7. Összefoglalás

A *nagyintenzitású kisülőlámpák* napjaink egyik legfontosabb fényforráscsaládját alkotják. A családba tartozó lámpák igen széles skálán felelnek meg a különböző követelményeknek. A *nagynyomású nátriumlámpák* például akár 150 lumen/watt értéket is elérnek fényhasznosításukkal, a *kerámiafémhalogén lámpák* használata pedig kiváló színvisszaadást (akár 90 fölötti) biztosít. A nagyintenzitású kisülőlámpák szinte mindegyikére jellemző a megbízhatóan hosszú élettartam, korai meghibásodásuk száma csekély. Ez utóbbi különösen a közvilágítás területén fontos, ahol egyre inkább igény, hogy a költségek csökkentése és az egyenletes megvilágítás érdekében a lámpákat a várható üzemidejük vége felé egyszerre, csoportosan cseréljék és ne az eseti meghibásodások szerint. A lámpák átlagos várható élettartamának növelése, illetve a korai kiesők számának további csökkentése a lámpafejlesztők kiemelt feladata. Érdemes azt is hangsúlyozni, hogy a fejlesztésben nem csupán a gazdaságossági szempontok számítanak, de egyre nagyobb szerepet kap a környezetvédelem is. A lámpák élettartamának meghosszabbítása kevesebb visszaforgatandó hulladékkal, így kisebb környezetterheléssel jár.

A lámpák megbízhatóságának növeléséhez a meghibásodás okainak feltárása, az odavezető folyamatok megismerése, és ezek alapján a termékfejlesztés optimalizálása a kiemelt feladat.

A lámpák meghibásodásának okai közt az egyik leggyakoribb a kerámia égőtest és a fém árambevezető közötti kötés lyukadása. Ez a kötés egy speciális összetételű fémoxid keverék megolvadása és megszilárdulása révén jön létre. A megszilárdulás folyamán különböző fázisok alakulnak ki az ipari gyakorlatban “zománc”-nak nevezett kerámiaanyagban. A kilyukadás folyamatát közvetlenül megfigyelni lehetetlen, okaira a hiba bekövetkezése után végzett anyagvizsgálatból következtethetünk. A feladat nem egyszerű, mert szinte minden feltárt hiba más. Olyan egyedi, véletlenszerűen fellépő eseményt kell tehát vizsgálni, amit nagyon sok külső-belső körülmény együttes hatása befolyásolhat. Ezek közül kell megkeresni a dominánsakat. Jelenlegi ismereteink szerint feltételezzük, hogy a zománc kilyukadásában döntő szerepe lehet az anyagban lévő mikrorepedéseknek. E mikrorepedések akár már a zománc megszilárdulása 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 zománc inhomogén mikroszerkezete miatt igen

különböző lokális feszültségértékeket eredményezhet. A problémát tovább nehezíti, amennyiben a bonyolult összetételű többfázisú zománc mikroszerkezete a lámpa üzemelése során változik. Ez a változás a lokális feszültségeket is változtathatja.

A zománc lyukadásához vezető hatások, mikrofolyamatok vizsgálata fontos feladat a lámpafejlesztés szempontjából, de általános anyagtudományi szempontból is érdekes. Doktori munkám során döntően ez utóbbi megközelítésre koncentráltam.

A munka fontos része a problémához illeszkedő vizsgálati módszerek megtalálása és egyéni alkalmazása, továbbfejlesztése. A zománc lyukadásának bonyolult problémája ugyanis speciális módszereket kíván, mivel a vizsgálandó zománc vastagsága a kerámia égőtest és az árambevezető fém közt tipikusan 50-100 mikrométer. A minták speciális volta miatt a fizikai anyagvizsgálat klasszikus mérési módszerei (pl. röntgendiffrakció, kalorimetria, dilatomeria, a törésmechanikában használatos három-, vagy négypontos hajlító vizsgálatok) nem alkalmazhatóak.

Új tudományos eredmények és tézisek

I. Alapkutatás

1. *Kis méretű, akár pár 10 μm –szer pár 10 μm területű minta törésmechanikai tulajdonságainak vizsgálatára és repedékenységének jellemzésére alkalmaztam a korábban fél-makro méretekben használt repedésstatisztikai módszert. Kimutattam, hogy az általunk vizsgált módosított felületű síküveg, illetve zománc-anyagok esetén a repedési valószínűség a terhelőerő függvényében a mikro-tartományban elfogadható pontossággal leírható Weibull eloszlással. Kimutattam ugyanakkor, hogy a módszer erősen inhomogén térben korlátozottan alkalmazható. Ilyenkor a lenyomat körüli deformációs feszültségtér és az inhomogén belső feszültségtér véletlenszerű szuperpozíciója nagymértékben megnöveli a mérés hibáját. A mikrokeménységmérővel végzett vizsgálati technika – a vizsgálni kívánt anyag tulajdonságainak függvényében - adaptálható ipari termelésben történő gyors minősítésre*.

A módszer a Vickers lenyomat sarkain kialakuló repedések kialakulásának valószínűségét adja meg a Vickers keménységmérő terhelőerejének függvényében. Adott terhelő erőnél a repedési valószínűséget nagyszámú lenyomat által keltett repedések számának és a potenciális repedési helyek (a sarkok számának) hányadosaként értelmeztük. A terhelőerőt változtatva (statisztikai elemzés alapján) a repedéskeletkezésre vonatkozó

eloszlásfüggvényt nyerjük, amelyre jól illeszthető a Weibull eloszlás. A vizsgált mintákban történő repedéskeltéshez szükséges terhelésektől függően egyszerű Vickers keménységmérő, mikro, illetve ultramikro-keménységmérő is alkalmazható, és alkalmas kisméretű, akár pár 10 μm –szer pár 10 μm területű minta vizsgálatára is.

II. Alkalmazott kutatás

2. *Alkáli-szilikátüveg lemezek felületét diffúziós módszerrel végrehajtott ioncserével, ionimplantálással, illetve a két kezelés kombinálásával módosítottuk. Kimutattam, hogy:*

2a) *Az ionimplantáció önmagában nem okozott kimutatható szignifikáns változást a Vickers keménység értékében, az ioncsere azonban növelte a keménység értékét. Az ioncserét követő ionimplantáció hatása függ az ioncsere mértékétől: kisebb mértékű ioncsere a Vickers keménység nagyobb mértékű csökkenését eredményezte. A jelenséget azzal magyaráztam, hogy az implantált* Ar^+ *ion és az ioncserével bejuttatott* K^+ *ion között kevésbé effektív az üvegbeli alkáli-oxigén kötések felszakításával járó úgynevezett elektronikus kölcsönhatás, mint az* Ar^+ *ion és az eredetileg üvegalkotó* Na^+ *ion esetében. Az általunk alkalmazott körülmények között a kombinált kezeléssel nem sikerült a keménység értékének növekedését elérni egyik önálló kezeléshez képest sem.*

2b) *Mind az ionimplantáció, mind pedig az ioncserés kezelés növelte a látszólagos törési szívósságot és a repedési ellenállás mértékét is a kezeletlen mintához képes, azaz csökkenttette a minta repedékenységre való hajlamát. Mindkét esetben a tapasztalt változásokért a minta belső feszültségeinek megváltozása, illetve a mikrorepedések eloszlásának változása a felelős. Mindkét önálló kezelés nyomófeszültséget kelt az anyagban. Az ionimplantáció esetében a keltett nyomófeszültség és a relaxációs mechanizmusok ellensúlyozzák a szerkezeti károsodás repedékenységre gyakorolt hatását. A relaxáció hatását a viszonylag magas hőmérsékleten végzett ioncserés eljárás esetében is figyelembe kell venni. Mindkét módszer ígéretes alkalmazási lehetőségeket kínál az üvegek repedékenységének csökkentésére. Az ioncserét követő implantáció csökkenti a látszólagos törési szívósságot, jelezvén, hogy utóbbi relaxálja az előbbi által bevitt nyomófeszültséget.*

3. *Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálattal feltártuk, hogy a kisülőlámpák beforrasztásában a zománc anyagának - amit korábban üvegesnek (amorfnak) véltek - jellegzetes fázisszerkezete van. Megállapítottuk, hogy a szerkezet mintegy 200 nm széles*

lamellákból álló kristályos rétegekből áll. Ez összhangban van más, magas viszkozitású kerámiaolvadékok megszilárdulását az irodalomban leíró eredményekkel.

4. *A kis térfogatú, néhányszor tíz-mikrométer vastagságú zománc-anyagok lokális mechanikai és törésmechanikai tulajdonságainak vizsgálatára a lámpákban sikeresen alkalmaztuk a mélységérzékeny Vickers ultramikro-keménység mérést és a repedésstatisztika módszerét. Megállapítottam, hogy:*

4a) *A párhuzamos lámpamintákon belül a mechanikai tulajdonságok (HV, E) eltéréseket mutatnak, egy mintában is megfigyelhetőek lokális különbségek. Az égetési idő függvényében vizsgálva a szerkezet tulajdonságait, megállapítottam, hogy a zománc mechanikai paraméterei az üzemidő növekedése során nem változnak számottevő mértékben. A zománc átlagos mechanikai tulajdonságai kis mértékben függnek a helytől, és ugyancsak kismértékben függnek az égetési időtől. Ezek az eltérések ugyanakkor nem valószínű, hogy befolyással vannak a lámpa megbízhatóságára.*

4b) A *beforrasztások feltárt csiszolataiban található, két jelentősen elkülöníthető fázis repedés statisztikával jellemzett repedékenysége eltérő. A minták repedésstatisztikával jellemzett repedékenysége a tartóségetés idejével változik. Ez a változás azonban függ a technológiai paraméterektől.*

5. *A Vickers fej okozta mikrorepedések számának, alakjának, hosszúságának elemzésével következtettünk a zománc belső feszültségállapotára. Megállapítottam, hogy:*

5a) *A henger-gyűrű alakú zománcrétegben jelentős belső feszültségek vannak, amik valószínűsíthetően a gyártási folyamat során kerültek az anyagba. Megfelelően orientált Vickers-nyomokból kiinduló anizotróp repedésekből arra következtettem, hogy a zománcban a henger sugarának irányában nyomófeszültség, a rá merőleges érintő irányában a hengepaláston pedig húzófeszültség hat. A vizsgált mintákban meghatároztam a két feszültség értékének arányát.*

5b) *A fent vázolt feszültségek relaxálódnak a lámpa tartóségetése során. A relaxáció mértéke függ a konstrukciótól és a gyártás körülményeitől.*

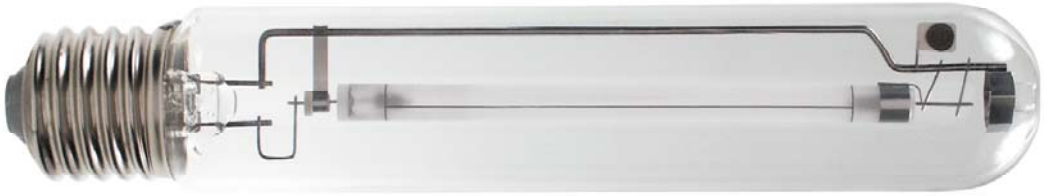
Feltételeztük, hogy a minta anizotróp belső feszültségállapota a gyártás beforrasztási folyamatában alakulhatott ki. A zománc megszilárdulása és a hűlése során jelentkező dilatációs különbségek belső feszültségeket keltenek. A feszültség tapasztalt anizotrópiáját végeselem modellezésünk is igazolta. A beforrasztás geometriájából következően az

árambevezető és a zománc határfelületén, illetve a zománc belsejében lévő feszültség változása hozzájárulhat a lámpa meghibásodásához.

6. *Ionporlasztásos mélységi profilírozással kombinált röntgen fotoelektron-spektroszkópiai méréssel feltártam a zománcpárolgás mértékét a lámpa készítése és tartóségetése során. Zománcpárolgást csak a készítés során tudtunk detektálni. Kimutattam, hogy a zománcpárolgás nincs befolyással a lámpa megbízhatóságára és fénytartására.*

III. Termékfejlesztés

7. *A kutatás során szerzett ismereteket sikeresen alkalmaztam konkrét nagyintenzitású kisülőlámpa termékek kifejlesztésében. Kifejlesztettem egy új, 400 V-os hálózati feszültségről üzemelő új, növényházi alkalmazásokra optimalizált PSL (Photosynthesis Light, Fotoszintézis Fény) monolit konstrukciójú HPS lámpacsaládot. Kifejlesztettem a lámpacsalád 230 V-os hálózati feszültségű tagjait is. Mind a 400V-os, mind a 23V-os termékek esetében a 750 W típus csak a GE termékpalettáján érhető el. Ezeket a fényforrásokat kiemelkedő fotoszintetikus fényhasznosítás (PAR, Photosintetically Active Radiation), stabil égésfeszültség és kiváló fénytartás jellemzi.*



Növényházi alkalmazásra optimalizált nagynyomású nátriumlámpa, a PSL család egy tagja.