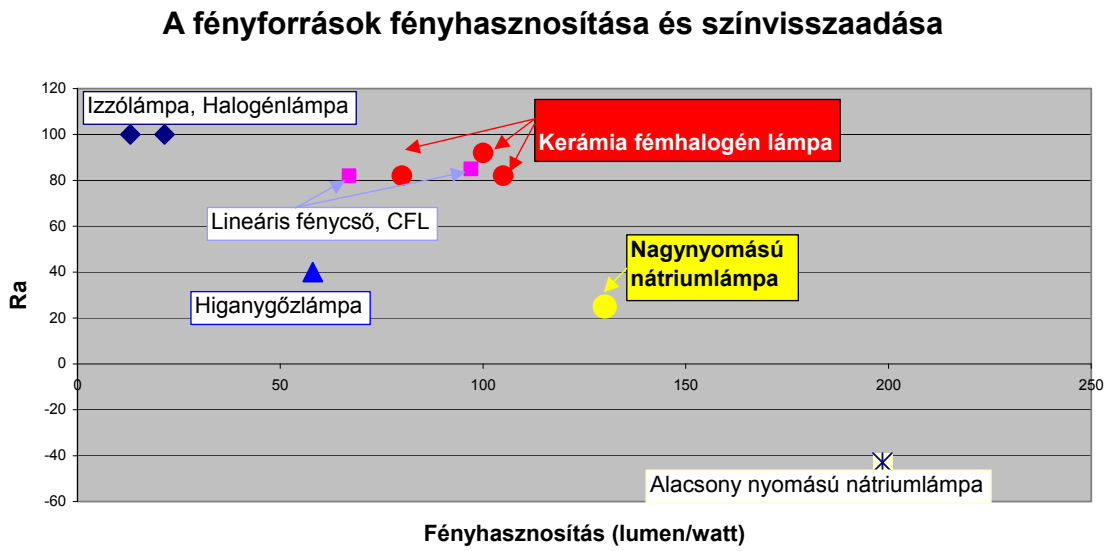
2.1. A Nagyintenzitású Kisülőlámpák alkalmazása

2.1. 1 A Nagyintenzitású Kisülőlámpák alkalmazása általános világításra

A fényforrásokat több különböző paraméterrel is jellemezhetjük. Nem lehet közöttük egyértelmű fontossági sorrendet felállítani, hiszen minden alkalmazás más és más követelményrendszert támaszt a világítással szemben. Mégis, talán a két legfontosabb a jellemző a fényforrás fényhasznosítása és színvisszaadási indexe. Előbbi mértékegysége (lumen/watt) önmagáért beszél: a fényhasznosítás a fényforrás által sugárzott fényáram és fényforrás által felvett teljesítmény hányadosa. (Megjegyzendő, hogy általában, de különösen a nagyintenzitású kisülőlámpák esetében a fényhasznosítás a működtető elektronika nélkül értendő). Köznapi értelemben véve a fényhasznosítás hasonló a hatásfok fogalmához, utóbbi azonban dimenziótlan mennyiség (illetve %). Elméleti maximális értéke 683 lumen/watt, ezt azonban – hasonlatosan a 100% hatásfokhoz – elérni nem lehet. Igaz azonban, hogy minél nagyobb a fényhasznosítás értéke, annál energiatakarékosabb a fényforrás. A másik fontos jellemző paraméter a fényforrás színe, precízebben fogalmazva az általa kibocsátott sugárzás spektrális energia-eloszlása. Azt tartjuk ugyanis 'jó' fényforrásnak, amely minél inkább visszaadja a megvilágított tárgy 'természetes' színét. Ennek a fogalomnak a jellemzésére szolgál az úgynevezett színvisszaadási index: annak a mérőszáma, hogy a vizsgált fényforrás által megvilágított kiválasztott és jellemző színminták színe milyen mértékben változik meg a referenciasugárzóval megvilágított színükhöz képest. (A referenciasugárzó Planck sugárzó, ha a fényforrás korrelált színhőmérséklete kisebb, mint 5000 K, illetve természetes fény, ha nagyobb, mint 5000 K. A 8 minta átlagából számított, R_a-val jelölt index értéke 100, ha nincs eltolódás (VillTechLex 2001). Minél nagyobb az eltolódás, azaz minél kevésbé hűen adja vissza a fényforrás a megvilágított tárgy színét, a színvisszaadási index értéke annál kisebb.

Érdekesnek tűnő jelenségre lehetünk figyelmesek, ha a különböző fényforrásokat a fenti két paraméterből alkotott koordináta térben ábrázoljuk: a pontok – nem túl rossz

közelítéssel – egy egyre meredekebben monoton csökkenő görbe mellett találhatóak (2.1 ábra, 2.1. táblázat).



2.1. ábra: A különböző fényforráscsaládok jellemző fényhasznosítás és színvisszaadási index értékeinek összehasonlítása a két paraméter által alkotott koordináta rendszerben

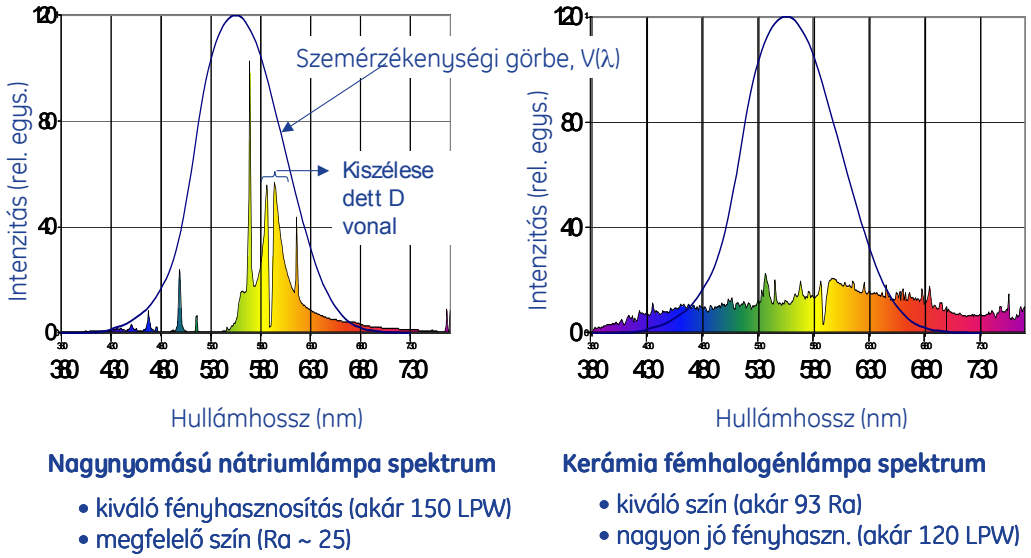
	lm/W	Ra
Izzólámpa	10-15	100
Halogénlámpa	20-25	100
Fluoreszcens lámpák	65-95	50-85
Nagynyomású nátriumlámpa	88-150	25
Kerámia fémhalogén lámpa	80-120	65-90

2.1. táblázat: A különböző fényforráscsaládok jellemző fényhasznosítás (lm/W) és színvisszaadási index (Ra) értékeinek összehasonlítása a táblázatos formában

Köznapi nyelvre lefordítva minél jobb a lámpa fényhasznosítása, annál kisebb a színvisszaadási indexe, illetve fordítva: a hűen visszaadott szín rosszabb energiafelhasználással jár. Mérnöki szemmel ez azt jelenti, hogy minden esetben – az adott alkalmazásnak megfelelően – kompromisszumot kell kötni az energiatakarékosság és a megvilágítás színhűsége szempontjából, amit már a termékfejlesztési folyamat legelején, a vevői igények felmérésekor és a project céljainak kitűzésekor véglegesíteni kell. Kültéri alkalmazásnál, különös tekintettel az utcavilágításra, a fő szempont az energiatakarékosság, a környezet láthatóvá tétele, a tárgyak, az utca elemeinek felismerése. Itt tehát inkább a jó fényhasznosítás a kívánalom, bár mindinkább

figyelembe kell venni az 1. fejezetben a közlekedésbiztonságról és a járókelők biztonságérzetéről elmondottakat. Díszvilágításnál már fontos a megvilágított épület kiemelése, szépségének bemutatása, így ott már előnyben részesülhetnek a jobb színvisszaadási index-szel rendelkező fényforráscsaládok elemei. Beltéri világításban, ahol vélhetőleg a megvilágítás teljes időtartamában tartózkodnak emberek, inkább a kellemes közérzetet biztosító, jobb színvisszaadású lámpákat használjuk. Természetesen itt sem megvetendő szempont az energiatakarékosság, de például egy kirakat kivilágítása során, ahol a feladat az, hogy a leendő vásárló figyelmét felkeltsük a kitett árú iránt azt természetes szépségében bemutatva s ezáltal az érdeklődőt az utcáról a boltba csalogassuk, a kiváló színvisszaadás lesz az elsődleges szempont. Hasonlóképp sportközvetítéseknél, filmforgatásokon is ez a szempont fog érvényesülni. Már most fel kell azonban hívni a figyelmet egy lényeges dologra: az említett kompromisszum egy adott lámpacsaládon belül és lámpacsaládok között is fennáll. Ugyancsak megjegyzendő, hogy az említett két jellemvonás mellett számos egyéb paraméter létezik, és adott alkalmazás esetében ezek bármelyike fontosabbnak bizonyulhat, mint akár a fényhasznosítás, akár a színvisszaadási index. Ilyen tulajdonságok lehetnek – a teljesség igénye nélkül – a fényáramtartás (mennyit veszít a lámpa a kezdeti fényáramából a használat során), az élettartam és a megbízhatóság, a lámpák közötti színszórás, a lámpa fénye spektrális eloszlásának változása a lámpa élettartama során (a színtartás) stb. Lehet fő követelmény a spektrum bizonyos részeinek magasabb intenzitása például szolárium lámpáknál, akváriumvilágító, fertőtlenítő, pénzvizsgáló vagy gyógyászati termékek esetében. Egyes termékeknél a minél nagyobb hőkibocsátás a cél (infralámpák), míg másoknál a kulcskívánalom a minél kisebb működési hőmérséklet (beépített fényforrások esetén).

A tapasztalt jelenség magyarázatához nézzük meg, hogy az emberi szem milyen hatásfokkal ismeri fel a 400 nm és 700 nm közé eső látható tartomány sugárzását a hullámhossz függvényében: ezt mutatja az emberi szem szemérzékenységi görbéje, az úgynevezett V(λ) görbe. A görbét a 2.2. ábra mutatja be a két legfontosabb nagyintenzitású kisülőlámpa: a nagynyomású nátriumlámpa és a kerámia fémhalogén lámpa spektrális eloszlásával együtt. A görbe korántsem egyenes: a zöld tartományban – 555 nm-nél csúcsosodik és haranggörbe-szerűen csökken a kék és a vörös irányokban.



Nagynyomású nátriumlámpa spektrum

- kiváló fényhasznosítás (akár 150 LPW)
- megfelelő szín (Ra ~ 25)

Kerámia fémhalogénlámpa spektrum

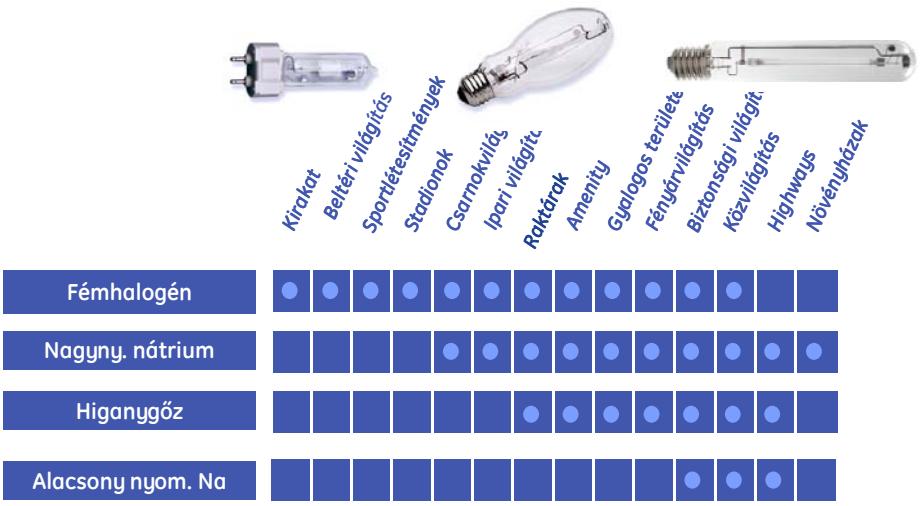
- kiváló szín (akár 93 Ra)
- nagyon jó fényhaszn. (akár 120 LPW)

2.2. ábra. A V(λ) szemérzékenységi görbe és egy tipikus nagynyomású nátriumlámpa spektrum, illetve kerámia fémhalogénlámpa spektrum.

Szemünk tehát jóval kevésbé érzékeny ez utóbbi tartományokban, mint zöld megvilágítás esetén. (Ennek biológiai okát könnyű megérteni: a szemérzékenységi görbe csúcsa jó közelítéssel egybeesik a Nap sugárzásának maximumával. A törzsfejlődés során nyilván azon egyedek élveztek előnyt, akik a legjobban tudták az adott természetes világítást hasznosítani.) Megjegyzendő, hogy a szemérzékenységi görbe a megvilágítás erősségével némileg változik: ahogy csökken a megvilágítás, a bemutatott - úgynevezett fotopos - szemérzékenységi görbe csúcsa a kék irányba tolódik el (az úgynevezett mezopos, majd a szkotopos tartományba). Ennek – mint már utaltunk rá az 1. fejezetben – közlekedésbiztonsági vonatkozásai is vannak. Részletes ismertetéshez a szakirodalomra utalunk [Schanda 1996]). A legjobb fényhasznosítású 'lámpa' tehát összes leadott fotonját a szemérzékenységi görbe csúcsán kellene, hogy kisugározza. Ekkor azonban a megvilágított tárgy is egyszínű zöld vagy szürke lenne. Ahhoz, hogy élvezni tudjuk a tárgy színét, a megvilágító spektrumot fel kell tölteni – amennyire csak az adott fényforrás lehetővé teszi – a teljes látható tartományban. Ekkor azonban, mivel egyre több és több fotont „teszünk át" az érzékeny zöld tartományból a kevésbé érzékeny kék és vörös felé, a fényhasznosítás sajnos romlani fog. Ezt példázza a bemutatott két lámpa spektruma is. A nagynyomású nátriumlámpa sugárzásának jelentős részét a sárgászöld tartományban, közel a szemérzékenységi görbe maximumához adja le, a vörös és

különösen a kék tartomány viszonylag kevésbé fedett. Fényhasznosítása kiváló (akár 150 lumen/wattot is elérhet), színvisszaadási indexe mérsékelt (22-25) (2.1. táblázat). Ezt a lámpát főként kültéri világításra, utcavilágításra alkalmazzák, beltéri világításban esetleg gyárakban, nagy üzemcsarnokokban találkozhatunk velük. Aranysárga színe mindannyiunk számára ismerős: hazánkban és világszerte is ez a meghatározó közvilágítási fényforrás, de épületek – különösen templomok – díszkivilágítása is nagyszerűen megoldható vele. Tipikus alkalmazási példa még a parkolók, repülőterek, alagutak világítása is. A bemutatott kerámia fémhalogén lámpa spektruma ezzel szemben egyenletesebb. A típust általánosságban akár 120 lumen/watt vagy akár 93-as színvisszaadási indexek jellemzik, így mind kül-, mind beltéri alkalmazásra igen kiváló. A kisteljesítményű típusok – köztük az egyedülálló 20W-os SuperMINI konstrukció – az irodavilágításban, sőt akár az otthoni világításban is egyre erősebb szerepre tör. A nagyteljesítményű típusok fő alkalmazási területei például a nagy és kisebb belmagasságú raktárak, üzemcsarnokok, ahol a jó megvilágítás feltétele a biztonságos munkavégzésnek. Hasonló jó alkalmazási példa a bevásárló központok világítása. Kültéri alkalmazások közé sorolhatjuk az utcák, terek, épületek díszkivilágítását. A nagyintenzitású kisülőlámpák alkalmazásait a 2.3. ábra ismerteti.

2.3. ábra. A nagynyomású kisülőlámpák főbb alkalmazási területei. Az ábrán egy G12 konstrukciójú kerámia fémhalogénlámpa, illetve egy elliptikus és egy csőbúrás E40 fejű nagynyomású



nátriumlámpa fényképe is látható.

A nagynyomású higanylámpa alkalmazása nem túl jó fényhasznosítása és színvisszaadási indexe miatt egyre inkább háttérbe szorul, új installációk gyakorlatilag

nincsenek. A kisnyomású nátriumlámpa szintén egyre kevésbé alkalmazott termék. Bár a legjobb kereskedelmi forgalomban kapható fényhasznosítással rendelkezik, szinte monokromatikus fénye gyakorlatilag semmilyen színhűséget sem biztosít.

2.1.2 Egy speciális alkalmazás: a növényházi termékcsalád legfontosabb kívánalmai

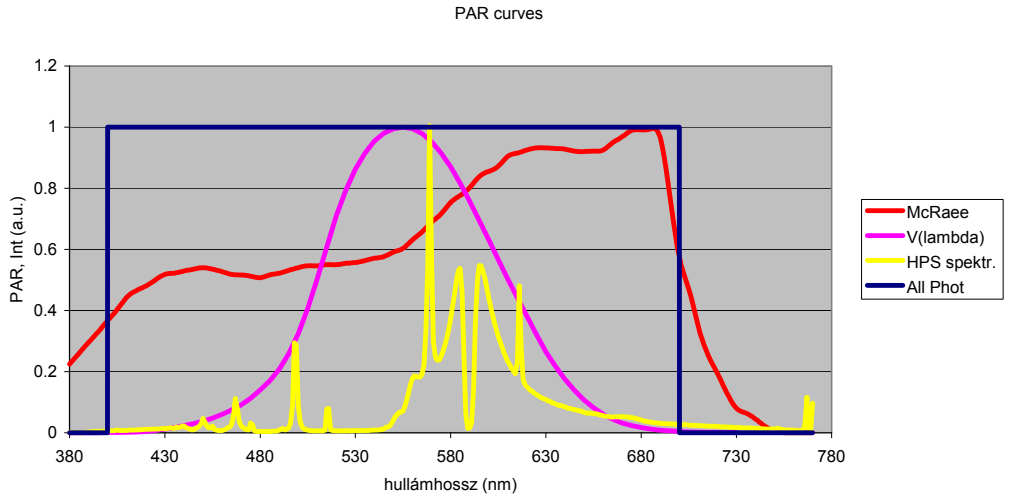
Egyre nagyobb számban találkozunk az élelmiszerüzletek polcain, illetve a virágboltokban növényházakban növesztett termékekkel. A mesterséges növesztés elsődleges oka a természetes napfény hiánya, illetve a nem megfelelő környezeti hőmérséklet. Ez utóbbi eset nemcsak a hideg téli-tavaszi napokat jelenti, hanem a túl meleg klímájú országokban gazdaságosabb leárnyékolni a napfényt és mesterséges megvilágítást alkalmazni, semmint hűteni a környezetet. A téma fontosságát és a piac növekedését mutatja, hogy egy adott országban például 1978-ban 5300 hektár, 1988-ban 34000 hektár, míg 2001-ben már több, mint 100000 hektár növényházi területtel rendelkezett [Merle 2001]. A piac mértékét csak Európában 18 millió USD-re becsülik.

A növényházak egyik fő célja a minél gyorsabb növesztés. Ehhez nemcsak a növényeket ért megvilágítást kell növelni, hanem a fényforrás spektrumát is a növények számára kell módosítani. Ennek az az oka, hogy a növények az emberi szemtől eltérő módon hasznosítják az őket ért sugárzást. A sugárzás által a növényekre gyakorolt legfontosabb hatás a fotoszintézis. A fotoszintézis során a növény az elnyelt fény energiáját arra fordítja, hogy a vizet elbontja hidrogénre és oxigénre, a hidrogénből és a légkörből felvett szén-dioxid molekulából nagy energiatartalmú szénhidrátot (gyümölcscukrot) készít. Az oxigén gáz formájában felszabadul. Bár a fotoszintézis folyamatához általában egynél több foton energiájára van szükség, a fotoszintézis kulcs paramétere sokkal inkább az elnyelt fotonok száma, semmint a fotonok tényleges energiája, szemben a látás folyamatával, amikor a színlátást a foton tényleges energiája teszi lehetővé.

A fotoszintézis két gyakorta használt hatásgörbéjét mutatja a 2.4.ábra, összevetve az emberi szem által érzékelt V(λ) szemérzékenységi görbével, illetve egy tipikus nagynyomású nátriumlámpa spektrummal. A McCree jelű függvény a levelek áteresztőképességmérésén alapszik, feltételezvén, hogy a fotoszintézis arányos az elnyelt

fotonszámmal [McCree 1972]. Az All Phot (azaz Minden foton) görbe pedig azon az imént említett feltételezésen alapszik, hogy a fotoszintézis az elnyelt fotonszámmal arányos. A két hatásgörbe közül mára gyakorlatilag az All Phot vált általánosan elfogadottá, a gyártók is ezt használják. A növényt ért megvilágítást ezzel a hatásgörbével súlyozva kapjuk a fotoszintézis szempontjából hatékony fotonfluxust, az úgynevezett PAR értéket (Photosinthetically Active Radiation). Azaz mindkét görbére igaz, hogy a PAR értéket úgy számoljuk, hogy a lámpa spektrális eloszlásából kiszámítjuk a fotonszám eloszlást, súlyozzuk a kívánt fotoszintézis hatásgörbével, majd integráljuk a súlyozott görbét . Látható, hogy a PAR érték meghatározása korántsem olyan szabályozott és egyértelmű, mint a lumen értéké. Az eltérő növények eltérő spektrumú világítást igényelhetnek, például más vörös/zöld arányt [Prikupets 1994]. Végeztek olyan kísérletet is, ahol a termesztett zöldség alakja változott meg a megvilágítás függvényében [Tamulaitis 2005, Dorais 2002].

2.4.ábra . Fotoszintetikus (PAR (λ)) és fotopos (V(λ)) hatásfüggvények



Mindenképp látható, hogy a növényházi alkalmazásra tervezett lámpa eltérő spektrumot, emiatt eltérő konstrukciót igényel. A McCree görbe szerint a fotoszintézis szempontjából leghatékonyabb rész a spektrum 580-700 nm-es tartománya, ahol a nagynyomású nátriumlámpa leadja a látható tartományban kisugárzott energiája zömét, így e lámpacsalád igen gazdaságos megvilágítást tesz lehetővé. Ugyanakkor – hasonlóan a fényáram és a színvisszaadás közti kompromisszumhoz – a nagyobb PAR

értékű lámpa kisebb fotopos fényáram (lumen) értékkel fog rendelkezni. Felhasználói szemmel nézve pedig a nagyobb mértékű fotoszintézis több terméket, nagyobb hozamot jelent, tehát a jó fényhasznosítás ebben a piaci szegmensben közvetlenül befolyásolja a felhasználó üzleti eredményeit. Éppen ezért ez a szegmens fokozottan érzékeny nemcsak a jó fényáramtartásra, de a megbízhatóságra (a meghibásodott lámpák számára) is a lámpa élettartama során.

2.1.3. A nagyintenzitású kisülőlámpák jövője és helye a többi lámpacsalád között

Kilépvén a nagyintenzitású kisülőlámpák köréből az első nagy család az izzólámpákat foglalja magában. Mint feketetest sugárzó, a volfrámszál olvadáspontján az elérhető elméleti maximum érték 53 lumen/watt lenne, a gyakorlati fényhasznosítás 10-15 lumen/watt körüli érték a normál izzólámpák, 20-25 lumen/watt a halogénlámpák esetében. Ez vezette az európai fényforrásgyártók szövetségét arra, hogy 2007 júniusában egy javaslatot terjesszen elő az EU 2005/32/EC energetikai direktívába való befoglalásába, miszerint először a 100W-nál nagyobb teljesítményű, majd 2015-ig a kisteljesítményű (25 W-tól fölfelé) legkevésbé hatékony – E, F és G energiaosztályú - izzólámpákat eltüntessék az európai lakásokból. (A javaslat az általános világítási célra használt fényforrásokról szól, a speciális alkalmazások maradhatnak). Érvek és ellenérvek hangoznak el a betiltás mellett (utóbbiak leginkább a kiváló színvisszaadási index, a jó irányíthatóság, a magas kezdeti fényáram vagy az azonnali újragyújthatóság tárgyköréből (például: [Nagy 2007])). Ne temessük azonban el az izzólámpa technológiát! Megfelelő infravörösben reflektáló rétegrendszert alkalmazva az izzószál köré (a külső búrán) a fényhasznosítás akár 30%-al is javítható. Még érdekesebbnek ígérkezik azonban az izzószál felületének módosítása. Waymouth vetette föl, hogy induljunk ki abból a kvantumelektrodinamikai effektusból, hogy egy $\lambda/2$ átmérőjű üreg nem emittál λ -nál nagyobb hullámhosszúságú sugárzást [Waymouth 1989]. Egy olyan volfrámszálat javasolt, amelyek felülete 350 nm széles, 700 nm mély, egymástól 150 nm-es falakkal ellátott üregekből áll. Számításai szerint ezek hullámvezetőként csatolják a látható sugárzást volfrám és a vákuum között, de megakadályozzák a látható tartomány fölötti sugárzást. Azaz a spektrális eloszlás csaknem 700 nm-ig a megszokott klasszikus

feketetest sugárzást követi, azonban 700 nm környékén erős intenzitás csökkenés és lényegesen kisebb infravörös sugárzás lép fel a klasszikus izzólámpához képest, és már 2100 K-en üzemeltetve az izzószálat is 88 lumen/watt fényhasznosítást jósol. 1992-es szabadalmában a technológiát más fényforrásokra is kiterjeszti, illetve utal a készítés módjára is [US 5,079,473]. Bár több szabadalom és publikáció is született azóta a tárgykörben (csak érdekességképp: US 6,433,303: lézeres eljárást ír le mikroüregek létrehozására, US 5389853: szubmikron méretű volfrám vagy volfrámötvözet kristályok létrehozását mutatja be a volfrám felületén, US 6,871,523: mikrocsatornák létrehozása a felületen húzásos technológiával, [Kamata 2007] fotolitográfiás és elektron nyalábos litográfia módszert alkalmazott különféle hordozókra), de kereskedelmi forgalmazásra még közel nem került sor. Mindaddig, amíg ez az áttörés meg nem születik, addig az izzólámpák kompakt fénycsövekre való cseréje, illetve a kisebb teljesítményű, például 20W-os kerámia fémhalogénlámpák térhódítása várható az eddig hagyományosan izzólámpavilágítási területen.

A másik nagy lámpacsalád a kisnyomású kisülőlámpák: lineáris fénycsövek és kompakt fénycsövek. A kisnyomású higanykisülésben keletkezett ultraibolya fotonokat fénypor segítségével a látható tartományba konvertálva az alkalmazott fényportól függően a színskála széles tartományában kapunk jó fényhasznosítású fényforrásokat. Legnagyobb szerepe a beltéri világításban várható, de közvilágításban az 55 W, vagy ennél nagyobb teljesítményű típusok most is vetélytársai a nagyintentenzitású kisülőlámpáknak. Részletes ismertetésük található [Debr 1983]-ban és [Waymouth 1971]-ben.

A harmadik nagy lámpacsalád a LED-ek családja. A fénykeltési mechanizmus és működés részletes ismertetését ezúttal is a szakirodalomra hagyjuk (például: [Zuk 2002], [Schanda 2004], s pusztán az alkalmazástechnikáról ejtünk néhány megjegyzést [Vass 2007]. A családot szándékosan nem tüntettem fel a 2.1. ábrán, mert annyira széles és olyan gyorsan változó tartományt kellene bemutatni, hogy értelmezhetetlenné tenné a grafikont. A 90-es évek elején jelentek meg az úgynevezett erős fehér LED-ek (power white LED). A dolgozat írásakor kereskedelmi forgalomban kapható legjobb fényhasznosítású termék már meghaladja a 100 lumen/watt értéket, azaz a kerámia fémhalogénlámpa értéke körül mozog. A jó fényhasznosítás mellett előnyére írható még,

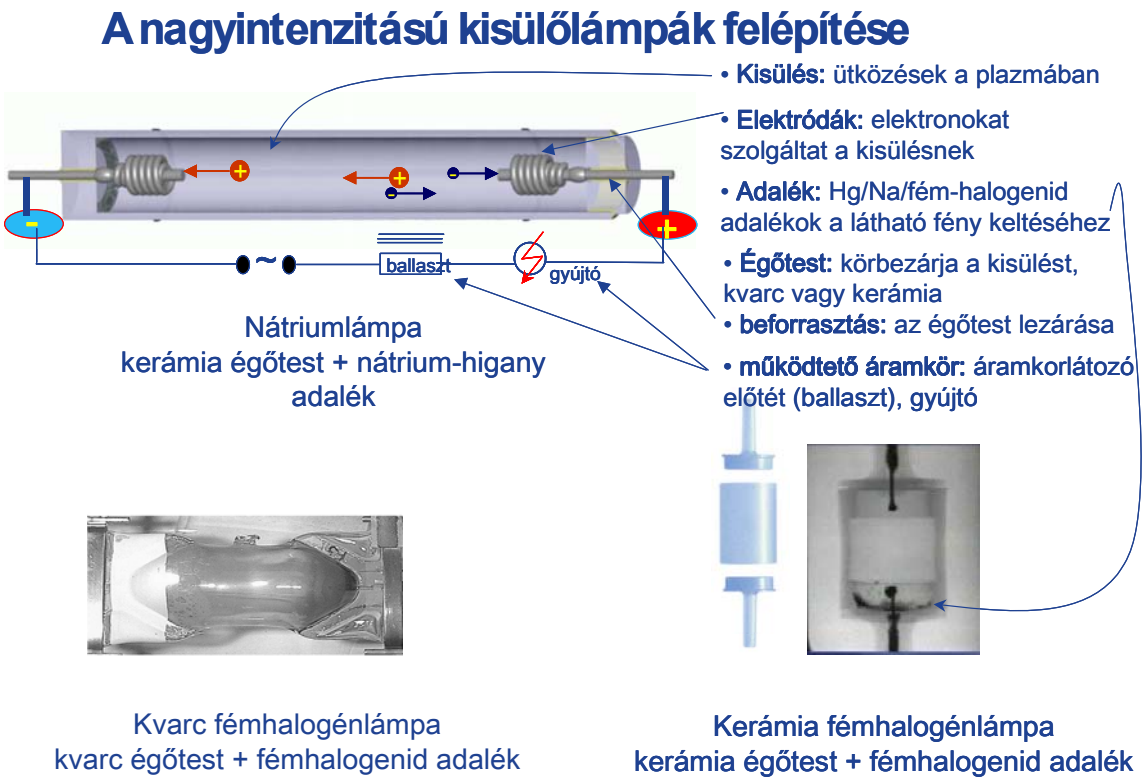
a LED-ek kiválóan alkalmasak a fényáramszabályozásra úgy, hogy a fény spektrális összetétele gyakorlatilag nem változik.. Hátrányuk viszont elsődlegesen az áruk. Másik – kevéssé közismert – hátránya, hogy fénytartását jelentős módon befolyásolja a LED-et ért hőterhelés. Ez a hőterhelés keletkezhet a készítés során (a beforrasztáskor, ami kihatással a magas hőmérsékletű ólommentes forraszanyagok használhatóságára), illetve a használat során. Ez utóbbi származhat az üzemeltetés során keletkezett Joule-hőtől, illetve a környezet fűtőhatásától. Az üzemeltetés közben keletkezett hő elvezetéséről, a LED hűtéséről gondoskodni kell, ez behatárolja az alkalmazhatóság körülményeit. Ugyancsak a hőhatással függ össze, hogy nem lehet nagy felületi fénysűrűségű LED-et készíteni. Tagadhatatlan azonban, hogy a LED-ek még mindig fejlődési ciklusuk elején járnak, és egyre nagyobb helyet fognak követelni a világítástechnikában.

2.2. A Nagyintenzitású Kisülőlámpák felépítése

A nagyintenzitású kisülőlámpák égőtestjének konstrukcióját a 2.5. ábra segítségével mutatjuk be. Jelen fejezetben az egyes részeket csak vázlatosan, funkciójukat tekintve mutatjuk be, de rövid kitekintést nyújtunk az adott konstrukciós elem aktuális, anyagtudományi vonatkozású kutatási témáira. A kutatási témák részletes kifejtése megtalálhatók például [Toth 2006, Toth 2007]-ban.

2.2.1. Az ív és az adalékrendszer

A kisülőlámpákban a fénykeltés alapja maga az ív, azaz a plazma, az itt keletkezett és a lámpát elhagyó fotonok jelentik tulajdonképpen a lámpa általi világítást. A lámpa működése során az égőtestbe helyezett adalékanyagok (részben, vagy egészben) az ívbe párolognak, ott atomjaik ütköznek az ívben lévő elektronokkal, gerjesztett állapotba kerülnek. Energiavesztésük egyik lehetséges módja a fotonok kisugárzása.



2.5. ábra. A nagyintenzitású kisülőlámpák égőtestjének felépítése. A felső ábra egy monolit konstrukciójú nagynyomású nátriumlámpa vázlatos keresztmetszeti rajza az égőtest konstrukciós elemeinek feltüntetésével. Alul egy kvarc fémhalogénlámpa fényképe (baloldalon), mellette egy kerámia fémhalogén lámpa röntgenképe (jobb oldalon) látható. A röntgenképen látható az alsó részen elhelyezkedő adalék.

A történelmileg legelső nagynyomású higanylámpa esetében a fénykeltő anyag a higany. A fémhalogén lámpák esetében a Hg mellett valamilyen fémhalogenid vegyületet, általában valamilyen jodidot is adalékolunk a lámpába. Néhány tipikus adalék kombináció: {Hg+Na+Sc+I}, {Hg+Na+In+Sn+Tl+Br+I}, {Hg+Na+Dy+Tl+I+Ca}. Az adalékrendszer együttes sugárzása hozta létre a 2.2. ábrán bemutatott fémhalogén lámpa spektrumot. A fénykeltésben csak maga a fém adalék vesz részt, a halogenid formában való adalékolást az teszi szükségessé, hogy a lámpa alkatrészei által megszabott praktikus működési hőmérsékleten a tiszta fémek gőznyomása túl alacsony volna.

A nagynyomású nátriumlámpában az adalék általában nátrium-higany amalgám, illetve tiszta nátrium. A lámpa jellegzetes aranysárga színét a nátrium 589 nm-es D-vonala adja. Ennek természetes vonalszélessége mindössze 0.025 nm volna. A körülbelül 4000 K-es ívet körülveszi azonban egy körülbelül 3000 K hőmérsékletű köpeny, amely

szintén tartalmaz Na atomokat. Ezek az atomok rezonancia adszorpció révén elnyelik az ívben keletkezett fotonokat, ezáltal gerjesztődnek, majd újra emittálnak. Tulajdonképpen az ív fényét átbocsátjuk egy olyan rezonancia szűrőn, amely maximális áteresztőképességének hullámhossza egybeesik az ív maximális sugárzásának hullámhosszával. Ezzel és a köpeny sugárzásával alakul ki a 2.2. ábrán bemutatott, úgynevezett kiszélesedett nátriumlámpa spektrum, ahol a két a D vonal már két csúccsá szélesedett ki. A két 'csúcs' közötti távolság, szaknyelven szólva D-vonal kiszélesedés mértéke a 10 nm-es nagyságrendbe esik.

A lámpatervező elsődleges feladata, hogy egy adott alkalmazáshoz adott spektrumú lámpát tervezzen. Sajnos – különösképpen a bonyolult fémhalogenid rendszerek esetében – nem állnak rendelkezésre *ab initio* szimulációs eszközök, amelyek egy adott módon adalékolt lámpa spektrumát a kellő pontossággal megjósolják. Legcélravezetőbbek a kísérlettervezési és statisztikai módszerek, melyeket például Brumleve ismertet [Brumleve 2005]. A különböző termokémiai adatok meghatározása azonban alapvető fontosságú a megbízható plazmamodellek létrehozása szempontjából [Mucklejohn 2006]. Ilyen paraméterek a viszkozitás, hővezetőképesség, elektromos vezetőképesség és a hőkapacitás. Ezen paraméterek kiszámításához a transzport együtthatók ismerete szükséges, amik viszont a kémiai összetételtől függenek. A jelzett számítások a rendszer Gibbs energiájának minimalizálásán alapszanak. Ehhez szükséges ismernünk a kulcs termodinamikai paramétereket, valamint figyelembe kell vennünk, hogy az ívben különböző, úgynevezett komplex vegyületek is képződnek. Ez azt jelenti, hogy például NaI és TmI_3 adalékot tartalmazó rendszerben a két említett vegyület mellet a kettőjükből formálódott egyéb vegyületek, mint például Na_2I_2 or Na_2TmI_5 is megjelenik. Mi több, kimutathatók a kerámiacső falával történő reakció eredményeképp létrejövő AlI_3 vagy $NaAlI_4$ vegyületek is [Hilpert 1997]. Ez máris előrevetíti, hogy az adalékrendszer megválasztásánál nincs szabad kezünk, az adalékrendszernek összeférhetőnek kell lennie a lámpa többi alkatrészével is. Sok esetben egy adott sugárzó elem gőznyomását ezek a komplex vegyületek határozzák meg. Ez – bár nehezíti a lámpa elméleti leírását – jó, hiszen ezáltal nő a fénykeltő anyagok koncentrációja az ívben. A kisülésben összetételének optikai spektroszkópiai elemzése segítheti a kisülésmodellek fejlesztését. Az optikai spektroszkópiai módszerek összefoglalása megtalálható [Zhu 2005]-ban. A

lámpába “szándékosan” tett összetevők mellett szót kell még ejtenünk a szennyezők hatásáról is. A nagyintenzitású kisülőlámpák készítése általában úgynevezett szárazboxban, ppm szintű oxigén, víz és hidrogén tartalom mellett folyik, ezen elemek hatása szintén befolyásolja a lámpa működését, kezdeti és az élettartam során tapasztalt viselkedését [Toth 2004a].

2.2.2. Az elektródák

A Nagyintenzitású Kisülőlámpákban a plazma két elektróda között jön létre. Az ívben akár 5000 K fok is lehet a hőmérséklet, az ív talppontja az elektródán 2500 K feletti hőmérsékletű. Az elektródák csaknem kizárólag volfrámból készülnek, mert magas olvadáspont és kismértékű párolgás jellemzi. Utóbbi folyamat – a párolgás miatt működés közben a volfrám a égőtest falára rakódik - fény elnyelést és ezáltal fényáram csökkenést okoz. Az elektródák anyagának az égőtest falára való lerakódásának megakadályozása a jó fénytartású lámpa fejlesztésének egyik kulcsfontosságú lépése.

A jó katódrendszer követelménye az, hogy a rendszer kilépési munkája minél alacsonyabb legyen. Beck és szerzőtársai egy új metodikát: a kilépési munka spektroszkópiát dolgozták ki a vizsgálathoz. A vizsgálandó felületet elektronokkal való bombázása során elemezvén a mintából kilépő elektronok energia-eloszlását, a kilépési munka meghatározható, miközben a felületen lévő anyagok mennyiségi eloszlásáról is képet kapunk [Beck 2005]. A térbeli feloldásnak a gerjesztő elektronsugár mérete szab határt. A plazmában lévő, így az elektródával is kölcsönhatásba kerülő adalékanyagok szintén csökkentik a kilépési munkát, ami viszont a katód hőmérsékletének csökkenésével is jár. Luijks és munkatársai például éppen a katódhőmérséklet mérésével állapították meg, míg a NaI és TlI rendszerben a katód – általuk mért úgynevezett “effektív” – kilépési munkája nem változott számottevően a tiszta Hg kisüléshez képest, addig Dy hozzáadásával akár 1 eV csökkenés is tapasztalható volt. Eredményüket azzal magyarázták, hogy a Dy könnyebben adszorbeálódik a W felületén a Na-hoz, vagy a Tl-hoz képest [Luijks 2005]. Az elektródák és az ív kölcsönhatásának leírására, beleértve például a kilépési munka hatását a mért értékekkel jól megegyező modellek léteznek [Benilov 2005]. Figyelmet kell fordítani a működtető elektronika és a elektródák

viselkedése közötti kölcsönhatásra is. Lamouri és szerzőtársai a lámpák fénytartását hasonlították össze egy 50 Hz frekvencián működő hagyományos előtét és egy nagyfrekvencián (néhány kHz) működő elektronikus előtét esetében. Megállapították, hogy bár az átlagos áramerősség azonos volt, az elektróda maximum hőmérséklete mintegy 200 K-nel kisebb az elektronikus előtét esetében. A szerzők mérései szerint ez körülbelül akár 10-20%-al jobb fényáramtartáshoz is vezethet [Lamouri 2005].

Kísérletek folynak az elektróda nélküli kisülőlámpák kifejlesztésére is. Ezek világítástechnikai alkalmazása inkább a fluoreszcens konstrukcióban terjedt el, látsd például a GE Genura lámpája [US 5,789,855].

2.2.3. Az égőtest anyaga

A kisülést el kell szigetelni a külvilágtól. Az égőtestnek ki kell bírnia a működés közbeni magas falhőmérsékletet (amely 1100-1450 K között mozog) és az agresszív adalékgőzöknek is ellen kell állnia. A működés közbeni belső nyomás a néhány száz millibártól néhányszor tíz bárig, illetve bizonyos konstrukciók esetében akár 100 bárig is terjedhet! Az égőtest anyaga higany és fémhalogén lámpák esetében kvarc, míg nagynyomású nátrium és kerámia fémhalogén lámpák esetében áttetsző nagytisztaságú alumíniuim-oxid. A legújabb alkalmazások, mint például az gépkocsi fényszórólámpák, vagy a vetítőlámpák könnyen fókuszálható, pontszerű fényforrásokat követelnek meg. Ennek egyik útja, hogy nem áttetsző, hanem átlátszó, a fényt nem szóró kerámiát tudjunk alkalmazni. Erre két út is kínálkozik. Az egyik a jelenleg is alkalmazott polikristályos alumínium-oxid alapanyagból indul ki (egykristályos zafír, vagy szubmikronos szemcseméretű kerámia formájában, míg a másik út alternatív kerámiákat alkalmaz [Kappen 2005], [Wei 2005].

A kerámia és az adalékanyag reakcióját, az úgynevezett kerámiakorróziót vizsgálták Markus és szerzőtársai [Marcus 2004]. Eredményük szerint a nagy hőmérsékleti gradienssel rendelkező lámpában a

$$AlI_3\,(g) + Al_2O_3\,(sz) = 3AlOI\,(g) \qquad (1)$$

kémiai reakció a kisülőcső forró részéről a hidegebb rész felé tudja a kisülőcső anyagát szállítani. A fenti reakcióban az AlI_3 az alábbi reakció során jöhet létre a

lámpába helyezett fémhalogenid adalék (esetünkben például DyI_3) és az alumínium-oxid között:

$$DyI_3\ (g) + Al_2O_3(sz) = DyAlO_3\ (sz) + AlI_3\ (g) \qquad (2)$$

(a "*g*" megjelölés gáz, míg a "*sz*" szilárd halmazállapotú reagenst jelent) Nagyobb mennyiségű adalék esetén a folyadék halmazállapotú adalékban történő, szintén a hőmérséklet hatására létrejövő transzport reakciót is megfigyeltek.

Az említett korróziós kémiai reakciók mellett figyelembe kell venni a kerámia falában történő diffúziós folyamatokat is, amely szintén az adalék elvesztéséhez, a lámpa fénytechnikai paramétereinek megváltozásához vezethet. Lovas és szerzőtársai megállapították, hogy a nátrium szemcsehatár menti diffúziós együtthatója polikristályos alumínium-oxidban körülbelül két nagyságrenddel nagyobb, mint a térfogati. A szemcsehatár menti diffúzió különböző aktiválási energiákkal játszódik le a 700 C alatti, illetve feletti tartományban. A törést az Arrhenius görbén az indokolja, hogy a kerámiacső bizonyos tartományaiban a szemcsehatárok mentén már a lámpa működési hőmérsékletén megindult a vegyületképződés (Lovas 2007). Ez azonban csak elősegíti a diffúziót, de nem a vegyületképződés a sebesség-meghatározó folyamat a Na fogyás szempontjából.

2.3.4. A beforrasztás

Ez az égőtest tulajdonképpeni lezárása az úgynevezett beforrasztási művelet. Ezzel a művelettel kell az elektróda meghosszabbítását jelentő fém árambevezetőt a kerámia égőtest anyagához rögzíteni oly módon, hogy az vákuumzáró (illetve az égőtest belsejéből nézve nyomástartó) legyen a lámpa élettartama során. A művelet eredményeképp létrejött szerkezeti elemet a szakzsargonban szintén beforrasztásnak nevezzük. Amennyiben ezen a rögzítésen rés keletkezik, az égőtestből az adalékanyagok a külső búrába kerülnek. Ez nem föltétlen jelenti a lámpa azonnali működésképtelenségét, de mindenképp a fényáram gyors csökkenéséhez és az élettartam jelentős rövidüléséhez vezet. A beforrasztás kilyukadásának folyamatát közvetlenül megfigyelni lehetetlen, okaira a hiba bekövetkezése után végzett anyagvizsgálatokból következtethetünk. A hibák utólagos feltárását nehezítik a kilyukadás hatásaként létrejött

egyéb, az alkatrészek roncsolódásával járó folyamatok. Különösen akkor igaz ez, amennyiben a külső búrában a gyújtóimpulzus hatására elektromos kisülés jön létre, amely a beforrasztási zóna megrepedését, illetve teljes degradációját vonja maga után.

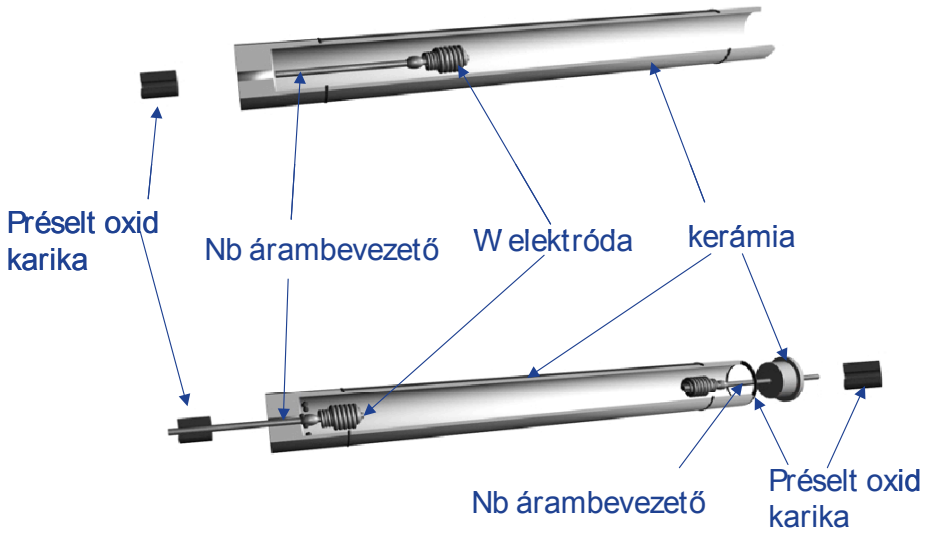
A beforrasztás kilyukadása több okból is bekövetkezhet, mely okokat több különféle, véletlenszerűen lejátszódó esemény befolyásol. Ezek közül kell megkeresni a meghatározó okot, vagy okokat. Az egyik ilyen lehetséges ok a beforrasztás mikroszerkezetében, a benne lévő hibákban, mikrorepedésekben, a beforrasztás anyagában fellépő feszültségekben keresendő. E mikrorepedések akár már a lámpakészítés művelete során képződhetnek, vagy a lámpa üzemelése során keletkeznek. A repedések kialakulása és a már kialakult repedések kiterjedése az anyagban ébredő lokális húzófeszültségek eredménye. Ilyen feszültségek forrása a lámpában tipikusan a hőtágulás. A makroszkopikus hőtágulás a beforrasztás alkotóelemeinek inhomogén mikroszerkezete miatt igen különböző lokális feszültségértékeket eredményezhet. Vevői visszajelzésekből tudjuk, hogy a lámpa megbízhatósága szempontjából legkritikusabb szakasz az úgynevezett korai meghibásodások szakasza. Ez gyakorlatilag az első 4000 üzemórát jelenti. Ez megfelel egy közvilágítási évnek, azaz a lámpát gyakorlatilag az első üzemévben cserélni kell. A közvilágításnál is nagyobb követelményeket állító növényházi alkalmazásoknál ez körülbelül két szezont jelent (itt a lámpákat 8-10000 óra után cserélik). Munkánkat emiatt elsősorban erre az időperiódusra koncentráljuk, de kitekintünk az ezt követő tartóségetés során lezajló folyamatokra is.

A beforrasztási művelet

A beforrasztás kiinduló alkotóelemeit a 2.6 ábra mutatja. Az ábrán az úgynevezett monolit konstrukciójú kerámiacső keresztmetszeti rajza látható. A monolit név az ábrán látható kerámiacső bal oldalára utal, ahol a kerámiacső és csövet lezáró kerámia ‘dugó’ egységet, monolit struktúrát alkot. Az ábrán a kerámiacső jobb oldala még nyitott, jobb oldalt lezáró kerámiadugó az ábra alsó részén látható.

Maga a gyártósor, illetve a beforrasztási művelet megtekinthető [Toth 2004a] – ban. A kerámiában (akár a monolit oldalon, akár a dugóban) lévő furatba helyezzük az elektródát már tartalmazó fém árambevezetőt, a kettő közé pedig egy többféle oxid

keverékéből álló (esetünkben: Al_2O_3 – ez az égőtest kerámiájának az anyaga, továbbá CaO, illetve kisebb mennyiségben Y_2O_3 és SrO) álló préselt karikát helyezünk.



2.6. ábra. A nagynyomású nátriumlámpa égőtestjének szerkezeti felépítése a beforrasztás művelete előtt. A konstrukciós részek ismertetése a szövegben található.

Az összeállított szerelvényt magas hőmérsékletű kályhába tesszük, ahol a préselt karika megolvad. Az olvadék befolyik a fém és a kerámia közti résbe, és a fémet körbevéve teljesen kitölti a fém és a kerámia közti üreget. A kályha hőmérsékletének csökkentésével az olvadék megszilárdul és létrehozza a vákuumtömör zárást a fém árambevezető és a kerámia között. A beforrasztási művelet egyik legfontosabb paramétere az úgynevezett hőprofil. Ez a kályha hőmérsékletének időbeli lefutását jelenti az idő függvényében. Egy beforrasztási hőprofil sematikus lefutása látható a 2.7. ábrán. Lényeges szakaszai a következőek:

a) a kályha felfűtése egy adott, a névleges olvadáspont alatti hőmérsékletre
b) adott idejű hőntartás ezen a hőmérsékleten. Ekkor homogenizálódik a hőmérséklet a beforrasztás szerkezeti elemei között. Megjegyzendő, hogy a kerámia gyakorlatilag átlátszó az infravörös tartományban (2.8. ábra). Emiatt a fém árambevezető melegszik fel gyorsabban és fűt rá bizonyos mértékig a kerámiára. A karika ebben a fázisban még nem olvadt meg.
c) Felfűtés az olvadáspont fölötti hőmérsékletre.

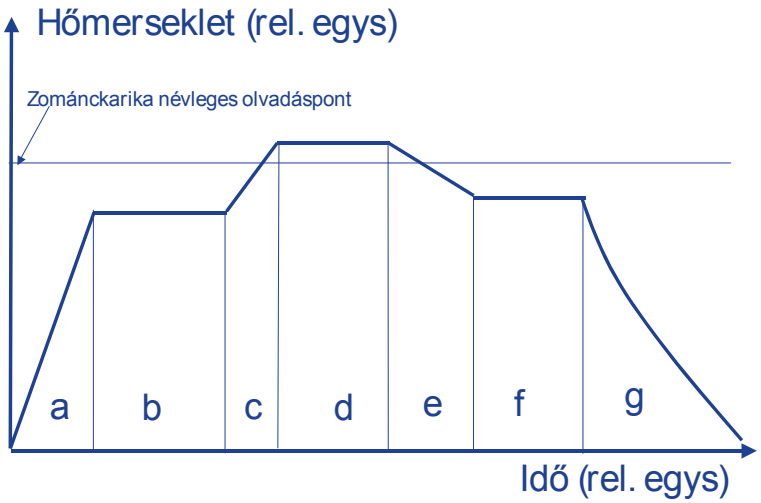
d) Hőntartás ezen a hőmérsékleten. A karika megolvad és befolyik az árambevezető és a kerámia közötti részbe. Lényeges szempont az olvadt zománc és a szilárd alkatrészek (mind a fém, mind pedig a kerámia) közötti nedvesítés. Emiatt kulcsfontosságú az alkatrészek felületének minősége, tisztasága.

e) Hűtés megkezdése adott hőmérsékleti gradiens vagy profil szerint a zománc névleges olvadáspontja alá. Az olvadt zománckarika megszilárdul.

f) Hőntartás az olvadáspont alatti hőmérsékleten, a zománc megszilárdult állapotában (opcionális)

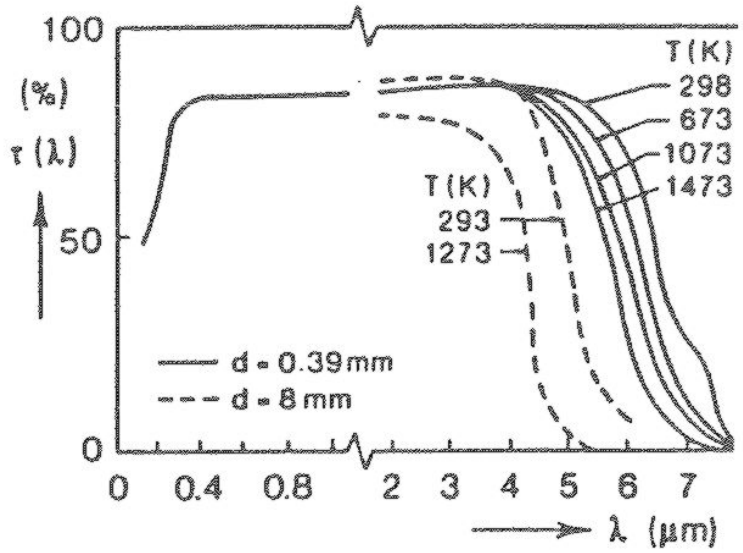
g) Hűtés folytatása adott hőmérsékleti gradiens vagy profil szerint.

A beforrasztás minőségét, a kialakult kristályszerkezetet leginkább a c) pont hőmérséklete, az ezen a hőmérsékleten eltöltött idő (d) és a hűlés lefolyása (e) szabja

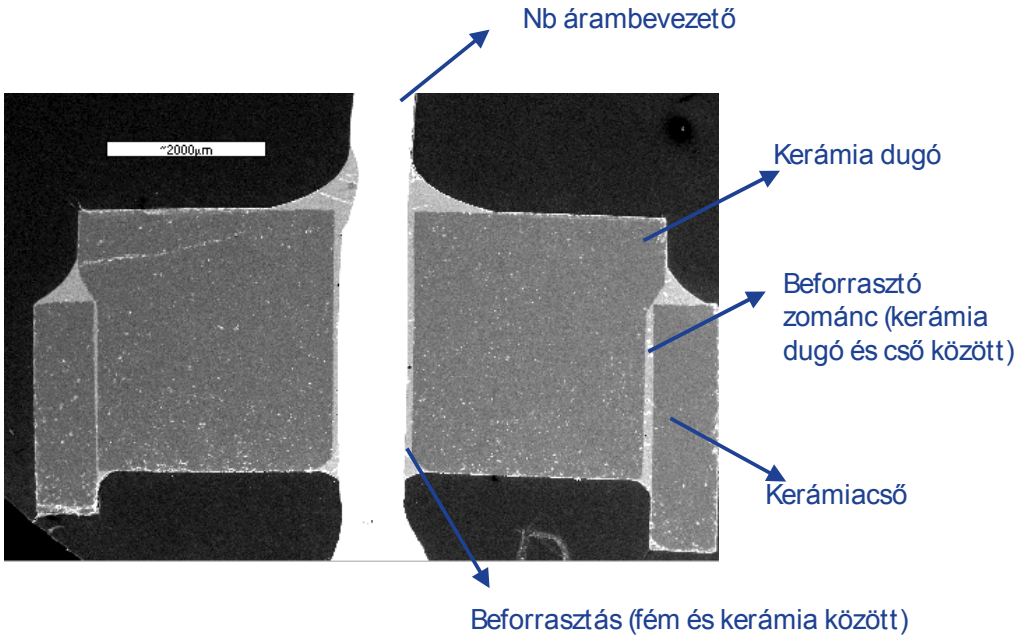


2.7. ábra. A beforrasztási művelet hősémája. A hőséma jelzett részinek magyarázata a szövegben található

A megszilárdult 'kötőanyag' neve *zománc*. A beforrasztási művelet utáni struktúrát mutatja a 2.9. ábra. A zománc vastagsága néhányszor tíz mikrométer.



2.8. ábra. Alumínium-oxid áteresztőképessége a hullámhossz függvényében. A kisülőlámpákban tipikusan alkalmazott falvastagság kisebb, mint 1 mm, a falhőmérséklet tipikusan 1350-1400 K.

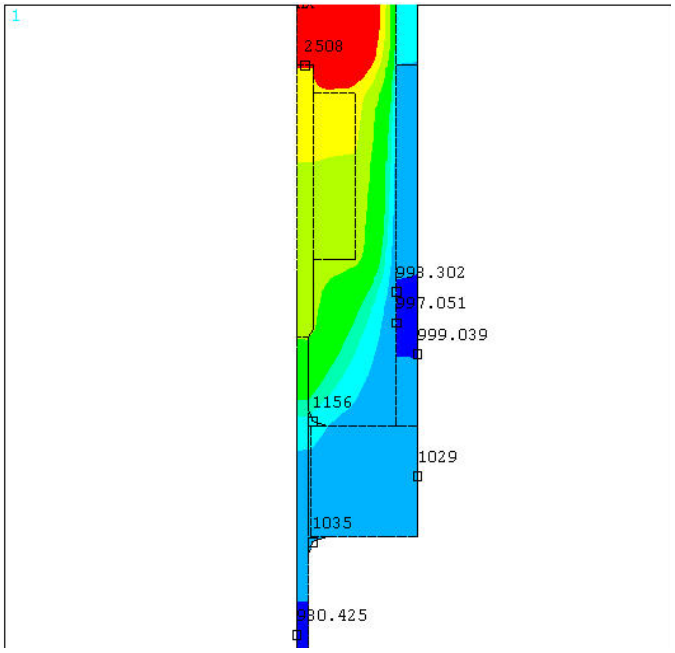


2.9. ábra. A beforrasztás hosszmetszeti csiszolata a beforrasztás műveletének elvégzése után.

A beforrasztás szerepe a lámpa megbízhatóságában

A beforrasztás során hőmérséklet említett csökkenésével, a zománc megszilárdulása közben különböző fázisok jönnek létre. Ezeknek a fázisoknak különböző hőtágulási együtthatói lehetnek, ami miatt a hőmérséklet csökkenésével különféle

feszültségek alakulnak ki, amik létrehozzák az égőtest kívánt lezárását, ugyanakkor mechanikai feszültséget is keltenek az rendszerben. Ez a mechanikai feszültség hasznos is lehet, ha a rendszerünkben a zománcanyag ráfeszül a fém árambevezetőre. Túlzott mértéke azonban – bár a szerkezeti anyagok egy-két nagyságrenddel nagyobb nyomófeszültséget viselnek el, mint húzót – már kárt tehet a beforrasztás szerkezeti anyagaiban. A lámpa működése során a beforrasztási zóna hőmérséklete – típustól függően – akár az 1070-1200 K^{o}-t is elérheti (2.10. ábra).

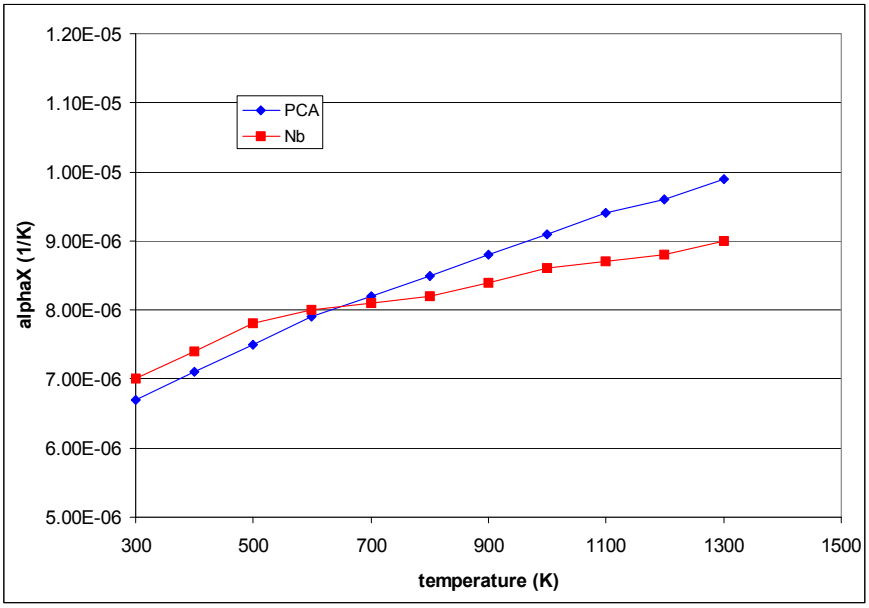


2.10. ábra. Hőmérséklet-eloszlás monolit konstrukciójú beforrasztásnál. Az adatok K-ben vannak feltüntetve

A hőmérséklet bekapcsoláskor a környezeti hőmérsékletről mintegy egy perc alatt éri el az egyensúlyi hőmérsékletet, kikapcsoláskor a lehűlés lassabb, mintegy 6-7 perc alatt hűl 400 K^{o} alá. Ez mutatja a beforrasztás szerkezete felé állított magas követelményeket, hiszen a lámpa 28500-32000 órás névleges élettartama során több ezer ki-bekapcsolási ciklust kell túlélnie A cél tehát olyan beforrasztási zománcstruktúrát létrehozni, ami a kívánt feszültségállapotot hozza létre a beforrasztás szerkezetében. Mint már utaltunk rá, az általunk használt konstrukcióban valójában kétféle beforrasztás létezik. Az egyik a fém árambevezetőt rögzíti a kerámiához, míg a másik a kerámiacsövet rögzíti a kerámia dugóhoz (látsd 2.6. ábra). Korábbi, kilyukadt égőtesteken héliumos

lyukkeresővel végzett vizsgálatok tapasztalatai szerint – a kívánt beforrasztási művelet végrehajtása után, azaz nem durva technológiai hibát vétve – kilyukadás szinte kizárólag csak az előbbi: fém-kerámia beforrasztásnál keletkezik. Így munkánk is erre a szerkezeti elemre koncentrál.

A hőmérsékletváltozáskor fellépő feszültségek elkerülésének legjobb módja az, ha azonos hőtágulású anyagokat használunk. A fém árambevezető anyaga éppen ezért Nb, mivel hőtágulási együtthatója jó egyezésben van az alumínium-oxidéval (nagyságrendileg mindkettő 8-9*10^{-6} 1/K^{o}, a pontos – hőmérsékletfüggő adatok a 2.11. ábrán találhatóak). A beforrasztó oxidkeverékre több lehetséges, kereskedelmi forgalomban elérhető lámpákban alkalmazott összetétel ismert. Közös jellemzőjük, hogy nagy arányban tartalmaznak alumínium-oxidot és kálcium-oxidot. E két fő összetevő mellett különböző adalékanyagok hozzáadása lehetséges, mint például MgO, BaO, B_2O_3, Y_2O_3, SrO stb. Kísérleteinkben a fent említett Al_2O_3-CaO-Y_2O_3-SrO összetételű oxidkeveréket használtuk. (A pontos összetétel, illetve a beforrasztás technikai részletei, mint például a beforrasztás művelete során alkalmazott hőséma iparjogvédelmi okokból nem adható meg).



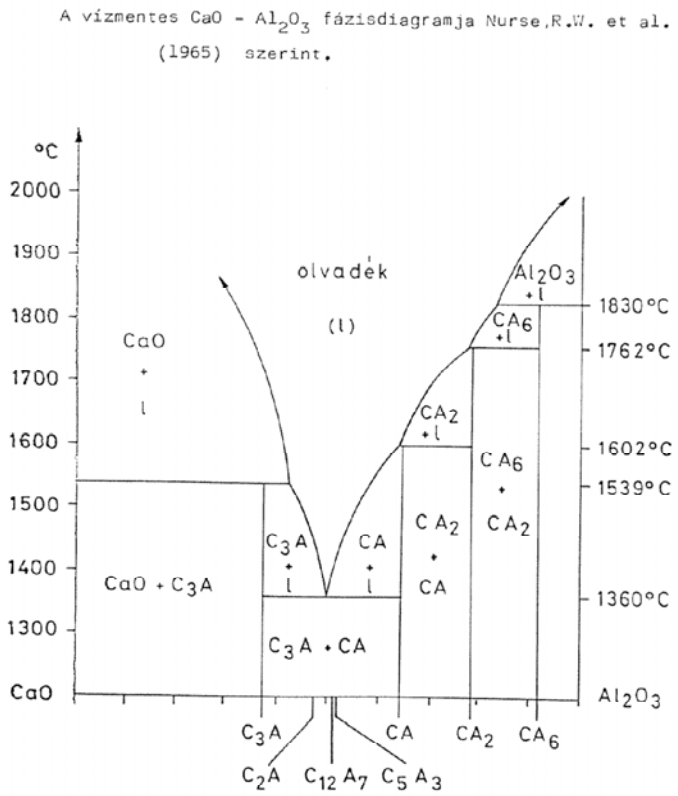
2.11. ábra. Az alumínium-oxid (PCA) és a nióbium (Nb) árambevezető lineáris hőtágulási együtthatójának hőmérsékletfüggése [Toth 2005b].

Alumínium-oxid alapú kerámiák mechanikai tulajdonságai és fázisai

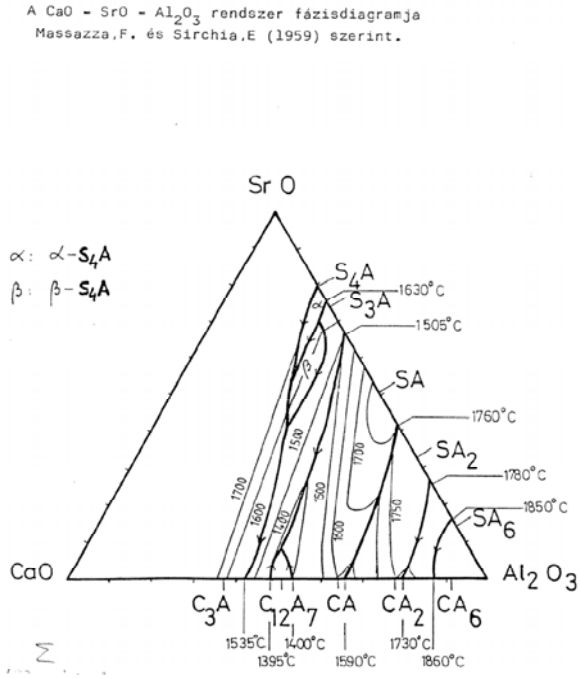
A fenti rendszerhez hasonló, alumínium-oxid alapú kerámiák mechanikai tulajdonságait mind ipari, mind orvosi célra is intenzíven kutatják. Ezen alkalmazásokban azonban az anyag porozitásának általában csak közvetett szerepe van. (Néha előnyös lehet, látsd [Firstov 2002]. A nagynyomású kisülőlámpákban a porozitás kifejezetten káros, hiszen a kerámiának el kell szigetelni az akár atmoszférikus nyomást is meghaladó plazmát a külső búra vákuumterétől.)

Ezekben a rendszerekben fennáll, hogy két fő fázis különböztethető meg: egy kristályos fázis és egy üveges fázisnak nevezett alapmátrix. Itt is fennáll, hogy a különböző fázisok különböző hőtágulási együtthatói miatt hőfeszültségek lépnek fel a rendszerben. Különböző alumínium-oxid alapú kerámiák esetében például Twigg és szerzőtársai kis terhelésű Vickers benyomások segítségével húzó gyűrűfeszültséget mutattak ki az alumínium-oxid kristály határfelületénél, amikor az alumínim-oxidénál kisebb hőtágulási együtthatójú mátrixba volt beágyazódva [Twigg 1996]. A rendszerekben erős feszültség inhomogenitás is felléphet. Ilyen inhomogenitást mutattak ki jó síkbeli feloldással rendelkező piezo-spektroszkópiai módszerrel Al_2O_3/NiAl rendszerben, vagy $MgSiO_3$ vagy $CaSiO_3$ –al együtt szinterelt alumínium-oxid esetében [Galusek 2000, Lughi 2000].

Utaltunk rá, hogy a zománcban hűléskor különböző fázisok alakulnak ki. A zománcban kialakuló fázisokat [Nagy 1989] alapján sorolhatjuk csoportokba. Az Al_2O_3-CaO binér rendszer fázisait a gyártás körülményeire jellemző vízmentes környezetben a 2.12. ábra mutatja [Nurse 1965], átvéve [Nagy 1989-ből]. A rendszerben C_3A (ortorombos, táblás kristályok), CA (monoklin), CA_2 (derékszögű, lemezszerű kristályok) és CA_6 (hatszöges lemezszerű kristályok) stabil fázisok, illetve C_5A_3 és $C_{12}A_7$ metastabil fázisok mutathatók ki. Utóbbi csak víz jelenlétében keletkezik, illetve a nedvesség stabilizálja. (C: CaO, A: Al_2O_3, például C_5A_3: $5CaO.3Al_2O_3$). SrO-t adva a fenti rendszerhez a fenti fázisok CaO-SrO helyettesítésű szilárd oldatai képződnek: (C,S)A ($Ca_{1-x}Sr_xO.Al_2O_3$), $(C,S)A_6$, $(C,S)A_2$, $(C,S)A_3$, látsd 2.13. ábra [Masazza 1959], átvéve [Nagy 1989]-ből.



2.12. ábra. Al_2O_3 és CaO fázisdiagrammja vízmentes környezetben



2.13. ábra. A CaO-SrO-Al_2O_3 rendszer fázisdiagrammja.

A beforrasztásban kialakuló kristályos fázisok

A Nb árambevezető és a kerámia közötti zománc tipikus vastagsága néhányszor tíz mikrométer. A lámpa beforrasztását a Nb árambevezetőt tartalmazó síkban elvágva (és megfelelő módon polírozva) a zománcok pásztázó elektronmikroszkópos képén az alapmátrixban (szokásos elnevezése üveges fázis) elterülő kisebb-nagyobb, tipikusan 1-10 mikrométer nagyságú kristályokat, bizonyos esetekben kisebb méretű kristályokat vagy lemezes kristályokat figyelhetünk meg. A kerámiacső mellett szinte mindig találunk kristályos fázist, míg a Nb mellett jóval ritkábban. Ennek oka az, hogy az olvadt zománc beoldja a kerámiacső falát (a zománckeverék jelentős mennyiségű alumínium-oxidot tartalmaz), és a fal egyben gócképzőként is szolgál. A Nb mellett akkor képződik kristályos fázis, ha ott valamilyen gócképző (szándékos, vagy véletlen szennyező) található. A zománcban kialakuló fázisokat Nagy Géza [Nagy 1989] alapján sorolhatjuk csoportokba.

A zománcban a tipikusan használt összetétel környezetében a CA és a C_2A fázisoknak megfelelő szilárd oldatok jelennek meg, néhol tartalmazva a fent említett Sr mellett még adalékolt Y-t is. A 2.14.a.-e. ábrákon bemutatunk néhány olyan beforrasztási morfológiát, amelyet tipikusnak mondható beforrasztási műveletek eredményeképp kapunk, illetve néhány olyan különleges struktúrákat, amelyeket extrém hőprofilokat alkalmazva hoztunk létre. Követve [Nagy 1989] elnevezését, a leginkább előforduló fázis a hasáb alakú "nagykristály". Összetétele (C,S)A ($Ca_{1-x}Sr_xO.Al_2O_3$), x tipikus értékei 0.15 és 0.3 között változnak. Y tartalma csekély, maximum 0.3-0.4%. A fent említett beforrasztási folyamatnak megfelelően a kerámiacső fala mentén szinte mindig megtalálható, de gyakran megjelenik a zománc belsejében is. Monoklin, átlagos hőtágulási együtthatója kisebb, mint az alumínium-oxidé, körülbelül $7.4*10^{-6}$ $1/K^o$-nek vehető. A tiszta CA-hoz képest a hőtágulási együtthatója némileg kisebb attól, azaz a Sr (és esetleg a csekély mennyiségű Y) növeli az alumínium-oxid és a nióbiumot hőtágulásától való eltérést, de csökkenti a hőtágulás anizotrópiáját.

Keskeny, lemezes kristályokat formál az úgynevezett "világos" fázis, összetétele $2(Ca_{1-x}Sr_x)O.(Al_{1-y}Y_y)_2O_3$ (x 0.03 és 0.09, y 0.08 és 0.15 között mozog). Mivel Y tartalma jelentősebb, előszeretettel fordul elő el nem reagált Y_2O_3 szemcse körül, mely

gócképzőként is szolgálhat nagyobb méretű kristályai megjelenéséhez. (A fázist vélhetően az Y stabilizálja).

Említettük, hogy a beforrasztás folyamata során az olvadt zománc beoldja a kerámiacső falát. Ennek eredményeképp egy jelenik meg a nagyobb alumínium-oxid tartalmú "reakcióperem" nevű $(C,S)A_2$ fázis a kerámiacső és a nagykristály fázis határán. Vastagsága tipikusan 1-2 mikrométer.

Még több Ca-t tartalmazhat a C_3A-szerű "szürke" fázis, képlete $3(Ca_{1-x}Sr_x)O.(Al_{1-y}Y_y)_2O_3$ (x,y =0.03-0.05). [Nagy 1989] szerint ritkán jelenik meg, esetünkben – az általunk alkalmazott körülmények között, egyezésben a zománckeveréket gyártó cég adataival - szintén jelentős fázisnak, a mátrix fő összetevőjének tudható be. Köbös és ortorombos változata is létezhet, mindkettő hőtágulási együtthatója nagyobb, mint az alumínium-oxidé, 9.6-10.8 közé várhatóak, természetesen összetételtől és kristályszerkezettől függően.

Meg kell még említeni a $C_{12}A_7$ fázist is, bár a vízmentes szárazboxban való gyártás miatt gyakorlatilag nem jelenik meg. Ez két okból is előnyös. Egyfelől hőtágulása jelentősen eltér az alumínium-oxid és a nióbium értékétől ($4.3*10^{-6}$ $1/K^o$, Lay 1981). Másfelől pedig – főleg nátriumra – gyors iontranszportot tesz lehetővé, így megnövekedne a zománcba történő káros Na diffúzió mértéke [Lacerda 1988].

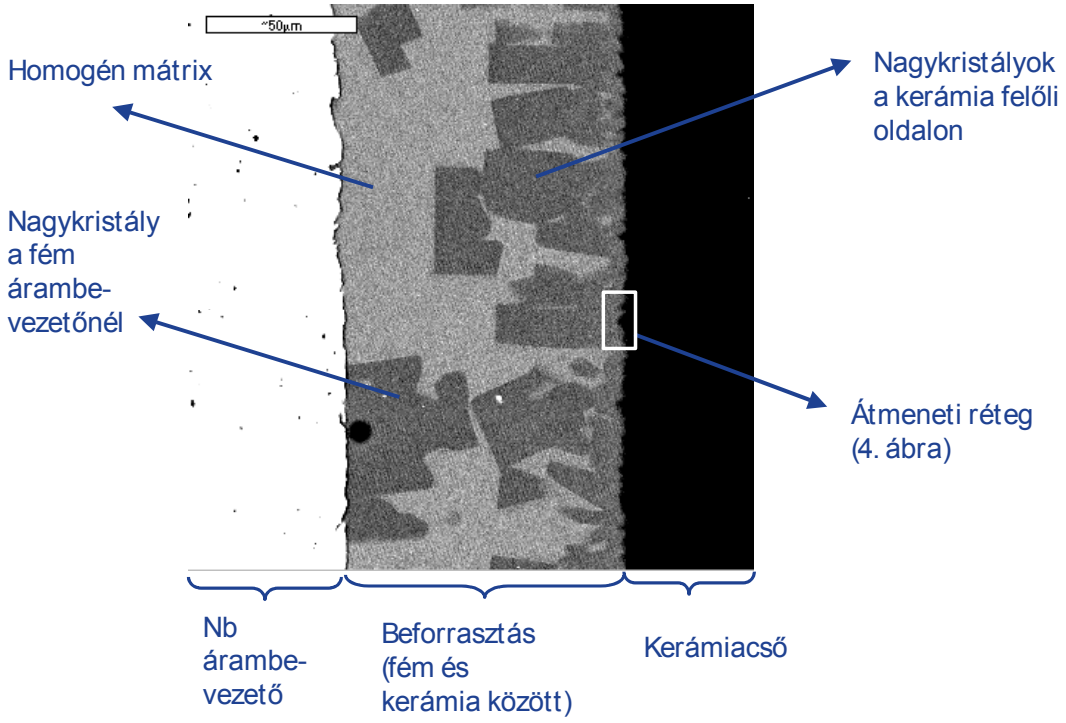
A mátrix szerkezete

Az alapmátrix szerkezetét amorfnak hittük a munka kezdetén. A tartóségetés során fellépő változáshoz szükség volt a szerkezet pontos megismerésére. Ez a saját eredményeket bemutató 4. fejezetben kerül majd ismertetésre.

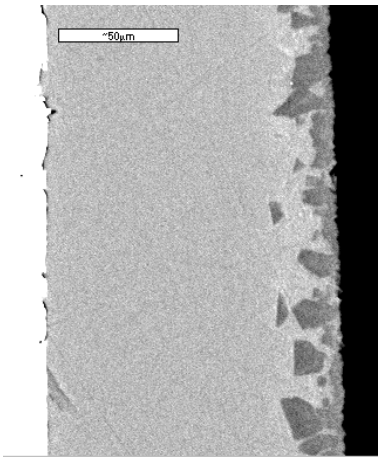
2.2.5. Az összeépített lámpa

A beforrasztott égőtestet fém állványra szerelik, ami nemcsak mechanikailag tartja az égőtestet, hanem egyúttal áramvezetőként is funkcionál. A kész szerelvényt a külső búra zárja körül. Ennek végén található az elektromos kontaktus, amivel majd a foglalatból a lámpa a tápfeszültséget kapja. A külső búra anyaga konstrukciótól és

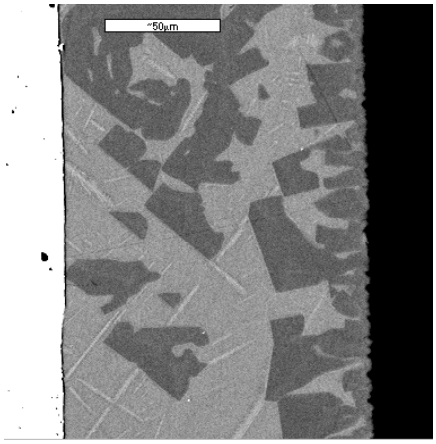
hőmérséklettől függően lágyüveg, keményüveg, vagy kvarc. Mivel működés közben a fémalkatrészek is néhány száz K-re melegszenek, gondoskodnunk kell az oxidáló környezet kizárásáról. Ezért a külső búra általában vákuumot, ritkább esetben nitrogént tartalmaz. A töltött külső búra hűti az égőtestet, ami fényhasznosítás vesztéssel jár, de bizonyos esetekben erre az égőtest hőmérsékleti profiljának beállítása, vagy egyéb adalékvesztési folyamatok lassítása végett van szükség. A 2.3. ábra képein látható egy G12 konstrukciójú kerámia fémhalogénlámpa, illetve egy elliptikus és egy csőbúrás E40 fejű nagynyomású nátriumlámpa fényképe.



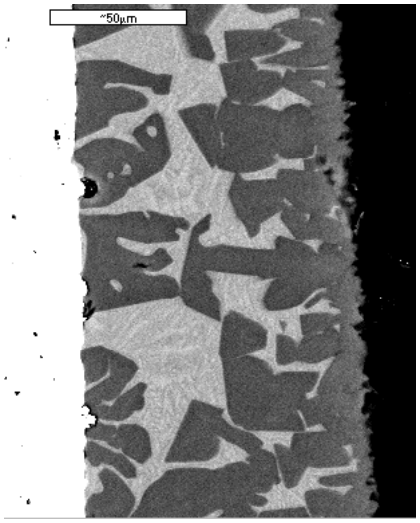
2.13.a. ábra. A beforrasztás hosszmetszeti csiszolata. A csiszolaton jól kivehetők a kerámiacső mellett sorakozó nagykristályok. A fém árambevezető mellett mindössze egy nagykristály nőtt. A kép felső szélén található nagykristály vélhetőleg a beforrasztási zóna közepén képződött. A mátrix homogénnek tűnik.



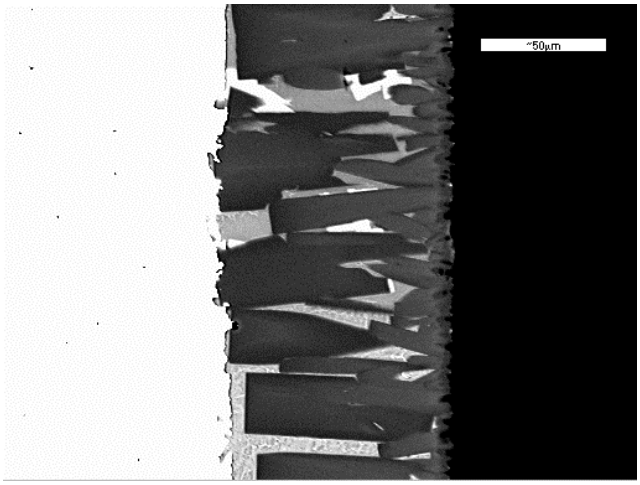
2.13.b. ábra. Minimális számú nagykristályt és nagy terjedelmű, a beforrasztási zóna több, mint 85%-t kitevő, homogénnek tűnő mátrixot eredményező beforrasztás hosszmetszeti képe



2.13.c ábra. A 2.13.a. ábrához képest némileg eltérő hőprofillal készült beforrasztás hosszmenti csiszolata. A mátrix már nem homogén, kissé szételegyedett, megjelentek benne a lemezes világos kristályok



2.13.d. a 2.13.d. ábrával ellentétben jelentős számú nagykristályt eredményező beforrasztás hosszmetszeti képe. A mátrix jelentősebben szételegyedett, mindössze a beforrasztási zóna alig harmadát fedi.



2.13.e. ábra. Extrém beforrasztás, a nagykristályok gyakorlatilag a kerámiacsőtől a fém árambevezetőig érnek. Nagyméretű ittriumdús fázisokat is megfigyelhetünk. Ilyen beforrasztási morfológiát csak különlegesen "elrontott" hőprofillal tudtunk elérni. (A 2.13. a-e ábrák Mészáros Júlia felvételei)

Összefoglalás

A nagyintenzitású kisülőlámpák még hosszú ideig meghatározó szerepet fognak betölteni a különféle alkalmazásokban, különös tekintettel azokra, ahol a nagy felületi fénysűrűség, vagy a nagy fényintenzitás a fő követelmény. Az anyagtudományi irányú kutatások a fényforrásipari kutató-fejlesztő munka szerves részét képezik. A lámpák nagy hőmérsékletű részein történő kémiai reakciók, illetve mechanikai változások ismerete kulcsfontosságú nemcsak a fényhasznosítás növelése, vagy a kívánt spektrum elérése céljából, hanem a megbízhatóság fejlesztésének szempontjából is. Nem szabad elfelejtenünk azonban, hogy a lámpafejlesztést mindig az egész rendszer: a fényforrás, a működtető elektronika és a lámpatest, mint egységes rendszer szempontjából kell végrehajtanunk.