

A magyar Szent Korona fémtani tulajdonságainak értékelése

A tanulmány bemutatja a magyar Szent Korona feltételezhető aranyötvözeteit, azok szilárdsági tulajdonságait és a koronának a szállítások során ért károsodásait. Külön kiemeli a lágyforrasztás korróziós folyamatait és az ebből adódó állagmegóvás legfontosabb betartandó paramétereit.

Bevezetés

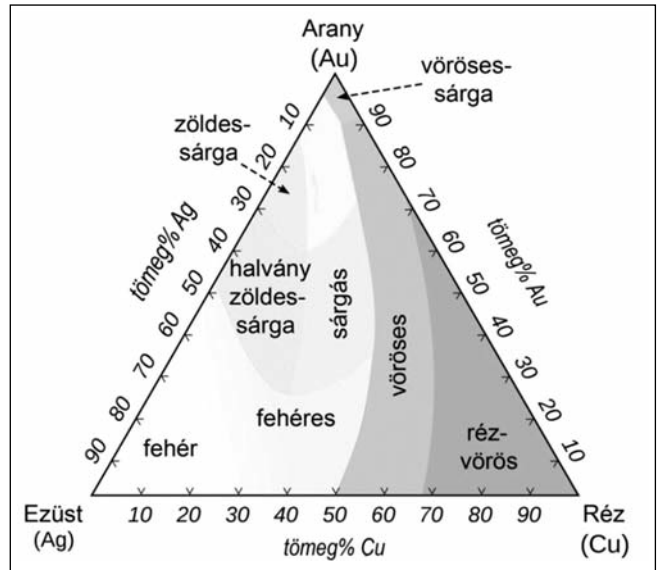
A Szent Korona és a szervesen hozzátartozó jelvényegyüttes 1978-as visszakérülése után a Magyarországon uralkodó materialista világfelfogás elvárásai arra inspirálták a magyar tudományos élet kiválóságait, hogy a koronát tudományosan vizsgálják, és a vizsgálatok eredményei azt bizonyítsák, hogy a Szent Korona Szent István regnálása után készült. Mintha több származási helyről összegyűjtött, véletlenül összerakott jelvényegyüttesről lenne szó, és nem a magyar nép által megőrzött szakrális hagyomány igazságáról. Nem tartották kellő tiszteletben, és ez meglátszott a jelvényegyüttesrel szemben tanúsított viselkedésükön is.

Az ún. mérnökcsoport keretén belül 1981-ben készítettem egy kis tanulmányt a „Magyar Szent Korona fémtani tulajdonságainak értékelése” címen a Nemzeti Múzeum számára, abból a célból, hogy az akkori vizuális vizsgálat mészaki állapotára és a sérülések feltételezhető okaira rávilágítsak.

A korona fémes részeinek kémiai és szilárdsági értékeiről beszélni igen merész dolog, mert napjainkig – nagyon helyesen – nem történtek kétes értékű vizsgálatok, amelyeket a hozzáértők sem javasoltak, illetve a feltételezett eredmények használhatóságát igen erősen vitatták. Roncsolásos anyagvizsgálat nem jöhetett szóba, s a valamilyen ionizáló sugárzást felhasználó roncsolásmentes vizsgálatokat is el kellett vetni, mert a szerves anyagokban (gyöngyök), illetve a drágakövekben visszafordíthatatlan folyamatokat indított volna el (pl. elszíneződések). Ellenben az állagmegóváshoz szükséges ismereteket így is jól lehet közelíteni. Az akkor leírtak tulajdonképpen ma is aktuálisak, de 40 év távlatából némi kiegészítésre szorulnak.

A korona feltételezhető fémtani, mechanikai tulajdonságai

Nem járunk messze az igazságtól, ha feltételezzük, hogy a korona anyagainak alapalkotója az arany (Au). Az aranyművesség a történelmi idők előtti korokba nyúlik vissza. Feltételezhető, hogy színaranyat (99,99%) sohasem tudtak előállítani. Számolni kellett azzal, hogy az arany mellett mindig találhatóak állandó kísérőelemek, ötvöző- és



■ 1. ábra. Az Au-Ag-Cu ötvözetekkel elérhető színek

szennyezőelemek. Most csak az arany számításba jöhető legfontosabb ötvözőelemeit vesszük figyelembe.

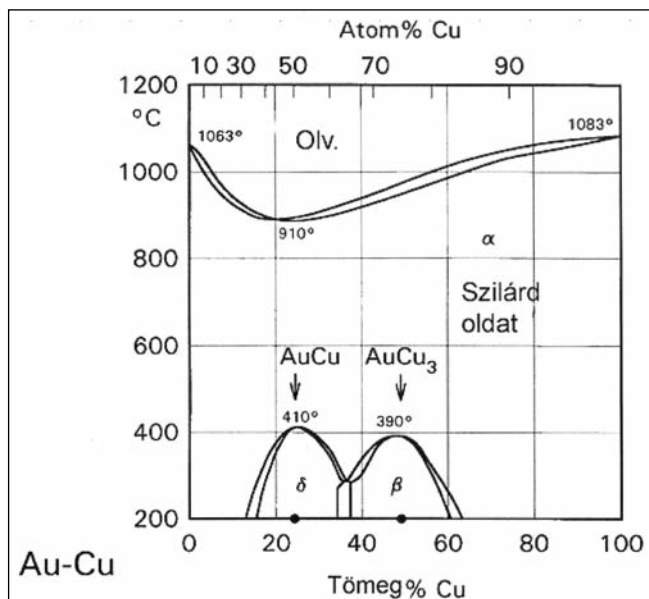
Az arany mellett figyelembe kell venni a korona esetében az ezüstöt (Ag) és a rezet (Cu) is. Az arany e két legfontosabb ötvözőelemét elsősorban szilárdságnövelési célból használják. Ha a készítő egyéb célból – pl. esztétikai, szimbolikai – színváltoztatást is el akar érni, akkor az 1. ábrán szereplő ternér állapotábrán – fekete-fehérben – láthatjuk azokat a területeket, amelyek némi tájékoztatást nyújtanak az arany egyes ötvözetsoportjainak természetes megvilágításban, szemmel látható színeiről.

Feltételezzük, hogy a korona készítéshez viszonylag kevés ötvözőelemet használtak fel. Ezt egyrészt arra alapozzuk, hogy a nagy egybefüggő lemezfelületek kialakításához nagymértékű alakítást kellett végezni, és erősen keményedő ötvözet nem volt kívánatos, valamint a szakrális szempontokra, melyek a legtisztább arany használatát részesítették előnyben. *Ludvig Rezső* aranyműves – aki a koronavizsgáló aranyművesekkel együtt vizsgálta a Szent Koronát – gyakorlati tapasztalatból adódó véleménye szerint a gyűrű (az abroncs) anyaga több ötvözőt tartalmaz, mint a boltozatot képező pántok. Zöldes színű, ami azt

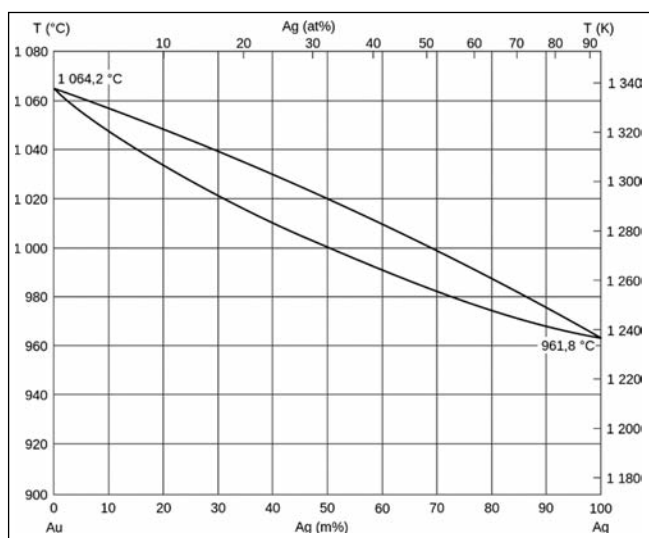
Dr. Fehér András 1967-ben végzett az NME Kohómérnöki Karának alakítástechnológiai szakán. Ezután a Dunaújvárosi Főiskola Alakítástechnológiai Tanszékén dolgozott 1993-ig, ahol az anyagszerkezet, hőkezelés, anyagvizsgálat tárgyakat oktatta. 2008-as nyugdíjba menetelég a Dunaferri Qualitest Kft. vizsgálatfejlesztő osztályvezetője volt. Jelenleg a felnőttoktatásban vesz részt, roncsolásmentes anyagvizsgálatokat oktat, valamint szakértői munkákat végez.

A hátsó borítón további képek láthatók a Szent Koronáról. Szelényi Károly 1978-ban készült felvételei. A teljes koronaképen a kereszt a helyes irányba dől. Ezt alátámasztja az 1608-ban készült koronaszállító ládán található ábrázolás is.

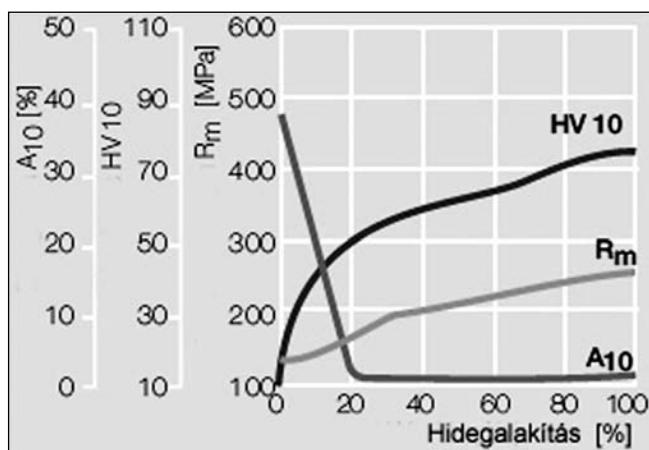
jelent, hogy 10-20%-ban ezüsttel és rézzel ötvözték. Ezt indokolhatják az előbb elmondottak, hisz a gyűrű 1,2 mm vastag, fő teherhordó, alaktartó eleme a koronának. A boltozat lemezei 0,4 mm vastag, tisztább aranyból készültek,



■ 2. ábra. Az Au-Cu ötvözet fázisdiagramja [2]



■ 3. ábra. Az Au-Ag ötvözet fázisdiagramja [2]



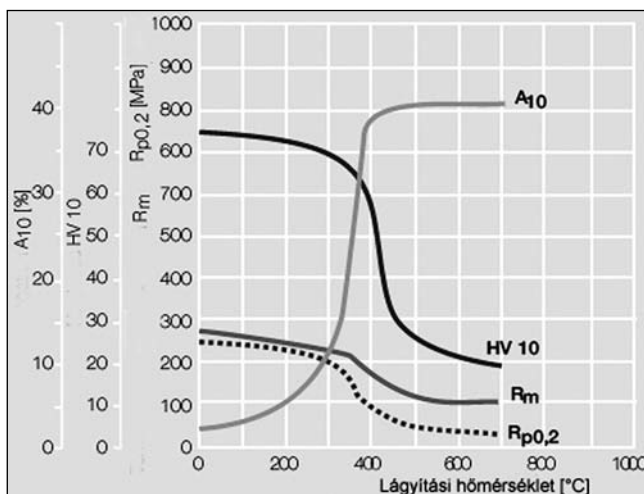
■ 4. ábra. Az AuAg20Cu10 ötvözet keményedése hidegalakítás során [5]

melynek könnyebben alakíthatónak kellett lennie ahhoz, hogy a kívánt lemezvastagságot elérjék [1]. Az 1. ábra ternér fázisdiagramjából kiemelve a két legfontosabb kétalkotós fázisdiagramot, látható, hogy szilárd állapotban az alkotók az arannyal szemben minden arányban oldják egymást, és ezért az arany kismértékben ötvözött (10-20%) ötvözeteiben csak szilárd oldatokat találunk. Más szóval bármilyen elkészített ötvözet homogén, a hőmérséklettől és a gyártástechnológiától függetlenül (2-3. ábra).

Ezek a szilárd oldatok kiváló, nagymértékű hidegalakíthatóságot biztosítanak. A feltételezett összetételű aranyötvözet szilárdsági jellemzőinek változását mutatja be a hideg képlékenyalakítás függvényében a 4. ábra, a lágyulás előrehaladtát a hőmérséklet függvényében az 5. ábra.

A feltételezett technológia szerint a lemezek és a gyöngydrótok gyártása során mindkét folyamat többször is lejátszódott, míg elérték a kívánt vastagságokat. A 0,4 mm-es pántok kialakulása után következett azoknak a tartóelemeknek a felforrasztása, amelyek egyrészt díszítőelemeket tartanak, másrészt a gyöngyök, ékkövek és az apostolok zománcképeinek a megfogását biztosítják. Ezeket keményforrasztással rögzítették, ami azt jelentette, hogy a pántok fő tartólemeze (0,4 mm) és az egyéb tartozékok teljesen kilágyultak a kb. 700-800 °C-os hőmérsékleten. Ebben az állapotban a pántok szakítószilárdsága – irodalmi adatok alapján – 450 MPa értéket ér el [5]. Szerencse, hogy a pántok egy boltozatot alkotnak, ahol nyugalmi állapotban nyomófeszültséggel kell számolni, amely a lovagló király esetében ismétlődő lüktető terhelésbe megy át. Ugyanezt a lüktető igénybevételt kell feltételezni a koronáladában történő szállításkor is.

A szakrális megfontolásokon túl figyelembe kell venni a kívánt szilárdsági értékeket is. A gyűrűnek eléggé egyértelmű az igénybevétele, mert csak a körköröséget, illetve gyenge ellipszis alakját kell megtartani a négy helyen egyenletesen ránehezülő boltozattal szemben. Erre érzékeny, mert a keresztmetszeti tényezője kicsi. A gyűrű és a pántok esetében is nagy a bizonytalanság, mert nem egyenszilárdságú tartóelemekről van szó, és ezeknek a lemezeknek a merevségét, hajlíthatóságukat, hajlítási szilárdságukat a rájuk forrasztott gyöngydrótok, a köveket és gyöngyöket befoglaló elemek és a képeket keretező le-

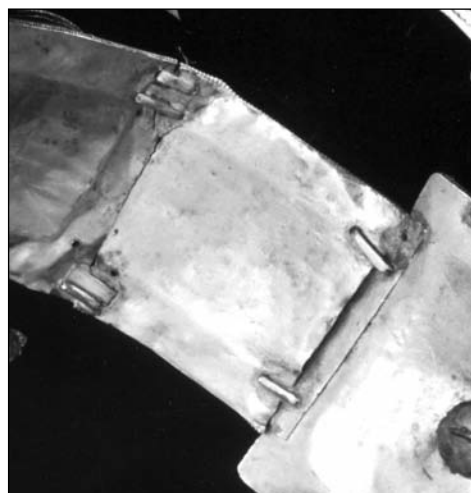


■ 5. ábra. Az AuAg20Cu10 ötvözet hidegalakítás utáni újrakristályosodása (lágyulása) [5]

mezcsíkok nagymértékben befolyásolják, megmerevítik. A merevséghez még hozzájárultak a zománcképek a vastag hordozó aranylemezzel (0,9 mm) és az azokon lévő, tovább merevítő zománcreteggel. Ezek szerkezeti felépítésének tulajdonítható, hogy a pántokon jól látható repedéskezdemények és törések ott alakultak ki, ahol zománcképek (apostolképek) nem fedték a pántokat. Tehát a zománcképek közti területekre (apostolképek közti sávokra) koncentrált minden ismétlődő rugalmas és maradó alakváltozás. Ezeken a helyeken alakultak ki az első repedéskezdemények, amelyek továbbhaladtával teljesen átrepedtek a pántok, és ezeket a károsodásokat már töréseknek kell neveznünk (6. ábra). A fekete-fehér tónusú képen is jól látható, hogy a János kép alatt és felett a pánt 0,4 mm-es lemeze teljes keresztmetszetben áttört. Hasonló törés mindegyik pánton található. A ma látható töréseket figyelembe véve megállapítható, hogy a boltozat ma már nem tudná megtartani eredeti alakját, összeroskadna. Ezért volt szükséges *Ferenc József* koronázása (1867) előtt a pántokat a törésvonalak elején és végén megerősíteni úgy, ahogy abban a korban elvárható volt egy budapesti aranyműves mestertől. A repedések kezdetét és végét áthidalta egy erősebb aranydróttal, és lágyforrasztással rögzítette azt a 0,4 mm-es pántok lemezeihez. Egy ilyen helyet mutat a 6. ábra.

A Szent Koronát a történelmi leírások szerint legalább három ízben érthették olyan behatások, amelyek nagymértékű maradó alakváltozást eredményezhettek. Az első 1301-ben, mikor a koronát Prágából állítólag lóháton csobolyóban hazaszállították és a csobolyóval együtt el is veszítették. A második 1440-ben, amikor *Kottanner János*-né szekéren, a csecsemő király alatt, a bölcsőjében lopta ki a koronát Magyarországról. A harmadik alkalom pedig 1849-ben történt, mikor *Szemere Bertalan* miniszterelnök Orsovánál a Duna árterében elásatta a Szent Koronát. Ez utóbbi alkalom okozhatott olyan mértékű sérüléseket, töréseket, amelyek 1867-ben indokolták a boltozat forrasztóónnal való megerősítését a koronázás előtt.

A Szent Korona szállítása nem történhetett mindig rázkódásmentesen. Például komoly ismétlődő fásztó igénybevételt is jelenthetett a lóháton történő szállítás a döcögős



■ 6. ábra. János apostol képe alatt és fölött áttört pánt a megerősítő aranydróttal és forrasztással. (Szelényi Károly felvétele 1978.)

szekéren való szállításokkal együtt. Az aranyötvözetek esetében, ha igen jó kifáradási határt becsülünk meg, ehhez e g y m i l l i ó igénybevételi szám tartozik, ami fémek és ötvöze t e i k e s e t é b e n túlzóan kedvező érték. Ha feltételezzük, hogy

szállítás közben az úton 2 méterenként egy-egy lökészerű igénybevétel érte (csak) a koronát, akkor könnyen kiszámolható, hogy 2000 km-es út megtétele után az egymilliósi igénybevételi számot elérjük. Tehát a repedések megjelenése törvényszerű. A Szent Korona ennél jóval többet utazott minden rázkódásvédelem nélkül.

Az ún. mérnökcsoporthoz a múzeumi mérések során 1980-ban a teodolitos mérésakor tapasztaltuk, hogyha egy villamos elment a múzeum előtt, akkor a terem alsó födémje annyira beremegett, hogy a méréssel várni kellett, míg a rezgések lecsillapodtak. Ezek az ismétlődő rezgő-fásztó igénybevételek egész nap hatottak a korona boltozatára, annak pántjaira. A kezdő és terjedő repedésekre a károsodások halmozódási elvének megfelelően hatottak ezek az ismétlődő igénybevételek.

Szakmai körökben ismert, hogy a színesfémeknek és azok szilárd oldatait tartalmazó ötvözeteknek nincs kifejezett kifáradási határjuk. Tehát minden kicsi igénybevétel hozzájárul a szerkezet károsodásához, nem úgy, mint az acélok esetében, ahol van egy határterhelés, mely alatt nem növekszik a károsodás mértéke. A korona aranyötvözetének sűrűsége 15-16 kg/dm³, és az ebből készült igen nehéz boltozatot egy 0,4 mm-es héjazatnak kell tartani. Ha még figyelembe vesszük a gyenge rugalmassági modulus értékét is, mely 78 GPa, akkor belátható, hogy minden rázkódás, ismétlődő igénybevétel komoly erőhatásokat és deformációkat eredményez a pántok által alkotott boltozatok feszültségűjtő helyein.

A koronán található lágyforrasztások metallográfiai vonatkozásai

A lágyforrasztás anyagok az Sn-Pb ötvözetek családjába tartoznak, és a pántok fő alkotójával, az arannyal már a forrasztás hőmérsékletén tovább ötvöződnek. A forrasztás hőhatásövezetében, diffúziós zónájában egy könnyen olvadó, az eutektikumhoz közelítő ötvözetsor alakul ki az arannyal, amely nagyon megnehezítheti a jövőben a Szent Korona restaurátorainak munkáját. Ezenkívül pedig számolni kell a korróziós folyamatokkal is a forrasztás környékén. A teodolit látómezőjében jó nagyítás mellett, a forrasztások környékén egy szürkésfehér lepedék látszott, mely a korróziós folyamatok termékének volt tekinthető. Az Országházba való szállításig a korona a belvárosi légtérrel érintkezett, mely tudvalegőleg igen szennyezett, és ezeket a folyamatokat csak tovább gyorsította. Voltak ennél rosszabb tapasztalataink is. A múzeumba bemenetkor megcsapta az orrunkat a hipószag, melyet a takarítók használtak. Az is lehangozó volt, hogy abban a térben, melyben a koronázási ékszerek és a palást is volt, a függönyök mögött megláttuk a riasztóberendezés éppen töltésre állított savas akkumulátorait, kicsavart záródugóval. Ezeket szóvá tettük.

A koronán elvégzett forrasztások állagára elsősorban az ónnak az aranyban és az aranyban az ónban történő (folyamatos) diffúziója van hatással. Az említett diffúziós irányokba a diffúzió sebességére jellemző ún. diffúziós állandók értékei szobahőmérsékleten az [1] irodalom szerint igen kicsiny értékek, ami azt jelenti, hogy 20-25 °C-on a jövőben nem kell számolni ilyen irányú állagromlással. Egészen más a helyzet a forrasztás környezetének korróziós károsodásával.

A koronán található korróziós jelenségek okairól

Az oldatba (elektrolitba) merülő fémekből, illetve ötvözeteiből a pozitív töltésű ionok mennek oldatba, és egyidejűleg az oldatba menő fém vegyértékével azonos számú elektron marad vissza, ezzel negatív töltést adva a fémnek. Az így létrejövő elektrokémiai potenciálkülönbségről (feszültségről) legegyszerűbben normálpotenciál-táblázatból tájékozódhatunk. A korona szempontjából legfontosabb elemek normálpotenciáljait hidrogénre vonatkoztatva az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Fémek normálpotenciál-értékei mV-ban

Cink (Zn++)	- 762
Ón (Sn++)	- 140
Ólom (Pb++)	- 126
Hidrogén (H+)	0,00
Réz (Cu++)	+357
Ezüst (Ag+)	+800
Arany (Au+++)	+1420
Arany (Au+)	+1680

alkotók közötti maximális potenciálkülönbség adja meg. A korona anyagára vonatkoztatva a forrasztások környezetében 1560–1820 mV potenciálkülönbség adódik, mely elektrokémiai folyamatoknál tekintélyes érték.

Ahhoz azonban, hogy két fém között elektrokémiai folyamat menjen végbe, a potenciálkülönbségen kívül még elektrolit is szükséges van. Az elektrolit esetünkben a légkörből származó szennyezett víz, amely például a hőmérséklet csökkenésekor vízpáraként csapódik le a korona fémes felületén. A felületen a víz megkötődése a hőmérséklet csökkenése nélkül is létrejöhet, hiszen a fémfelületek megkötnek (adszorbeálnak) a velük érintkező anyagokból. Az elektrolit a korona gondatlan kezelése közben is felkerülhet a fémes és nem fémes (például üveg = zománc, szerves anyag = gyöngy) részeire, például a csupasz kézzel való fogdosáskor, amikor is a kéz bőrfelületéről elpárolgó sós izzadsággal vagy a közlőről kilétezt páradús levegővel érintkezik a korona fémes anyaga (7. ábra).

Arra, hogy az elektrolit jelen volt a Szent Korona múzeumi tartózkodási idején, és az egyes fém alkotók – elsősorban az ólom, az ón, majd a réz – oldatba mentek és különféle vegyületeket hoztak létre, az a bizonyíték, hogy a forrasztás helyén és környezetében az anyagok korróziós termékei szemmel láthatóak voltak. Ebben a folyamatban a legkevésbé nemes alkotók vesznek részt és mennek oldatba, amely addig folytatódhat, míg a maradék nemesebb szilárd oldat fázisátárán az aranyötvözet el nem éri a rezisztencia határt, mely után az oldódási, illetve korróziós folyamatoknak törvényszerűen le kell állni. Az aranyötvözet oldaláról ez a koncentráció 50%-os aranyatomszámmal következik be [3]. Ez a folyamat éppen a jövőbeli restaurátoroknak kedvezhet is, mert az 1867. évben elvégzett forrasztás káros következményeinek eltávolítására adhat lehetőséget. Gondolhatunk itt egy tamponos maratásra, mely során gyorsan, helyileg, hidegen leoldható a forrasztással felvitt felesleges anyag, és majd az adott kornak

Mivel a korona fémes váza arany, ezüst és réz elemekből készült, továbbá a javításhoz a közelebbi múltban forrasztó ötvözetet, pontosabban ón-ólom ötvözetet használtak fel, az ötvözetekre vonatkozó normálpotenciál számítási szabályát kell figyelembe venni. Eszerint az elektrokémiai normálpotenciált az



■ 7. ábra. Koronaátvételi vizsgálat: Fort Knox, Kentucky 1977. (Kovács Éva felvétele)

megfelelő és az állagmegóvásnak is eleget tevő technológiával meg lehet erősíteni a korona boltozatát.

Összefoglalás

Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy a koronázási jelvények közül a Szent Korona szenvedte el a legtöbb igénybevételt, és a jelvényegyüttesből a paláستtal együtt igényli a legtöbb gondoskodást. Időközben a Szent Korona, az országalma, a jogar és a kard átkerült az Országházba és egy biztonságos üvegtárolóban helyezték el, melynek a légtérét a legutolsó információ szerint nitrogéngázzal töltötték fel. Arról nincs adat, hogy a szerves gyöngyök miatt a páratartalmat és a hőmérsékletet milyen értékre állították be. Ha a hőmérsékletet 10 °C alá állították be, akkor a korróziós folyamatok sebessége elhanyagolható és hosszú ideig nem kell annak káros hatásával foglalkozni. Már csak a különböző kutatásokra kiadott engedélyeket kell kordában tartani, mert a különböző kézzel való megfogásokból adódó saját súlyterhelés is jelentősen károsítja a korona fizikai állapotát (fajsúlya: 15-16 kg/dm³). Iránymutató lehet az a gondoskodás, amiben a korona legutolsó visszaszállítását részesítették az amerikaiak. A Szent Koronát belülről, teljes egészében, egy gyurmához hasonló anyaggal kítámasztották.

A Szent Korona felvázolt fizikai állapotát sajnos sok feltetelezésre kellett alapozni. Meg kell állapítani, hogy a mai napig sem készült a koronáról és a többi koronázási jelvényről sem egy elfogadható műszaki dokumentáció, mely be tudná mutatni hitelesen, teljes részletességgel, méret- és színhelyesen a legbecsesebb szent ereklyéinket, melyek azon túl, hogy a magyarság utóbbi több mint ezeréves múltjának legszentebb kulturális tárgyi bizonyítékai, az egész világ kulturális kincsének is tekinthetők. Ebből következően kötelességünk a koronázási relikviák állagának megőrzése.

Irodalom

- [1] Gmelins Handbuch „Gold” Der anorganischen Chemie. 1954.
- [2] Metals Handbook Vol.8. Metallography, structures and phase
- [3] Verő József – Káldor Mihály: Fémtan 1977.
- [4] C. HAFNER GMBH +CO. KG Gold und Silberscheideanstalt
- [5] Electrical Contacts WIKI DODUCO Pforzheim 2012.