

Magyar Képzőművészeti Egyetem  
Doktori Iskola

**Római kori falképtöredékek lézeres tisztítása és az eljárás mechanikai hatásainak vizsgálata holografikus interferometriával**

DLA értekezés tézisei

Kisapáti Ivett

2015

Témavezetők:

Dr. habil, DLA Menráth Péter  
Magyar Képzőművészeti Egyetem

Dr. habil, PhD Márton Zsuzsanna  
Pécsi Tudományegyetem

## Bevezetés

A lézereket a mindennapi élet számos területén alkalmazzuk, de már az 1970-es évektől találhatunk példát a restaurátori felhasználásukra is. Hatalmas fejlődésük nyomán a különféle lézeres technikák mára egyre nagyobb teret nyernek a restaurátori gyakorlat több területén, úgymint felületi tisztítás, anyagvizsgálat, 3D képkalkotás segítségével történő dokumentálás.

A módszer alkalmazásával különböző alapanyagú műtárgyakról különböző összetételű, eredetű szennyeződések távolíthatóak el, és a számos változtatható lézerparaméter helyes megválasztásával kiváló eredményeket lehet elérni. Természetesen a lézeres tisztítás sem univerzális megoldás minden restaurátori problémára, ezért lehetséges negatív hatásainak ismerete elengedhetetlen.

Egyetemi hallgatóként a szakdolgozatomat római kori freskótöredékek excimer lézeres tisztításáról írtam. Ekkor kerültem kapcsolatba a PTE Fizikai Intézetével, ahol már 2005 óta foglalkoznak a lézerek lehetséges restaurátori felhasználásával. A Doktori értekezésem témája ennek a munkának a folytatása. Többféle (különböző hullámhosszú vagy impulzushosszú) lézert használva és újabb mintadarabokon kísérletezve kiterjesztettem a lézeres tisztítás freskótöredékeken való alkalmazhatóságára, előnyeire és korlátaira vonatkozó tapasztalataimat.

Céлом volt a lézeres tisztítás potenciálisan káros fotomechanikai hatásainak vizsgálata is, melyre a digitális holografikus szemcsekép interferometria (DHSPI) módszerét alkalmaztam. A DHSPI használatával egy olyan, a hazai restaurátori környezetben eddig még nem alkalmazott roncsolásmentes módszert ismertem meg, amely alkalmazása számos más esetben is (például falképek, fatáblák állapotfelmérése, megfigyelése) hasznos lehet.

Dolgozomban először irodalmi adatok alapján ismertetem a lézeres felülettisztítás fizikai alapjait, összehasonlítom a hagyományos és a lézeres tisztítást, majd részletesebben tárgyalom az utóbbi hatékonyságát meghatározó paramétereket, és kitérek a módszer alkalmazásának lehetséges veszélyeire.

A következő fejezetben egy olyan, digitális holografikus szemcsekép interferometria (DHSPI) nevű módszert mutatok be a szakirodalom alapján, amely alkalmas a lézeres tisztítás során föllépő mechanikai effektusok esetleges nemkívánatos hatásainak kimutatására.

Ezután részletesen tárgyalom saját munkámat. Megfogalmazom a kitűzött feladatot, bemutatom a kísérletekhez kiválasztott illetve készített mintadarabokat, ismertetem a lézeres tisztítás eredményét és a DHSPI mérésekkel nyert adatokat, majd levonom a lézeres tisztítás alkalmazhatóságára vonatkozó következtetéseket.

A doktori értekezésemhez tartozó mestermunka során a lézer, mint restaurátori tisztítóeszköz gyakorlati alkalmazhatóságát vizsgálom. Elsőként római kori falkép töredékek lézeres tisztítását mutatom be, majd egy festékkel súlyosan megrongált, teljesen új szobor restaurálását írom le.

## **Az értekezés tézisei**

### ***1. Ásatásból kikerült falképtöredékek lézeres tisztítása***

A doktori kutatásom során ásatásból kikerülő, olyan falképtöredékek lézeres tisztítási problémáit vizsgáltam, amelyek felületén kemény, többnyire kalcitos szennyeződés található.

Kísérleteim eredményeiből arra következtettem, hogy gondosan megválasztott beállításokkal a lézeres tisztítás hatékonyan végrehajtható úgy, hogy a freskók festett rétege közben nem károsodik. Ez a módszer tehát jó alternatívája vagy kiegészítője lehet az olyan hagyományos restaurátori eljárásoknak, mint például a mechanikus tisztító módszerek (szike, szemceszórás), oldószeres tisztítások, pakolások.

Az általam alkalmazott mindkét hullámhossz esetében, 248 nm-en és 1064 nm-en egyaránt, a következő érzékenységi sorrendet állíthatjuk fel a legérzékenyebb vizsgált pigmenttől kezdve a legellenállóbbig: cinóber, szénfekete, vas-oxid vörös, vas-oxid sárga, zöldföld, egyiptomi kék és mészfehér. Egyes mintákon a vas-oxid vörös korábban a szakirodalomban nem publikált sárgulását figyeltem meg.

### ***2. Különböző szilárdító szerek falképtöredékek lézeres tisztására gyakorolt hatásának kimutatása***

Kísérleteimmel kimutattam, hogy a különböző szilárdító szerek jelenléte hatással van a tisztítási eredményre. Az eredeti töredékek sok esetben annyira sérülékenyek lehetnek, hogy a tisztítás előtt szükségszerű a szilárdításuk, bár ez a lépés magában hordozza azt a veszélyt, hogy a szennyeződést is a felületre kötjük. Az eredeti freskótöredékeken végzett lézeres tisztítások (KrF 248 nm) során láthattunk példát a szilárdító szernek (Syton X30<sup>1</sup>, MfCO<sup>2</sup>) tulajdonítható pozitív hatásra, amikor a festékréteget megvédte a lepattanástól, károsodástól.

---

<sup>1</sup> vizes bázisú kovasav diszperzió

<sup>2</sup> finoman eloszlatott, vizes bázisú akril kopolimer diszperzió

Előfordult azonban olyan eset is, amikor a szilárdító szer (Remmers KSE 300<sup>3</sup>) a szennyeződés lézeres (248 nm és 1064 nm) eltávolítását megnehezítette.

A szilárdított (Remmers KSE 300) modell minták lézeres tisztítására a KrF lézer 248 nm-es hullámhossza hatékonyabbnak bizonyult, mint az 1064 nm-en működő Nd:YAG lézer. Továbbá mindkét hullámhossz esetében azt találtam, hogy az intakt modell minták tisztításához szükséges impulzusok száma a szilárdított minták esetében kevesebb, mint a nem szilárdítottaknál, tehát ezen minták esetében a szilárdító és a szennyeződés együttesen hatékonyabban ablálható, mint a szennyeződés maga.

Mindezek alapján javasolható a lézeres tisztítás lehetőségének megfontolása egyidejű szilárdításra és tisztításra szoruló freskótöredékek esetén.

### ***3. Eredeti falképtöredékek és freskó modellek mechanikai vizsgálata***

A freskótöredékek és modellek jellemzésére mechanikai vizsgálatokat végeztem. Ezzel bizonyítottam, hogy a kísérletek céljára készített modell freskó minták vakolatának sűrűsége egységes ( $\sim 1,65 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ ), valamint jó egyezést mutat az eredeti, ásatásból kikerülő román kori freskótöredékek sűrűségével, melyek értéke a  $1,69 - 2,41 \text{ g/cm}^3$  tartományba esett. Az ultrahang terjedési sebességek szilárdított és szilárdítatlan mintákban való mérésével és annak a mérési eredménynek a felhasználásával, hogy a sűrűség a szilárdítás hatására gyakorlatilag nem változik, kísérletileg igazoltam, hogy a szilárdító a freskó vakolatában lévő kötéseket erősítette meg. Megállapítottam, hogy a Duroszkóp visszapattanási értékkel meghatározott felületi keménység nőtt a szilárdítás hatására (Remmers KSE 300) a modell minták hátoldalán, míg a szilárdítás jelentősen nem befolyásolta a minta szennyezett, elülső oldalán mért keménységet. Ebből arra következtettem, hogy a szilárdító a freskó vakolat anyagával és a mesterséges szennyeződés anyagával különböző módon reagált.

### ***4. A digitális holografikus szemcsekép interferometria (DHSPI) alkalmazhatósága a fotomechanikai hatások kimutatására***

A lézeres tisztítás mechanikai hatásait interferometrikus módszerrel vizsgáló kísérletek eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a DHSPI rendszerrel ki lehetett mutatni a lézeres tisztítás fotomechanikai hatásait az eredeti freskótöredékeken és a modell mintákon egyaránt.

---

<sup>3</sup> kovasav-etilészter alapú, oldószermentes kőszilárdító

Az eredeti freskótöredékek vizsgálatakor a minta tisztítása és DHSPI mérés közötti mozgatásból adódó lehetséges következményeket elkerülhetjük, ha a tisztítás és a megfigyelés egyidejűleg zajlik. Az egymást követő tisztítások felhalmozódó hatását úgy küszöböltem ki, hogy különálló teszteket végeztem egyforma, modell mintákon.

A modell minták között két olyan mintadarab volt, ahol a csíkrendszer felfedett nem szándékosan okozott elváltozásokat, amelyek már a tisztítás előtt jelen voltak a mintában (láthatóak a referencia különbségi interferogramon), valamint jól láthatóak a szándékosan törött minták illesztései is. Ezen eredmények alapján megállapítottam, hogy a DHSPI módszer alkalmas a lézeres tisztítás mechanikai hatásainak vizsgálatára.

### ***5. A KrF (248 nm) és a Nd:YAG (1064 nm) lézerrel történő felülettisztítás összehasonlítása DHSPI segítségével***

A modell minták nyolc különböző mintacsoportján végeztem DHSPI vizsgálatokat KrF (248 nm) és Nd:YAG (1064 nm) tisztító lézerek hatásainak kimutatására.

A lézeres tisztítópróbákból megállapítottam, hogy a nem szilárdított, intakt és eltört minták csoportján belül a tisztításhoz szükséges impulzusok száma majdnem megegyezik a KrF (248 nm) és Nd:YAG (1064 nm) lézereknél. Másrészt, ahogy azt már a 2. pontban írtam, a szilárdított minták esetében a KrF tisztítás hatékonyabbnak bizonyult.

Az eltört minták tisztításához szükséges impulzusok száma a KrF (248 nm) és Nd:YAG (1064 nm) lézerek alkalmazásakor egyaránt magasabb az eltört mintáknál, mint az intaktaknál. Véleményem szerint ez abból következik, hogy az eltört minták felülete az összeragasztást követően kevésbé sík, így a törésvonalak fölött a szennyeződés vastagsága helyenként eltérhet. Erre a területre került a tisztító ablak is, így ez magyarázza, hogy az eltört minták esetében miért volt szükség több lézer impulzusra.

Azt is megfigyeltem, hogy ott, ahol a Nd:YAG (1064 nm) lézer impulzusok elérték vagy megsértették a szennyeződés alatt lévő festékréteget, a sérülések sokkal jelentősebbek voltak, mint a KrF (248 nm) lézer esetében. Ez annak a következménye lehet, hogy ezen kísérletek során a tisztítás száraz körülmények között zajlott, mivel a nedvesítés zajosabbá tette az interferogramokat. Mivel a nedvesítés fontos eleme az IR tisztítási módszernek, a hiánya okozhatta a nem megfelelő eredményt.

## **6. A DHSPI mérések nem mutattak ki új szerkezeti elváltozást a lézeres tisztítás hatására**

A DHSPI mérések segítségével kimutattam, hogy nem jelentek meg olyan új, szerkezeti elváltozásokra utaló módosulások sem az intakt, sem a véletlenül vagy szándékosan gyönggített (eltört és újra összeragasztott) minták különbségi interferogramjain, amelyek a lézeres tisztításnak tulajdoníthatóak. Továbbá a meggörbült csíkok alakja és sűrűsége szerint sem a véletlenszerű, sem a szándékosan előidézett szerkezeti hibahelyek (törésvonalak) nem változtak jelentősen a lézeres tisztítás hatására.

Megfigyeltem, hogy a szándékosan eltört modell minták különbségi interferogramjain a csíkrendszer középpontja általában az összeillesztések fölött vagy az összeillesztések találkozási pontjai fölött van, mutatva, hogy ezek azok a területek, ahol a minta elmozdulása a legnagyobb.

A különböző mintákon összehasonlítottam a DHSPI vizsgálatok során két egymástól 5 cm-re levő pont relatív elmozdulását és megállapítottam, hogy a minta termális gerjesztésre adott válaszában megváltozása a lézeres tisztítás után nem nagyobb, mint azok a különbségek, amik a minták között már a referencia állapotukba is jelen voltak. Továbbá azt is megfigyeltem, hogy a minták gerjesztésre adott válasza egy hónap relaxálás után egységesebb, mint a referencia állapotukban és az egy órával a tisztítás utáni állapotukban.

A lézeres kezelés csak elhanyagolható mértékben növelte a hőmérséklet-növekedés (~3°C) hatására bekövetkező átlagos relatív elmozdulást, és még ez az elhanyagolható hatás sem volt kimutatható a minta 1 hónapos relaxációja után.

## **7. A lézeres tisztítás gyakorlati tapasztalatai a mestermunka alapján**

A mestermunkám során a lézert, mint a hagyományos módszerek lehetséges alternatíváját vagy kiegészítőjét vizsgáltam különböző műtárgyakon, eltérő lézereket és beállításokat alkalmazva. A műtárgyak korukban, méretükben, anyagukban, a felületükön lévő szennyeződésben is jelentősen eltértek.

Az általam használt KrF (248 nm) és Nd:YAG (1064 nm) lézerek segítségével sikeresen távolítottam el az eredeti, római kori falképtörödékek felületére erősen kötődött, különböző vastagságú kalcitos szennyeződést, valamint a festett felületen is megjelenő Plextol filmréteget úgy, hogy az alatta lévő festékréteg nem sérült. A pigmentek reakciója megfelelt a korábbi tapasztalataimnak, így az egyiptomi kék és a mészfehér egyáltalán nem mutatott

színváltozást. Nem változott a vas-oxid sárga színe sem, viszont a vas-oxid vörös tisztítására a KrF lézert (248nm) alkalmaztam, mivel a Nd:YAG (1064 nm) lézer használatakor a festékréteg megsötétedett.

A legjobb eredmény eléréséhez a főtí Károlyi István szobrot szennyező festékréteg eltávolítására a lézeres tisztítást különböző restaurátori tisztító eljárásokkal kapcsoltam össze. Az eltávolítandó festékréteget szemcseszórással és oldószeres pakolással vékonyítottam, majd a Nd:YAG lézer 532 nm-es és 1064 nm-es hullámhosszú lézernyalábjainak segítségével távolítottam el úgy, hogy a felület jellegzetes vésőnyomai is megmaradtak. A mélyedésekben, repedésekben, nehezen elérhető helyeken megülő festékmaradványokat graffiti árnyékeltávolító szerrel (Tensid AGS 60) távolítottam el.

A freskótöredékek lézeres tisztításakor azt tapasztaltam, hogy a desztillált vizes nedvesítés sárgulást okozott, ezért nedvesítés nélkül alkalmaztam a Nd:YAG (1064 nm) lézert. A felületre jutott Plextol viszont eltávolíthatónak bizonyult desztillált vizes nedvesítéssel 1064 nm hullámhosszon, anélkül, hogy a festékréteg sérült volna. A szobor lézeres tisztítása során a felület alkoholos nedvesítése mindkét hullámhossz (532nm, 1064nm) használata során gyorsította a folyamatot, és hatékonyabbnak bizonyult, mint a desztillált vizes nedvesítés.

A tárgyak mérete meghatározta a lézer beállítását. A pár centiméter kiterjedésű falképtöredékek tisztításakor a nyalábot kibocsájtó kart rögzítettem és a tárgyakat mozgattam. Ezzel szemben a szobor lézeres tisztításakor kihasználva az eszköz mobilitását és a csuklós kar nyújtotta lehetőségeket az eszközt mozgattam a tárgy körül.

Az itt nyert széleskörű tapasztalataim alapján összességében elmondható, hogy a lézeres tisztítás lehetőségét érdemes számba venni a restaurálási folyamat megtervezésekor. Amennyiben elég széles skálán tudjuk változtatni a paramétereket, úgy remélhetjük, hogy a lézer a hagyományos módszerekkel nem, vagy nehezen megoldható tisztítási problémákra is hatékony megoldást kínál.

## **A doktori kutatáshoz kapcsolódó publikációk, témavezetés**

Zs. Márton, I. Kisapáti, Á. Török, V. Tornari, E. Bernikola, K. Melessanaki, P. Pouli: *Holographic testing of possible mechanical effects of laser cleaning on the structure of model fresco samples*, NDT&E International, vol. 63, pp. 53–59, 2014.

Kisapáti I., Márton Zs.: *Római kori falkép-töredékek lézeres tisztítása*, Műtárgyvédelem, vol. 37-38, pp. 185-191, 2012-13.

Kovács-Mravik P., Galambos É., Kisapáti I., Márton Zs., Sajó I., Sándorné Kovács J., J. Schultz, Tóth A.: *Az Iparművészeti Múzeum Damaszkusz szobája*, Műtárgyvédelem, vol. 37-38, pp. 7-37, 2012-13.

Zs. Márton, I. Kisapáti, P. Pouli, E. Bernikola, V. Tornari: *Laser cleaning of excavated fresco fragments; testing and optimization of laser parameters and structural monitoring by means of Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry in Lasers in the Conservation of Artworks IX*, ed: Saunders et al. Archetype Publications, London, 2013

J. Marczak, M. Strzelec, R. Ostrowski, A. Rycyk, A. Sarzynski, W. Skrzeczanowski, Koss, R. Szambelan, R. Salimbeni, S. Siano, J. Kolar, M. Strlic, Z. Márton, I. Sánta, I. Kisapáti, Z. Gugolya, Z. Kántor, S. Barcikowski, P. Engel, M. Pires, J. Guedes, A. Hipólito, S. Santos, A.S. Dement'ev, V. Švedas, E. Murauskas, N. Slavinskis, K. Jasiunas, M. Trtica: *Advanced laser renovation of old paintings, paper, parchment and metal objects in Lasers in the Conservation of artworks VII*, ed: Castillejo et al. Taylor and Francis Group, London, 2008

Szörényi Bella: *Graffiti eltávolítása kőfelületekről*, témavezető: Kisapáti Ivett, konzulens: Dr. Márton Zsuzsanna, MKE, 2014.

## **A doktori kutatáshoz kapcsolódó konferencia részvételek, előadások**

**40. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2015.**, előadó:  
Kisapáti I., Márton Zs.: A fői Károlyi István szobor lézeres tisztítása

**LACONA X, Sharjah, 2014.**, poszter:

Zs. Márton, I. Kisapáti, V. Tornari, E. Bernikola, K. Melessanaki, E. Tsiranidou, K. Hatzigiannakis, P. Pouli: Holographic evaluation of the structural condition of laser-cleaned model fresco samples

**ICOM-CC: Heritage Wood: Research & Conservation in the 21st century, Varsó, 2013.**, előadás: P. Kovács-Mravik, É. Galambos, Zs. Márton, I. Kisapáti, J. Schultz: A polychrome wooden interior from Damascus: a multi-method approach for the identification of manufacturing techniques, materials and art historical background

**Laserlab User Meeting, Marseille, 2013.**, előadás:

I. Kisapáti, Zs. Márton, I. Bernikola, E. Tsironidou, C. Hatzigiannakis, P. Pouli, V. Tornari: Laser-cleaning of excavated fresco samples and DHSPI testing of model fresco samples for differentiating the photomechanical effects induced by the laser cleaning



**CHARISMA Itinerant course on stone conservation, Amszterdam, 2013.,** előadó:

Kisapáti I., Márton Zs., P. Pouli, K. Melesanaki, E. Bernikola, E. Tsiranidou, K. Hatzigiannakis, V. Tornari: DHSPI testing of laser-cleaned model fresco samples for monitoring the photomechanical effects induced by laser cleaning,

**II. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia, Pécs, 2013.,** előadó:

Kisapáti I., Márton Zs., Pouli P., Melesanaki K., Bernikola E., Tsiranidou E., Hatzigiannakis K., Tornari V.: Freskó modelleken végzett lézeres tisztítás által okozott fotomechanikai hatások vizsgálata digitális holografikus szemcsekép interferometriával

**LATKÖV - Lézeres és analitikai technikák a kulturális örökség védelmében,**

**Pécs, 2013. február 8-9.,** szervező és előadó:

Márton Zs., Kisapáti I., Tóth T.: Lézeres felület-tisztítás és LIBS analízis műtárgyakon. Fizikai alapok és gyakorlati alkalmazások

Kisapáti I.: Holográfia alkalmazása műtárgyak vizsgálatára

**CHARISMA – Advanced laser-based techniques in art conservation, diagnostics and analysis, FORTH, Institute of Electronic Structure and Laser, Kréta, 2012.,** poszter: I.

Kisapáti, P. Pouli, I. Sajó, K. Kovács, Zs. Márton: Laser induced yellowing of red ochre pigments

**Magyar Képzőművészeti Egyetem, Budapest, 2012.,** előadó:

Márton Zs., Kisapáti I., Tóth T.: Lézeres felület-tisztítás és LIBS analízis műtárgyakon. Fizikai alapok és gyakorlati alkalmazások

**LACONA IX, London, 2011.,** előadás

Zs. Márton, I. Kisapáti, P. Pouli, E. Bernikola, V. Tornari: Laser cleaning of excavated fresco fragments; testing and optimization of laser parameters and structural monitoring by means of Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry

**XXXVI. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2011.,** előadó:

Márton Zs., Kisapáti I.: Különböző típusú lézerek alkalmazhatósága freskótöredékek tisztítására

**XXXV. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2010.,** előadó:

Kisapáti I., Márton Zs., E. Bernikola, P. Pouli: Római kori freskótöredékek lézeres tisztításának ellenőrzése holografikus interferometriával

**XXXIV. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2009.,** poszter:

Kisapáti I., Márton Zs.: Római kori freskótöredékek lézeres tisztítása

**Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA) VII, Madrid, 2007.,** poszter:

J. Marczak, M. Strzelec, R. Ostrowski, A. Rycyk, A. Sarzynski, W. Skrzeczanowski, A. Koss, R. Szambelan, R. Salimbeni, S. Siano, J. Kolar, M. Strlic, Z. Márton, I. Sánta, I. Kisapáti, Z. Gugolya, Z. Kántor, S. Barcikowski, P. Engel, M. Pires, J. Guedes, A. Hipólito, S. Santos, A.S. Dement'ev, V. ©vedas, E. Murauskas, N. Slavinskis, K. Jasiunas, M. Trtica: Advanced laser renovation of old paintings, paper, parchment and metal objects