

Magyar Képzőművészeti Egyetem
Doktori Iskola

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

DLA értekezés

Kisapáti Ivett

2015

Témavezetők:

Dr. habil, DLA Menráth Péter
Magyar Képzőművészeti Egyetem

Dr. habil, PhD Márton Zsuzsanna
Pécsi Tudományegyetem

Bevezetés.....	3
1. A lézeres tisztítás irodalmi áttekintése	5
1.1. A lézeres tisztítás fizikai alapjai	5
1.2. A lézeres és a hagyományos tisztító eljárások összehasonlítása.....	9
1.3. A műtárgyalkotók sokféleségének jelentősége	11
2. A digitális holografikus szemcsekép interferometria alapelve, alkalmazásai – irodalmi áttekintés	18
2.1. A DHSPI fizikai alapjai.....	18
2.2. A DHSPI felhasználása a restaurálás területén	23
3. Római kori freskótöredékek lézeres tisztítása.....	27
3.1. A lézeres tisztítópróbák célja	27
3.2. A kísérletben használt freskótöredékek bemutatása.....	27
3.3. Kísérleti eszközök, módszerek	28
3.4. A lézeres tisztítás eredménye	28
4. A lézeres tisztítás fotomechanikai hatásának vizsgálata a DHSPI technikával	38
4.1. A DHSPI mérések célja.....	38
4.2. A freskóminták bemutatása, készítéstechnikája és tulajdonságai	38
4.3. A DHSPI mérések során alkalmazott eszközök, módszerek.....	45
4.4. A DHSPI mérések eredményei	51
4.4.1 Az eredeti freskótöredékek DHSPI mérésének eredményei	51
4.4.2 Az új, modell minták DHSPI mérésének eredményei.....	55
5. Összefoglalás.....	61
Melléklet.....	64
Köszönetnyilvánítás	130
Irodalomjegyzék.....	131
Önéletrajz	136

Bevezetés

A lézereket a mindennapi élet számtalan területén, de a kutatásban, az orvoslásban, a haditechnikában is elterjedten használják 1960-ban történt felfedezésük óta. Már az 1970-es évektől megjelentek publikációk a lézerek lehetséges restaurátori alkalmazásairól is [1, 2]. A lézerek, spektrográfok és képfeldolgozó módszerek azóta bekövetkezett hatalmas fejlődése nyomán a különféle lézeres technikák mára egyre nagyobb teret nyernek a restaurátori gyakorlat több területén. Ilyenek például a felületi tisztítás, az anyagvizsgálat (különféle lézerspektroszkópai módszerekkel), a 3D képalkotás segítségével történő dokumentálás.

A mobil tisztító lézerek piaci megjelenésével [3, 4, 5] nő a műemlékek, műtárgyak lézeres tisztításáról beszámoló publikációk száma [6, 7]. A módszer alkalmazásával különböző alapanyagú műtárgyakról különböző összetételű, eredetű szennyeződések távolíthatók el, és a számos változtatható lézerparaméter helyes megválasztásával kiváló eredményeket lehet elérni. Viszont természetesen a lézeres tisztítás sem univerzális megoldás minden restaurátori problémára, ezért lehetséges negatív hatásainak ismerete elengedhetetlen. A nemkívánatos hatásokat két csoportra oszthatjuk: *a*, a felület elváltozása, megrongálódása (beleértve a festékréteg elszíneződését vagy elvesztését), valamint *b*, szerkezeti elváltozások, amelyek a lézeres tisztítás mechanikai- és hőhatásának következményei lehetnek.

Magyarországon, a PTE Fizikai Intézetében 2005 óta végeznek kutatásokat a lézerek restaurátori alkalmazásaival kapcsolatban. Ebbe a munkába egyetemi hallgatóként kapcsolódtam be, amikor a szakdolgozatomat római kori freskótöredékek excimer lézeres tisztításáról írtam [8]. Doktori értekezésem témája ennek a munkának a folytatása. Többféle lézert használva és újabb mintadarabokon kísérletezve kiterjesztettem a lézeres tisztítás freskótöredékeken való alkalmazhatóságára, előnyeire és korlátaira vonatkozó tapasztalataimat, valamint a lézeres tisztítás potenciálisan káros fotomechanikai hatásait a digitális holografikus szemcsekép interferometria módszerével vizsgáltam meg.

Dolgozatomban 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 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.

1. A lézeres tisztítás irodalmi áttekintése

1.1. A lézeres tisztítás fizikai alapjai

A lézer (LASER) elnevezés egy mozaikszó, amely az angol „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (fényerősítés a sugárzás indukált emissziója által) kifejezésből keletkezett. Ebben a dolgozatban nem tárgyalom a lézerműködés fizikáját. Az alkalmazott módszerek lényegének megértéséhez elegendő, ha a lézerre úgy tekintünk, mint egy speciális fényforrásra, amelynek legfontosabb tulajdonságai a következők:

A lézerfény jó közelítéssel *monokromatikus*. Ez azt jelenti, hogy ideális esetben – ellentétben például a napfényel – egyetlen, meghatározott frekvenciával vagy hullámhosszal jellemezhető (egyszínű) komponenst tartalmaz. (A gyakorlatban nem tökéletesen monokromatikus a lézerfény, hanem egy központi frekvencia körüli nagyon keskeny frekvenciasávba eső frekvenciakomponenseket tartalmaz.) *Nagy a spektrális teljesítménysűrűsége*, tehát egy szűk frekvenciatartományban sugároz, és a lézernyalábban kis felületen sok energia áramlik át rövid idő alatt. A lézerfény *koherens*, azaz ha egy kettéosztott lézernyaláb részei újból találkoznak a térben, akkor interferencia jelenségeket figyelhetünk meg. *Kicsi a divergenciája*, ami azt jelenti, hogy a nyaláb a lézerből kilépve jó közelítéssel párhuzamos, nem széttartó. Ezek a tulajdonságok különböztetik meg a lézerfényt más, közönséges fényforrások fényétől, és ezek teszik lehetővé a speciális lézeralkalmazásokat.

Impulzuszézeres *ablációnak* nevezzük azt a jelenséget, amikor nagy energiájú, rövid lézerimpulzussal valamely területet besugározva, arról anyag távozik el [9]. Ha sikerül a szennyeződés réteget ablációval úgy eltávolítanunk, hogy a megőrizni kívánt felület nem sérül, akkor lézeres felülettisztításról beszélhetünk.

Az abláció név nem egyetlen fizikai folyamatot jelöl, mert az anyageltávolítás sok különböző úton mehet végbe. Az alkalmazott lézerparaméterektől illetve a jelenlévő anyagok tulajdonságaitól függően érvényesülhetnek fotomechanikai, fotokémiai vagy fototermális hatások [2]. A folyamatot nagyon sok paraméter befolyásolja.

A céltárgy tulajdonságai közül fontos szerepet játszik az anyagi minőség, a hőkapacitás, a hővezető képesség, a felület morfológiája és az abszorpció (fényelnyelési) együttható. A felület nedvesítésével e tulajdonságok közül egyszerre több is megváltozik, és ez gyakran javítja a lézeres tisztítás hatékonyságát.

A lézer paramétereit közül a legfontosabbak a hullámhossz, az energia, az impulzushossz, az intenzitás, a felületi energiasűrűség (fluencia, angolul fluence) az impulzus ismétlési frekvenciája, az energiaeloszlás homogenitása a nyalábkeresztmetszet mentén.

A felülettel érintkező közeg általában lehet levegő, inert gáz vagy vákuum. Ez a tényező a lézerfény-felület kölcsönhatást követő másodlagos hatások szempontjából fontos. Például a lézer által felmelegített felületen oxidáció következhet be, ami a restaurátori alkalmazásoknál, ahol a közeg általában levegő, nem elhanyagolható hatás [2].

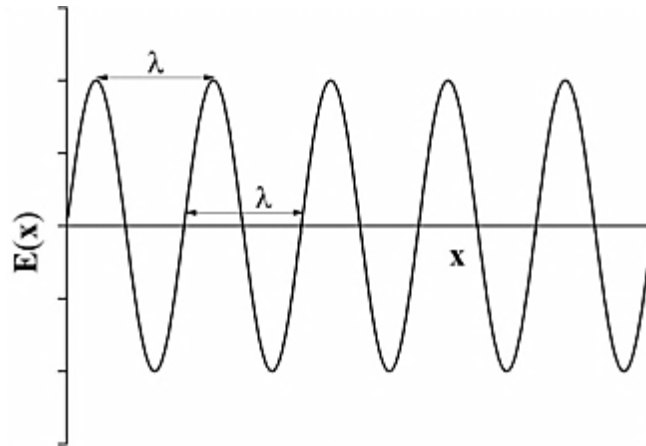
Az alábbiakban a fizikában kevésbé jártas olvasók számára szemléltetem a fény frekvenciája, hullámhossza és egy fotonjának energiája közti kapcsolatot, mert ezek ismeretében érthetőbbé válik, hogy hogyan érdemes a lézertípust és a nyalábparamétereket megválasztani a tisztítási feladatokhoz.

Mint az a huszadik század első fele óta közismert, a fény (és minden anyag) kettős természettel rendelkezik. Egyrészt leírható az elektromágneses térben terjedő hullámként (1. ábra), másrészt, ha kölcsönhatásba lép valamivel, akkor az energiáját meghatározott nagyságú adagokban tudja átadni, ezért ilyenkor úgy tekinthetjük a fényt, mint adott energiájú részecskék (fotonok) összessége.

Két szomszédos hullám csúcsa közötti távolságot hullámhossznak (λ), az időegység alatt egy ponton áthaladó csúcsok számát frekvenciának (ν) nevezzük. A hullámhossz és a frekvencia fordítottan arányosak, szorzatuk a c fénysebesség, ami állandó.

$$c = \lambda \cdot \nu,$$

ahol c a fénysebesség, ν a frekvencia, λ a hullámhossz.



1. ábra

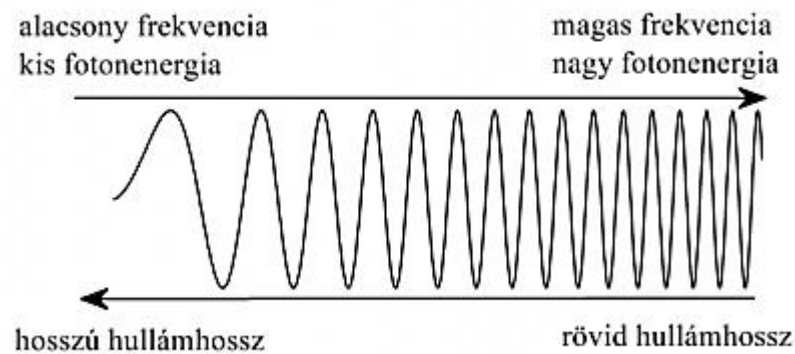
Egy foton energiája a frekvencia (ν) és a Planck-állandónak a szorzataként számolható ki.

$$Q = h \cdot \nu,$$

ahol Q a foton energia, ν a frekvencia, h a Planck-állandó, értéke $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js. Ha a frekvenciát a hullámhossz és a fény sebessége segítségével kifejezzük, láthatjuk, hogy egy kvantum energiája fordítottan arányos a hullámhosszával:

$$Q = \frac{hc}{\lambda}.$$

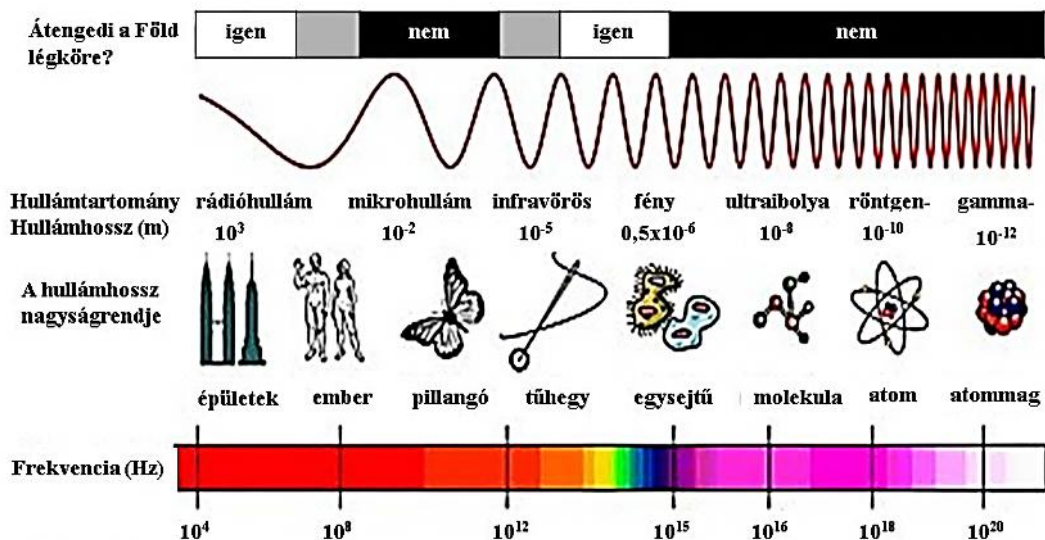
A fenti összefüggések ismeretében érthetővé válik az elektromágneses spektrum szokásos ábrázolásmódja, ahol a frekvencia és/vagy a hullámhossz, tehát végső soron az energia függvényében különítik el az egyes tartományokat (2. ábra).



2. ábra

Minél nagyobb a hullámhossz, annál kisebb a fény egy fotonjának energiája (3. ábra).

ELEKTROMÁGNESES SPEKTRUM



3. ábra [10]

A lézerben található aktív közegtől és a rezonátor beállításától függ, hogy a lézer milyen hullámhosszú fényt bocsájt ki. Az alábbi táblázatban található a restaurálás során leggyakrabban alkalmazott lézertípusokat hullámhosszuk szerint növekvő sorrendben.

Lézertípus		Hullámhossz (nm)	Az aktív közeg halmazállapota	Felhasználás a restaurálásban
Excimer	KrF	248 (UV)	gáz	festett felületek, festmények
Neodímium YAG	Nd:YAG 4 ω	266 (UV)	szilárdtest	
Excimer	XeCl	308 (UV)	gáz	kalcitos szennyeződés eltávolítás márványról
Excimer	XeF	351 (UV)	gáz	kísérlet szilárdítokon, lakkokon, ragasztókon
Neodímium YAG	Nd:YAG 3 ω	355 (UV)	szilárdtest	
Neodímium YAG	Nd:YAG 2 ω	532 (VIS)	szilárdtest	
Rubin	Cr:Al ₂ O ₃	694 (VIS)	szilárdtest	kőfelületek
Neodímium YAG	Nd:YAG	1064 (IR)	szilárdtest	kőfelületek
Erbium YAG	Er:YAG	2940 (IR)	szilárdtest	festmény, festett felület
Szén-dioxid	CO ₂	10600 (IR)	gáz	korrodálódott vas

1. táblázat: A restaurátori gyakorlatban használt lézerek [11]

1.2. A lézeres és a hagyományos tisztító eljárások összehasonlítása

A restaurálás folyamán törekednünk kell arra, hogy a műtárgy lehetőleg ne károsodjon. Ennek érdekében gondosan meg kell terveznünk a restaurálás menetét, mérlegelnünk kell az egyes módszerek műtárgyra, a restaurátorra illetve a környezetre gyakorolt hatásait.

Kedvező tulajdonságainak köszönhetően a lézeres tisztítás jó alternatíva lehet a korszerű módszerek közt. Mivel a fényt valamilyen mértékben minden anyag elnyeli, a módszer használhatósága nem korlátozódik csak meghatározott összetételű műtárgyalkotókra, szennyeződésekre. Ahhoz, hogy optimális tisztítási eredményt kapjunk, szükséges, hogy a szelektivitás teljesüljön, tehát olyan lézerhullámhosszat kell választani, amelyen a szennyeződés abszorpciója nagy, míg a műtárgyalkotóé kicsi. Szerencsére sok esetben lehetséges teljesíteni ezt a feltételt, így elmondhatjuk, hogy a lézer a szennyezőanyagok széles palettáját képes eltávolítani úgy, hogy közben az eredeti felület nem sérül.

A szelektív tisztítás egyik legjobb példája, ha egy fehér hordozóról, például fehér márvány, mészkő felületről a ráakódott fekete szennyeződésréteget Nd:YAG lézer 1064 nm hullámhosszával távolítják el. A szakirodalomban számos példát találhatunk erre [12, 13, 14, 15]. Kiemelkedik ezek közül bécsi Szent István székesegyház homlokzatának évekig tartó tisztítása (1-2. kép) [15], vagy Diokleciánusz palotájának oszlopcsarnoka Splitben, amit szintén lézerrel tisztítottak (3. kép) [16]. Pummer tanulmányában [17] szemcseszórásos eljárásokat (JOS, korund, duroplast, dióhéj) hasonlított össze lézeres tisztítással. Azt tapasztalta, hogy a keményebb szennyeződések eltávolításakor a szemcse nem távolította el kellőképpen a szennyeződést, de a kőfelület puhább részeit roncsolta, ellenben a lézerrel a szennyeződés keménységétől függetlenül úgy tisztította le felületet, hogy a kő nem sérült.

A gyenge megtartású műtárgyak esetében már azzal is kárt tudunk okozni, amikor a tárgyat megfogjuk, felületére nyomást gyakorolunk a tisztításhoz használt eszközeinkkel. A lézeres tisztítás ezzel szemben közvetlen érintkezés nélküli, a folyamat során csak a lézerfény éri a felületet. A lézer paraméterek (elsősorban a felületi energiasűrűség) helyes beállításával a felület megőrzi plasztikusságát, megmaradnak a felületre jellemző formák, mint például véső- vagy ecsetnyomok, amelyek fontos készítéstechnikai információkat is hordozhatnak.



1. kép: A bécsi Szent István székesegyház lézeres tisztítása [15]



2. kép: A bécsi Szent István székesegyház Madonna szobrának lézeres tisztítása [18]



3. kép: Lézeres tisztítás Diokleciánusz palotájának oszlopcsarnokán Splitben [19]

Amint az előző fejezetben említettük, az egy lézerimpulzus hatására eltávolított réteg vastagsága kicsi, akár mikron alatti, és a felületi energiasűrűséggel szabályozható. Célszerű az energiasűrűséget úgy megválasztani, hogy a szennyeződésréteg ne egy impulzus hatására távozzon el. Ilyenkor az egy területet érő impulzusok számának változtatásával is befolyásolhatjuk az eltávolított réteg vastagságát. Ez a tulajdonság jól hasznosítható akkor, ha az eltávolítandó réteg vékony, például festmények tisztítása során, amikor nem a teljes lakkréteget, hanem annak csak egy részét szeretnénk eltávolítani [20].

Munkánk során elengedhetetlen, hogy a környezetvédelemre is hangsúlyt fektessünk. A lézeres tisztítás kevésbé környezetszennyező eljárás, mint például a vegyszeres vagy szemcseszórásos eljárások, mivel nem keletkezik elhasznált folyékony anyag vagy szemcse, és szerves oldószert sem alkalmaz. Számolnunk kell viszont a lézeres tisztítás során keletkező gáznemű termékekkel, ezek kiszűrését, elszívását meg kell oldanunk.

1.3. A műtárgyalkotók sokféleségének jelentősége

A lézeres tisztítás megkezdése előtt – úgy, mint minden egyes restaurátori beavatkozás esetében is – elengedhetetlen a műtárgyat alkotó és a szennyező anyagok ismerete, mert ez alapvetően meghatározza a lézer-anyag kölcsönhatás folyamatait. Fontos felhívni a figyelmet arra, hogy nem elegendő az anyag megnevezését, esetleg átlagos kémiai összetételét ismernünk, meg kell figyelni az összetevők eloszlását, szerkezeti tulajdonságait is.

Köből készült műtárgyaknál gyakran előfordul, hogy a felhasznált darab inhomogén, ereket, zárványokat tartalmaz. Az anyag lézerfényre adott reakcióját olyan méretek alapján kell vizsgálnunk, amelyen az inhomogén felszín különböző típusú területei megkülönböztethetők. Jellemzően a fehér márványban található szürkés, feketés erek anyaga könnyebben roncsolódhat az infravörös fény hatására, míg a fehér területek tisztítására többnyire alkalmazhatjuk az infravörös hullámhosszakot. A magyarázat egyszerű. A hétköznapi életben is közismert tény, hogy az infravörös (hő-) sugárzást a sötét színű anyagok jobban elnyelik, mint a fehér színűek. Szaknyelven ez úgy írható le, hogy a sötét színű anyagnak nagyobb az abszorpciós együtthatója az infravörös tartományban, tehát a beérkező lézerenergia nagyobb hányadát nyelik el, és emiatt jobban is roncsolódhatnak.

Már a lézeres tisztítás korai alkalmazásakor megfigyelték, hogy a Nd:YAG lézer 1064 nm hullámhosszával tisztított világos kőfelület (márvány, mészkő) sárgás árnyalatot kaphat az eredeti kőanyaghoz képest. [21, 22] A jelenség magyarázatára több teória is született, de a mai napig folynak a kutatások, és az is előfordulhat, hogy ugyanazon esetben egyszerre több magyarázat is igazolódik [2, 23].

A lézeres tisztítás utáni sárgás szín egyik magyarázata lehet, hogy a tisztítás felfedte a patinát, vagy egy korábban felhordott bevonatot. Ezek lehetnek természetes patinák, amik környezeti hatásoktól vagy zúzmók bioaktivitása során alakultak ki, vagy

a múltban szándékosan felhordott védőrétegek, alapozások [24, 25]. A Parthenon kövein is azonosítottak ilyen sárgás-barnás színű réteget (epidermis), amit valószínűleg védőréteggént használtak az antik korban [26]. Mivel a múltban fontos szerepe volt a rétegnek, így megőrzése rendkívül fontos. Sajnos a korábbi, nem megfelelő tisztítás következtében sok helyen már elveszett, de azokon az elemeken, amiket lézerrel tisztítottak sikerült megőrizni ezt a réteget [27]. Természetesen a patina vagy védőréteg felfedése bármely tisztítási technika esetén sárgás felületet eredményez.

Azonban a védőréteg vagy patina nem minden esetben magyarázza az alapkőzet sárgás árnyalatát a lézeres tisztítás után, hiszen olyan esetekben is tapasztalták a jelenséget, amikor bizonyítottan nem volt jelen ilyen réteg [12]. Magyarázhatja a sárgulást az is, hogy a felületen lévő fekete szennyeződésben lévő vízdoldható vegyületek magas páratartalom vagy az eső következtében a szennyeződésből a kő felé vándorolhatnak, beszennyezve a kő felületét. Például a St. Denis katedrális fekete szennyeződéséből sárga színű, szerves, poláris vegyületeket mutattak ki, amelyeket nem távolított el a Nd:YAG lézer 1064nm hullámhossza. Tehát a sárgulást részben okozhatják ezek a nem megfelelően eltávolított szerves vegyületek is [28]. Ellentétben a patinával, nem célunk ezek megőrzése, eltávolításuk azonban nagy odafigyelést igényel. Erre lehet jó módszer a Nd:YAG lézer 355 nm hullámhosszának alkalmazása, amely sikeresen eltávolította ezeket a maradványokat [12]. További tanulmányok szükségesek annak a meghatározására, hogy ezek a poláris vegyületek megváltoztatják-e a patina vagy a védőréteg színét, ami [29] szerint szintén sárgás lett az IR lézeres sugárzás hatására.

Egy másik magyarázat szerint a sárgulást a kőben [30] vagy a szennyeződésben [31, 32] lévő vastartalmú összetevők hő hatására bekövetkező kémiai átalakulása okozza. A mikronos nagyságrendű vastartalmú komponensek olvadásáról számoltak be a Pliocén Siena homokkőben (SFR, Nd:YAG) valamint a szerzők által készített mintákon a szennyeződésben és mészkövek természetes szennyeződésében (QS, Nd:YAG) [28]. A sárga megjelenés enyhítésére többféle pakolást alkalmaztak, amelyek közül a papírpépes pakolás úgy csökkentette az elszíneződést, hogy a pakolás nyomok nem maradtak a felületen. A sárgulás csökkentésének két magyarázata lehet: *a*, a sárgulást okozó részecskék feloldódtak *b*, a pakolás eltávolításakor leváltak a felületről [28].

Továbbá magyarázhatja a jelenséget az is, hogy a lézeres tisztítás hatására megváltozik a felület egy vékony rétegének (~5 μ m) a fizikai és kémiai állapota. A

fekete részecskék szelektív elpárolgása miatt a felszíni réteg sokkal porózusabbá válik, ami új fényvisszaverési centrumokat eredményez, ezért látszik a felület sárgábbnak [2]. Az IR és UV (1064 nm és 355 nm) lézerek együttes használatával el lehet kerülni a sárgulást vagy egymás utáni alkalmazása segíthet az optimális megjelenés elérésében. Görög fizikusok fejlesztettek ki egy olyan lézert, amely egy időben 1064 nm és 355 nm hullámhosszú nyalábokat bocsájt ki, és ezt az eszközt alkalmazták az Akropolisz nyugati frízének, valamint az Erechteion kariatidáinak tisztítása során is [2, 33, 27].



4. kép: Az Akropolisz frízének lézeres tisztítása [34]



5. kép: A kariatidák lézeres tisztítása [35]



6. kép: A kariatidák lézeres tisztítása, részlet [35]

A festett műtárgyak komplex rendszereket alkotnak. Egy festett réteg lézerfényre adott reakcióját a pigment, a kötőanyag és a hordozó reakciója együtt határozza meg. A lézeres tisztítás tervezésekor figyelembe kell vennünk, hogy a pigmentek eltérően reagálhatnak a lézerfényre attól függően, hogy por alakban, vagy kötőanyagban vizsgáljuk őket [36, 37]. Ugyanazon pigment tisztítása eltérő lézer paramétereket igényelhet különböző kötőanyagba ágyazva, és azt is figyelembe kell vennünk, hogy milyen a pigment és a kötőanyag aránya a festékrétegben.

Számos tanulmány vizsgálta a pigmentek lézerfényre adott reakcióját [38, 36, 37, 39], melyek alapján egy érzékenységi sorrendet állíthatunk fel a leggyakrabban használt pigmentek között [36, 37]. Vannak olyan pigmentek, amelyek egyáltalán nem változnak a lézeres tisztítás hatására. Ilyen például a verdigris, ami még az energia növelésével sem színeződik el, inkább leválik a felületről [37]. Hasonlóan stabil a mészfehér, a zöldföld és a smalte is. Stabilmak mondható a cinkfehér, az ultramarin, a kobaltkék és az egyiptomi kék, ezeknél az energia túlzott növelése okozott csak színváltozást. Az okkerek egyes esetekben nem változnak, míg máskor színváltozást mutatnak. A higany és ólomtartalmú pigmentek valamint a malachit a legérzékenyebbek a lézeres sugárzásra.

Már a kezdetekben megfigyelték, hogy a higany tartalmú pigmentek (cinóber, vermilion) fokozottan érzékenyek a lézersugárzásra, akár egy impulzus hatására is véglegesen megsötétednek függetlenül a kötőanyagtól, a szennyezőanyagtól vagy az alkalmazott lézer hullámhossztól [36, 40]. Ez a jelenség nem meglepő, mert a cinóberről köztudott, hogy fényérzékeny pigment. Az antik kor óta használták (pl. Pompeii falképek), valamint kedvelt volt a reneszánszban és a barokkban is, habár már a rómaiak is tudták, hogy fény hatására megsötétedhet. [41] Számos kutatás vizsgálja az okokat, [40, 22, 42, 43], amelyek közül [44] tiszta, por pigmenten végzett kísérlete során az XPS adatok alapján arra következtetett, hogy a vörös α -HgS allotróp módosulattól a lézeres kezelés hatására fekete β -HgS lett. Ez magyarázhatja az elszíneződést és alátámasztja [22] korábbi feltevését is. Egy másik teória szerint a szennyeződésben vagy a festékrétegben jelen lévő halogén szennyezők (pl. klór) hozhatók összefüggésbe a vermilion/cinóber sugárzás hatására bekövetkező sötétedésével [43, 45]. Mindenesetre az ilyen festékrétegek esetében kerülni kell a lézeres tisztítást.

Az ólomtartalmú pigmentek (pl. ólomfehér, minium, ólomsárga stb.) a lézeres kezelés hatására könnyen megfeketednek, bár az elszíneződés egyes esetekben visszafordítható, valamennyi idő elteltével a pigment visszanyerheti az eredeti színét

[36, 37, 38, 46]. Megfigyelték, hogy oxigéndús környezetben a folyamat gyorsabban ment végbe, valamint az ólomfehér gyorsabban alakult vissza, mint a mínium és az ólomsárga. Ez utóbbi csak lassan vagy egyáltalán nem alakult vissza [40, 47].

Kezdetben a színváltozásért egyesek az oxidációt [46] mások a redukciót tartották felelősnek [47, 48], mely utóbbi teóriát alátámasztják az analitikai mérések (XPS, TEM) eredményei is. A redukció a következő módon mehet végbe: a lézeres abláció során egy sűrű plazma keletkezik, ahol helyi oxigénhiány alakul ki. Ez kedvez annak, hogy a pigment alkotóelemeire essen szét. Ennek következtében a pigment fémes alkotórészei a festékréteg legfelső rétegében koncentrálnak, majd a plazma megszűnése után lehetségessé válik az oxidáció, ami visszafordíthatja a lézer hatására bekövetkező színváltozást [12, 40]. Már a korai alkalmazások során kiderült, hogy a malachit nagyon érzékeny a lézersugárzásra. XPS és micro-Raman adatok azt támasztják alá, hogy a malachit végleges elszíneződéséért is a redukció lehet a felelős. A mérések szerint az eredeti malachitot alkotó réz-karbonátból (CuCO_3) és réz-hidroxidból ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) kuprit (Cu_2O) jött létre [40, 44].

Azt is megfigyelték, hogy az ultrarövid (femtosekundumos vagy pikosekundumos tartományba eső) UV impulzusok hatására a pigmentekben bekövetkező színváltozások a malachit kivételével mérsékeltebbek voltak, mint az infravörös, nanosekundumos sugárzás hatására bekövetkező változások [44].

Fontos megemlítenünk a vörösokker elváltozásait is, mivel ezzel a pigmenttel gyakran találkozhatunk a restaurátori gyakorlatban. A vörösokker festékréteg számos beszámoló szerint sérülés és a szín megváltozása nélkül tisztítható lézerral [49, 50, 51, 52, 53], de találhatunk rá példát, hogy a lézer hatására megsötétedett. [37] Saját kísérleteink során ezek mellett azzal a jelenséggel is találkoztunk, hogy a vörösokker festékréteg sárgásabb árnyalatúvá vált a lézeres kezelés hatására [54]. Ezt a jelenséget a „*Római kori freskótöredékek lézeres tisztítása*” című fejezetében tárgyalom.

Az utóbbi időben egyre több olyan restaurálásról adnak számot, ahol már nagy felületen, egész freskó ciklusokon is alkalmazzák a lézeres tisztítást [53, 55]. Ilyen például Neferhotep sírkamrája (TT49) Thébában, ahol a vastag, kormos szennyeződést a lézeres tisztítás és oldószeres pakolás kombinálásával tudták a leghatékonyabban eltávolítani a falképekről és festett köfelületekről. A lézer szempontjából legkritikusabbnak ítélt területeket, mint például a feketével festett motívumokat, cyclododecan illanó szilárdítóval védték le a lézeres kezelés idejére. A restaurálás során

egy olyan könnyű, mobil eszközt használtak, amit a restaurátor hátizsákszerűen a hátára vehet munka közben, ahogy az a 7. képen is látszik.



7. kép: Neferhotep sírkamrájának lézeres tisztítása [56]



8. kép: Neferhotep sírkamrájának lézeres tisztítása [56]

Amennyiben a műtárgyon korábbi restaurálás során alkalmazott anyagokat találunk, el kell döntenünk, hogy el szeretnénk-e őket távolítani vagy éppen a megőrzésükre törekszünk. Amennyiben szeretnénk megtartani, lehetőleg olyan hullámhosszt alkalmazzunk, amelyet az adott anyag többnyire visszaver, míg ha az eltávolítás a cél, akkor olyan tartományból válasszunk, amit jól elnyel [57]. Előfordulnak olyan esetek is, amikor a tisztítandó műtárgy anyaga olyan mértékben meggyengült, hogy azt a tisztítás előtt szilárdítanunk kell. Ebben az esetben vizsgálnunk kell, hogy az alkalmazott szilárdító szer hogyan befolyásolja a lézeres tisztítást.

A szennyeződés eltávolítását általában megkönnyíti, ha a lézeres tisztítás alatt a felületet nedvesítjük. A folyadékréteg vastagsága általában néhány tizedtől több mikronig terjed. A nedvesítő anyag lehet, pl.: desztillált víz, vagy desztillált víz és alkohol (10-20%) elegye, amely jobban terül a felületen [2]. Nedves tisztításkor kisebb energiasűrűséget használhatunk, illetve a lézer energiájának vagy az esetleg felszabaduló hőnek egy részét a folyadék nyeli el, ami rendkívül fontos a hőre érzékeny hordozók vagy az olyan részecskék esetében, amelyek megolvadhatnak.

Az OH- csoportban gazdag oldószerek erősen elnyelők 2940 nm-en, így az ezen a hullámhosszon történő sugárzás (Er:YAG lézer) elsősorban az elegyben fog elnyelődni csökkentve így a hordozó hőterhelését. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy a folyadékok alkalmazása a nagyon érzékeny felületeken magában hordozza az oldószer/elegy beszívódásának veszélyét, ami káros mellékhatásokat okozhat.

Mindezen tényezők figyelembe vételével egy nagyon precíz, az adott tárgyra szabott tisztítást végezhetünk.

2. A digitális holografikus szemcsekép interferometria alapelve, alkalmazásai – irodalmi áttekintés

2.1.A DHSPI fizikai alapjai

A holografikus interferometria különböző tárgyak, köztük műtárgyak felületi és szerkezeti változásainak, deformációknak és feszültségeknek a nagyon érzékeny kimutatására alkalmazható módszer. Pontos fizikai leírása magas szintű matematikai ismereteket feltételez, ezért itt csak vázlatosan szemléltetem az alapelveit.

Interferencia

Mint azt már a 1.1. fejezetben írtam, a fény hullámként terjed. Két hullám találkozásánál, ha azok fáziskülönbsége a vizsgálat helyén időben állandó, interferencia figyelhető meg, azaz a hullámok erősíthetők vagy gyengíthetők egymás attól függően, hogy azonos vagy ellentétes fázisban találkoznak. Fény esetében, ha két hullám egy adott pontban erősíti egymást, akkor ott nagy fényintenzitást mérhetünk (világos pont), ha gyengítik egymást, akkor a pont sötét. A maximális erősítés helyein a hullámok fáziskülönbsége nulla, az útkülönbsége a hullámhossz egész számú többszöröse.

Jó közelítéssel síma, de nem feltétlenül sík felületekről való visszaverődés után a hullámok úgy találkoznak egymással, hogy az erősítés és a gyengítés helyei valamilyen, többé-kevésbé szabályos görbékkel rajzolnak ki egy síkon, például párhuzamos egyenesekből vagy koncentrikus körökből álló sötét-világos csíkrendszer alakul ki.

Holográfia

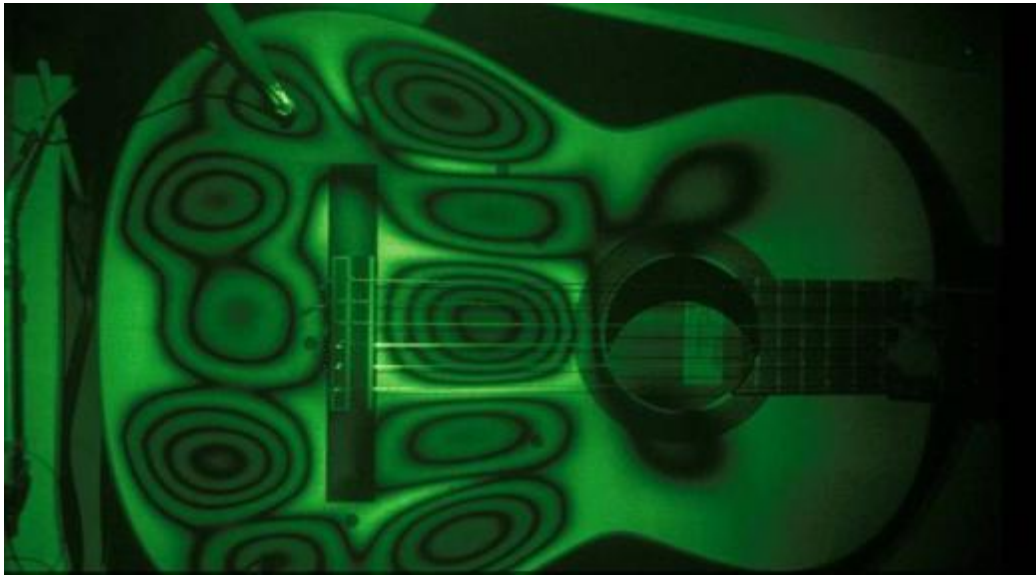
A holográfia egy olyan speciális képalkotó eljárás, amellyel nem csak a fény erősségére (az intenzitásra) vonatkozó információt rögzítjük, hanem a fény fázisát is. A fényérzékeny felületen (fotolemez vagy CCD), nem a geometriai optikában megismert képet rögzítik, hanem a tárgyról érkező hullám és egy referencia nyaláb által alkotott teljes interferenciaképet. Amikor ezen az interferenciaképen keresztül, vagy arról visszaverődve nézünk egy rekonstruáló fénynyalábot, akkor az úgy jut a szemünkbe, mintha a tárgyról érkezett volna, és hordozza magában a fázis információt is, ezt térbeli mélységként érzékeljük [58].

Holografikus interferometria

Az interferencia csíkokhoz hasonló csíkrendszert létrehozhatunk úgy is, hogy nem egy időben találkozó két hullám által kialakított interferenciaképet rögzítünk, hanem két képet (valójában két hologramot) rögzítünk egymás utáni időpillanatokban ugyanazon a síkon (lehet ez fényérzékeny lemez, vagy egy CCD kamera síkja is). Ha a két kép felvétele közt csak annyi történt, hogy a felület, amiről a képképző hullámok visszaverődtek kis mértékben deformálódott, akkor a két felvett kép csak annyiban különbözik egymástól, hogy a visszavert hullámok más fázisban érik el a képsíkot. Így lesznek olyan helyek, ahol a két felvett hologram maximális intenzitású helyei egybeesnek (maximális erősítés), és olyan helyek is, ahol a minimumhelyre minimumhely esik (minimális erősítés). Ha a két hologram intenzitása egy fényérzékeny lemez emulziójában vagy digitálisan, a két CCD-kép kiolvasása után összeadódik, akkor létrejön egy olyan csíkrendszer, ami a vizsgált test deformációjára jellemző. Nagyon szemléletesen mutatják be a holografikus interferencia módszerét a hangszerek rezgéseiről készített felvételek (9-10. kép) [59]. A holografikus interferometriának különböző fajtái vannak attól függően, hogy pontosan milyen kísérleti elrendezésben rögzítjük a fény intenzitás és fázisviszonyait, és hogyan figyeljük meg a kialakult „képet”.



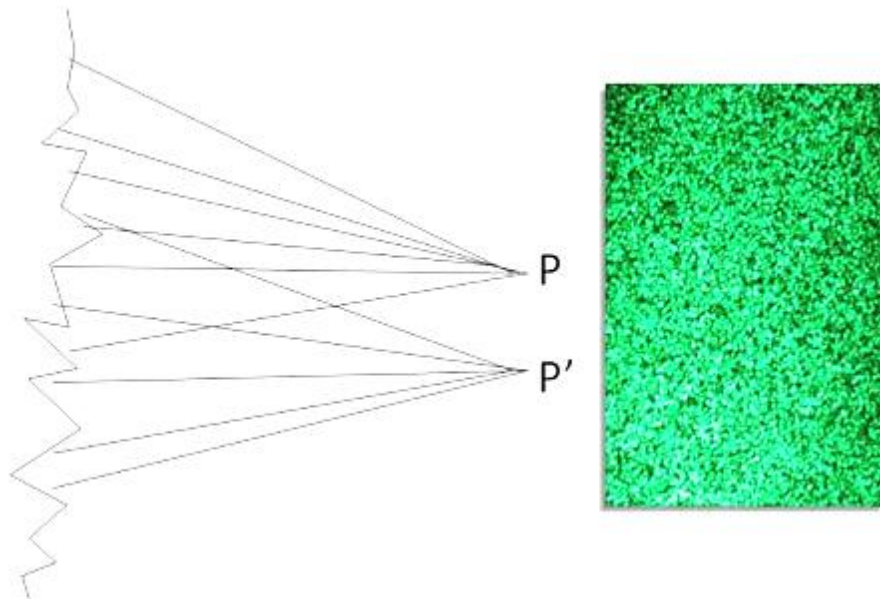
9. kép: Holografikus interferogram felvételére szolgáló kísérleti elrendezés [59]



10. kép: A hangszer rezgéseit mutató holografikus interferometria felvétel [59]

Szemcsekép

Szemcsekép akkor alakul ki, ha érdes felületről verődik vissza interferenciaképes (koherens) nyaláb (4. ábra). Ekkor a megfigyelési sík egy adott pontjába az érdes felület különböző pontjaiból beérkező elemi hullámok gyakorlatilag véletlenszerűen hol erősítik, hol gyengítik egymást, így a megfigyelési síkban véletlenszerűen eloszló sötét és világos apró foltokból álló képet, az úgynevezett szemcseképet figyelhetjük meg.



4. ábra: A szemcskép kialakulása

A DHSPI-I interferometrikus képalkotó rendszer

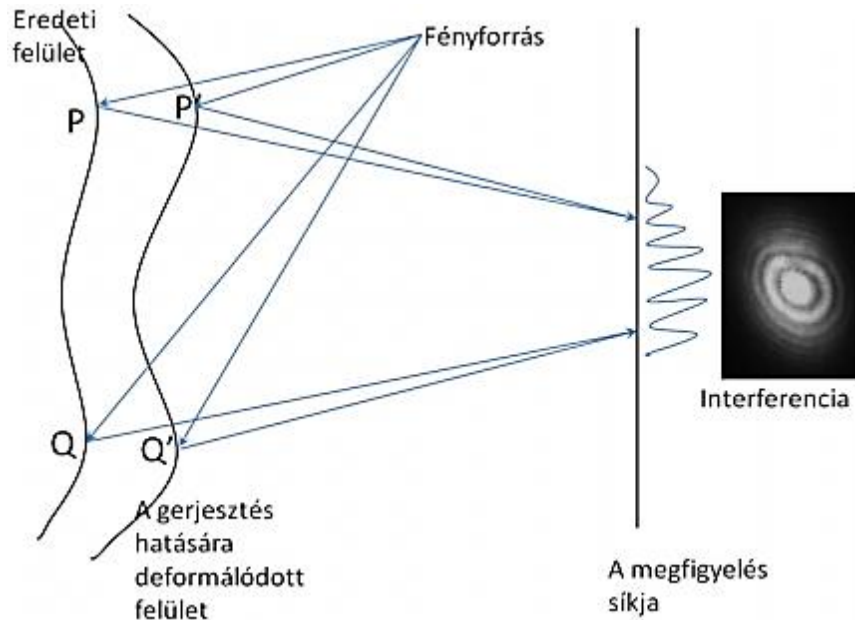
A DHSPI-I egy egyedi gyártású interferometrikus képalkotó rendszer, ami a differenciális holografikus szemcskép interferometria elvén működik (5. ábra). A módszer lényege a következő:

A tárgy érdes felületéről visszavert lézernyaláb a fentiek értelmében szemcsképet hoz létre egy távoli síkon. Ezt a visszavert lézernyalábot egy referencia nyalábbal interferáltatjuk, és az interferencia képet rögzítjük a CCD kamerán. Az eredmény tehát egy hologram lesz, ami világos-sötét szemcsékből áll, mint a szemcskép, de a fázis információt is tartalmazza.

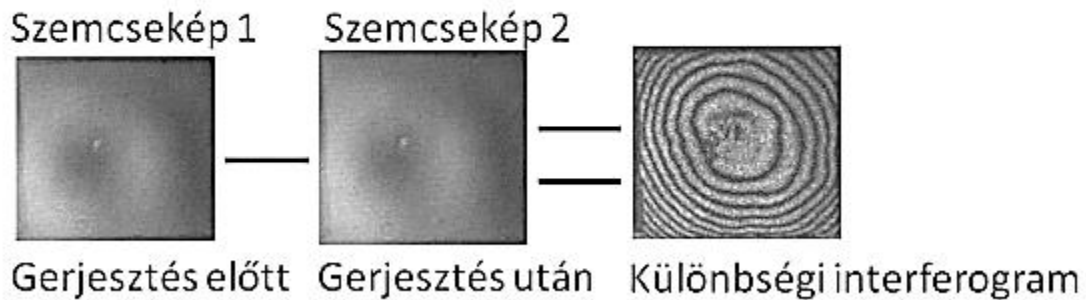
Ezután a tárgy állapotát kissé megváltoztatjuk, jelen esetben úgy, hogy néhány percen keresztül infra lámpával melegítjük, ezáltal a hőmérséklete néhány fokkal megnövekszik. A hőmérséklet-emelkedés miatt hőtágulás következik be, a felület elmozdul. Ha a tárgy inhomogén, akkor a felület deformációja is inhomogén lesz.

A megmelegített tárgyról újra felvesszük a szemcskép-hologramot. Ez a felület elmozdulásának megfelelően máshol mutat világos és sötét szemcséket. Majd a gerjesztés előtt és után felvett hologramok különbségét képezzük, amin világos-sötét csíkrendszer rajzolódik ki. A különbségi kép két szomszédos világos (vagy sötét) vonalára igaz, hogy a nekik megfelelő pontok elmozdulásának különbsége éppen

akkora, hogy az onnan visszavert nyalábok közti útkülönbség a hullámhosszal egyenlő. A csíkok alakjából, sűrűségéből következtethetünk arra, hogy egyenletesen vagy inhomogén módon tágult a tárgy, és arra is, hogy milyen mértékben.



5. ábra: A holografikus interferometria elve



6. ábra: A különbségi interferogram előállításának módja

A DHSPI-I az optikai úthossz változás mérésére alapozva bonyolult, akár anizotróp összetételű tárgyak felületi topográfiájának minimális, a lézernyaláb hullámhosszának nagyságrendjébe eső változását is képes pontosan megmérni. A mérési elrendezés sematikus ábrája a Bernikola és szerzőtársai cikkében található [60].

A DHSPI mérés során csak a gyenge fénynyaláb érintkezik közvetlenül a felszínnel. A kitágított lézernyaláb teljes keresztmetszetét használjuk, ezért nincs

szükség pontról pontra történő pásztázásra, a teljes felületről egy lépésben veszünk fel egy szemcseképet. Emiatt a módszert angolul „full-field” (teljes tér) módszernek is nevezik. Kísérleteinkben DHSPI-I rendszert a lézeres tisztításnak tulajdonítható, szabad szemmel láthatatlan, esetleg csak átmenetileg fellépő szerkezeti elváltozásoknak a kimutatására használtuk.

A DHSPI során a vizsgálat alatt álló felszín referencia állapotáról és melegítéssel gerjesztett állapotáról készült szemcseképeket használunk az interferometrikus csíkrendszer létrehozásához. A tárgyat egy 532 nm hullámhosszúságú, kiterjesztett lézer nyaláb világítja meg. Az alkalmazott beállítás a felszín síkból való merőleges kimozdulását méri. A mérés felbontása a használt lézer hullámhossz felének nagyságrendjébe esik ($\lambda_{\text{laser}}=532$ nm), így a felszín változásainak nagyon precíz nyomon követésére van lehetőség.

A csíkrendszerben megjelenő deformációk egyaránt hordoznak kvalitatív információt a belső szerkezet válaszreakcióiról, megmutatva a minta belsejében megbújó elváltozásokat, és kvantitatív információkat arról, ahogyan a deformáció és a belső elváltozások befolyásolják a felszínt.

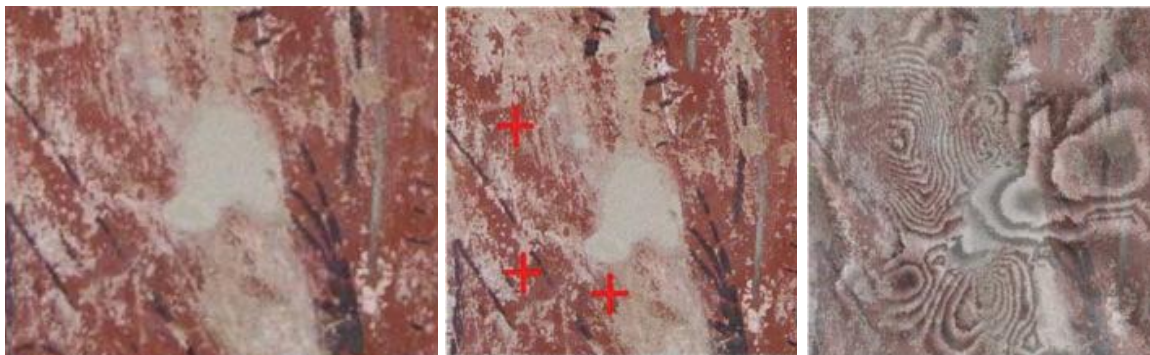
2.2. A DHSPI felhasználása a restaurálás területén

Holografikus interferometriát 1972-ben, Velencében alkalmaztak először műtárgyak felszín alatti sérüléseinek detektálására, amikor Donatello: Keresztelő Szent János faszobrát és Nino Pisano: Madonna gyermekével carrarai márványszobrát vizsgálták [1]. A kísérlet során a márványszobor esetében nem, ellenben a Keresztelő Szent János szoborhoz sikerült látható interferencia csíkokat létrehozni. A faszobrot kétféle módon is vizsgálták: a szobrot először lámpával enyhén melegítették az interferogramok létrehozásához. Később a szobrot egy átlátszó dobozba helyezték, amelyben deszikkátor/vízmegekötő anyag segítségével enyhén csökkentették a relatív páratartalmat (60%-ról 58%-ra) és megfigyelték, hogy hogyan hat rá ez a környezeti változás. Ezen holografikus interferometria kísérlet során ismerték fel, hogy a lézer a műtárgyak tisztítására is alkalmazható [61].

A firenzei keresztelőkápolna Paradicsom kapujának 1982-es restaurálása során a József élete című domborművön végeztek holografikus interferometria vizsgálatot [62]. Ezzel a módszerrel Ghiberti alkotásán nemcsak a lokális elváltozásokat figyelték meg, de az egész tábla enyhe melegítésre ($\sim 1^\circ\text{C}$) adott válaszát is. Ez azért is volt akkor

fontos, mert a táblákat eredeti helyükön a nap egyes szakaszában erős napsugárzás érte és így képet kaphattak arról, hogy hó hatására hogyan változik a dombormű. (Az eredeti domborműveket aztán a '90-es évek elején múzeumba helyezték, helyükre másolatok kerültek.) Később az aquilai és firenzei egyetemek kutatócsoportjai számoltak be egy festményeken és szobrokon végzett szisztematikus diagnosztikai kísérletsorozatról, ahol a holografikus interferometriát alkalmazták, mint egy olyan új, roncsolásmentes eljárást, ami a röntgen vizsgálatok potenciális alternatívája lehet [2]. A technika fejlődésével a '90-es években már egyre szélesebb körben kezdték alkalmazni a lézereket a restaurálás során, így egyre több példát találhatunk a holografikus interferometria alkalmazására is [63, 64].

A restaurátori körülményekhez optimalizált, hordozható eszközök lehetővé teszik, hogy mozgítás nélkül, a helyszínen vizsgáljuk a műtárgyakat [65, 66]. Az utóbbi időben Tornari és szerzőtársai számoltak be a franciaországi UNESCO világörökségi helyszínen, a St. Savin székesegyházban végzett méréseikről, ahol 11-12. századi freskók állapotát vizsgálták. [67]



11. kép: A vizsgált terület [67]

12. kép: Az elváltozás helyei [67]

13. kép: A vizsgált terület holografikus interferometria képe [67]

A felmérés során kapott eredményeiket összehasonlították a restaurátorok által korábban, a felület kopogtatásával készített feltérképezésével valamint infravörös termográfiai mérésekkel. Arra jutottak, hogy az elváltozásokat mindhárom módszer nagyjából azonos helyen azonosították, viszont az infravörös termográfia és a holografikus interferometria pontosabb adatokat szolgál az elváltozásról. A két módszer a gyakorlatban jól kiegészítheti egymást, az infravörös termográfiaival meghatározhatjuk a veszélyeztetett területeket, míg a DHSPI módszerrel sokkal pontosabb adatokat kaphatunk az elváltozás kiterjedéséről, struktúrájáról.

Ahogy azt a fenti példákön láthatjuk, a holografikus interferometria sokféle vizsgálati követelménynek tesz eleget a műtárgyak diagnosztikája és a preventív konzerválás során. Alkalmas a hibák kimutatására és azonosítására, meghatározható vele az elváltozások helyzete, mérete, szerkezeti morfológiája. Láthatóvá válnak a műtárgy szerkezetében lévő olyan elváltozások, amelyeket szabad szemmel esetleg nem veszünk észre. Ilyenek lehetnek a belső leválások, repedések, inhomogenitások, az anyagban ébredő mechanikai feszültségek stb. A DHSPI módszer nagy előnye, hogy a szerkezeti elváltozások kimutatásához nincs szükség mintavételre, vagy más módon a vizsgálandó tárgy vagy a tárgy felületének speciális előkészítésére. A tárgy felületére kis intenzitású, széttartó lézernyaláb esik, a gerjesztéshez, azaz a 3-4°C-os melegítéshez, csak kis mennyiségű termális többletenergia szükséges. Nem invazív technika, amelyet akár egymás után többször is alkalmazhatunk a roncsolás veszélye nélkül. [2]

Általánosan megállapíthatjuk, hogy a forma, a textúra és a műtárgy mérete nem jelent akadályt a DHSPI alkalmazása során. A komplex tárgyak vizsgálatakor számos előnye lehet e technikának, különösen, ha a vizsgálandó tárgy formája bonyolult vagy a felülete durva.

A holografikus interferometria egyaránt alkalmas a hosszú távú elváltozások, öregedési folyamatok, környezeti hatások nyomon követésére [60] valamint a hirtelen változások, szállítás, kezelés közbeni balesetek következményeinek felmérésére is. [68]

Ellenőrizhetjük vele a restaurálás sikerességét is, mint ahogy történt El Greco: Mária gyermekével (National Gallery Athén) (14. kép) című képének restaurálása során, ahol DHSPI méréseket is végeztek. Az állapotfelmérés során kiderült, hogy a festékréteg több helyen elvált a hordozóról (15. kép), viszont a szilárdítást követően készült interferogramon már jól látszik a beavatkozás pozitív hatása. [2, 69] Mivel lehetővé teszi a valós idejű megfigyelést, így a módszer segítségével nemcsak a restaurálás megkezdése előtt és után mérhetjük fel a műtárgyat, hanem alkalmas arra is, hogy a restaurátori eljárások alatt folyamatosan kövessük a tárgy állapotát. [70]



14. kép: El Greco: Mária gyermekével (National Gallery, Athén)



15. kép: El Greco: Mária gyermekével című kép közepső részének holografikus interferomtria képe

Számos előnye mellett viszont ügyelnünk kell arra, hogy az interferometrikus módszerek rezgésmentes környezetben alkalmazhatók, máskülönben a felvételek zajosak lehetnek, amely jelenség nagymértékben megnehezíti vagy gátolja a kiértékelésüket. Továbbá azt is figyelembe kell vennünk, hogy a lézer teljesítménye és a nyaláb divergenciája meghatározza a mérőeszköz műtárgytól való távolságát. Ez a távolság a DHSPI-I rendszer esetében maximum ≈ 1.50 m.

3. Római kori freskótöredékek lézeres tisztítása

3.1. A lézeres tisztítópróbák célja

A szakdolgozatomban szereplő tisztítópróbákat KrF (248 nm) lézerrel végeztem római kori freskótöredékeken. A felületükön lévő szennyeződés hagyományos restaurátori módszerekkel történő eltávolítása sokszor okoz nehézséget, ezért merült fel a lézeres tisztítás lehetősége. Az akkori tapasztalataimat felhasználva terveztem meg az újabb kísérleteket.

A kísérletek célja különböző típusú lézerek alkalmazása eltérő beállításokkal az optimális tisztítási paraméterek megtalálásához. Megfigyelem a különböző hullámhosszon működő lézerek hatását az egyes freskótöredékekre. Továbbá céлом annak a vizsgálata, hogy hogyan befolyásolja a tisztítást az impulzus hossza, ezért ugyanazon hullámhosszú, de különböző impulzushosszú lézereket is alkalmazok.

Már a szakdolgozatomban felállítottam egy a pigmentekre vonatkozó érzékenységi sorrendet. Megfigyelem, hogy a most vizsgált pigmentek is beillenek-e ebbe a sorrendbe illetve összhangban állnak-e a szakirodalmi adatokkal.

A szennyeződés és a festékréteg összetétele lelőhelyenként változhat ezért a felhasznált freskótöredékek lelőhelyének körét kibővíttem. Így megfigyelhetem, hogy mennyire számít a freskótöredék származási helye a lézeres tisztítás szempontjából.

Ahogy azt már korábban említettem, gyakran előfordul, hogy a gyenge megtartású tárgyat tisztítás előtt szilárdítani kell, ezért vizsgálom a különböző szilárdító szerek lézeres tisztításra gyakorolt hatását is.

3.2. A kísérletben használt freskótöredékek bemutatása

A kísérletek során felhasznált freskótöredékek az egykori Pannónia különböző területeiről kerültek elő (Szabadbattyán, Brigetio, Ács-Vaspuszta, Balácapuszta, Sopiane) és kr.u. 1-4. századra datálhatóak. A festékrétegben a következő pigmentek találhatóak a polarizációs mikroszkópos, SEM és XRD vizsgálatok alapján: vörös és sárgaokker, zöldföld, egyiptomi kék, venyige fekete, mészfehér, cinóber.

A töredékeket változó vastagságú szennyeződés fedi, amelyeket három kategóriába soroltam: vastag: ~0,5 - ~1mm; vékony: ~20µm - ~500µm; filmszerű: <

20 μ m. A szennyeződések XRD vizsgálata különböző arányban a következő ásványokat mutatta ki: kalcit $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ (~30%), kvarc SiO_2 , (~50%) dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (~10%), muszkovit $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ (~2%) és chamosite, $\text{Fe}_{1.8}\text{Mg}_{0.2}\text{Al}_{0.8}(\text{Si}_{1.3}\text{Al}_{0.7})\text{O}_5(\text{OH})_4$, (~5%), amely arányok a lelőhelyeknek megfelelően változhatnak.

Azokat a freskótöredékeket, amelyek nagyon gyenge megtartásúak voltak (C, R, S), Remmers KSE 300, MfCO illetve Syton X 30 szilárdító szerekkel szilárdítottam.

A mintadarabok adatait a 2. táblázatban foglalom össze.

3.3. Kísérleti eszközök, módszerek




A kísérleteim során a következő lézereket alkalmaztam: egy Lambda Physik L.P.X. 210 KrF excimer laser ($\lambda = 248$ nm, 30 ns), egy BMI 5022 DNS10 Q-kapcsolt Nd:YAG laser ($\lambda = 1064$ nm és 532 nm, mindkettő 8 ns), egy ElEn EOS1000 Nd:YAG laser ($\lambda = 1064$ nm, 0,5 ms), és egy EKSPLA SL312 QS Nd:YAG laser ($\lambda = 1064$ nm, 150 ps). A kísérletekben beállított felületi energiasűrűséget az aktuális eset tárgyalásakor adom meg.



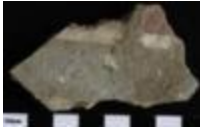
A lézer fejet minden esetben rögzítettem és a nyalábot egy sztereomikroszkóp alá vezettem, így a mintát folyamatosan megfigyelhettem a lézeres tisztítópróbák közben. A freskótöredékeket egy x-y eltoló segítségével mozgattam, hogy egy adott helyre csak a kellő számú impulzus jusson. A frekvenciát alacsonyan tartottam (1-3 Hz), így könnyebben lehetett szemmel követni a történéseket. Nedvesítéshez desztillált vizet használtam.





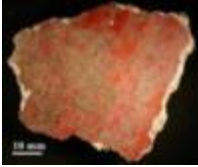
3.4. A lézeres tisztítás eredménye




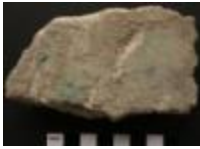
Az alábbi táblázatban foglaltam össze az egyes mintákra vonatkozó adatokat, tisztítási eredményeket. Minden a sztereo mikroszkópon keresztül látott elváltozást leírtam, még akkor is, ha nem az egész felületet, csak kisebb területeket, pontokat érintett.

2. táblázat: A minták adatai és a lézeres tisztítás eredményei;
vastag: ~0,5 - ~1mm; vékony: ~20µm - ~500µm; filmszerű: < ~20µm.

Mintakód/ származás	Pigment / Szilárdító- szer	Szennye- ződés	Energiásűrűség (J/cm ²)	Tisztítási eredmények
B Szabadbattyán 	vörösokker, mészfehér	vastag, jól kötődő	1. 5,35 @ 1064nm, µs	1. nedves, a vörösokker jól tisztult
			2. 8,92 @ 1064nm, µs	2. nedves, a mészfehér jól tisztult
C Szabadbattyán 	vörösokker <i>Remmers Steinfestiger KSE 300</i>	vastag, kemény, jól kötődő	1. 20,5 @ 248nm	1. nedves, a nagyon kemény szennyeződés számos impulzus után is csak vékonyodott, majd a festékréteget magával rántva pattant le
			2. 17,32 @ 1064nm, µs	2. nedves, nagyon nehéz tisztítani, a festékréteg megsérült
			3. 0,24 @ 1064nm, ns	3. nedves, a festékréteg lejött
			4. 2,48 @ 1064nm, ps	4. nedves, a második impulzus leszedte a festékréteget
E Szabadbattyán 	vörösokker	vastag, jól kötődő	1. 8,72 @ 248nm	1. nedves, megsötétedett és egy kicsit megsárgult
			2. 8,31 @ 1064nm, µs	2. nedves, fekete gömböcskék jelentek meg a felületen és megsárgult
			3. 0,16 @ 1064nm, ns	3. nedves, megsárgult és a festékréteg lejött, de a szennyeződésnek kevés
			4. 0,86 @ 1064nm, ps	4. nedves, enyhe sárgulás és feketedés, a festékréteg lejött
			5. 0,05 @ 532nm	5. nedves, a szennyeződés jól lejött, a festékréteg szép, de több impulzus hatására megsötétedett

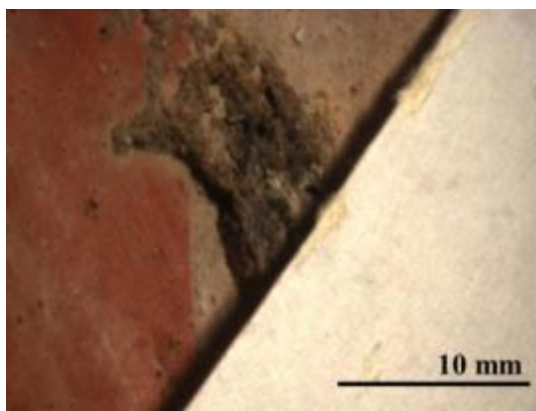
Mintakód/ származás	Pigment / Szilárdító- szer	Szennye- ződés	Energiasűrűség (J/cm ²)	Tisztítási eredmények
F <i>Szabadbattyán</i> 	vörösokker, mészfehér, egyiptomi kék	vékony és vastag, kiterjedt	1. 2,47 @ 248nm	1. nedves, nincs látható változás
			2. 7,13 @ 1064nm, μs	2. nedves, a festékréteg lepattant (az egyiptomi kék és a vörösokker egyaránt)
			3. 0,17 @ 1064nm, ns	3. nedves, vörösokker – sárgulás és a festékréteg lepattant
			4. 3,65 @ 1064nm, ns	4. nedves, egyiptomi kék és mészfehér szépen tisztult
			5. 1,21 @ 1064nm, ps	5. nedves, vékony szennyeződés: jól eltávolítható, vastag szennyeződés: a festékréteg a szennyeződés mellett lepattant
			6. 17,0 @ 532nm	6. nedves, a szennyeződés jól eltávolítható, vörösokker – megsötétedett
G <i>Szabadbattyán</i> 	egyiptomi kék	filmszerű, kiterjedt	1. 0,85 @ 1064nm, ps	1. nedves, a kék szemcsék lepattantak
H <i>Szabadbattyán</i> 	vörösokker, mészfehér, egyiptomi kék	vastag, jól kötődő	1. 3,13 @ 248nm	1. nedves, egyiptomi kék – a szemcsék viszonylag jól tisztultak, mész fehér – jól tisztult, vörösokker – enyhe szürkülés
			2. 0,86 @ 1064nm, ps	2. nedves, egyiptomi kék – a szemcsék viszonylag jól tisztultak, de a fekete aláfestés könnyen lepattant, mészfehér – jól tisztult, vörösokker – megsötétedett több impulzus hatására

Mintakód/ származás	Pigment / Szilárdító- szer	Szennye- ződés	Energiasűrűség (J/cm ²)	Tisztítási eredmények
L <i>Szababattyán</i> 	vörösokker, mészfehér	vastag, jól kötődő	1. 0,3 @ 248nm	1. száraz, vörösokker (tisza) – enyhe színváltozás, a tisztítási küszöbérték nagyon alacsony
			2. 8,7 @ 248nm	2. nedves, vörösokker (szennyezett) – jól tisztult, enyhe színváltozás a tisztított felületen
			3. 7,13 @ 1064nm, μs	3. nedves, mészfehér – jól tisztult, vörösokker – enyhe színváltozás a tisztított felületen
M <i>Szababattyán</i> 	vörösokker, zöldföld, egyiptomi kék	vékony, kiterjedt	1. 7,98 @ 248nm	1. nedves, tisztult, de a festékréteg lepattant több impulzus hatására
			2. 1,21 @ 1064nm, ps	2. nedves, egyiptomi kék – viszonylag jó, zöldföld – a festékréteg lepattant a szennyeződéssel együtt, vörösokker – a festékréteg lepattant
O <i>Brigetio</i> 	zöldföld	vastag, jól kötődő	1. 28,6 @ 248nm	1. száraz, nem történt színváltozás
P <i>Ismeretlen</i> 	sárgaokker	filmszerű, kiterjedt	1. 0,5 @ 248nm	1. nedves, megbarnult
Q <i>Ács-Vaspusza</i> 	cinóber	vastag, kemény, jól kötődő	1. 21,3 @ 248nm	1. nedves, a festékréteg megfeketedett, több impulzus hatására is csak egy pontban szedte le a szennyeződést

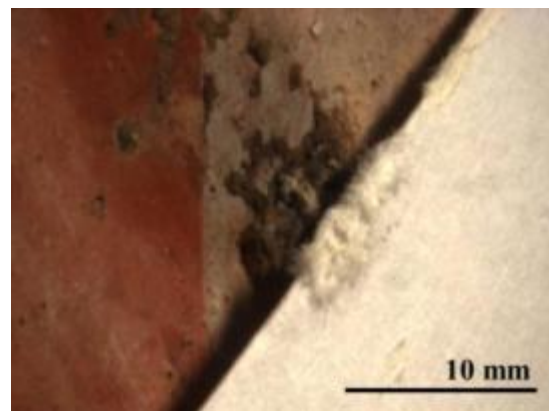
Mintakód/ származás	Pigment / Szilárdító- szer	Szennye- ződés	Energiasűrűség (J/cm ²)	Tisztítási eredmények
R Szabadbattyán 	vörösokker, mészfehér <i>MfCO</i>	vékony, kiterjedt	I. 2,32 @ 248nm	I. nedves, egy kevés szennyeződés maradt a felületen, de nem történt színváltozás sem a vörös okkeren sem a mészfehéren
S Sopiane 	egyiptomi kék <i>Syton X 30</i>	vékony, kiterjedt, jól kötődő	I. 15,0 @ 248nm	I. nedves, nem történt színváltozás
			2. 2,0 @ 248nm	2. nedves, nem történt színváltozás
UA Szabadbattyán 	vörösokker, mészfehér	vékony és vastag, jól kötődő	I. 14,0 @ 248nm	I. nedves, a vörösokker enyhén megsötétedett, de nem sárgult
			2. 0,27 @ 1064nm, ns	2. nedves, vékony szennyeződés – a vörösokker enyhén megsötétedett és megsárgult
			3. 0,314 @ 1064nm, ns	3. nedves, vastag szennyeződés – jól eltávolítható a vörösokkerről
BB2 Balácapusza 	zöldföld	vastag, kemény, jól kötődő	I. 0,062 @ 532nm	I. nedves, a zöldföld megsötétedett

A KrF lézerrel (248 nm) hatékonyan távolítottam el a szennyeződést - a szilárdított C minta kivételével - minden mintáról. Az energiasűrűséget a szennyeződéstől függően választottam meg: ~0,5-3 J/cm² ott, ahol a szennyeződés szürkés film réteget képzett (<20 µm), és ~15-28,6 J/cm² azokban az esetekben ahol a lerakódás nagyon vastag volt (>1 mm). Ez utóbbi érték lényegesen magasabb a tiszta festett felület roncsolási küszöbénél (0,3 J/cm² a vörösokker esetében), ezért ilyen magas energiasűrűség alkalmazása nagy óvatosságot igényel. Ebben az esetben a

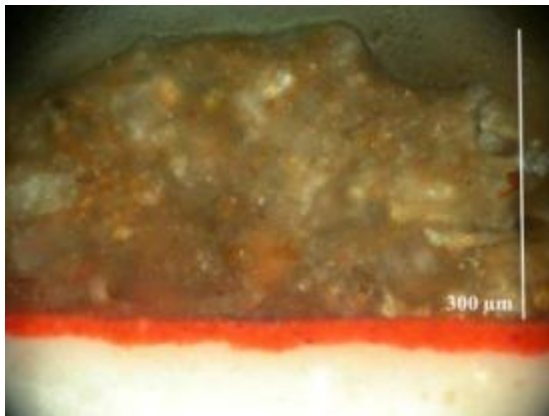
lézernyalábot a felületre fókuszáltam ($d \approx 0,5 \text{ mm}$), és lövésenként, mikroszkópon keresztül figyeltem meg a hatását. Ha úgy láttam, hogy a lövés bármilyen károsodást okozott a felületen, a kezelést azonnal megállítottam. Mikroszkóppal vizuálisan követve a tisztítást, a vastag szennyeződéssel borított mintákon jól látható, ahogy a szennyeződés szemcséi megmozdulnak egy-egy lézerimpulzus nyomán a rezgő felületen. Ebben az esetben joggal következtethetünk arra, hogy a lézer nyaláb okozta fotomechanikai hatások fontos szerepet játszanak a szennyeződés lepattanásában (16-19. kép). A fátyolszerű szennyeződés alacsony energiasűrűséggel való tisztításánál inkább a fototermális és a fotokémiai hatásoknak lehet szerepe.



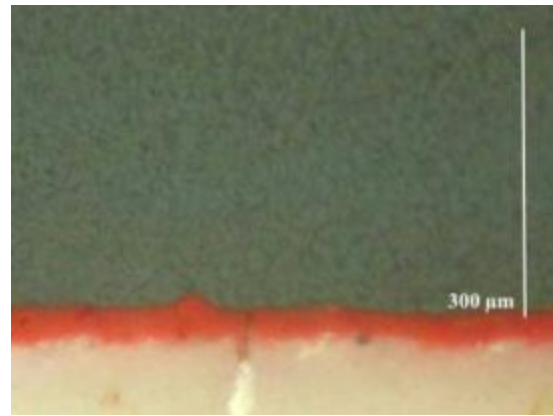
16. kép: L minta tisztítás előtt



17. kép: L minta KrF lézeres tisztítás közben



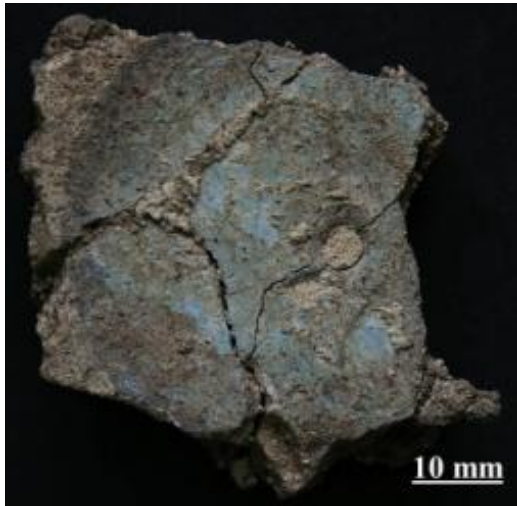
18. kép: L minta keresztmetszet képe tisztítás előtt



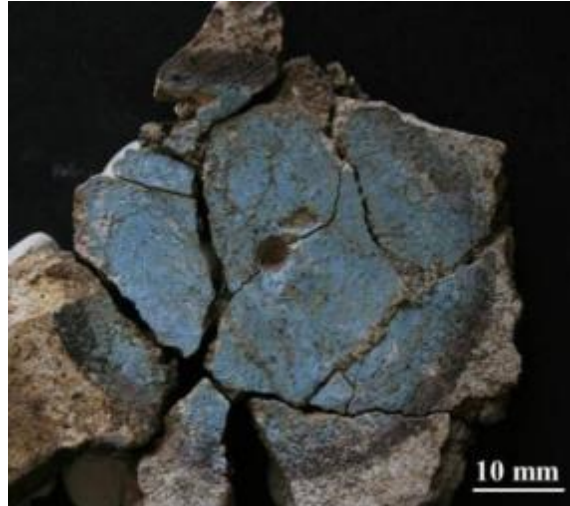
19. kép: L minta keresztmetszet képe KrF lézeres tisztítás után

Kiemelkedően jó tisztítási eredményeket hozott az egyiptomi kék háttéren kör motívumot ábrázoló S minta KrF lézeres tisztítása (20-21. kép). Tisztítás előtt Kremer Syton® X 30 szilárdító szerrel kezeltem a töredéket gyenge megtartása miatt. A lézeres tisztítással úgy távolítottam el a szennyeződést, hogy a felület sajátosságai, mint például az ecsetnyomok megmaradtak (22. kép). Valószínűleg a szilárdító összetartotta a

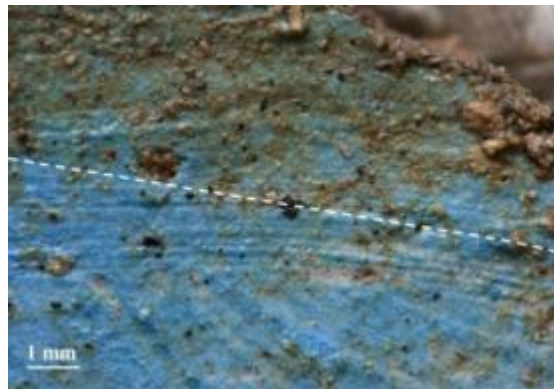
különböző rétegeket (vakolat, festékréteg, szennyeződés) és jelentősen hozzájárult a sikeres tisztításhoz. A 248 nm-es lézer használatával hasonlóan szép eredményt láthatunk más olyan mintákon is, amin egyiptomi kék festés található (H, F). Ezen hullámhossz használatával nem mutatott színváltozást a mészfehér és a zöldföld sem, valamint könnyen tisztíthatóak voltak. A venyige fekete azonban hajlamos lepattanni a felületről.



20. kép: S minta tisztítás előtt



21. kép: S minta KrF lézeres tisztítás után



22. kép: S minta KrF lézeres tisztítás közben, a szaggatott vonal alatti lézerrel tisztított területen jól látszanak az ecsetnyomok

Az okker pigmentek esetében már nem tudtam ilyen szép eredményeket elérni. A sárgaokker (P minta) és négy a hét vörösokker mintából (E, H, L, UA) a 248 nm sugárzásra enyhén megsötétedett, valamint a Szabadbattyánból származó vörösokker csoportja enyhén megsárgult ezen a hullámhosszon történő nedves tisztítás hatására.

A nedvesítés általában javította a KrF tisztítási eredményeket, kivéve mikor a vörösokker megsárgult. A vörösokker nagyon gyakran használt pigment, és mivel a

megfigyelt sárgulást korábban még nem írták le a szakirodalomban, így a Nd:YAG lézerrel végzett kísérletek során különös hangsúlyt fektettem erre a pigmentre.

A Nd:YAG lézer két különböző hullámhosszát is alkalmaztam a tisztítópróbák során. Az 532 nm hullámhosszú Nd:YAG impulzusok hatékonyan távolították el a szennyeződést, de jelentős színváltozást okoztak az alatta lévő festékrétegben, így ezt a hullámhosszt kizártam a további kísérletekből.

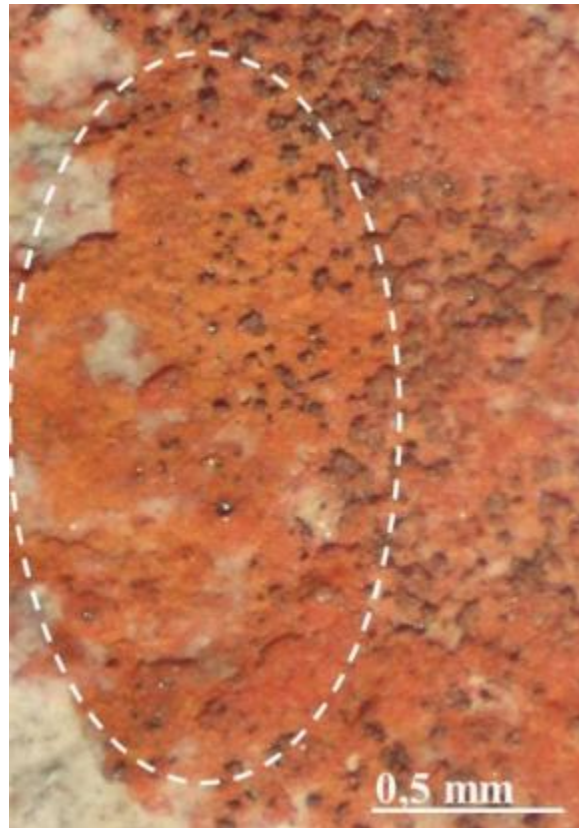
Hatékonyan le lehetett tisztítani a SFR Nd:YAG lézerrel a vörösokker felületet 4-5 impulzussal és $5,35 \text{ J/cm}^2$ energiasűrűséggel, ott ahol a szennyeződés nem volt összefüggő (23-24. kép). A B mintán nem okozott színváltozást, viszont néhány mintán (E, L, F) a szennyeződés olyan kemény és kiterjedt volt, hogy csak magasabb energiasűrűséggel ($7,1- 8,3 \text{ J/cm}^2$) és több impulzussal (2-10) lehetett eltávolítani. Ez viszont a vörösokker sárgulásához és/vagy sötétedéséhez vezetett az E mintán (25. kép) és néhány pontban az L mintán, valamint leszedte a festékréteget az F mintán. Szabad szemmel az E minta tisztítási eredménye szépnek tűnik, de mikroszkópon keresztül láthatjuk, hogy a festékréteg árnyalata sárgásabbá vált.



23. kép: B minta tisztítás előtt



24. kép: B minta SFR Nd:YAG lézeres tisztítás után



25. kép: E minta a SFR Nd:YAG (1064 nm 8,3 J/cm²) lézeres tisztítás után. A szaggatott vonallal jelölt terület a kezelés hatására megsárgult

A néhány ns impulzushosszú, 1064 nm-es hullámhosszú, Q-kapcsolt Nd:YAG lézer is hatékonyan távolította el a szennyeződést, de a vörösokker megsötétedett és/vagy megsárgult a C, E, F, UA mintákon. Az elszíneződés 0,15 J/cm² energiasűrűségnél következett be, ami csak a fele a vörösokker lepattanásához tartozó, 248 nm-en mért küszöbértéknek.

A 150 ps-os, Q-kapcsolt Nd:YAG lézer könnyen eltávolította a szennyeződést már alacsony energiasűrűségnél is (0,85-1,2 J/cm², a szilárdított C mintánál 2,5 J/cm²), de megrongálta a festékréteget, ami elszíneződött és lepattant. Ehhez a lézerhez nem találtam olyan biztonságos beállítást, ami kellő mértékben eltávolította volna a szennyeződést úgy, hogy a festékréteg ne sérüljön. A vörösokker korábban már említett sárgulása itt is jelentkezett az E és F mintán a nedves tisztítás során.

A szakirodalmi adatokból az derül ki, hogy a vörösokker sötétedése során hő hatására valószínűleg a hematitból magnetit lesz (Fe₃O₄) [71], ellenben a sárgulás okainak feltárása további vizsgálatokat igényel.

A G és H mintákon az egyiptomi kék festékrétegből már csak szórványosan maradtak meg a pigment szemcsék, amelyek - a hullámhossztól függetlenül –

mindegyik fajta alkalmazott lézer hatására lepattantak a felületről, bár színváltozást nem tapasztaltam. Hasonlóan a venyige feketének sem változott a színe, de bármelyik hullámhosszon könnyen megsérül előzetes szilárdítás nélkül.

A 248nm és a 1064nm hullámhosszra egyaránt igaz, hogy az érzékenységi sorrend a legérzékenyebb cinóberrel kezdődik, majd ezt követi a venyige fekete, vörösokker, sárgaokker, zölföld, egyiptomi kék és a legkevésbé érzékeny mészfehér. Ez megfelel a szakirodalmi adatoknak is, leszámítva, hogy a vörösokker sárgulásáról korábban nem számoltak be.

4. A lézeres tisztítás fotomechanikai hatásának vizsgálata a DHSPI technikával

4.1. A DHSPI mérések célja

Azt már a szakdolgozatomhoz végzett lézeres tisztítópróbákat követően is megállapítottam, hogy a lézeres tisztítás - bizonyos esetekben - jó alternatívája lehet a tradicionális eljárásoknak. Ezen kísérletek során olykor magas energiasűrűséget alkalmaztam ($>20 \text{ J/cm}^2$), így mindenképpen indokoltá vált, hogy a szennyeződés eltávolításához szükséges lézer paraméterek meghatározása mellett vizsgáljam a lézeres tisztítás hatására bekövetkező lehetséges szerkezeti elváltozásokat is.

Jelen kutatásban a digitális holografikus szemcsekép interferometria (DHSPI) használhatóságát tanulmányoztam a freskótöredékek lézeres tisztításának következményeként fellépő esetleges mechanikai változások megfigyelésére. Ezzel egy időben vizsgáltam a szilárdítók szerepét is a freskótöredékekben a lézer hatására bekövetkező szerkezeti elváltozásokban.

4.2. A freskóminták bemutatása, készítése technikája és tulajdonságai

A DHSPI mérések és a lézeres tisztítópróbák ugyanazon minták felhasználásával, párhuzamosan zajlottak, így egyrészt a 3.2 fejezetben bemutatott eredeti római kori freskótöredékeket használtam itt is; másrészt tradicionális freskó technikával új, modell mintákat készítettem, amelyek felszínére ismert összetételű, mesterséges szennyeződés került.

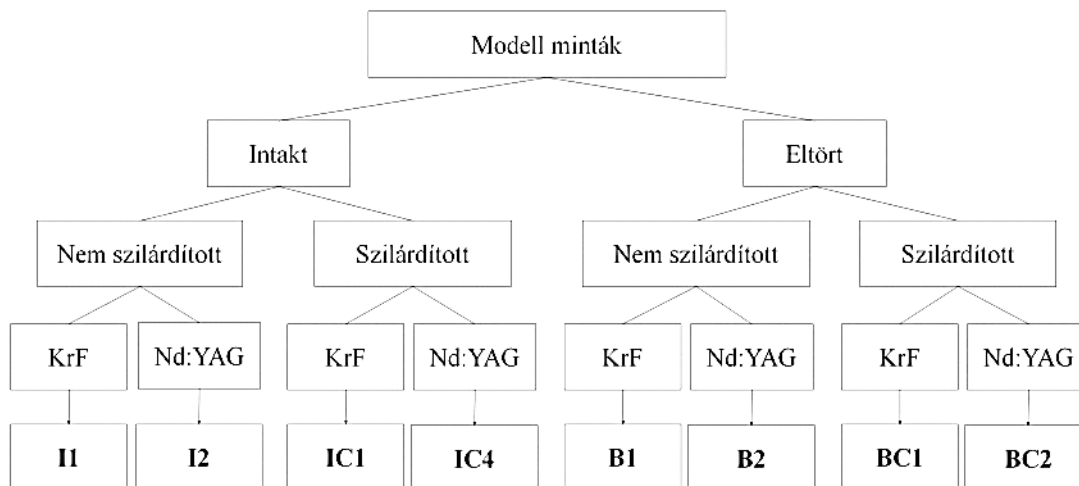
Ezek az új minták három rétegből épülnek fel: a freskóminta teste (vakolat), festékréteg és szennyeződés, mérete $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$. A freskóhoz használt vakolat három rész homokból, egy rész mészből állt, amihez annyi vizet adtam, ami az összeállításához szükséges volt. A freskó festékrétegét a nedves felületre felhordott vörösocker pigment (Kremer 40090) adja. Egy hónap száradás után a freskó felületére egy $1,5 \text{ mm}$ vastag, mesterséges szennyeződés került, amely homokból (főként SiO_2 , 48,7%), gipszből (CaSO_4 , 48,7%), vörösocker (Kremer 40090, 1,4%) és szénfekete (C,

1,2%) pigmentből, valamint vízből állt. Így egységes, ismert összetételű mintákat kaptam, amelyek segítségével összehasonlíthatóvá vált a különböző lézerparaméterek hatása a freskótöredékre.

A huszonnégy, eredetileg azonos mintát négy csoportra osztottam (7. ábra). Hat mintát semmilyen módon nem változtattam, ezek alkotják az első csoportot (kód: I1, I2, mindegyik csoporthoz 3 mintadarab tartozik), amelyek ezentúl „*intakt*” mintákként szerepelnek. Hat mintát kovasav-észter alapú szilárdítóval itattam át (Remmers KSE 300), ezekből áll a második csoport (kód: IC1, IC4), amely az „*intakt & szilárdított*” megnevezést kapta. A szilárdítás során a mintákat teljesen elmerítettem a szilárdítóban, ahogy az a restaurátori gyakorlatban általános eljárás a kisméretű tárgyak szilárdítására. [72, 73] A minták a kísérletek megkezdése előtt 2 hónapig száradtak.

Hat mintát kettő vagy több darabra törtem, majd gipsszel újra összeragasztottam, mielőtt a mesterséges szennyeződés a felületükre került. Ezekből a mintákból (kód: B1, B2) áll a harmadik, „*eltört*” nevű csoport. A maradék hat mintát eltörtem és újra összeragasztottam ugyanolyan módon, mint az előző csoportnál, majd a mesterséges szennyeződés felhordása után szilárdításra került sor a korábban már említett módon. Ezek a minták (kód: BC1, BC2) alkotják a negyedik, „*eltört & szilárdított*” csoportot.

Minden hat mintát magába foglaló csoportot két alcsoportra osztottam. Az egyik alcsoportot KrF, a másikat Nd:YAG lézerrel kezeltem. Az eljárás nyolc mintacsoportot eredményezett, ahogy azt a 7. ábra mutatja, a csoportoknak megfelelő kódokkal együtt. Minden csoportban három mintadarab kezelésére került sor, kivéve az IC1 és BC2 csoportokat, ahol csak két minta esetében volt értékelhető az eredmény.

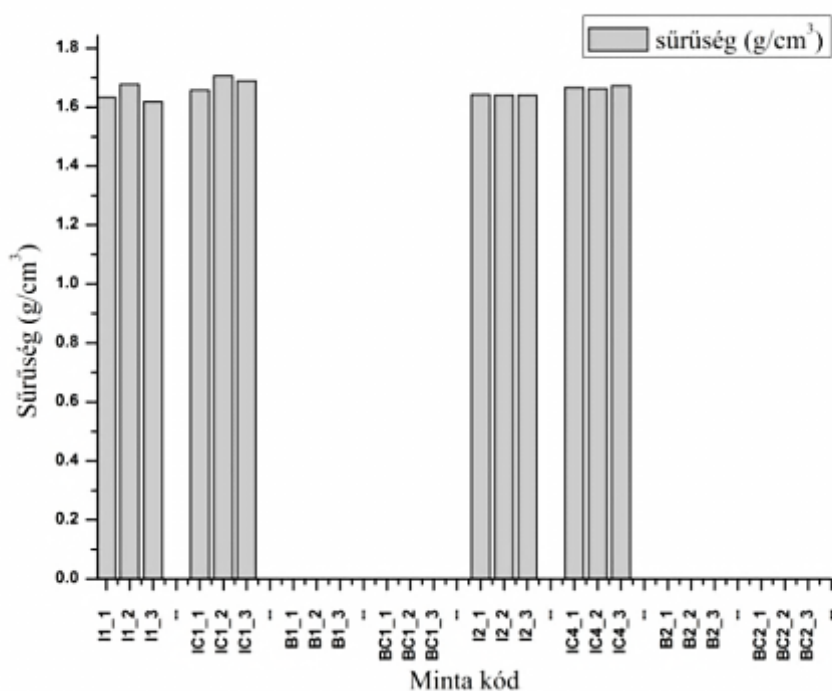


7. ábra: Az új, modell freskómintadarabok alcsoportjainak kialakítása és a vizsgált mintacsoportok kódjai

A freskóminták mechanikai tulajdonságainak vizsgálata sűrűség és ultrahang terjedési sebesség mérésekkel történt, a keménységüket pedig Duroszkóp segítségével határoztam meg.

A kísérletben felhasznált freskó vakolat anyagának sűrűség mérése az EN 1936 szabvány szerint történt, a geometriai méreteinek és súlyának megmérésével. A sűrűség vizsgálatban nem szerepelnek az eltört majd gipszsel újra összeragasztott minták, mert az eltérő gipsztartalom eltorzította volna az eredményeket. Mivel az eltört és újra összeragasztott minták eredetileg a többi mintával együtt készültek, és véletlenszerűen választottam ki őket a minták közül, így a sűrűségük (a gipsztartalomtól eltekintve) feltételezhetően megegyezik a mért minták sűrűségével.

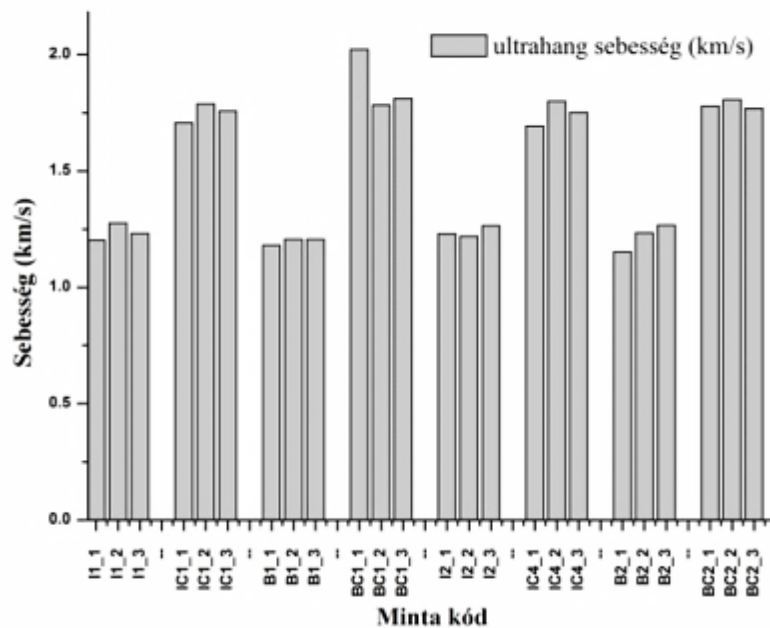
A 8. ábra szerint megállapítható, hogy az új modell minták sűrűsége meglehetősen egyforma, az átlag $1,65 \text{ g/cm}^3$ $0,03 \text{ g/cm}^3$ szórás mellett. Az is megfigyelhető, hogy a szilárdító lényegesen nem változtatja a sűrűséget. Az új, modell minták sűrűsége jó egyezést mutat az eredeti, ásatásból kikerülő román kori freskótöredékekével, amely a mérések alapján $1,69$ és $2,41 \text{ g/cm}^3$ között változik. A sűrűségmérések alátámasztották a minták egységességét, igazolva a készítéstechnika alkalmasságát is.



8. ábra: A freskó minták sűrűsége

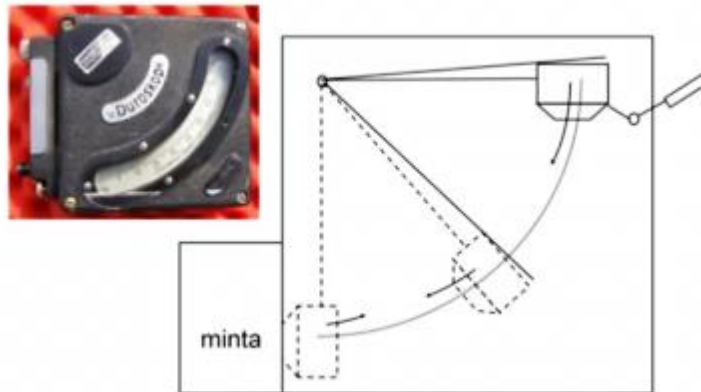
Az ultrahang terjedési sebesség mérése egy a roncsolásmentes vizsgálatok közül, amelyet széles körben használnak a kövek mechanikai tulajdonságainak meghatározására [73], és arra is találunk irodalmi példát [74], hogy ezt használták a szilárdítás hatékonyságának vizsgálatára is. Az ultrahang terjedési sebesség mérések átmenő üzemmódban, a minta 10 cm x 10 cm-es felületére merőleges irányban, a “Determination of sound speed propagation” EN 14579 szabványt követve zajlottak, egy Pundit típusú ultrahang terjedési sebesség mérővel.

Ahogy azt a 9. ábra is jól mutatja, az ultrahang terjedési sebesség átlaga határozottan magasabb a szilárdított minták esetében ($1,79 \pm 0,08$ km/s), mint a nem szilárdított mintáknál ($1,22 \pm 0,04$ km/s). Ez, azzal a ténnyel együtt, hogy a minták sűrűségét nem változtatta jelentősen a szilárdító, alátámasztja, hogy a Remmers KSE 300 szilárdító a kötéseket erősíti, azaz az anyag Young-modulusát változtatja, nemcsak a kövek, de a vakolatok esetében is.



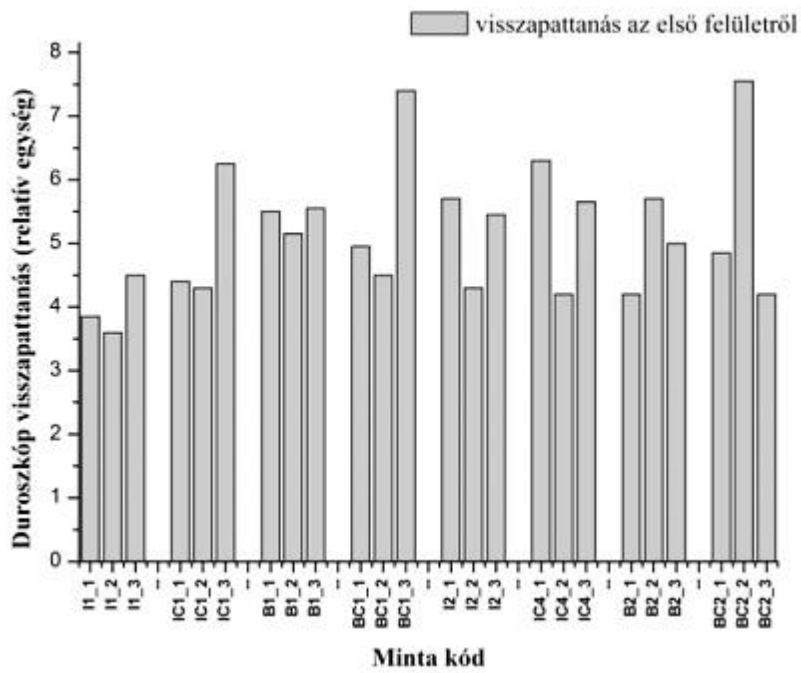
9. ábra: A freskó minták ultrahang terjedési sebesség mérése

A keménységet nem sorolhatjuk az alapvető anyagtulajdonságok közé, mégis a különböző típusú keménységmérések eredményeként kapott viszonyszámok alapján képet alkothatunk a különböző anyagok relatív deformálhatóságáról. Vizsgálataim során az úgynevezett Duroszkóp visszapattnási értékeket használtam, amely eszköz és a működését bemutató sematikus rajz a 10. ábrán látható. Ez a mérési módszer egy, a felületet ismert erővel megütő kis kalapács visszapattnásának meghatározásán alapszik. Ezt a típusú dinamikus felületi keménységmérő eszközt kezdetben fémek keménységének mérésére fejlesztették ki, de később köveken is alkalmazták. [75] A mértékegység nélküli Duroszkóp visszapattnási értékeket a szennyeződés felőli, elülső oldalon és a hátoldalon egyaránt megmértem.

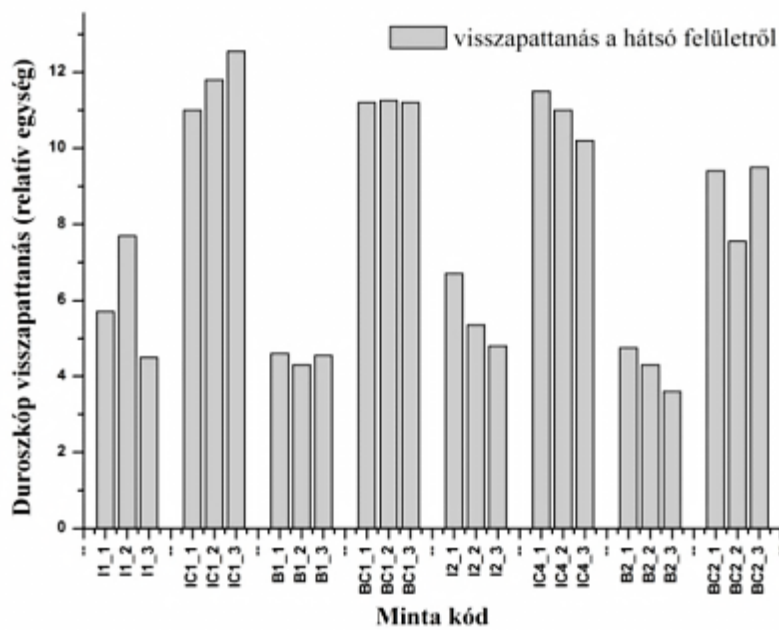


10. **ábra:** A Duroszkóp működési elve

Az elülső oldalon mért visszapattanási értékekhez viszonylag magas (18%) relatív szórás tartozik 5,27 átlagérték mellett, és a szilárdító jelenléte vagy hiánya nem függ össze a mért keménységgel (11. ábra). *A minta hátoldalán* mért Duroszkóp visszapattanási értékek jelentősen, majdnem kétszer magasabbak a szilárdított darabok esetében a nem szilárdítottakéhoz képest (12. ábra). A visszapattanási értékek átlaga a nem szilárdított minták hátoldalán némileg alacsonyabb, mint a nem szilárdított minták elülső oldalán mért értékek. Megállapíthatjuk tehát, hogy a mesterséges szennyeződés felületi keménysége kissé magasabb, mint a freskóé, valamint azt is, hogy az alkalmazott szilárdító növeli a modell freskók felületi keménységét, de nem reagál olyan módon a mesterséges szennyeződéssel, ahogyan a freskó vakolat anyagával. Ez a tény előnyös lehet a lézeres tisztítás szempontjából.



11. ábra: Duroszkóp visszapattanási értékek a minta elülső (szennyezett) oldalán mérve



12. ábra: Duroszkóp visszapattanási értékek a minta hátsó oldalán mérve

4.3. A DHSPI mérések során alkalmazott eszközök, módszerek

Az eredeti freskótöredékek tisztítópróbáihoz a 3.3 fejezetben bemutatott lézereket és módszert alkalmaztam.

A modell freskótöredékek lézeres tisztítása KrF (LAMBDA PHYSIK, L.P.X. 200, $\lambda=248$ nm, $t_p=30$ ns) és Nd:YAG (módosított SPECTRON SL805, $\lambda=1064$ nm, $t_p=5$ ns) lézerekkel történt, meglehetősen magas energiasűrűséget alkalmazva (16-18 J/cm²). Tisztítás közben a lézernyalábot egy automatikus pásztázó rendszer juttatta a mintára. Ezeknek a kezeléseknél nem a tökéletes tisztítási eredmény elérése volt a célja, ezért mikor a lézernyalábok a pásztázott felszín egyes pontjain a festett freskó réteget elérték (vagy néha károsították) a tisztítást megállítottam.

A lézeres tisztítás paramétereit a 3. táblázat tartalmazza. Fontos megjegyezni, hogy ezek a lézeres tisztítások száraz körülmények között zajlottak, mivel a nedves lézeres tisztítási próbák során a holografikus képeken megnövekedett a zaj.

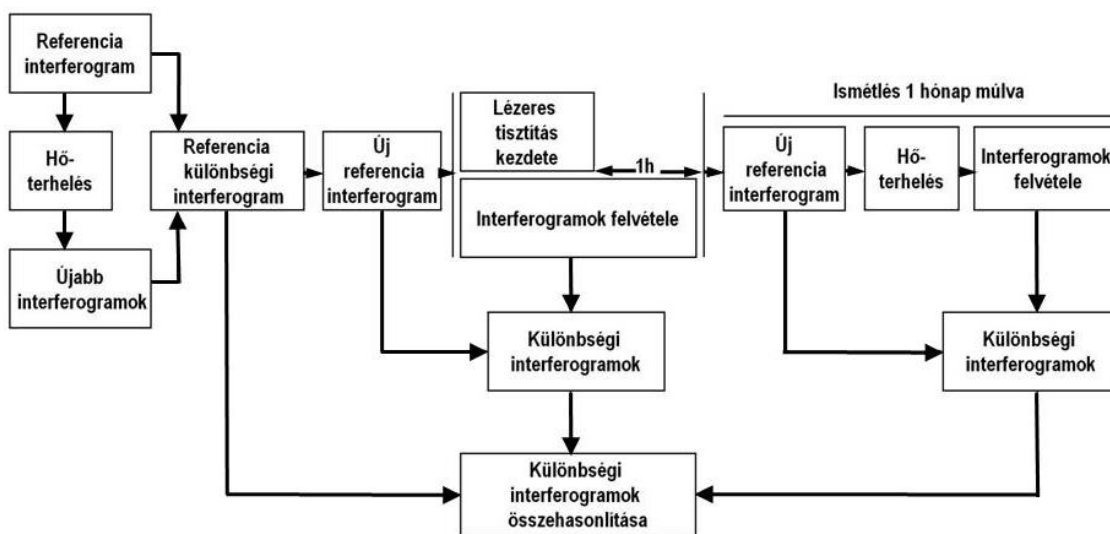
Lézer/ hullámhossz	Lézer foltméret	Energiasűrűség	Impulzus/folt	Tisztított terület
KrF 248nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	I1: 30-46, B1: 35-52, IC1: 20, BC1: 23-55	2 cm x 2 cm terület a minta közepén
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17 – 18 J/cm ²	I2: 30-41, B2: 40-60, IC4: 25-30, BC2: 49-66	

3. táblázat: A lézeres tisztítás paramétereit

Az eredeti freskótöredékek lézeres tisztítópróbái előtt a mintadarabokat a DHSPI technikával vizsgáltam meg, információt nyerve minden egyes mintadarab tisztítás előtti, kiinduló szerkezeti állapotáról. Minden egyes lézeres beavatkozás után a mintákat újra megvizsgáltam, úgy, hogy a DHSPI kísérleti beállítások nem változtak, így a tisztítások előtt és után létrehozott interferogramok összehasonlíthatóak. A hosszú távú hatások vizsgálatához egy hónap elteltével a DHSPI méréseket megismétltem.

A mintatartó és a befogatás módszere hiba forrása lehet minden interferometrius mérés esetében. Az általában szabálytalan alakú eredeti freskótöredékeket stabilan és megismételhető módon kell rögzíteni azért, hogy a mintát precízen vissza tudjuk illeszteni a DHSPI beállításba, azért, hogy a különböző lézeres tisztítások előtti és utáni mérések összehasonlíthatóak legyenek. Erre lehet megoldás, ha a tisztítópróbákat és a DHSPI méréseket ugyanazzal a beállítással végezzük.

Az új mintadarabok esetében (I1-BC2) a DHSPI méréseket nem csak a lézeres tisztítás előtt és után végeztem, hanem a tisztítás alatt és az azt követő egy órás relaxáció során is folytattam. A teljes eljárás lépéseit a 13. ábra foglalja össze.



13. ábra: A kísérlet lépéseinek vázlata

Először, a minta gerjesztése előtt, öt holografikus szemcseképet vett fel a kamera, amelyek a digitális *referencia interferogram* létrehozására szolgáltak. Ezt követően a vizsgált tárgyat a felületére egyenletesen irányított, rövid idejű és nagyon alacsony hőterheléssel gerjesztettem, melynek következtében a hőmérséklete $\sim 3^{\circ}\text{C}$ fokkal nőtt, valamint a hőtágulástól az alakja kissé megváltozott. A tárgy gerjesztés utáni relaxációja alatt interferogramok sorozatát rögzítettem. Azt, hogy minden minta gerjesztése azonos legyen, úgy biztosítottam, hogy a megvilágító lámpa és a minta relatív helyzete és a megvilágítás időtartama állandó volt a kísérletek során.

Ezt követően a relaxálás alatt kapott interferogramokat egy képkezelő számítógépes program kivonta a referencia interferogramból, így keletkeztek a *különbségi interferogramok*. Mivel ezek a különbségi interferogramok a minta állapotát

a lézeres tisztítás előtt mutatják, így *referencia különbségi interferogramokként* használhatjuk őket a lézeres tisztítás szerkezeti hatásainak kiértékelése során.

A referencia interferogramok felvétele után kezdődött a lézeres tisztítás, miközben a minta és a DHSPI-I rendszer helyzete állandó maradt. Az interferogramok folyamatos rögzítése a lézeres tisztítás alatt és annak befejezése után még egy óráig folytatódott, extra hőterhelés nélkül. Ebben a lépésben a tisztító lézer biztosította a gerjesztési energiát.


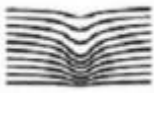
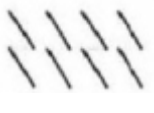


Amikor a lézeres tisztítást követő egy óra letelt, egy új referencia interferogram felvételére került sor, majd további interferogramok felvétele következett különböző mennyiségű extra hőterhelés alkalmazásával.

A lézeres tisztítás alatt és után felvett interferogramokból különbségi interferogramokat hoztam létre a fent leírt módszerekkel, és ezeket a referencia különbségi interferogrammal összehasonlítva láthatjuk a lézeres tisztítás hatását az adott mintára.

A lézeres tisztítást követően a minták egy hónapot relaxáltak, majd megismételtem a DHSPI méréseket.

A mérések eredményeként minden egyes mintához létrejött egy referencia különbségi interferogram, valamint nagyszámú különbségi interferogram, amelyek a minta lézeres tisztítása alatt és után keletkeztek. A lézeres tisztítás által esetlegesen okozott hatások kiértékeléséhez először a referencia különbségi interferogramok és a beavatkozás utáni különbségi interferogramok csíkrendszerének alakját hasonlítottam össze vizuális megfigyeléssel. A vizuálisan megfigyelhető elváltozások és azok lehetséges okainak értelmezésére a 4. táblázatban [76] lévő társítások voltak iránymutatóak.

A freskó modellekkel végzett kísérletek során a négyzetes alakú, új mintákat az éleiknél rögzítettem, ebből következőleg a minta közepe az, ahol a legnagyobb elmozdulás megy végbe a gerjesztés hatására. Általában a létrehozott különbségi interferogramokon koncentrikus körök jelentek meg. Ennek a csíkrendszernek a közepe közel esik a minta geometrikus középpontjához, és a tisztított terület is a középponthoz közel helyezkedett el. Természetesen a tökéletes kör szimmetriához képest vannak eltérések a csíkrendszerben, épp ezek az eltérések hordoznak információt a minta mechanikai állapotáról. Az alkalmazott képoptimalizáló szűrők ellenére a különbségi interferogramok néhol zajosak, de nem akkora mértékben, hogy az a kiértékelést megakadályozta volna.

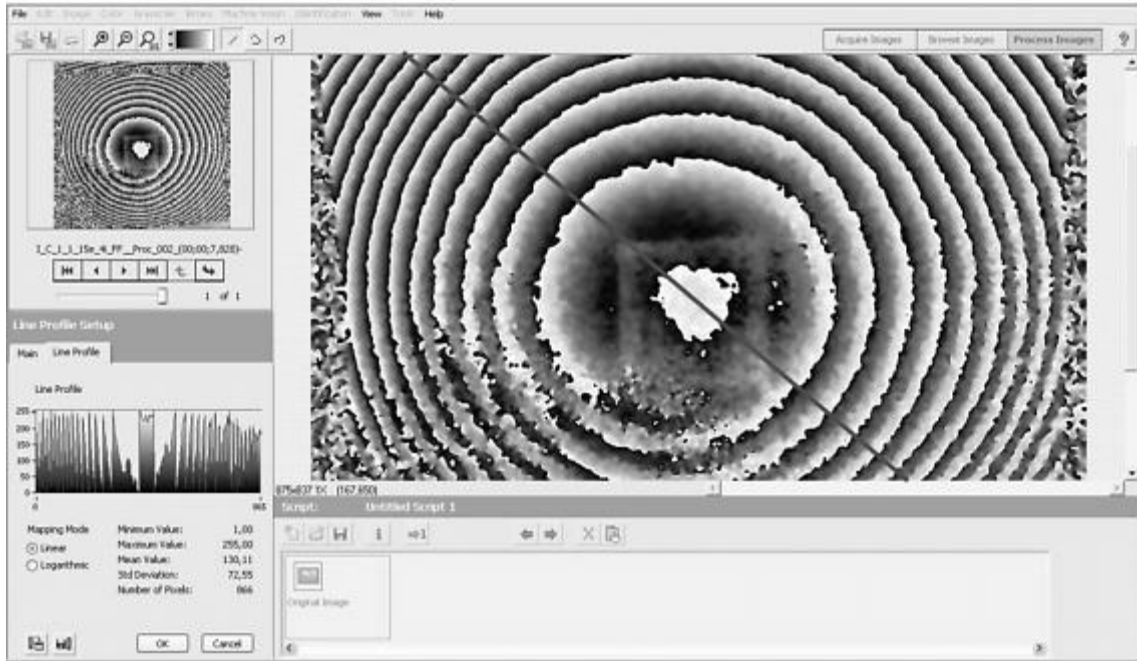
					
	<i>Körkörös vonalak</i>	<i>Görbült vonalak</i>	<i>Megszakadt vonalak</i>	<i>Változó sűrűségű vonalak</i>	<i>Változó irányú vonalak</i>
<i>Tulajdonságok</i>	Zárt vagy nyílt görbék, fokozatos irányváltás	Nyílt görbék, fokozatos, lassú irányváltás	Azonos irányú, nem folytonos vonalak	Más jelenségek fellépésekor a vonalsűrűség is változhat	Hirtelen irányváltás, folytonos vonalak
<i>Lehetséges okok</i>	Rétegleválás vagy üreg	Belső törésvonal vagy rétegleválás	Különböző anyagok határa	Különböző mértékű deformáció	Különböző anyagok határa

4. táblázat: Különbégi interferogramok elváltozásának osztályozása [76]

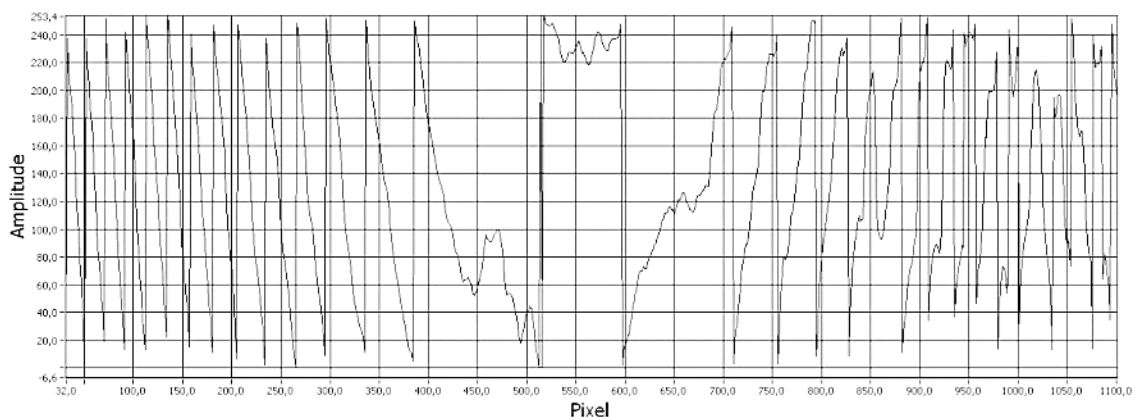
A lokális hatások kiértékelése vizuálisan történt, a globális elváltozások kiértékelése pedig az NI VISION program felhasználásával folyt. Első lépésként kiválasztottam egy, a képen átlósan keresztülhúzó vonalat, amely mentén a program kirajzolta a különbségi interferogram intenzitás profilját, valamint fájlba mentette a koordinátákat és a nekik megfelelő intenzitás értékeket. Ezek felhasználásával meghatároztam a vonal mentén mért intenzitásmaximumok számát. A vonal irányának merőlegesnek kell lennie a csíkokra (amennyire csak lehetséges, a nem tökéletesen körszimmetrikus interferenciacsíkok mellett) azért, hogy a számolás összehasonlítható eredményeket adjon. Így a vonal olyan irányba haladt keresztül a körnek tekintett csíkok geometriai középpontján, amely lehetőség szerint elkerülte a kép zajos részeit, ha voltak ilyenek (14. ábra)

Két l távolságra lévő felszíni pont közötti csíkok száma (N) megadja az adott két pont síkból való elmozdulásának (d) különbségét, ahol

$$d = N \cdot \frac{\lambda_{\text{laser}}}{2}.$$



14. ábra: Az NI Vision express module felhasználói felülete

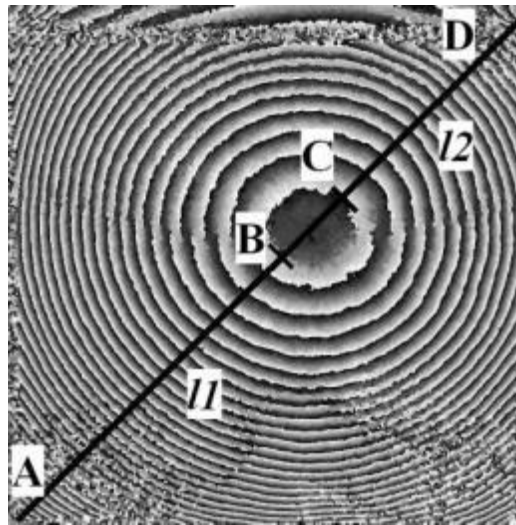


15. ábra: Intenzitás profil egy különbségi interferogramon áthaladó vonal mentén

Ezután a program segítségével felvettem az intenzitásprofil a kiválasztott vonal mentén (15. ábra). A lézeres tisztítás előtt készült különbségi interferogramokon van egy viszonylag lapos terület az intezitás görbe közepén, ami a minta legmagasabb pontjának környezetéhez tartozik. Ettől a területtől jobbra és balra találhatók a csíkok, az élek felé növekvő sűrűséggel.

A tisztítás után felvett különbségi interferogramokon a tisztított területnek megfelelő helyen a csíkrendszer helyi elváltozást, hullámos csíkokat mutat. Ez a tisztító lézernyaláb helyi hatásának tulajdonítható, amit a teljes minta reakciójától elkülönítve

vizsgálunk. A teljes minta megváltozására az interferencia csíkok számából és sűrűségéből következtetünk.



16. ábra: Értelmező ábra a csíkok számolásának módjáról

A különbségi interferogramokon manuálisan választottam ki a vonal legkedvezőbb irányát (16. ábra). A csíkok (azaz az intenzitás maximumok) számolása a középponttól a kép szélei felé, mindkét irányba haladt (AB és CD szakasz a 16. ábrán). Mivel a hozzávetőlegesen körkörös csíkok középpontja elmozdulhat a kép középpontjából, így különböző távolságokra lehet a két metszésponttól, amelyeket a vonal és a kép éle ad (A, D, 16. ábra). Ezután megszámláltam a csíkokat az AB és CD szakaszokon (N_1 , N_2), majd meghatároztam az l_1 és l_2 szakaszok hosszát.

A különbségi interferogramok kiértékelése különböző szempontok alapján történt. Azért, hogy két egyforma távolságra lévő pont relatív elmozdulása minden mintára összehasonlítható legyen, kiszámoltam a csíkok átlagos sűrűségét (N_1/l_1 , N_2/l_2) a középponttól jobbra illetve balra. Ezekből az értékekből határoztam meg a relatív elmozdulás mértékét két, egymástól 5 cm-re lévő felületi pont között (5cm a minták oldalhosszának fele). A kapott relatív elmozdulásokat (jobbra és balra egyaránt) a minták csoportjaira átlagoltam, így a minták különböző csoportjainak a gerjesztésre adott mechanikai válaszát hasonlíthatjuk össze a három állapotban: a referencia állapotban, valamint 1 órával és 1 hónappal a lézeres tisztítást követően.

Az interferenciacsík szélessége (azaz a különbség két intenzitás maximum között) a minta két pontjának különbségét adja, aminek a relatív elmozdulása 266 nm. Nagy csík szélesség kis helyi meredekséghez tartozik és viszont. Azért, hogy a választott

vonala mentén a minta minimum meredekségéről információt szerezzek, a maximum csíkszélességet mértem meg és hasonlítottam össze a különböző mintákra nézve. A csíkszélesség általában a csíkrendszer közepe felé növekszik.

4.4. A DHSPI mérések eredményei

4.4.1 Az eredeti freskótöredékek DHSPI mérésének eredményei

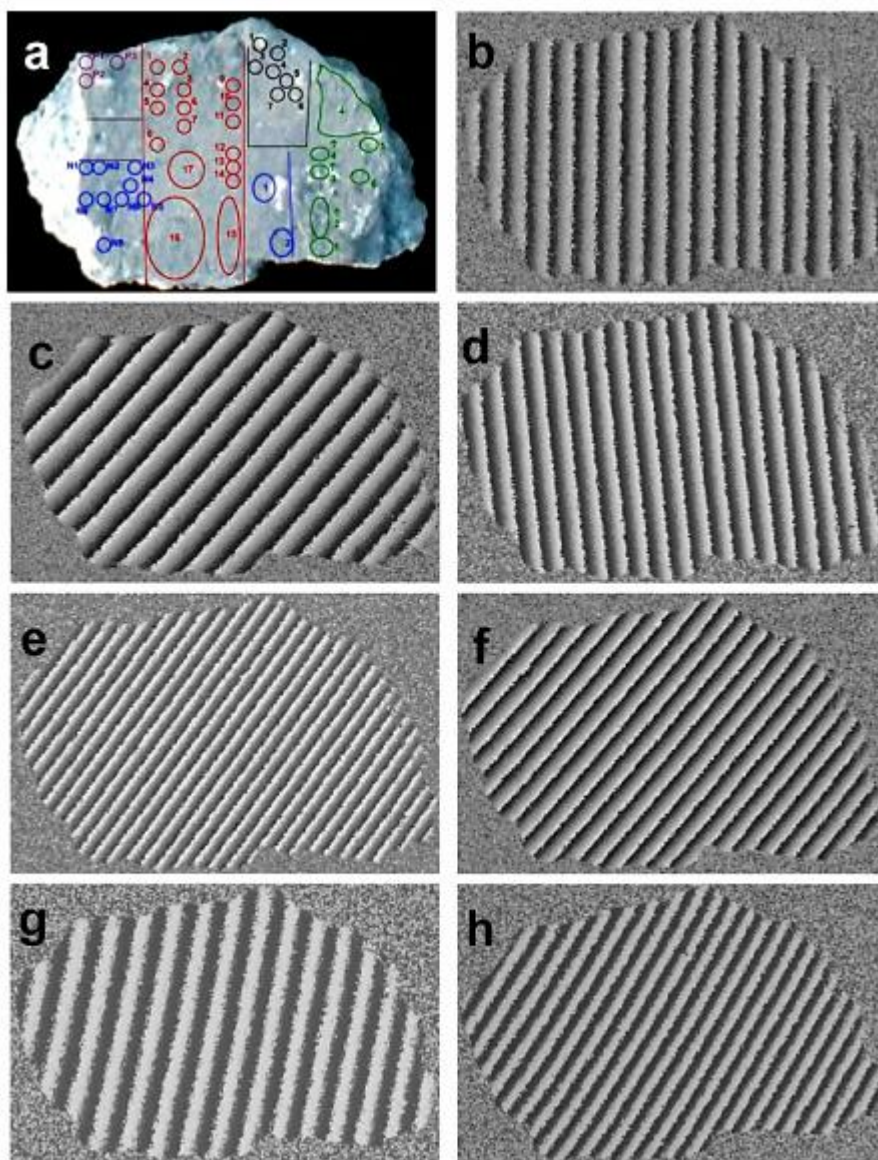
Az eredeti freskótöredékek esetében a csíkrendszerben történt változások alapján két csoportba soroltam a minták válaszreakcióját: a teljes minta reakciója úgy jelenik meg, hogy az interferencia csíkok alakja és sűrűsége megváltozik a minta teljes felülete felett, míg a helyi reakciókra az érintett terület felett a csíkrendszerben kialakuló helyi elváltozások utalnak.

A vizsgált freskótöredékek egymást követő tisztítás és DHSPI vizsgálatokon estek át, így a lézeres tisztítások halmozott hatásait értékelhettem ki. A DHSPI tesztek eredményét az 5. táblázat foglalja össze. A megismételt mérések azt mutatják, hogy a DHSPI képes megjeleníteni a lézeres tisztítás által okozott elváltozásokat a freskótöredékekben és kimutatja azt is, hogy ezek az elváltozások nem maradnak fenn permanensen, hanem a minták relaxációja során eltűnnek.

Jelen tanulmányomban két jellegzetes mintára térek ki: az E és C mintákra. Az E minta esetében (26. kép) – habár az egyes tisztítópróbák különböző eredménnyel zárultak, a sikeres tisztítási eredménytől a festékréteg elvesztéséig – az interferogramokon helyi elváltozás nem volt látható. Az eredetileg párhuzamos interferencia csíkok továbbra is nagyjából párhuzamosan futnak, csak az irányuk változott a teljes képen. (Ezt a jelenséget esetleg okozhatja az is, hogy a gondosan kialakított mintatartó ellenére nem sikerült tökéletesen pontosan visszahelyezni a mintát a DHSPI mérési elrendezésbe.) Az eredmények tehát azt mutatják, hogy a lézeres kezelések hatására nem alakultak ki helyi elváltozások az E minta szerkezetében.

Minta kód	Lézer típusa	Hullám-hossz [nm]	Impulzus-hossz	Energia sűrűség [J/cm ²]	DHSPI mérések eredményei
C	SFR Nd:YAG	1064	500 μs	6-17	DHSPI-vel látható sérülés (27. kép c)
	QS Nd:YAG	1064	8 ns	0,2-0,4	A nagyon alacsony energiasűrűség ellenére, ennek a beavatkozásnak volt a legnagyobb hatása a mintára. Sérülések mutathatók ki a tisztítópróbák helyén (27. kép d)
	KrF	248	30 ns	8-21	A csíkrendszerben korábban látható zavarok eltűntek (1 nap elteltével). Ebből valószínűleg arra következtethetünk, hogy a lézeres tisztításnak rövidtávú hatása volt a mintára és nem okozott végleges károsodást. (27. kép e)
	QS Nd:YAG	1064	150 ps	1-2,5	A csíkrendszer sima (27. kép f)
					Egy hónap elteltével a csíkrendszer nagyon hasonló az eredetihez (27. kép g)
E	KrF	248	30 ns	2,4-17	Párhuzamos, egyenes csíkrendszer. A csíkok iránya minden egyes tisztítópróba után megváltozik.
	SFR Nd:YAG	1064	500 μs	7,1-22	
	KrF ismételt	248	30 ns	2,7-8,7	
	QS Nd:YAG	1064	8 ns	0,2-0,5	
	QS Nd:YAG	1064	150 ps	0,8-2,5	

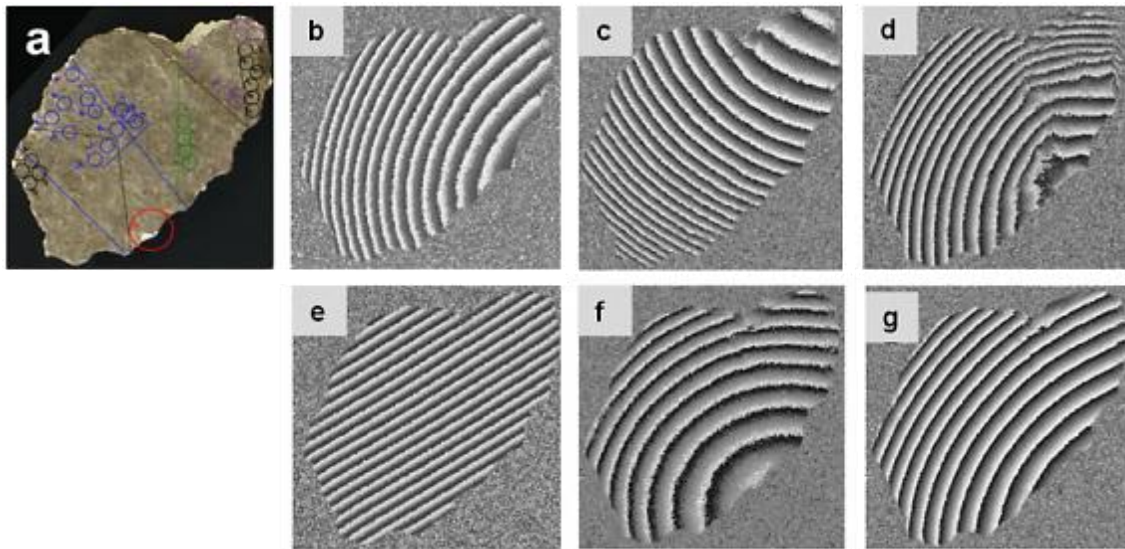
5. táblázat: a C és E minták DHSPI mérési eredményei



26. kép: A lézeres tisztítópróbák helyei (a) és a csíkrendszer az E mintán a tisztítópróbák előtt (b) és közvetlenül a lézeres kezelések után (c-g), valamint egy hónap elteltével (h). A lézeres tisztítás hatására csak teljes mezős elváltozásokat láthatunk

Ezzel szemben, a lézeres tisztítások következményei határozottan megjelennek a C mintáról felvett interferogramokon (27. kép, 5. táblázat). Az első SFR Nd:YAG lézeres tisztítás után az eredeti interferencia csíkok görbülete teljesen megváltozott (27.c kép). Ez arra utal, hogy a töredékben új feszültség jelent meg. Az alkalmazott alacsony energiasűrűségek ellenére, a ns-os impulzushosszú Nd:YAG lézer a szennyeződés eltávolításakor egyes területeken a festékréteget is roncsolta (27.d kép). Egy nappal a ns-os Nd:YAG kezelés után KrF lézeres tisztítást végeztünk a minta két ellentétes oldalán, amely kiegyenesedett, sima interferencia csíkokat eredményezett (27.e kép). A következő napon ps-os, Nd:YAG (1064 nm) lézeres tisztítást végeztünk,

és a tisztítás után felvett interferogramok azt mutatták, hogy a minta nem csak lokálisan, de teljes egészében is másképp reagál a gerjesztésre, mint a Nd:YAG lézeres tisztítás előtt. Az interferencia csíkok simák, de ismét íveltek, az irányuk hasonló, mint az eredeti csíkrendszer (27.f.kép). Egy hónap relaxáció után a csíkok orientációja, görbülete és távolsága megközelítőleg visszaállt az eredeti, referencia állapotba (27.g.kép).



27. kép: A lézeres tisztítópróbák helyei (a) és a csíkrendszer a C mintán a tisztítópróbák előtt (b) és közvetlenül a lézeres kezelése után (c-f), valamint egy hónap elteltével (g). Az interferogramokon teljes mezős és lokális elváltozások egyaránt megfigyelhetők

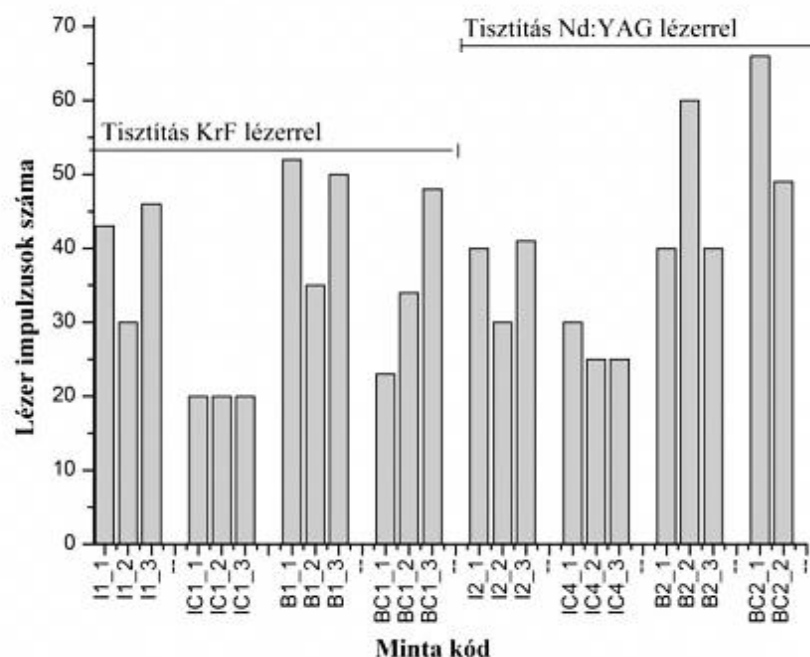
Ezen megfigyelések alapján arra lehet következtetni, hogy a ns-os impulzushosszú Nd:YAG lézeres tisztítás a C minta esetében szerkezeti változásokat eredményezett. Azonban ezek a változások átmenetiek voltak, mivel a csíkok megszakadása és a lokális elváltozásai, amelyeket a Nd:YAG tisztítás után észleltünk, eltűntek azokon az interferogramokon, amelyeket ugyanazon mintáról vettünk fel a későbbi kísérletek során. A tisztítópróbák után egy hónap elteltével megismételt DHSPI mérések megmutatták, hogy a csíkrendszerben lévő zavarok tovább csökkentek. Így arra következtethetünk, hogy a 27. kép interferogramjain látható, a lézer által indukált elváltozásokat nem állandó mechanikai sérülés vagy egy folyamatos többlet feszültség okozza, hanem csak átmenetileg léptek fel belső feszültségek.

4.4.2 Az új, modell minták DHSPI mérésének eredményei

A kísérletben szereplő minden egyes új, modell mintára vonatkozó adatlapot a melléklet tartalmazza.

Mivel az új, modell freskómintákon végzett kísérletsorozatnak nem volt célja a tökéletes tisztítás, így a folyamat alatt csak szabad szemmel figyeltem meg a felszín, valamint a szükséges lézer impulzusok számára vonatkozóan vontam le következtetéseket (17. ábra).

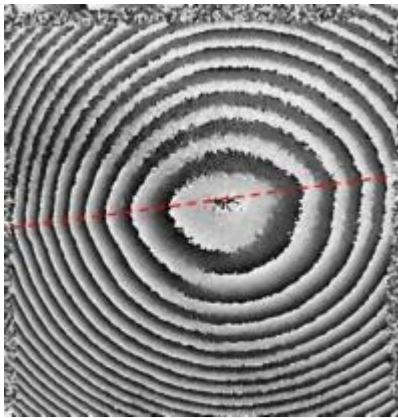
Habár a szükséges impulzusok száma bizonyos csoportokban 25%-nál nagyobb mértékben változik, a 17. ábrából látható, hogy a szükséges tisztítási impulzusok számának átlaga kisebb a szilárdított minták esetében (a csoport nevében C szerepel) mint a nem szilárdított mintáknál, kivéve a BC2 csoportot. Az ábra alapján azt is láthatjuk, hogy a Nd:YAG lézeres tisztítás során átlagosan több lézer impulzusra volt szükség, mint a KrF lézeres tisztításnál. A csoportokon belüli nagy eltérés egyrészt a szennyeződés kismértékű inhomogenitásával, másrészt a lézer impulzus energiájának szórásával magyarázható.



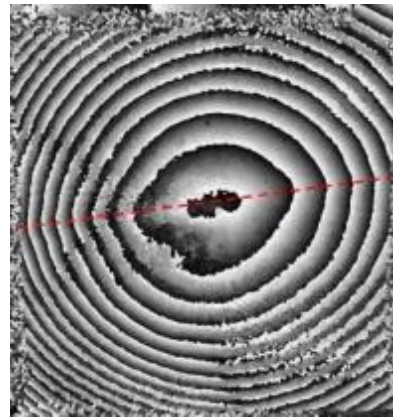
17. ábra: A tisztításhoz szükséges lézer impulzusok száma

Ahogy azt a 4.3. fejezetben már ismertettem, összehasonlítás céljából számos különbségi interferogram készült a tisztítási beavatkozás előtt referenciaként, és a

tisztítási folyamat után. A referencia különbségi interferogramot vizuálisan megvizsgálva, felismerhetjük a mintában már a tisztítás előtt jelen levő strukturális elváltozásokat, attól függetlenül, hogy az elváltozást szándékosan okoztam, mint például az eltört minták esetében (28-29. kép), vagy véletlenül alakult ki, mint az I1_3, B1_3 mintadarabokban.

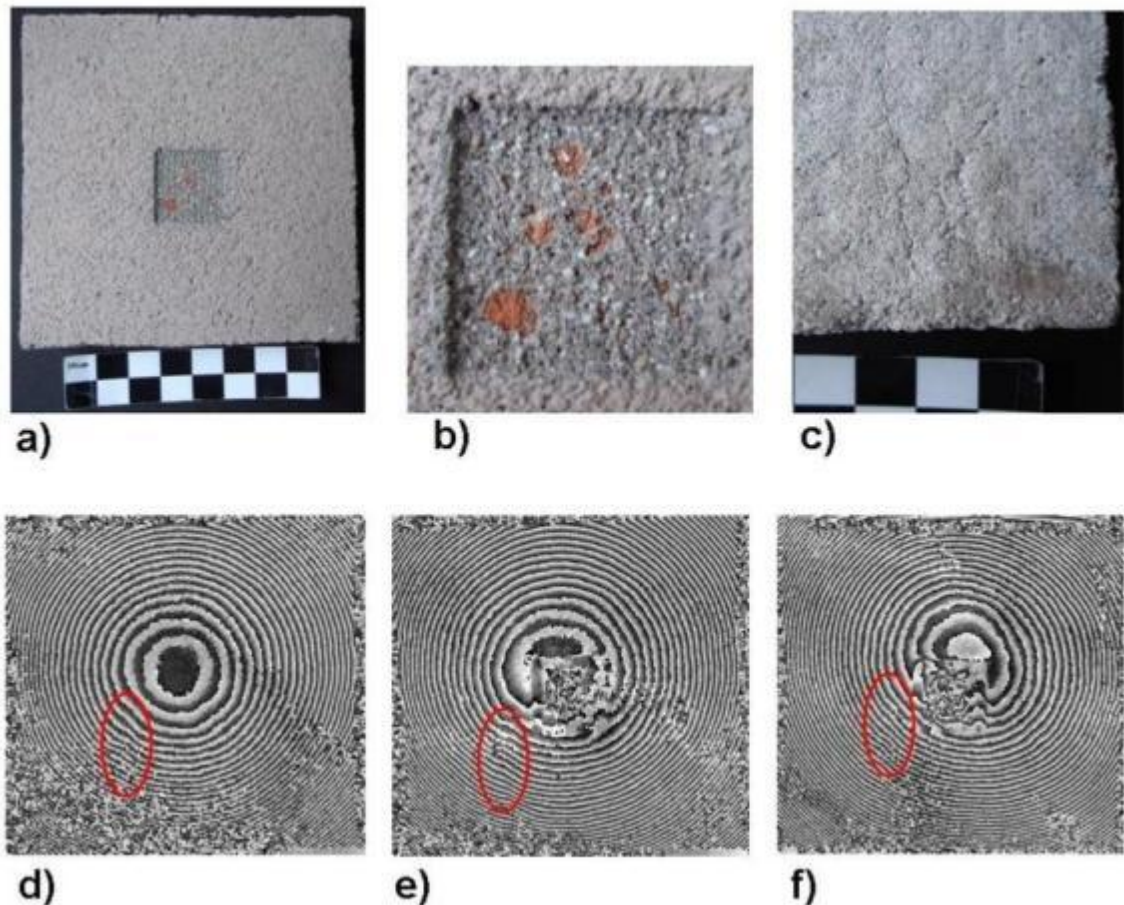


28. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5 kép



29. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 6 kép

Összehasonlítva a tisztítás után felvett különbségi interferogramokat a referencia különbségi interferogramokkal, megállapítható, hogy a lézeres kezelés nem okozott további elváltozást egyetlen mintában sem, valamint jelentősen nem növelte az interferencia csíkrendszer szabálytalanságait azoknál a mintáknál, ahol már a lézeres tisztítás előtt jelen voltak az elváltozások. Egy hónap elteltével a DHSPI képfelvételt megismételve azt tapasztalhatjuk, hogy nem mutatnak új elváltozásokat vagy további károsodásokat a már a tisztítás előtt is sérült mintákon (30. kép).

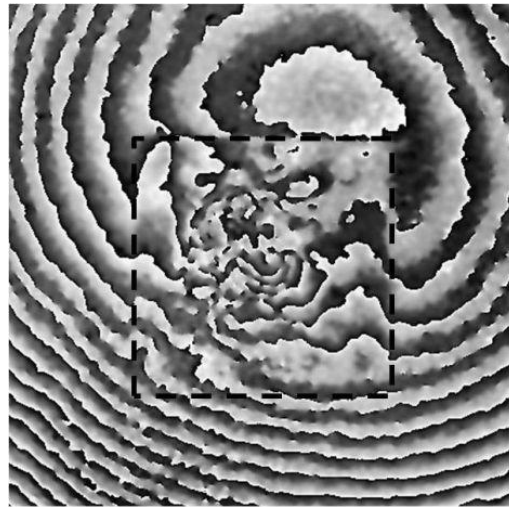


30. kép: (a) I_1_3 mintadarab elülső felülete a KrF lézeres tisztítás után, (b) a tisztított terület, (c) egy repedés az I_1_3 minta hátoldalán, (d) a referencia különbségi interferogram mutatja a repedés elhelyezkedését (e) egy órával a tisztítás után felvett különbségi interferogram (f) egy hónappal a tisztítás után felvett különbségi interferogram. A d), e) és f) képeken jelölt részen látható a területet, ahol enyhén deformálódott csíkok a hátoldalon lévő repedést mutatják

A különbségi interferogramok jelentősen megváltoznak a minta 2 cm x 2 cm-es tisztított területe felett, így nem lehetséges statisztikai kiértékelést végezni ezeken a területeken. Ez annak a következménye, hogy a lézeres tisztítás automatikusan, pásztázva folyt, így tisztítás közben nem volt lehetőség az eredendően inhomogén felület pontról pontra történő ellenőrzésére. Például néhány esetben a szennyeződés már elvált a felületről, de még nem pattant le. Ezekben az esetekben a csíkrendszer jellemzői a szennyeződés állapotát mutatják, és nem a minta állapotát. A festékréteg lokális sérülése bizonyos mintákon (például I_1_2, I_1_3) együtt jár az interferencia csíkrendszer torzulásával, más mintákon (például I_1_1, B_1_3) viszont nem látszik a festékréteg sérülésének az interferencia csíkokra gyakorolt hatása.

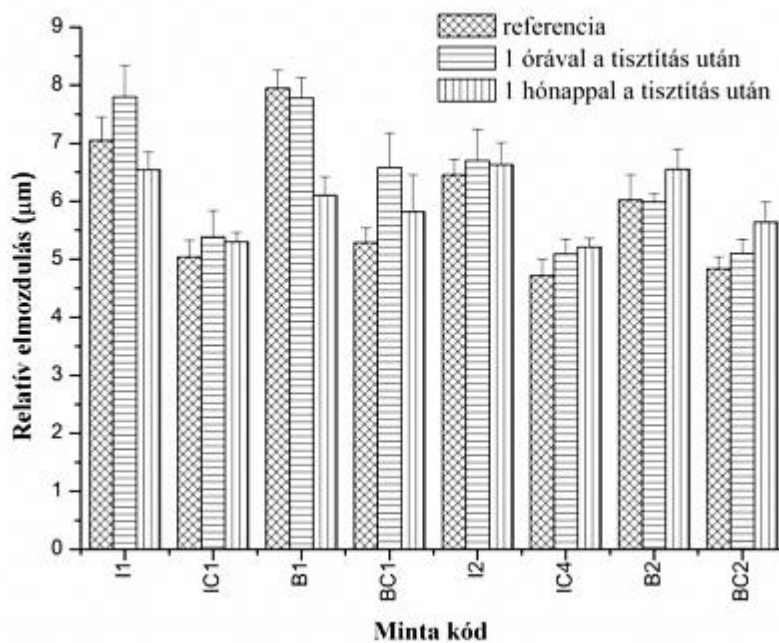
A 31. kép nagyobb nagyításban mutatja a 30. f) kép lézerral tisztított területét. A tisztított terület határait a szaggatott négyzet emeli ki. A tisztított terület feletti

csíkrendszer közelebbi vizsgálata és a tisztítási paraméterek összefüggései egy következő kutatás témáját adhatják.



31. kép: Az I_1_3 minta lézerrel tisztított területe

A különbségi interferogramok számszerű kiértékelését a 4.3. fejezetben leírt módszer szerint végeztem. Két, egymástól 5 cm-re lévő felületi pont termális gerjesztés hatására bekövetkező elmozdulásának mértéke a 18. ábrán látható.



18. ábra: Két egymástól 5 cm-re lévő felületi pont relatív elmozdulása a hőmérsékleti gerjesztés hatására, DHSPI mérés alapján

Ahogy az a 18. ábrából megállapítható, némi különbség van a freskó minták referencia állapotai között. Az azonos mértékű termális gerjesztés hatására bekövetkező átlagos relatív elmozdulás két egymástól 5 cm-re levő pont esetében a lézeres tisztítás előtt $5,92\ \mu\text{m}$, ($1,16\ \mu\text{m}$ szórás mellett), ami $6,30\ \mu\text{m}$ -re nőtt ($1,10\ \mu\text{m}$ szórás mellett) egy órával a kezelés után, és újra csökkent $5,97\ \mu\text{m}$ -re ($0,57\ \mu\text{m}$ szórással) a kezelés után egy hónappal. Megállapíthatjuk tehát, hogy a lézeres beavatkozás hatása a legrosszabb esetben annyi, hogy a mintadarab a $\sim 3\ ^\circ\text{C}$ hőmérséklet emelkedésre a szélektől a középpontig mért relatív elmozdulás $0,4\ \mu\text{m}$ -es növekedésével válaszol, amely növekedés csupán 7%-a az eredeti értéknek, és még ez a csekély hatás is elmúlik a minta egy hónapos relaxációja után. A szórás jelentős csökkenése azt mutatja, hogy a minta válasza a hőterhelésre egységesebb a lézeres tisztítást követő egy hónapos relaxálás után, mint a referencia állapotukban.

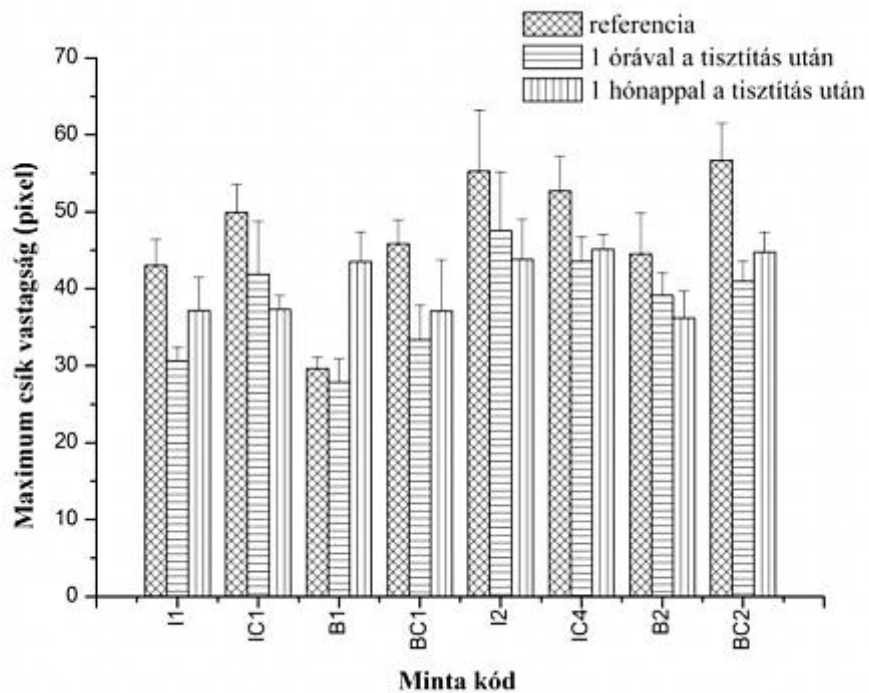
Az is látható, hogy a relatív elmozdulás a referencia állapotban a szilárdított mintáknál kisebb (BC1, BC2, IC1, IC4), mint a nem szilárdított minták esetében (B1, B2, I1, I2, I3), vagyis - ahogyan az várható volt - a szilárdított minták még kisebb strukturális változást mutatnak a gerjesztés hatására.

A legnagyobb különbség a referencia állapot és az 1 órával a tisztítás utáni állapot között a BC1 csoportnál - KrF lézerral kezelt, eltört és szilárdított mintáknál - fordul elő (21%). Azonban, összehasonlítva a KrF lézerral tisztított (B1, BC1, I1, IC1) és a Nd:YAG lézerral tisztított csoportokat (B2, BC2, I2, IC4), megállapítható, hogy a mechanikai elváltozások nagysága nem függ jelentősen a tisztító lézer típusától. Azt is meg kell jegyeznünk, hogy, amíg a legnagyobb változás, amit a lézeres tisztítás okozott egyetlen mintadarabon 21%, a különböző típusú lézerral tisztított, más szempontból azonos csoportokon belül 24% a legnagyobb különbség a referencia állapotok közt.

A fent számolt relatív elmozdulás minden mintára, mint teljes egészre jellemző. Ezzel ellentétben a különbségi interferogramon az interferenciacsíkok szélessége a minta helyi meredekségéről nyújt információt.

A különbségi interferogramokon látható, hogy a csík szélesség nő a minta széleitől a csíkok közepe felé. A csíkrendszer közepe mutatja a minta felületének legjobban elmozdult területét és a tisztított terület gyakran egybeesik ezzel vagy közel van hozzá. A törött minták különbségi interferogramján a csíkrendszer középpontja általában az összeillesztések vagy az összeillesztések metszéspontja fölé esik, mutatva, hogy ezek azok a területek, ahol a minta elmozdulása a legnagyobb.

A 19. ábra a referencia állapot, az egy órával és egy hónappal a tisztítás utáni állapot maximális csíkszélességét ábrázolja. Minden mintacsoportban, kivéve a B1, tisztítás után a maximális csíkszélesség csökkenése tapasztalható, ami a minta termális gerjesztés hatására bekövetkező deformációjának kismértékű növekedését jelenti. Ez a hatás annak tulajdonítható, hogy a felületi szennyeződés a tisztítás helyén már nem fejt ki a mintát összetartó, szilárdító hatását.



19. ábra: Maximális csíkszélesség a referencia és a tisztítás után egy órával illetve egy hónappal felvett interferogramokon

5. Összefoglalás

A doktori kutatásom során ásatásból kikerülő, olyan freskótöredékek tisztítási problémáit vizsgáltam, amelyek felületén kemény, kalcitos szennyeződés található, valamint egységes modell mintákon figyeltem meg a lézeres tisztítás hatásait.

Kísérleteim eredményeiből arra következtettem, hogy gondosan megválasztott beállításokkal a lézeres tisztítás jó alternatívája vagy kiegészítője lehet az olyan hagyományos módszereknek, mint például a mechanikus tisztító módszerek (szike, szemcseszórás), oldószeres tisztítások, pakolások.

Az általam alkalmazott mindkét hullámhossz esetében, 248nm-en és 1064nm-en egyaránt, a következő érzékenységi sorrendet állíthatjuk fel a legérzékenyebb vizsgált pigmenttől kezdve a legellenállóbbig: cinóber, venyige fekete, vörösokker, sárgaokker, zöldföld, egyiptomi kék és mészfehér. Egyes mintákon a vörösokker sárgulását figyeltem meg, ennek okait tovább vizsgálom.

A szilárdító jelenléte hatással van a tisztítási eredményekre. Láthatunk példát a pozitív hatására, amikor a festékréteget megvédte a lepattanástól, károsodástól (például S minta), bár olyan is előfordult, hogy a szennyeződés eltávolítását megnehezítette (például C minta).

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.

Az eredeti freskótöredékek vizsgálatakor a minta tisztítása és DHSPI mérése 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 tesztekkel végeztem egyforma, modell mintákon.

A modell minták nyolc különböző mintacsoportján folyt a DHSPI vizsgálat két különböző típusú tisztító lézer hatásainak kimutatására.

A mechanikai vizsgálatok bizonyították, hogy a kísérletek céljára készített modell freskó minták vakolatának sűrűsége egységes, valamint az ultrahang terjedési sebesség mérések igazolták, hogy a szilárdító a freskó vakolatában lévő kötéseket erősítette meg. A Duroszkóp visszapattanási értékkel meghatározott felületi keménység nőtt a szilárdítás hatására (Remmers KSE 300) a minták hátoldalán, míg a szilárdítás jelentősen nem befolyásolta a minta szennyezett, elülső oldalán mért keménységet.

Ebből a megállapításból következik, hogy a szilárdító a freskó vakolat anyagával és a mesterséges szennyeződés anyagával különböző módon reagált.

A lézeres tisztítópróbákból megállapítható, hogy a szükséges impulzusok száma majdnem megegyezik a KrF és Nd:YAG tisztításnál a nem szilárdított, intakt és eltört minták csoportján belül, másrésről, a KrF tisztítás hatékonyabbnak bizonyult a szilárdított minták esetében. Az intakt mintákra általánosan igaz, hogy a szükséges impulzusok száma kevesebb a szilárdított minták esetében, mint a nem szilárdítottaknál. Megállapítható tehát, hogy a szilárdító és a szennyeződés együttesen hatékonyabban ablálható, különösen a KrF lézerrel, mint a szennyeződés maga.

A szükséges tisztító impulzusok száma a KrF és Nd:YAG lézeres tisztítás során egyaránt magasabb az eltört mintáknál, mint az intaktaknál. A freskóvakolat mechanikai tulajdonságai, mint a Duroszkópos visszapattnási érték és az ultrahang terjedési sebesség mérés nem magyarázzák ezt a különbséget. Mindazonáltal az eltört minták felülete az összeragasztást követően kevésbé sík, mivel a töredékek nem feltétlenül illeszkednek pontosan, amiben szerepet játszik a ragasztásukhoz használt gipsz is. A készítés során 0,2-0,3 mm pontatlanság is előfordulhatott a síkok összeillesztésénél, ami okozhatja a törésvonalak fölött a szennyeződés vastagságának helyi eltéréseit. Ide került a tisztító ablak is, így ez magyarázza, hogy az eltört minták esetében miért volt szükség több lézer impulzusra ahhoz, hogy elérjük a tisztítás megállításához szükséges állapotot.

Azt is megállapíthatjuk, hogy azokban az esetekben, amikor a szennyeződés alatt lévő festékréteget a Nd:YAG lézer impulzusok elérték vagy megsértették, a sérülések sokkal jelentősebbek voltak, mint a KrF lézer esetében. Ez annak a következménye lehet, hogy ezen kísérletek során a tisztítás száraz körülmények között zajlott. Mivel a nedvesítés fontos eleme az IR tisztítási módszernek, a hiánya okozta a nem megfelelő eredményt.

A DHSPI mérések alapján látszik, hogy a különbségi interferogramok nem mutattak olyan új, szerkezeti elváltozásokat, amelyek a lézeres tisztításnak tulajdoníthatóak. Két olyan mintadarab volt, I1_3 és B1_3, ahol a csíkrendszer felfedett nem szándékosan okozott elváltozásokat, amelyek már a tisztítás előtt jelen voltak a mintában (láthatóak a referencia különbségi interferogramon). A meggörbült csíkok alakja és sűrűsége szerint sem ezek, sem a szándékosan előidézett szerkezeti hibahelyek (törésvonalak) nem változtak jelentősen a lézeres tisztítás hatására.

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

Az összehasonlítható modell mintákon végre hajtott DHSPI mérések alátámasztják, hogy a lézeres tisztítás nem okozott kimutatható károsodást sem az intakt, sem a véletlenül vagy szándékosan gyöngített (eltört és újra összeragasztott) mintákban. A lézeres kezelés csak elhanyagolható mértékben növelte a $\sim 3^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletnövekedés hatására bekövetkező átlagos relatív elmozdulást a 10 cm x 10 cm modell freskó minta szélei és a középpontja között, és még ez az elhanyagolható hatás sem volt kimutatható a minta 1 hónapos relaxációja után.

Összefoglalásként megállapítható, hogy - amennyiben a pigmentek lehetővé teszik – a lézeres tisztítás jó alternatíva a régészeti freskótöredékek restaurálása során, különösen azokban az esetekben, amikor annyira gyenge a töredék megtartása, hogy előszilárdítás nélkül nem lehetne őket kezelni.

Melléklet

A melléklet a digitális holografikus szemcsekép interferometria módszerével végzett kísérlet minden egyes mintára vonatkozó adatlapját tartalmazza, az egyes mintákról levont vizuális következtetésekkel együtt.

I_1_1



1. kép: I_1_1 minta, lézeres tisztítás előtt, előlnézet



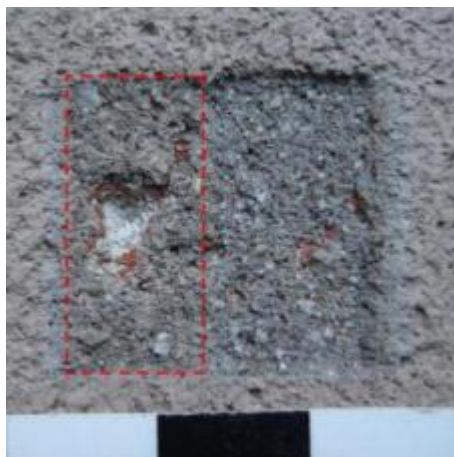
2. kép: I_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

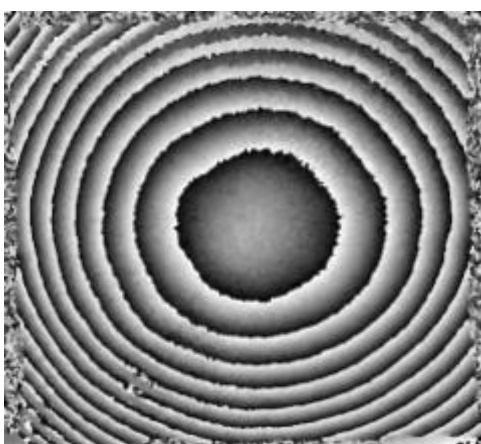
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézér/ hullám- hossz	foltméret	energia- sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / folt	lézeres tisztítás megjegyzései	DHSPI megjegy- zések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	43	a második pásztázás után (10 impulzussal) a festékréteg megsérült, így ezt a területet (a 3. képen bekeretezve) kizártam a további pásztázásból	

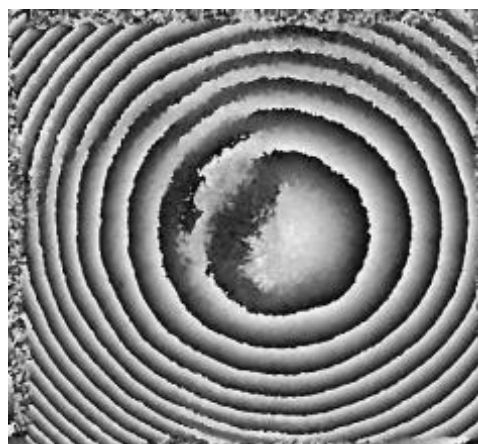
1. táblázat: Az I_1_1 minta kísérleti paraméterei



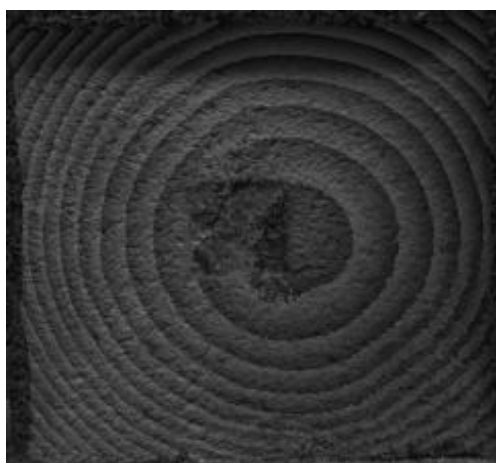
3. kép: I_1_1 minta, lézerrel tisztított területe



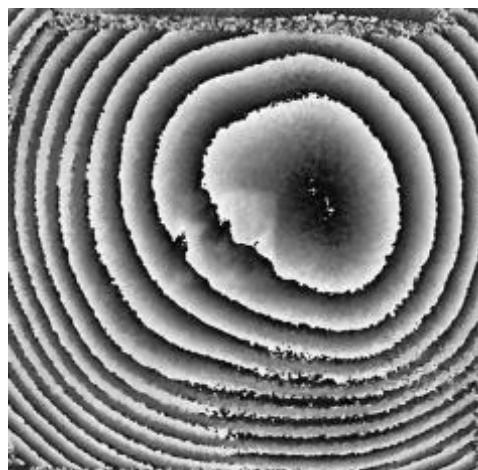
4. kép: I_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 7. kép



5. kép: I_1_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 7. kép



6. kép: a minta lézeres tisztítás utáni képe és különbségi interferogramja egymásra helyezve, 15 s gerjesztés, 6. kép



7. kép: I_1_1 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után 15 s gerjesztés, 6. kép

Vizuális kiértékelés:

A különbségi interferogramok nem mutatnak lokális elváltozásokat, kivéve a tisztított terület feletti részt.

I_1_2



8. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



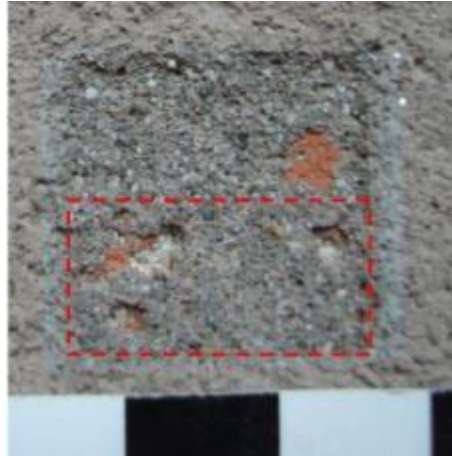
9. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

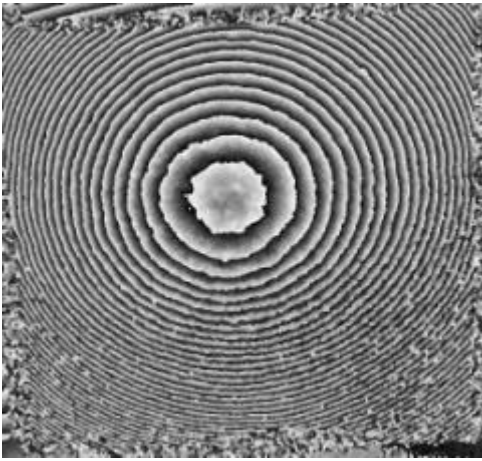
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órával, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / folt	lézeres tisztítás megjegyzései	DHSPI megjegyzései
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	30	- a második pásztázás után (10 impulzussal) a festékréteg megsérült néhány ponton, így ezt a területet (bekeretezve a 10. képen) kizártam a további pásztázásból	

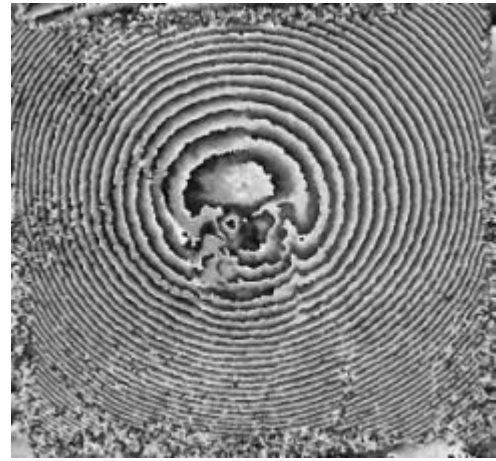
2. táblázat: Az I_1_2 minta kísérleti paraméterei



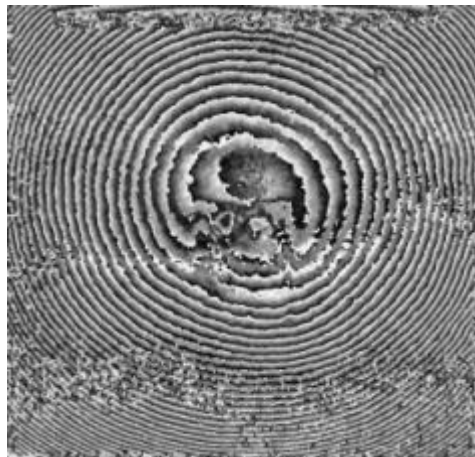
10. kép: I_1_2 minta, lézerrel tisztított területe



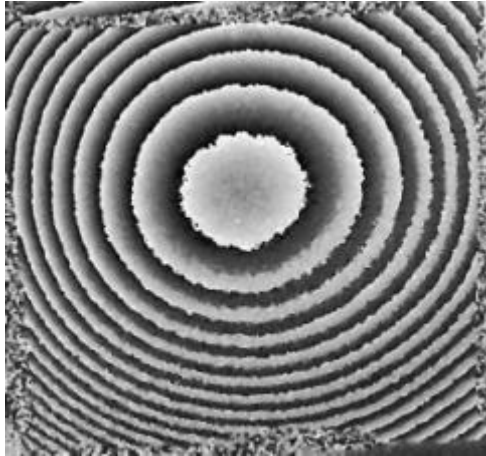
11. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 1. kép



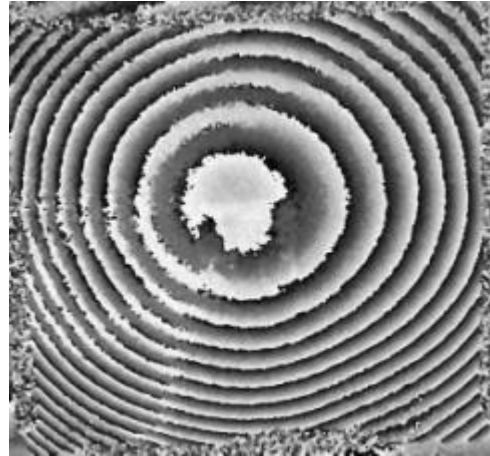
12. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



13. kép: I_1_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



14. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 7. kép



15. kép: I_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 6. kép

Vizuális kiértékelés:

- A megsérült területek felismerhetők a különbségi interferogramokon (12. kép, 13. kép)

I_1_3



16. kép: I_1_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



17. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



18. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	46	az ötödik pásztázás után (háromszor 10 impulzussal és kétszer 5 impulzussal) a lézer néhány helyen elérte a festékréteget (de nem sértette meg), így ezt a területet (bekeretezve a 20. képen) kizártam a további pásztázásból	

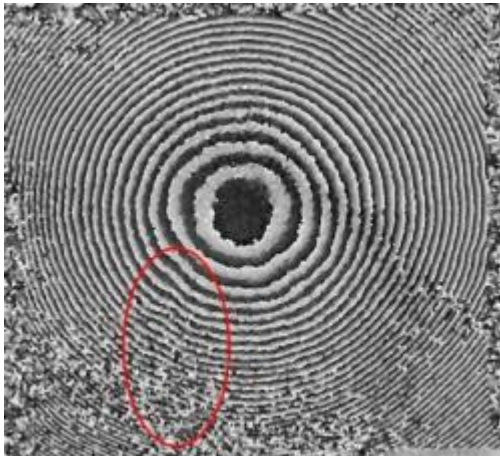
3. táblázat: Az I_1_3 minta kísérleti paraméterei



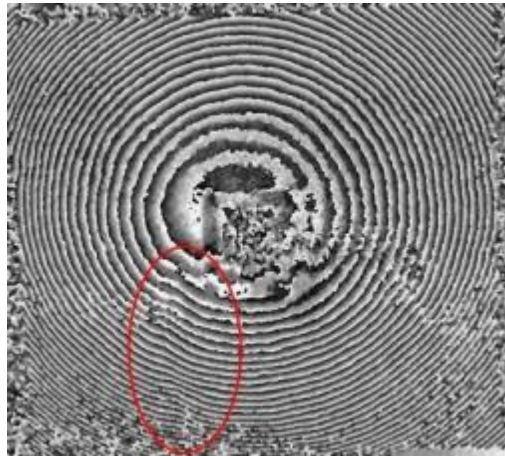
19. kép: I_1_3 minta lézerrel tisztított területe 40 impulzus után



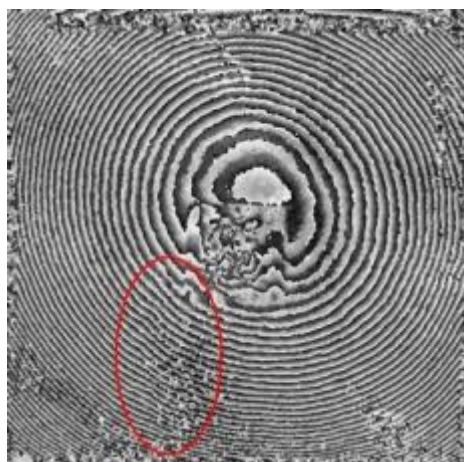
20. kép: I_1_3 minta lézerrel tisztított területe 46 impulzus után



21. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 1. kép



22. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



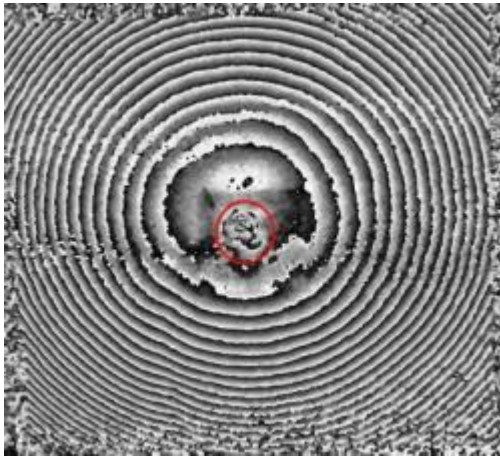
23. kép: I_1_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



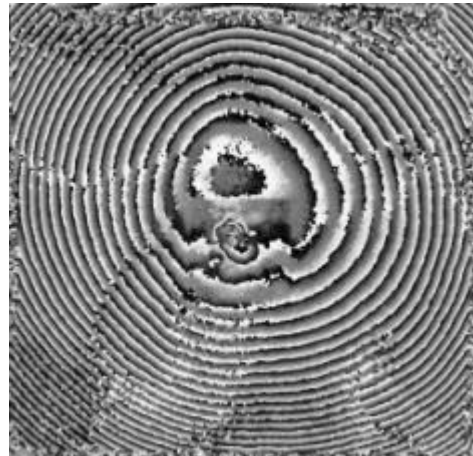
24. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal



25. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás előtt. A minta hátoldalán látható határozott repedés lehet az oka a csíkrendszerben megfigyelhető deformitásnak



26. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép
A képen jelölt elváltozás folyamatosan látható a csíkrendszerben. Ezen a ponton a festékréteg megsérült.



27. kép: I_1_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép



28. kép: I_1_3 minta lézeres tisztítás után. Optikai mikroszkópos fotó a lézerrel tisztított területről, részlet. A jelölt területen a szennyeződés mintha már elvált volna a festékrétegtől, de nem pattant le. Ez lehet az oka a 26. és 27. képeken látható elváltozásnak.

Vizuális kiértékelés:

- Deformálódott csíkok láthatóak a referencia különbségi interferogramon (21. kép, piros keret) és az egy órával és egy hónappal a tisztítás után felvett különbségi interferogramokon (22. és 23. kép, piros keret). A deformálódott csíkok nem változtak a lézeres tisztítás hatására. A minta hátoldalán látható határozott repedés (25. kép) lehet az oka a csíkrendszerben megfigyelhető deformitásnak.
- A lézeres tisztítás után felvett különbségi interferogramon látható elváltozást (26. és 27. képek) valószínűleg a szennyeződésréteg elválása okozza.

IC_1_1



29. kép: IC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



30. kép: IC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

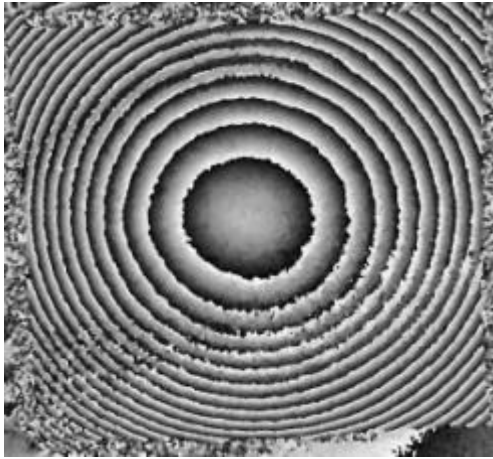
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	20	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (31. kép)	

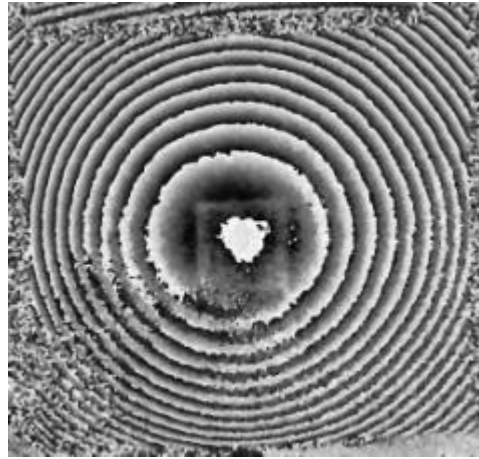
4. táblázat: Az IC_1_1 minta kísérleti paraméterei



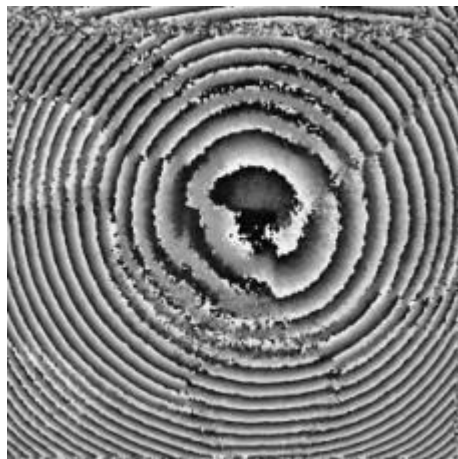
31. kép: IC_1_1 minta lézerrel tisztított területe



32. kép: IC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt 15 s gerjesztés, 2. kép



33. kép: IC_1_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép

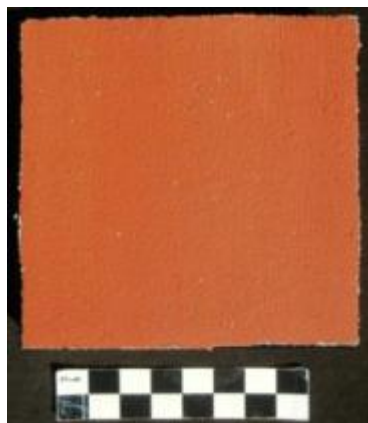


34. kép: IC_1_1 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép

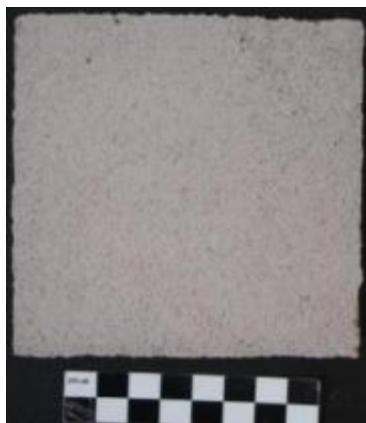
Vizuális kiértékelés:

- A különbségi interferogramok nem mutatnak helyi elváltozásokat sem a lézeres tisztítás előtt sem utána. (32. és 33. kép). Még a tisztított terület is egyenletes szerkezetet mutat a 33. képen
- Egyes esetekben nehéz eldönteni, hogy a különbségi interferogram megszakadt csíkokat mutat, ami felületi repedésre utal, vagy csak a zaj okozza. A minta mikroszkópos megfigyelése során nem találtam repedést, így a képen lévő elváltozást zajnak azonosítottam.

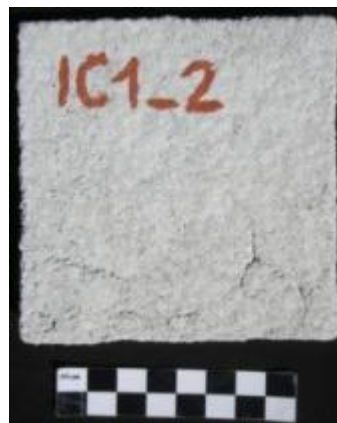
IC_1_2



35. kép: IC_1_2 minta, a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



36. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



37. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

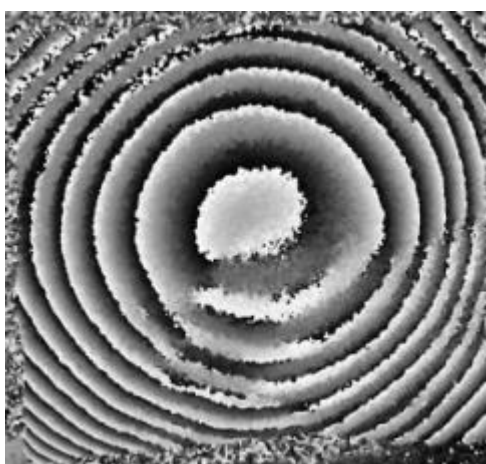
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órák, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően elveszett a rendszer meghibásodása miatt
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	20	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (38. kép)	Az utolsó pásztázás alatt (5 impulzussal) DHSPI-I rendszerhiba történt, így az utolsó pásztázáshoz és az azt követő 1 órák megfigyeléshez tartozó interferogramok elvesztek

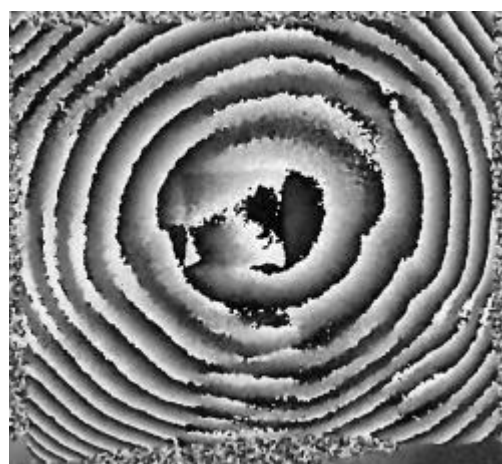
5. Táblázat: Az IC_1_2 minta kísérleti paraméterei



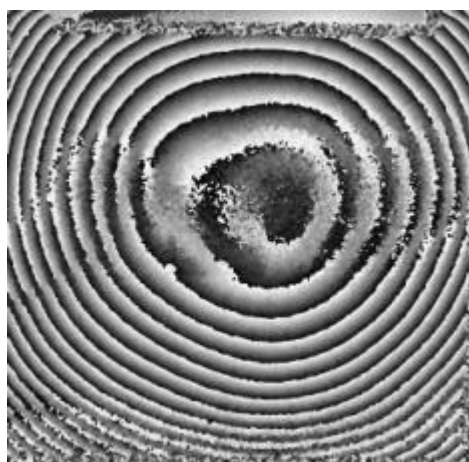
38. kép: IC_1_2 minta, lézerrel tisztított területe



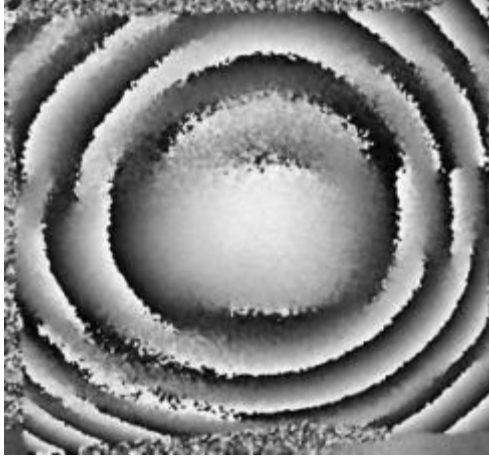
39. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 1. kép



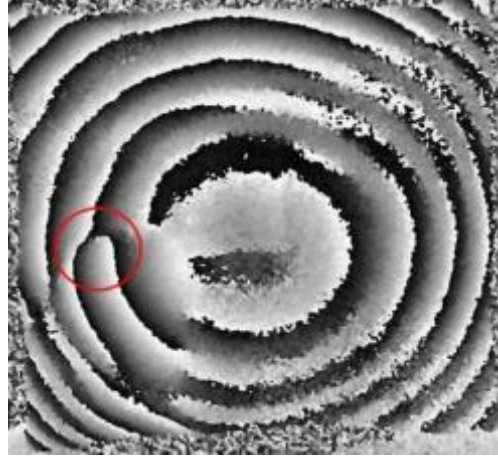
40. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép
Zajos kép
Ezt a mintát kihagytam a numerikus kiértékelésből



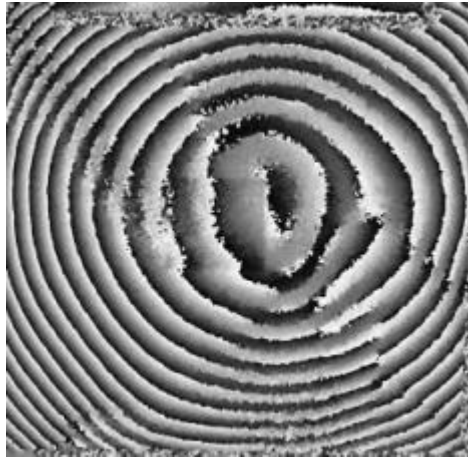
41. kép: IC_1_2 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



42. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 10 s gerjesztés, 2. kép



43. kép: IC_1_2 minta lézeres tisztítás után, 10 s gerjesztés, 2. kép



44. kép: IC_1_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 10 s gerjesztés, 2. kép

Vizuális kiértékelés:

- Ezen a mintán nehéz kiértékelni a lézer hatásait, mivel a különbségi interferogramok zajosak.
- Az IC_1_2 minta különbségi interferogramjai annyira zajosak, hogy ezeket kihagytam a numerikus kiértékelésből.
- Az IC_1_2 minta mikroszkópos vizsgálata nem mutatott mechanikai sérülést, inhomogenitást, ami a különbségi interferogramon megfigyelhető elváltozás oka lehetne

IC_1_3



45. kép: IC_1_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



46. kép: IC_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



47. kép: IC_1_3 minta, lézeres tisztítás után, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

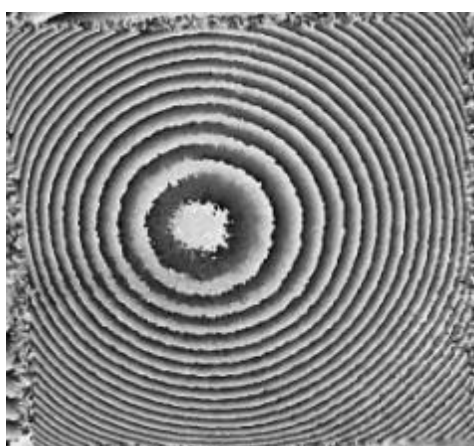
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órási, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	20	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (48. kép)	

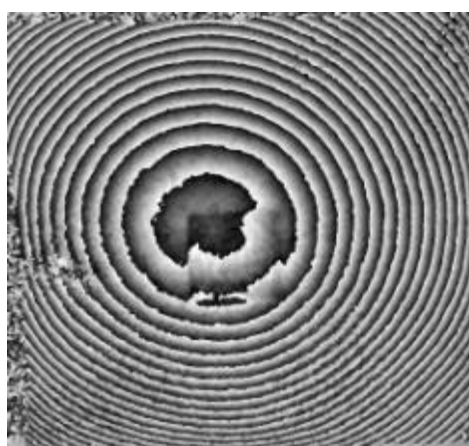
6. táblázat: Az IC_1_3 minta kísérleti paraméterei



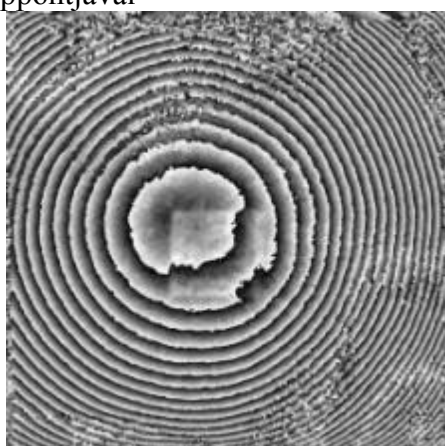
48. kép: IC_1_3 minta lézerrel tisztított területe



49. kép: IC_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 1. kép
A csíkrendszer középpontja nem esik egybe a minta középpontjával



50. kép: IC_1_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



51. kép: IC_1_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép

Vizuális kiértékelés:

- A különbségi interferogramok egyenletesek. A csíkrendszer középpontja nem esik egybe a minta geometrikus középpontjával. A csíkrendszer és a geometrikus középpont eltérését a vakolat nem teljesen egyenletes sűrűsége okozhatja.

B_1_1



52. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



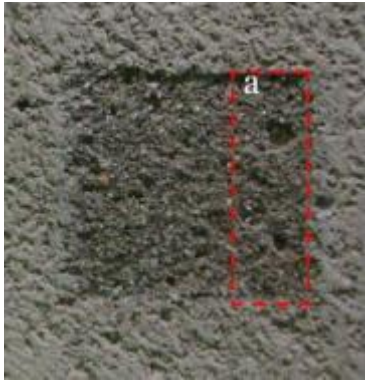
53. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

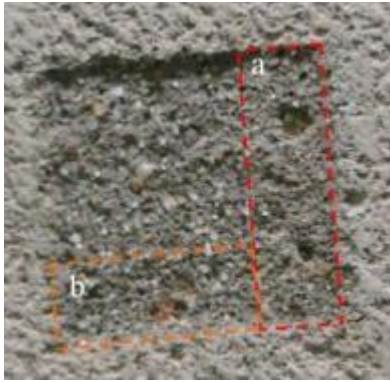
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	felt-méret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / felt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	52	- a lézer 20 impulzust követően, néhány ponton elérte a festékréteget, így a további pásztázásból kizártam az <i>a</i> , területet (54. a kép) - 43 impulzus után a <i>b</i> , területet (54. b kép) is kizártam a további pásztázásból - 46 impulzus után a <i>c</i> területet (54. c) is kizártam a további pásztázásból	

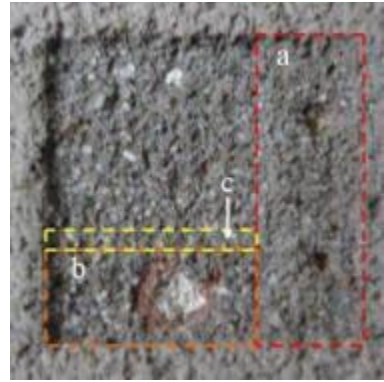
7. táblázat: A B_1_1 minta kísérleti paraméterei



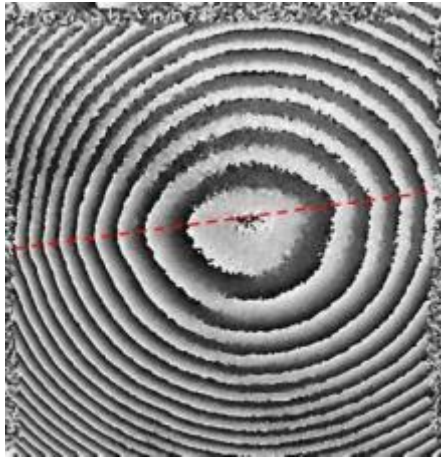
54. a, kép



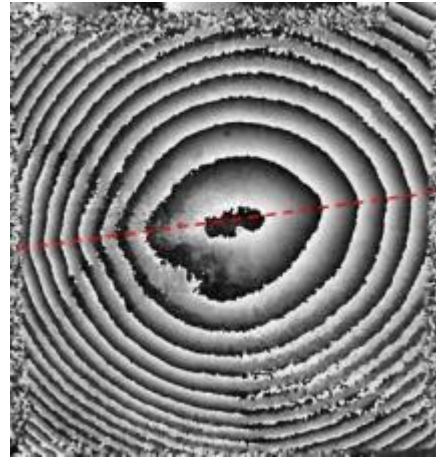
54. b, kép



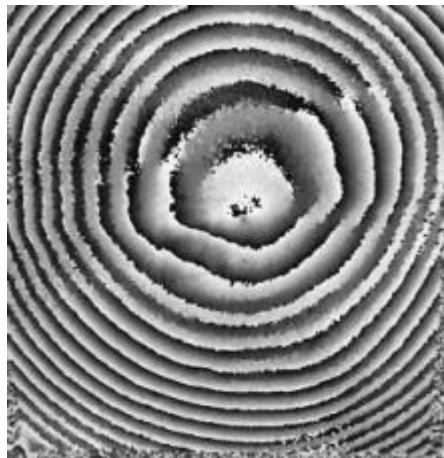
54. c, kép



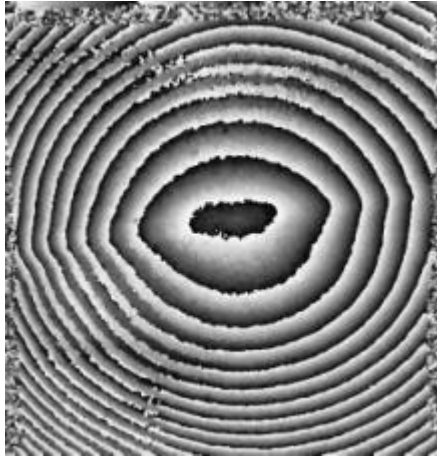
55. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5. kép



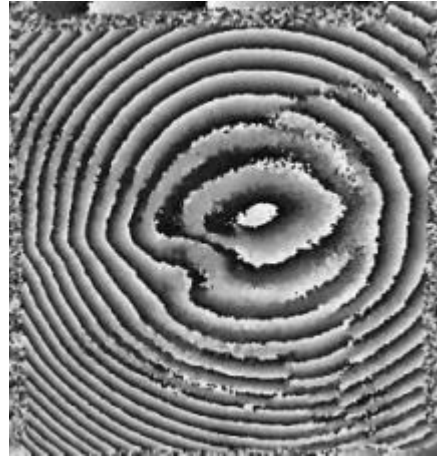
56. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 6. kép



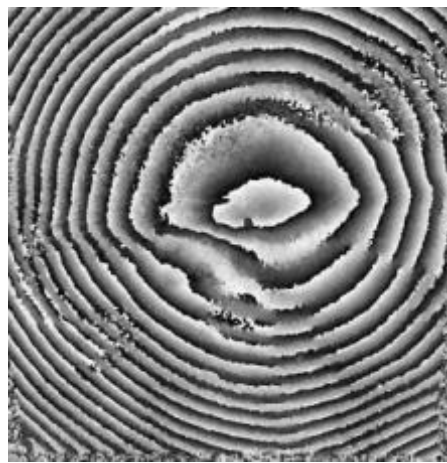
57. kép: B_1_1 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép



58. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 10. kép



59. kép: B_1_1 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 10. kép



60. kép: B_1_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 8. kép

Vizuális kiértékelés:

- A törött minta összeillesztése látszik a 15 s gerjesztéssel készült különbségi interferogramon.
- Az összeillesztés még egyértelműbben látszik azokon a különbségi interferogramokon, amelyek 30 s gerjesztéssel készültek.
- A különbségi interferogramokon látható a sérült terület is, amely az 54. c, képen a b, keretben látható.

B_1_2



61. kép: B_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



62. kép: B_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

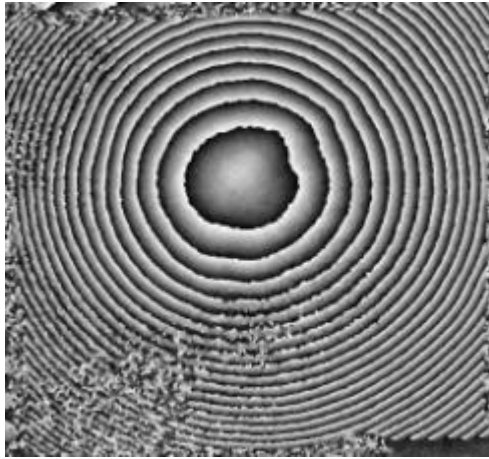
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	35	a lézer elérte a festékréteget, ami néhány helyen meg is sérült (63. kép)	

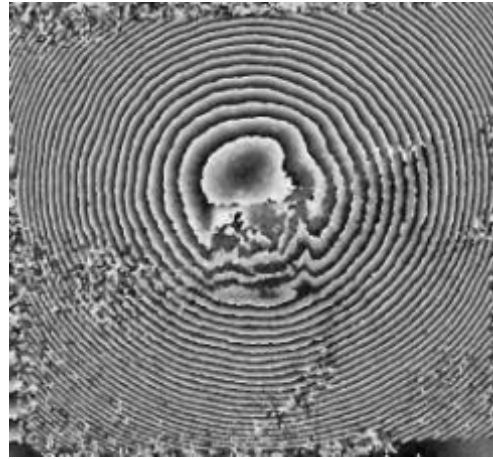
8. táblázat: B_1_2 minta kísérleti paraméterei



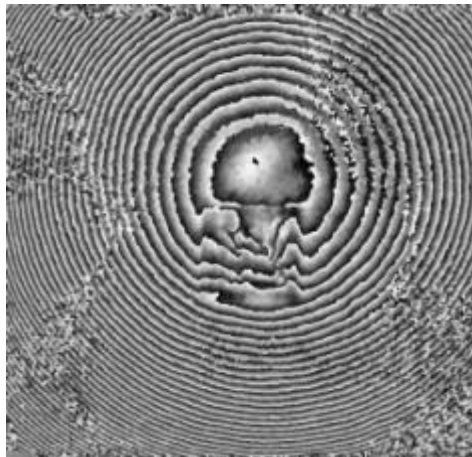
63. kép: B_1_2 minta lézerrel tisztított területe



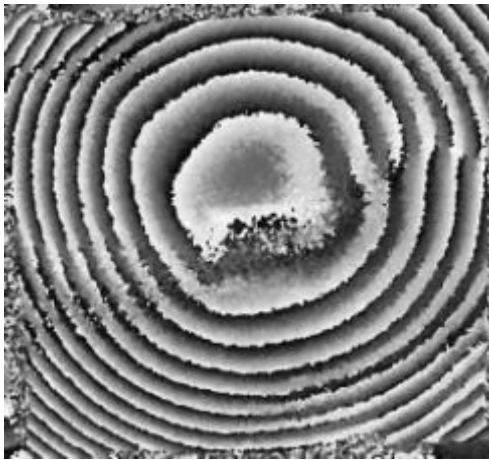
64. kép: B_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép



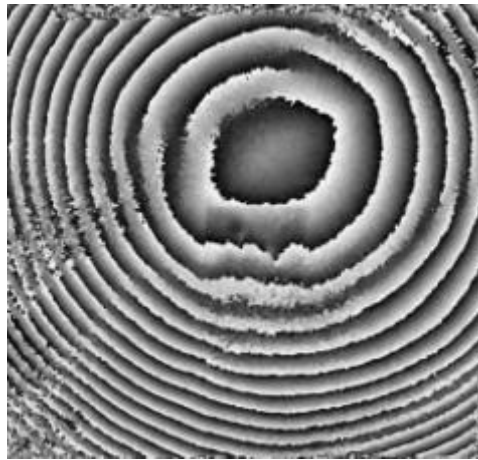
65. kép: B_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



66. kép: B_1_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



67. kép: B_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 6. kép



68. kép: B_1_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztések kevésbé egyértelműen látszanak a B_1_2 minta különbségi interferogramján, mint a B_1_1 mintánál, 15 s és 30 s gerjesztésnél egyaránt.

B_1_3



69. kép: B_1_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



70. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



71. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

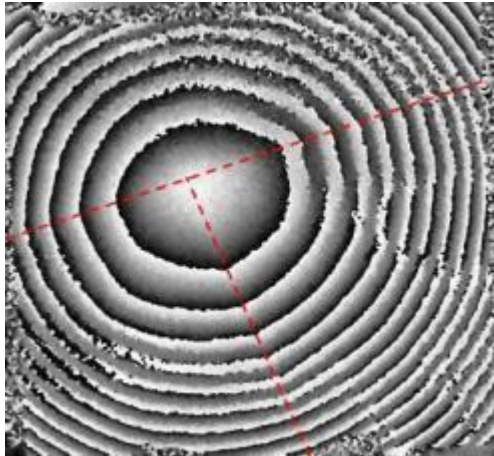
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	50	a tisztított terület közepe megsérült a lézeres tisztítás során (72. kép)	

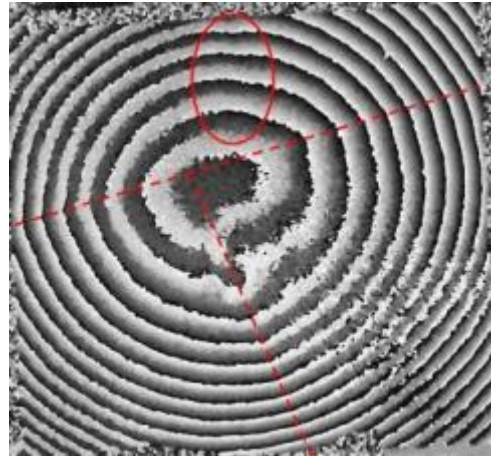
9. táblázat: B_1_3 minta kísérleti paraméterei



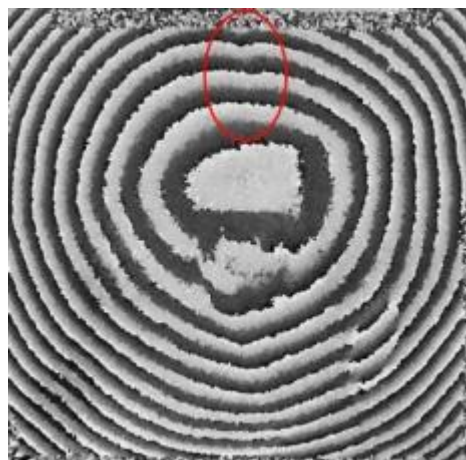
72. kép: B_1_3 minta lézerrel tisztított területe



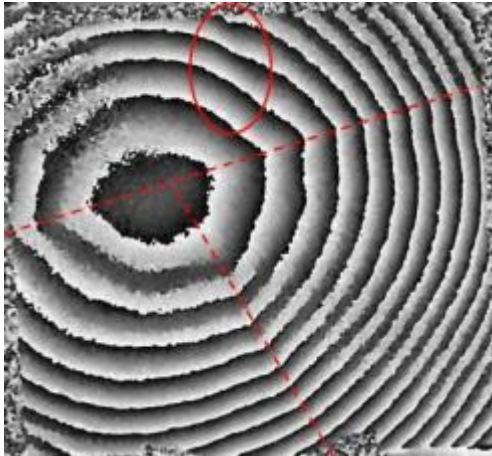
73. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5. kép



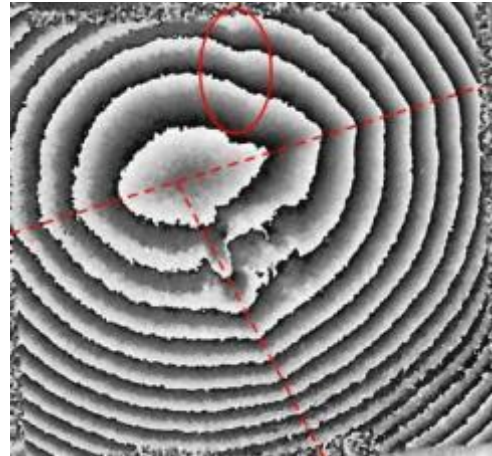
74. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép



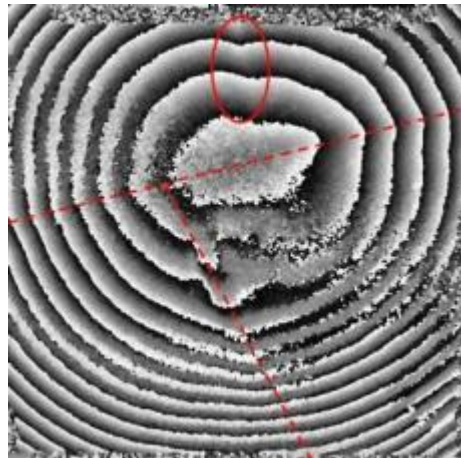
75. kép: B_1_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép



76. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 11. kép



77. kép: B_1_3 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 11. kép



78. kép: B_1_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 9. kép

Vizuális kiértékelés:

- A különbségi interferogramon jól látszanak az összeillesztések és egy olyan terület, ahol a csíkok meggömbültek. A 76. kép mutatja, hogy a meggömbült vonalak (és az ennek megfelelő szerkezeti inhomogenitás) a lézeres tisztítás előtt is jelen volt a mintában. Az a tény, hogy a meggömbült vonalak a hosszabb gerjesztés hatására erőteljesebben jönnek elő azt mutatja, hogy az elváltozás a minta felszínétől mélyebben rejtőzik. A szabad szemmel és mikroszkóppal történő megfigyelés nem mutatott elváltozásra utaló jelet azon a területen, ahol a meggömbült vonalak megjelentek.
- A különbségi interferogramon a meggömbült terület a lézeres tisztítás után egy kicsit hangsúlyosabb, de a meggömbült csíkok száma és a karakterük nem változott jelentősen.
- A csíkrendszer középpontja a geometrikus középpont felé mozdult az egy hónapos relaxálás közben.

BC_1_1



79. kép: BC_1_1 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



80. kép: BC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



81. kép: BC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

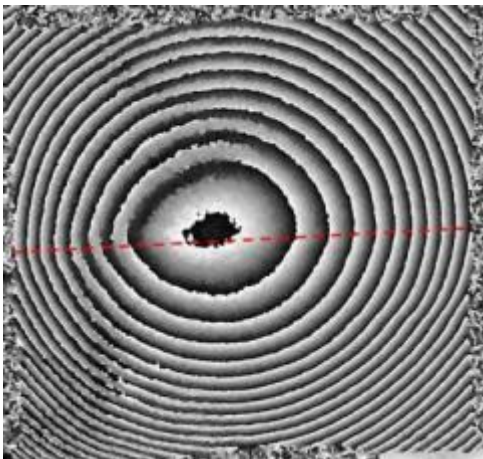
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	szár/ nedves	impulzus / folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	szár/az	23	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (82. kép)	

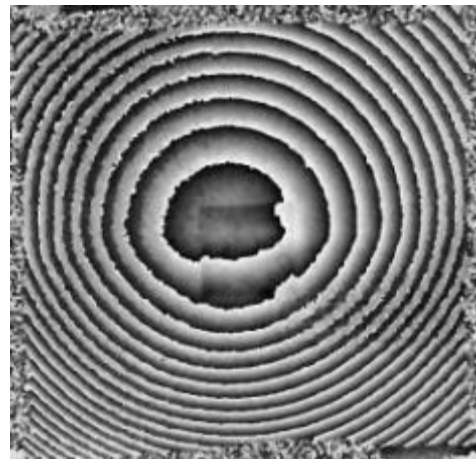
10. táblázat: BC_1_1 minta kísérleti paraméterei



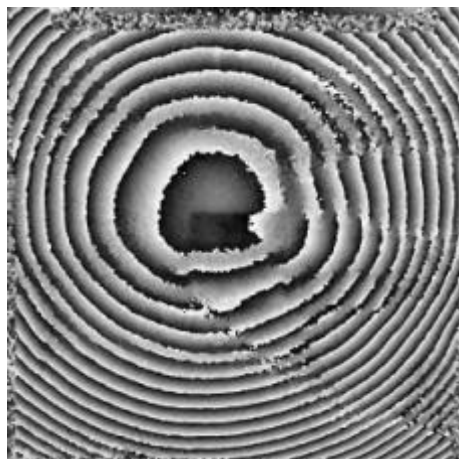
82. kép: BC_1_1 minta lézerrel tisztított területe



83. kép: BC_1_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép



84. kép: BC_1_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



85. kép: BC_1_1 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztés felismerhető, de nem annyira hangsúlyos, mint a nem szilárdított mintáknál.
- A csíkok általában egyenletesebbek, mint a nem szilárdított mintáknál.

BC_1_2



86. kép: BC_1_2 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



87. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



88. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

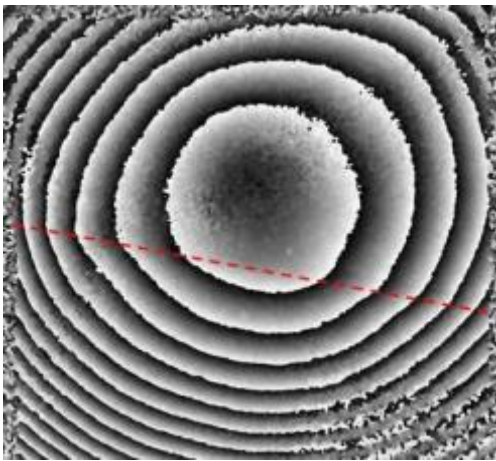
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	34	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (89. kép)	

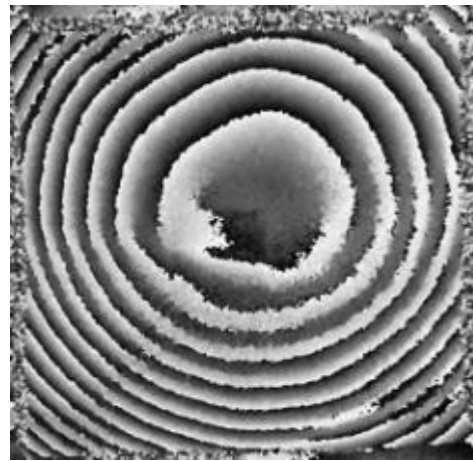
11. táblázat: BC_1_2 minta kísérleti paraméterei



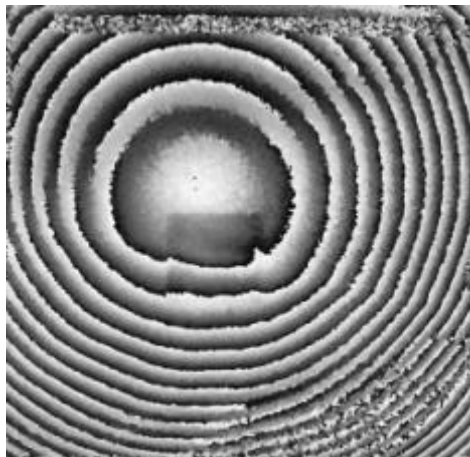
89. kép: BC_1_2 minta lézerrel tisztított területe



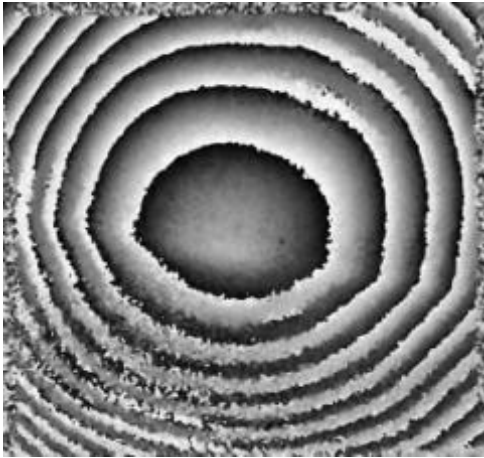
90. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5. kép



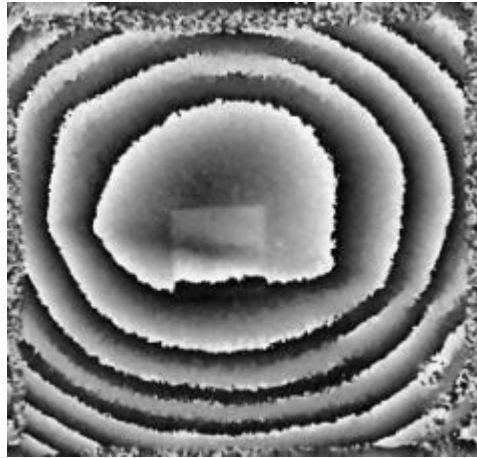
91. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép



92. kép: BC_1_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



93. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 11. kép



94. kép: BC_1_2 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 11. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztés felismerhető a különbségi interferogramokon, ami 30 s gerjesztéssel még hangsúlyosabb.
- A csíkok egyenletesek és nem mutatnak elváltozást.

BC_1_4



95. kép: BC_1_4 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



96. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



97. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

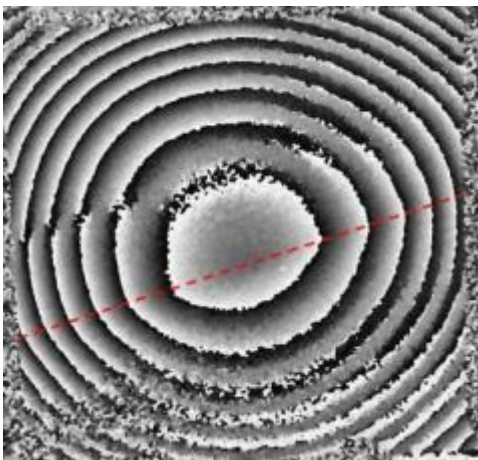
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- KrF lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órá, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
KrF 248 nm	2,2 mm x 0,9 mm	18 J/cm ²	száraz	48	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget és az összeillesztéshez használt gipszet, de a festékréteg nem sérült meg (98. kép)	

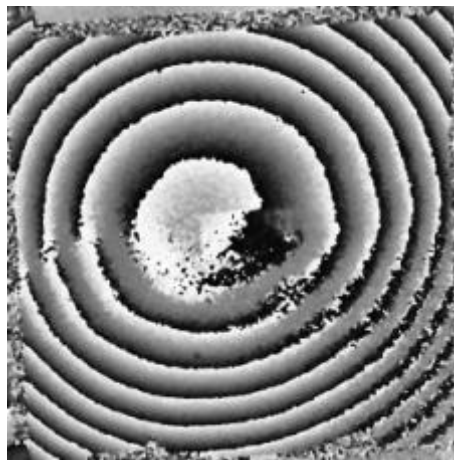
13. táblázat: BC_1_4 minta kísérleti paraméterei



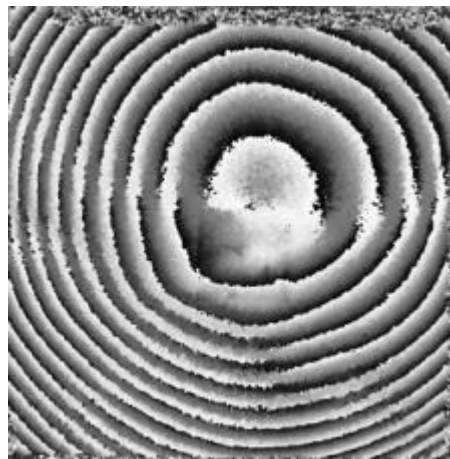
98. kép: BC_1_4 minta lézerrel tisztított területe



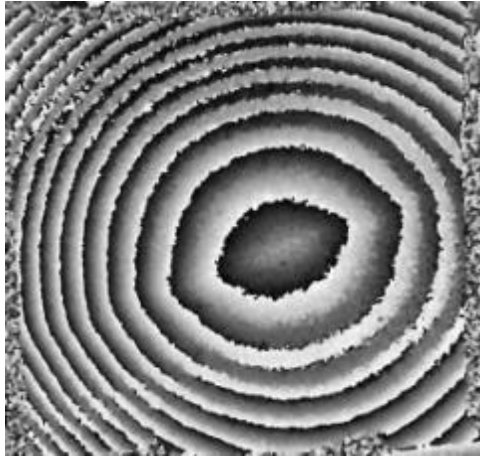
99. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5. kép



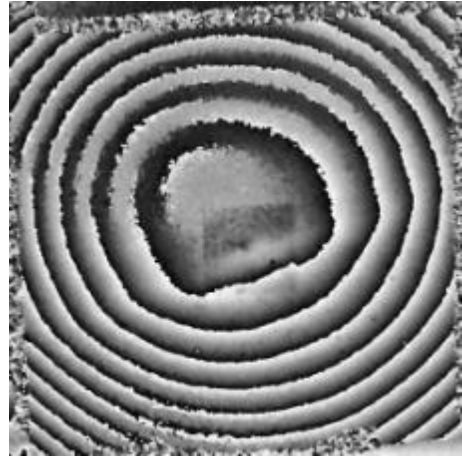
100. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 6. kép



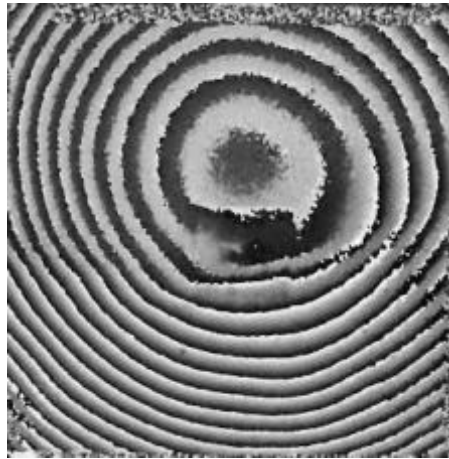
101. kép: BC_1_4 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 5. kép



102. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 9. kép



103. kép: BC_1_4 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 10. kép



104. kép: BC_1_4 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 8. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztés felismerhető a különbségi interferogramon
- A csíkrendszer középpontja felfelé mozdult el a relaxálás után.

I_2_1



105. kép: I_2_1 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



106. kép: I_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



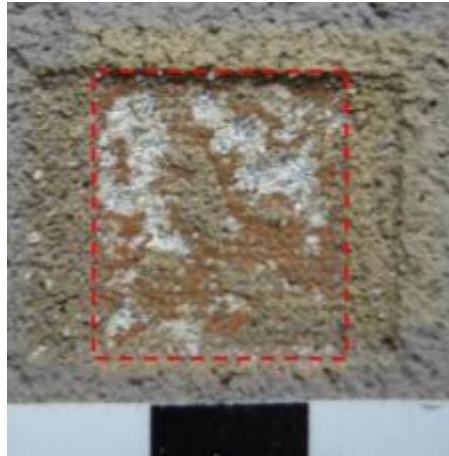
107. kép: I_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

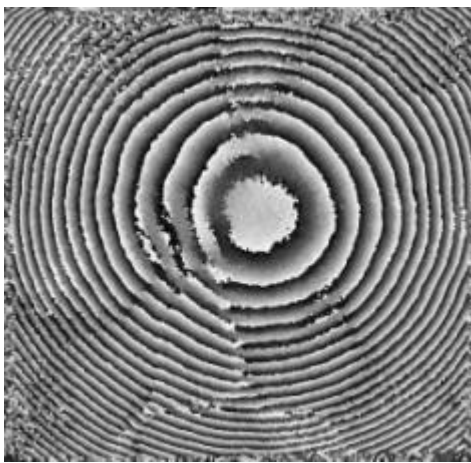
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	18 J/cm ²	száraz	40	- Az első pásztázás (20 impulzussal) után a tisztított területet lecsökkentettem a 108. képen bekeretezett területre - a harmadik pásztázás után (összesen 40 impulzus) a festékréteg megsérült (108. kép)	

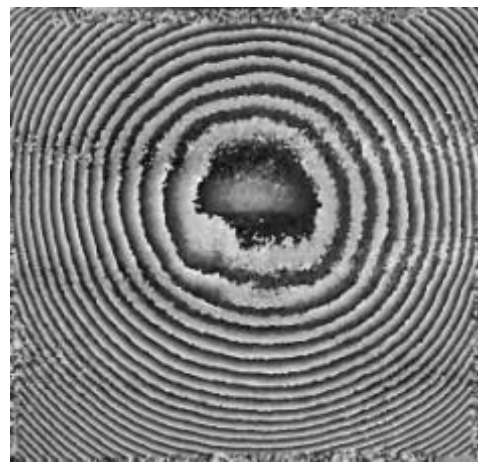
14 táblázat: I_2_1 minta kísérleti paraméterei



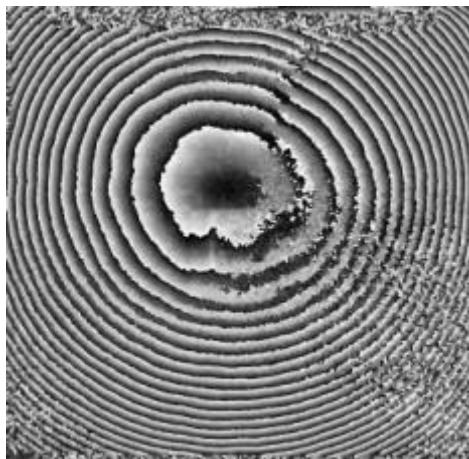
108. kép: I_2_1 minta lézerrel tisztított területe



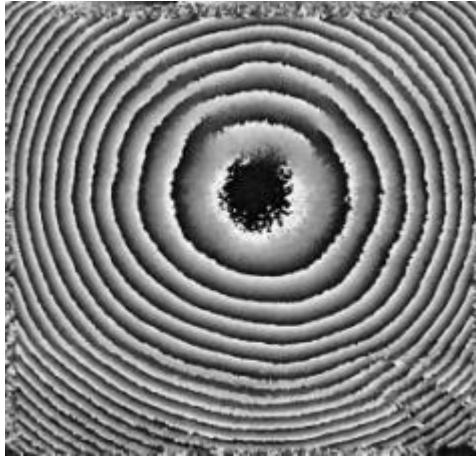
109. kép: I_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép zajos különbségi interferogram



110. kép: I_2_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép



111. kép: I_2_1 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép



112. kép: I_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, 10 s gerjesztés, 2. kép

Vizuális kiértékelés:

- A csíkrendszer sima (kivéve a zajos területeket), nem mutat elváltozást
- A lézeres tisztítástól a festékréteg nagy területen megsérült, valamint a tisztított felület „raszteres”

I_2_2



113. kép: I_2_2 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



114. kép: I_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



115. kép: I_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

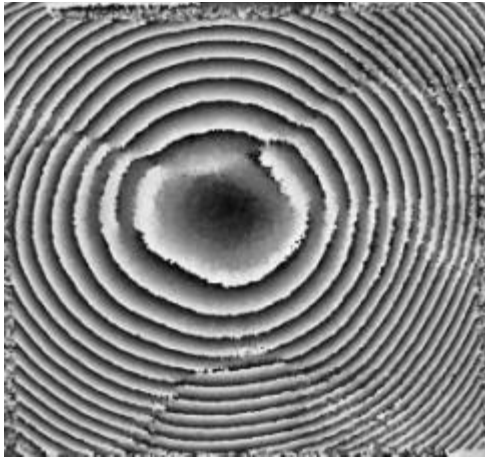
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órával, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17 J/cm ²	száraz	30	a festékréteg megsérült (116. kép)	

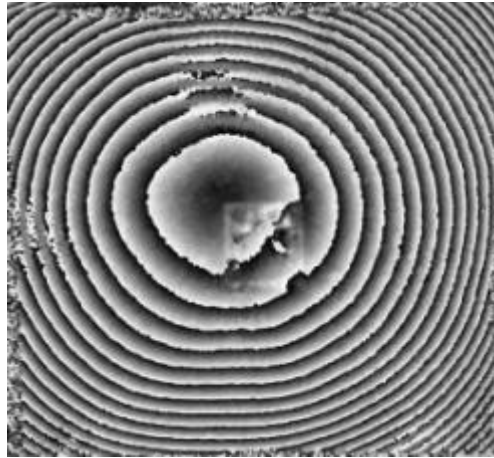
15. táblázat: I_2_2 minta kísérleti paraméterei



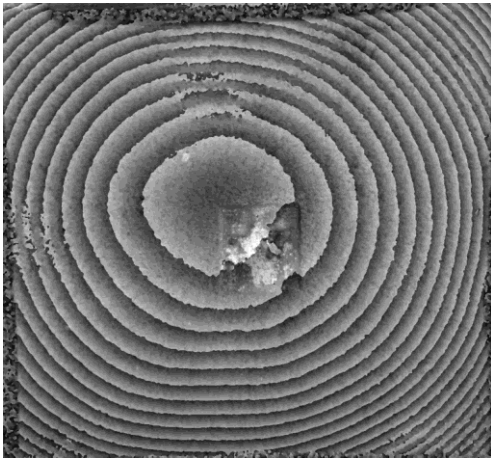
116. kép: I_2_2 minta lézeres tisztított területe



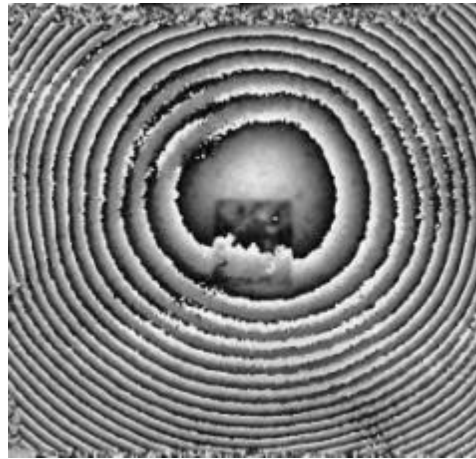
117. kép: I_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 3. kép



118. kép: I_2_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép a festékréteg megsérült



119. kép: I_2_2 minta, a mintáról a lézeres tisztítás után készült kép és interferogram egymásra helyezve, 15 s gerjesztés, 3. kép



120. kép: I_2_2 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép

Vizuális kiértékelés:

- A csíkrendszer sima (kivéve a zajos területeket), nem mutat elváltozást
- A lézeres tisztítástól a festékréteg nagy területen megsérült, valamint a tisztított felület „raszteres”

I_2_3



121. kép: I_2_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



122. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



123. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

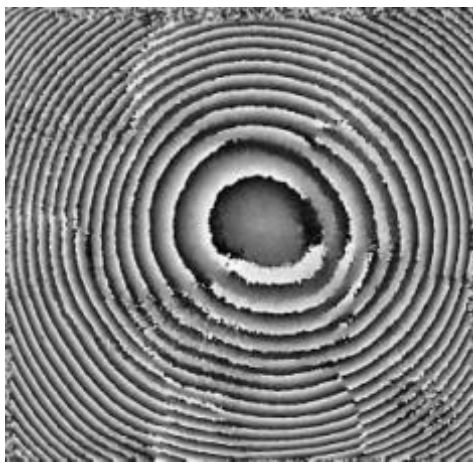
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17 J/cm ²	száraz	41	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (124. kép)	

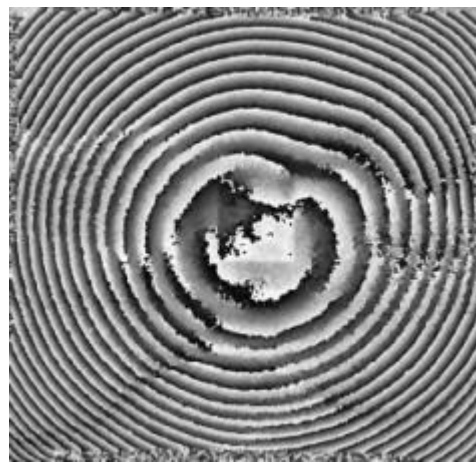
16. táblázat: I_2_3 minta kísérleti paraméterei



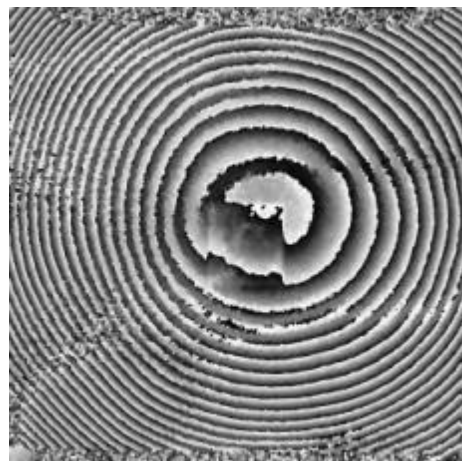
124. kép: I_2_3 minta lézerrel tisztított területe



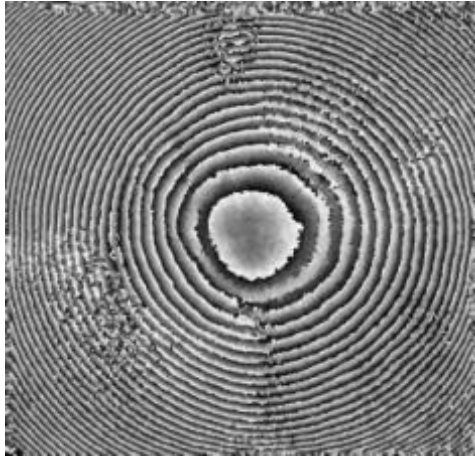
125. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 3. kép



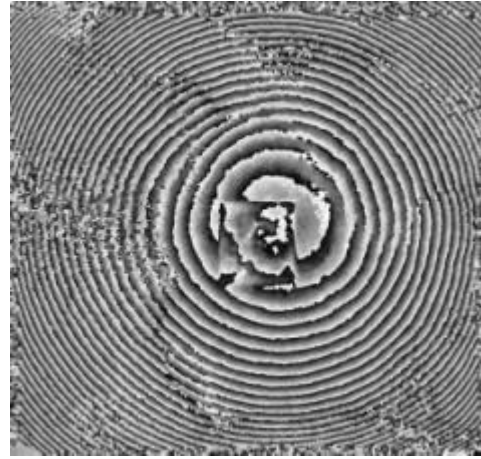
126. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



127. kép: I_2_3 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



128. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, 10 s gerjesztés, 1. kép



129. kép: I_2_3 minta lézeres tisztítás után, 10 s gerjesztés, 1. kép

Vizuális kiértékelés:

- A csíkrendszer sima (kivéve a zajos területeket), nem mutat elváltozást
- A felületre jutó Nd:YAG lézer impulzusok teljes száma gyakorlatilag ugyanannyi, vagy több mint a I_2_1 és I_2_2 mintáknál, de ezek több, kevesebb impulzusos pásztázás alatt jutottak a mintára. Így a mintát érő hő terhelés kisebb lett és a festékréteg nem károsodott.

IC_4_1



130. kép: IC_4_1 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



131. kép: IC_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



132. kép: IC_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

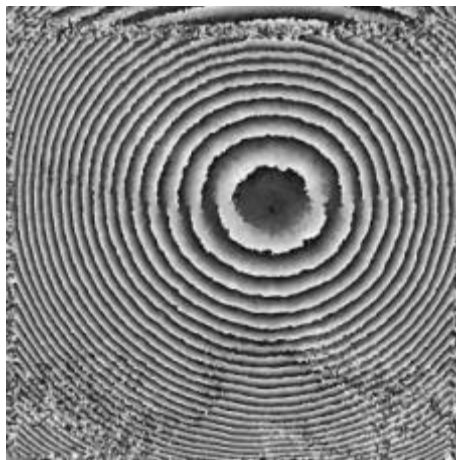
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/nedves	impulzus/folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17 J/cm ²	száraz	30	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (133. kép)	

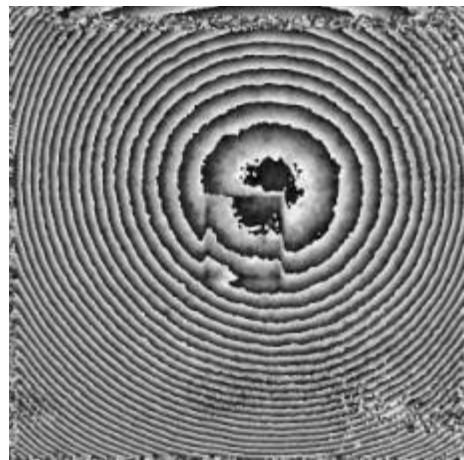
17. táblázat: IC_4_1 minta kísérleti paraméterei



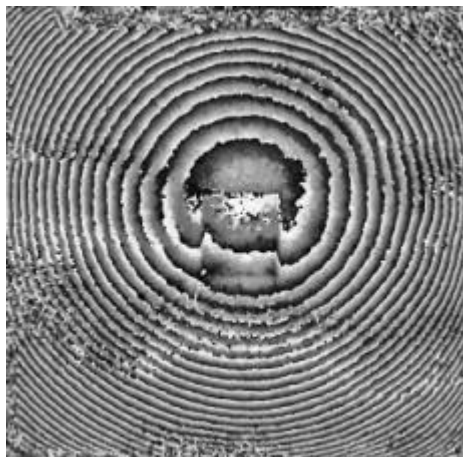
133. kép: IC_4_1 minta lézerrel tisztított területe



134. kép: IC_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 1. kép



135. kép: IC_4_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



136. kép: IC_4_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép

Vizuális kiértékelés:

- A különbségi interferogramok nem mutatnak helyi elváltozásokat kivéve a tisztított területnek megfelelő helyen.
- A festékréteg nem sérült meg

IC_4_2



137. kép: IC_4_2 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



138. kép: IC_4_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



139. kép: IC_4_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paramétere:

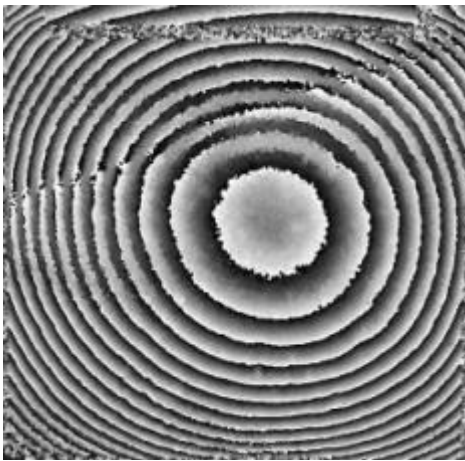
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,2 J/cm ²	száraz	25	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (140. kép)	az első pásztázás (10 impulzussal) 5%-a után új referencia interferogramot vettem föl

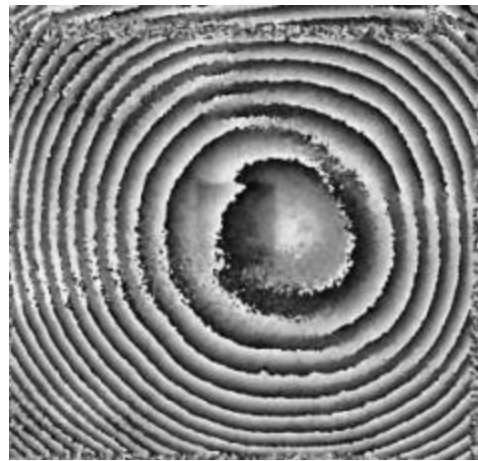
18. táblázat: IC_4_2 minta kísérleti paramétere



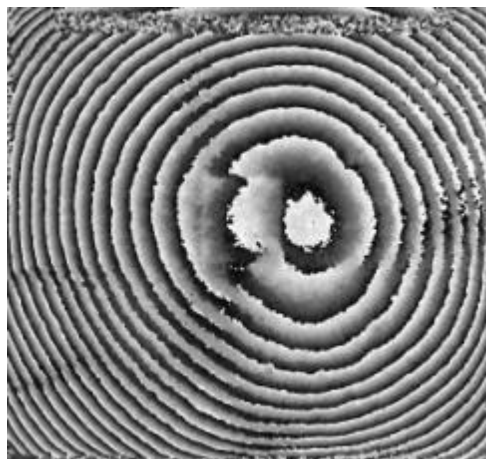
140. kép: IC_4_2 minta lézerrel tisztított területe



141. kép: IC_4_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép



142. kép: IC_4_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



143. kép: IC_4_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép

Vizuális kiértékelés:

- A különbségi interferogramok nem mutatnak helyi elváltozásokat kivéve a tisztított területnek megfelelő helyen.
- A festékréteg nem sérült meg

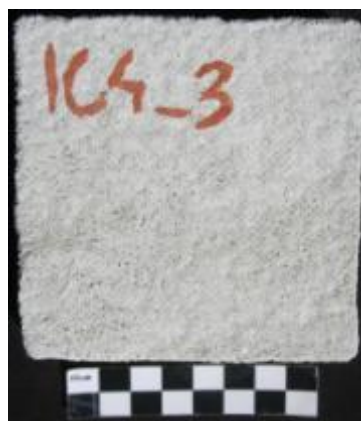
IC_4_3



144. kép: IC_4_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



145. kép: IC_4_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



146. kép: IC_4_3 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

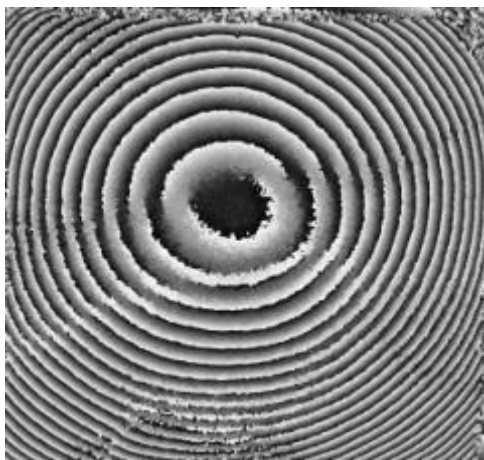
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,2 J/cm ²	száraz	25	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (147. kép)	

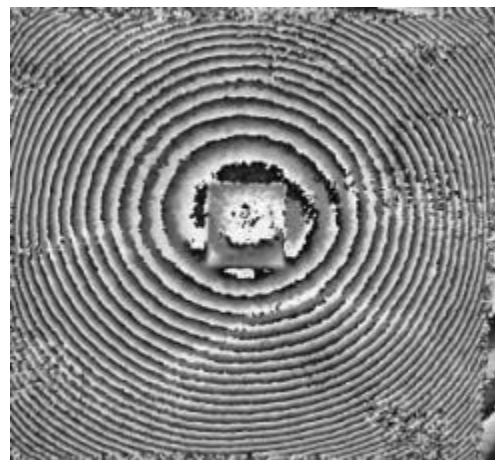
19. táblázat: IC_4_3 minta kísérleti paraméterei



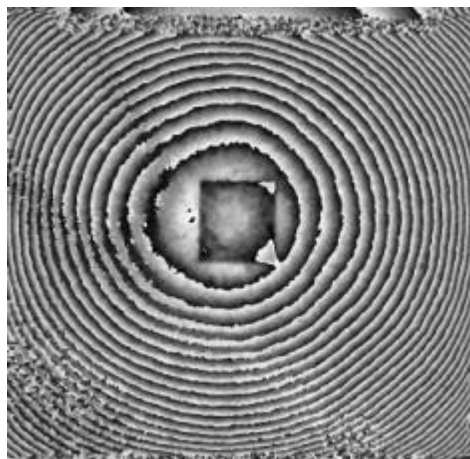
147. kép: IC_4_3 minta lézerrel tisztított területe



148. kép: IC_4_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép



149. kép: IC_4_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép



150. kép: IC_4_3 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 1. kép

Vizuális értékelés:

- A különbségi interferogramok nem mutatnak helyi elváltozásokat kivéve a tisztított területnek megfelelő helyen.
- A festékréteg nem sérült meg

B_4_1



151. kép: B_4_1 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



152. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



153. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

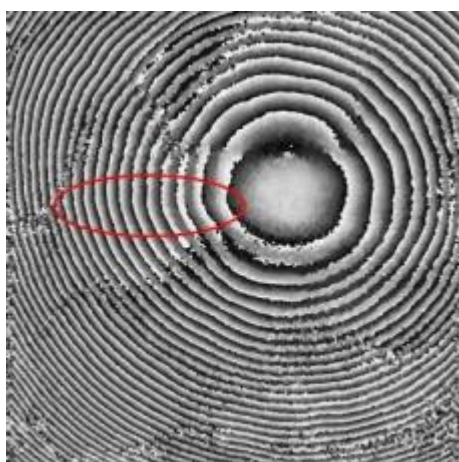
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,5 J/cm ²	száraz	40	a festékréteg megsérült (154. kép)	Az első pásztázás (20 impulzussal) 2%-a után új referencia interferogramot vettünk föl

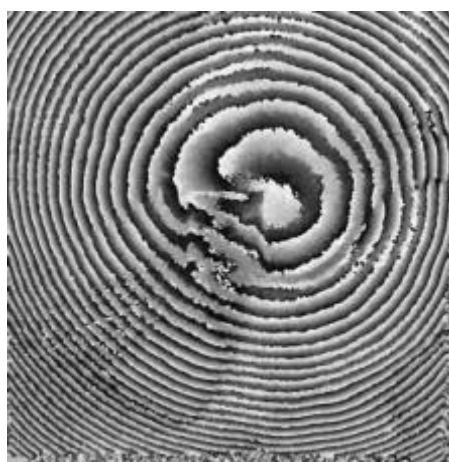
20. táblázat: B_4_1 minta kísérleti paraméterei



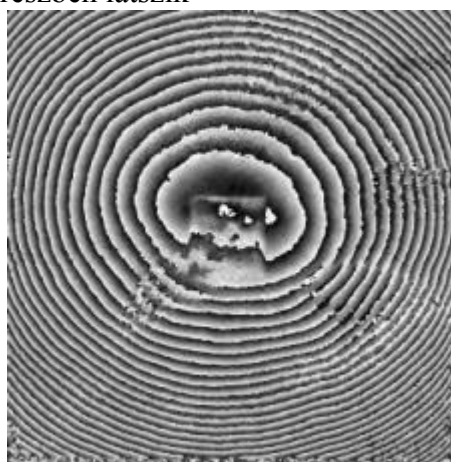
154. kép: B_4_1 minta lézerrel tisztított területe



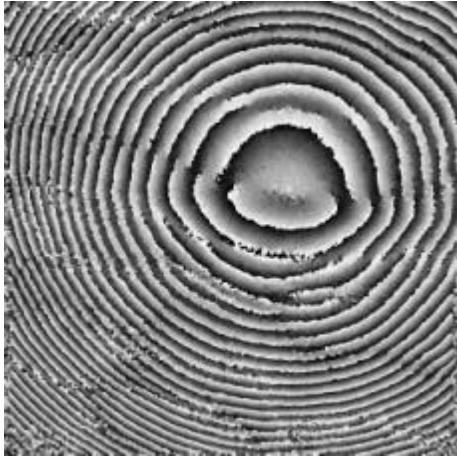
155. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép
Az összeillesztés csak részben látszik



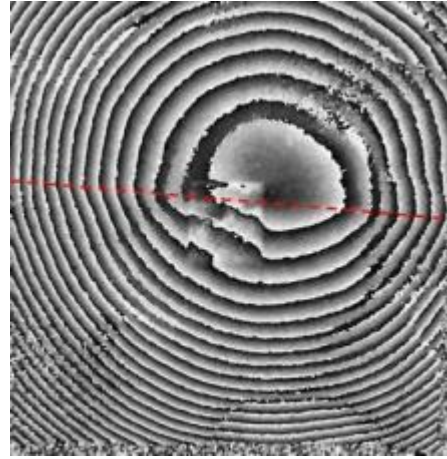
156. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép



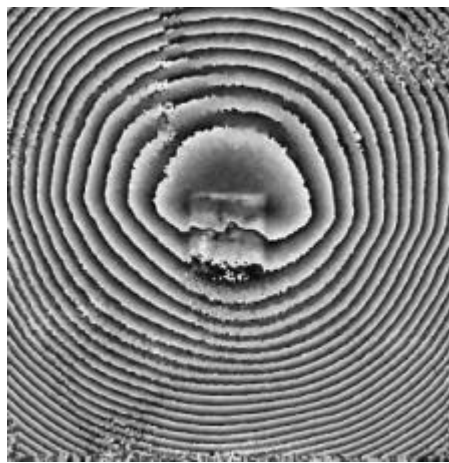
157. kép: B_4_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 2. kép



158. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 6. kép



159. kép: B_4_1 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 6. kép



160. kép: B_4_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 6. kép

Vizuális értékelés:

- A törött minta összeillesztése részben látható azon a különbségi interferogramon, ami 15 s gerjesztéssel készült és jól látszik azokon, amelyek 30 s gerjesztéssel készültek.
- A tisztított területen a festékréteg megsérült.

B_2_2



161. kép: B_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



162. kép: B_2_2minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

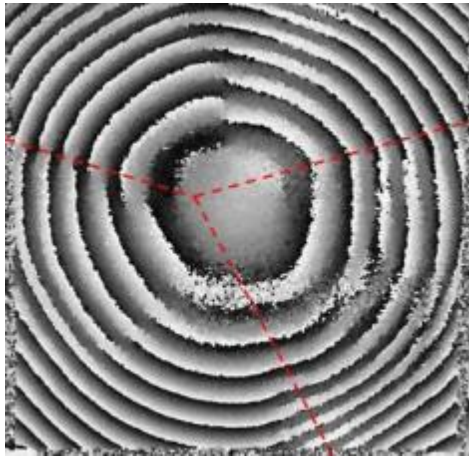
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,5 J/cm ²	száraz	60	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (163. kép)	

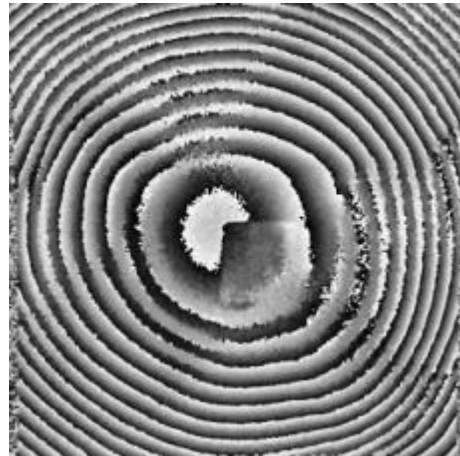
21. táblázat: B_2_2 minta kísérleti paraméterei



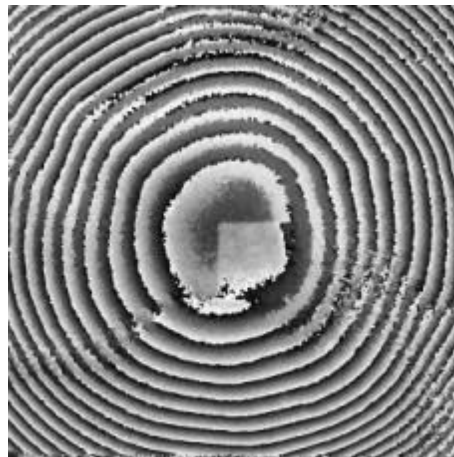
163. kép: B_2_2 minta lézerrel tisztított területe



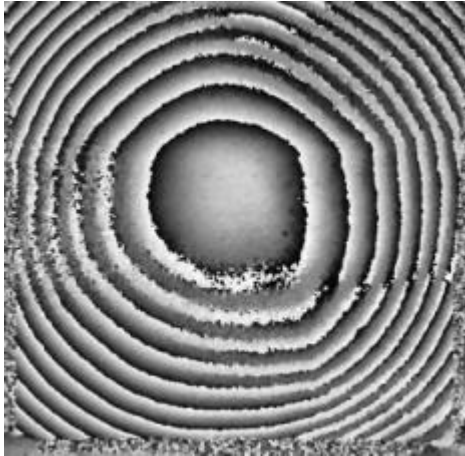
164. kép: B_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 6. kép



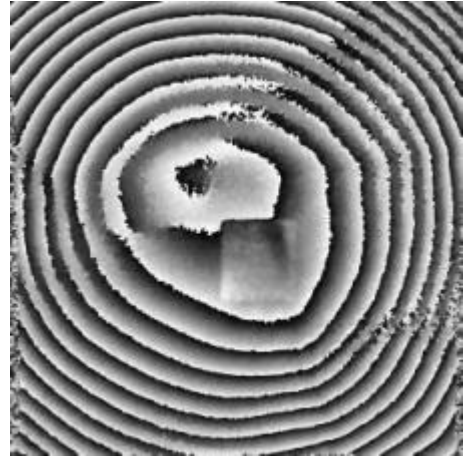
165. kép: B_2_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



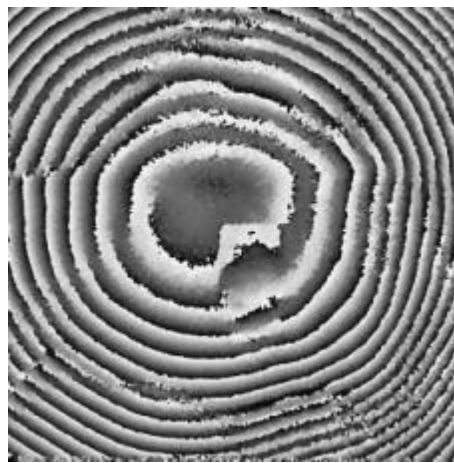
166. kép: B_2_2 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



167. kép: B_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 9. kép



168. kép: B_2_2 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 9. kép



169. kép: B_2_2 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 9. kép

Vizuális értékelés:

- Az összeillesztések jól láthatóak a különbségi interferogramokon.
- A különbségi interferogramok zajosak, de nem mutatnak olyan elváltozást, amit a lézeres tisztításnak tulajdoníthatnánk.
- A festékréteg nem sérült meg a tisztított területnél.

B_2_3



170. kép: B_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



171. kép: B_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet

A kísérlet lépései és paraméterei:

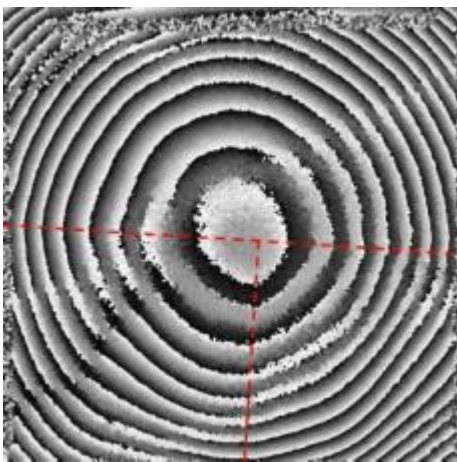
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	szár/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,5 J/cm ²	szár/az	40	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget és a gipszet, de a festékréteg nem sérült meg (172. kép)	a CCD megsérült, szürke kereszt látható a tisztítás után készült képeken (174. kép)

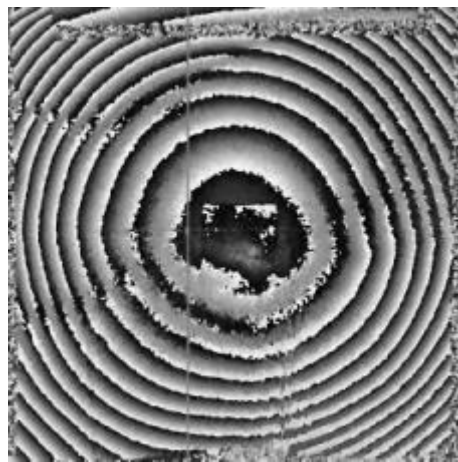
22. táblázat: B_2_3 minta kísérleti paraméterei



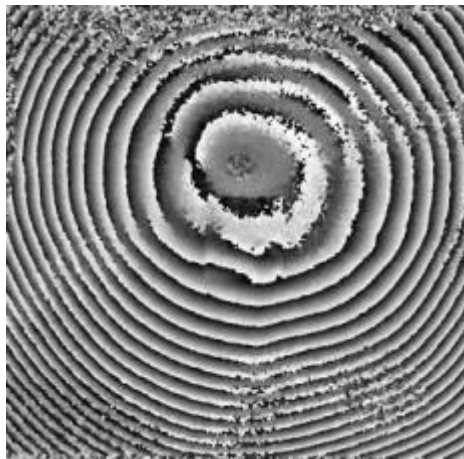
172. kép: B_2_3 minta lézerrel tisztított területe



173. kép: B_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 4. kép



174. kép: B_2_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



175. kép: B_2_3 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztések jól láthatóak a különbségi interferogramokon.
- A különbségi interferogramok zajosak, de nem mutatnak olyan elváltozást, amit a lézeres tisztításnak tulajdoníthatnánk.
- A festékréteg nem sérült meg a tisztított területnél.

BC_2_1



176. kép: BC_2_1 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



177. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



178. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

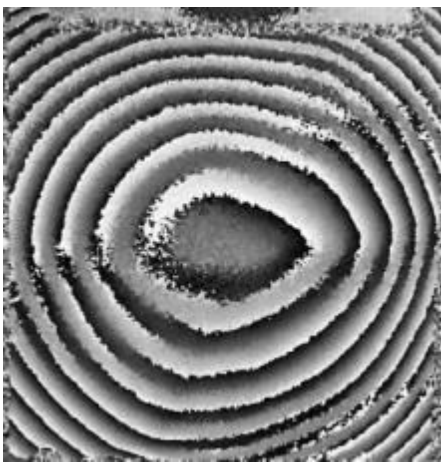
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,5 J/cm ²	száraz	66	a lézer néhány ponton elérte a festékréteget, de az nem sérült meg (179. kép)	az első pásztázás (10 impulzussal) után új referencia interferogramot vettem föl

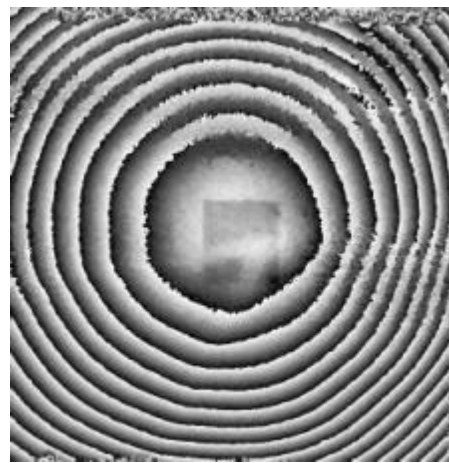
23. táblázat: BC_2_1 minta kísérleti paraméterei



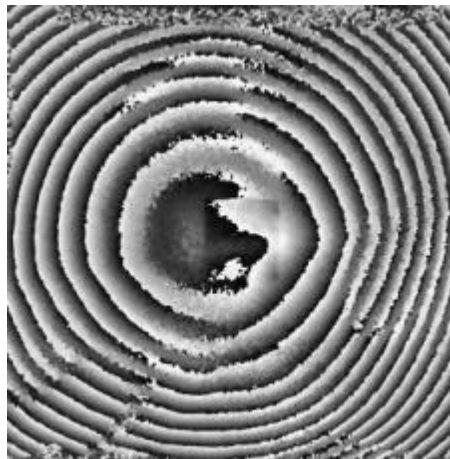
179. kép: BC_2_1 minta lézerrel tisztított területe



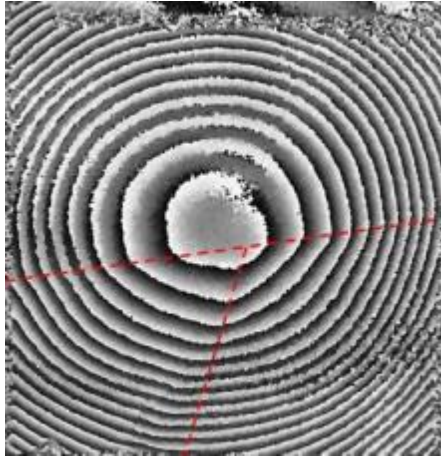
180. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 5. kép



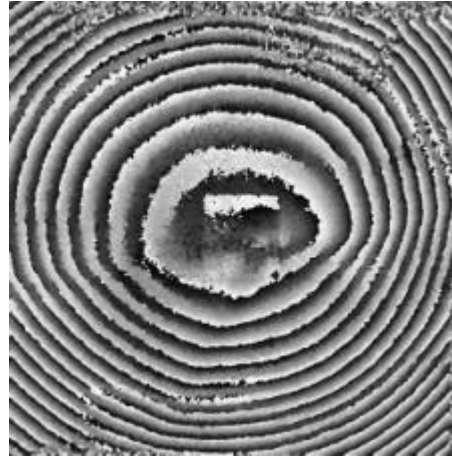
181. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



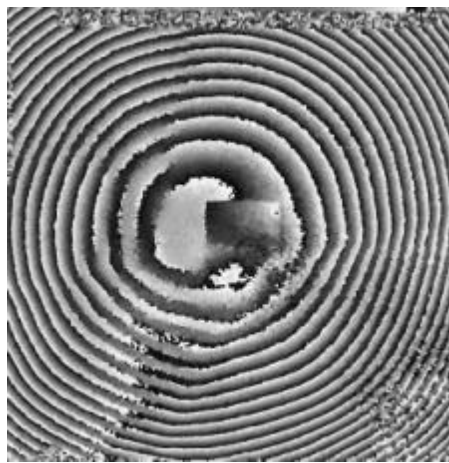
182. kép: BC_2_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



183. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 5. kép



184. kép: BC_2_1 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 6. kép



185. kép: BC_2_1 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 5. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztések jól láthatóak a különbségi interferogramokon.
- A különbségi interferogramok nem mutatnak olyan elváltozást, amit a lézeres tisztításnak tulajdoníthatnánk.
- A festékréteg nem sérült meg a tisztított területnél

BC_2_2



186. kép: BC_2_2 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



187. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet



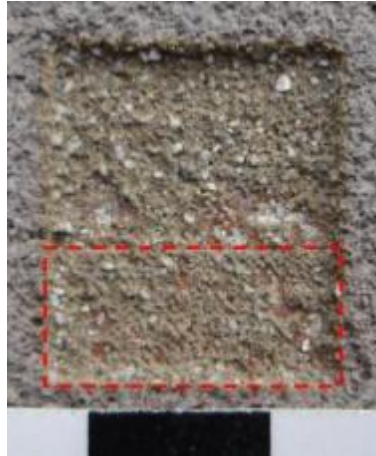
188. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, hátoldal

A kísérlet lépései és paraméterei:

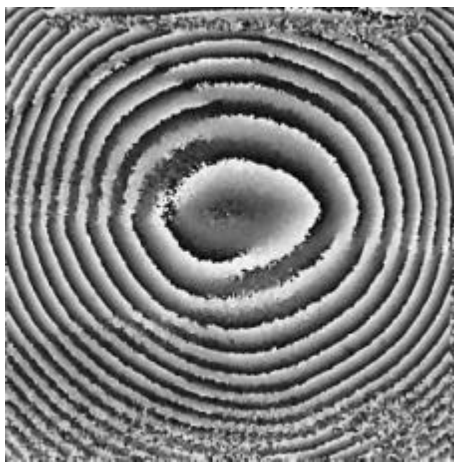
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órás, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	foltméret	Energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus/ folt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1 mm x 1,1 mm	17,2 J/cm ²	száraz	49	44 impulzus után a lézer elérte a festékréteget, ami egy helyen megsérült, így a 189. képen bekeretezett terület kizártam a további pásztázásból	

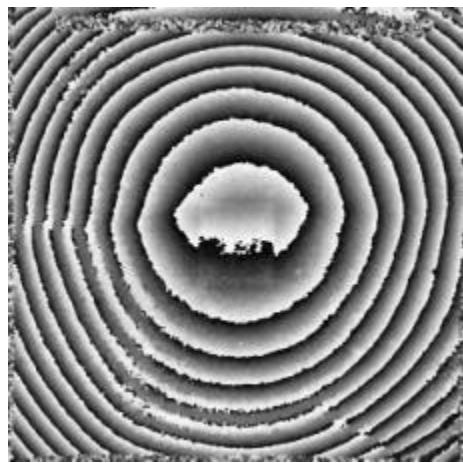
24. táblázat: BC_2_2 minta kísérleti paraméterei



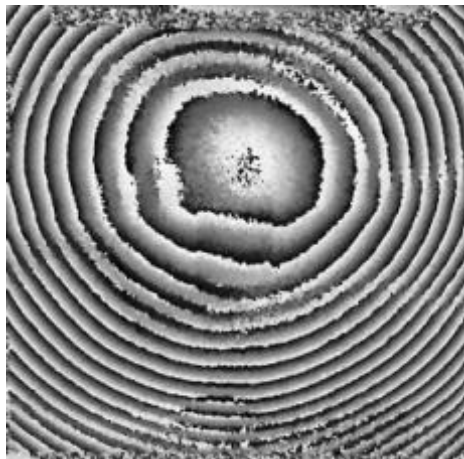
189. kép: BC_2_2 minta lézerrel tisztított területe



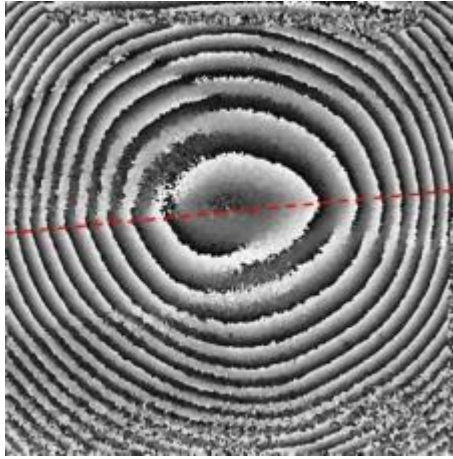
190. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 3. kép



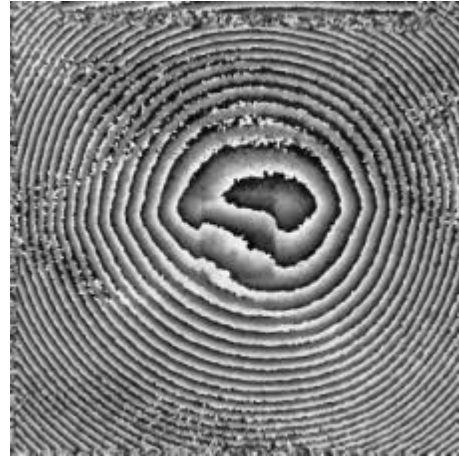
191. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



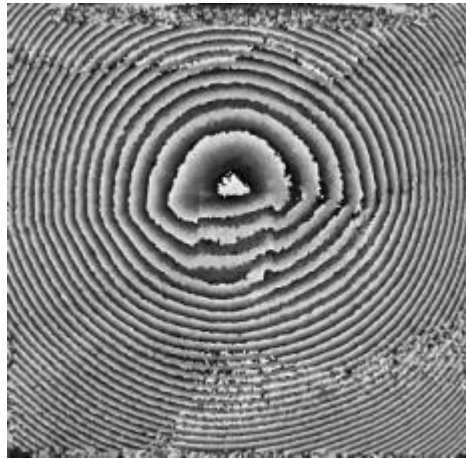
192. kép: BC_2_2 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 4. kép



193. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 3. kép



194. kép: BC_2_2 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 3. kép



195. kép: BC_2_2 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 3. kép

Vizuális kiértékelés:

- Az összeillesztés jól látható a különbségi interferogramon
- A különbségi interferogramok nem mutatnak olyan elváltozást, amit a lézeres tisztításnak tulajdoníthatnánk

BC_2_3

A pásztázás alatt fellépő bonyodalmak miatt ezt a mintát kihagytuk a numerikus kiértékelésből



196. kép: BC_2_3 minta a szennyeződés felhordása előtt, előlnézet



197. kép: BC_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, előlnézet

A kísérlet lépései és paraméterei:

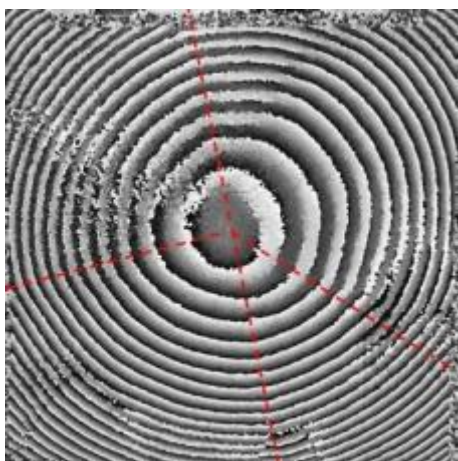
- DHSPI mérések lézeres tisztítás előtt: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s
- Nd:YAG lézeres tisztítás folyamatos DHSPI megfigyeléssel
- A minta relaxálásának 1 órási, folyamatos DHSPI megfigyelése a lézeres tisztítást követően
- DHSPI mérések lézeres tisztítás után: gerjesztés IR lámpákkal 5 s, 10 s, 15 s, 30 s

lézer hullám-hossz	felt-méret	energia-sűrűség	száraz/ nedves	impulzus / felt	lézeres tisztítás megjegyzések	DHSPI megjegyzések
Nd:YAG 1064 nm	1mm x 1,1mm	17 J/cm ²	száraz	65	- áramszünet következtében, a pásztázás közben leállt a lézer - pásztázási hiba - a tisztított terület 3 részletben lett pásztázva - a lézer elérte a festékréteget és a gipszet (198. kép)	áramszünet következtében a rendszer leállt a folyamat közben

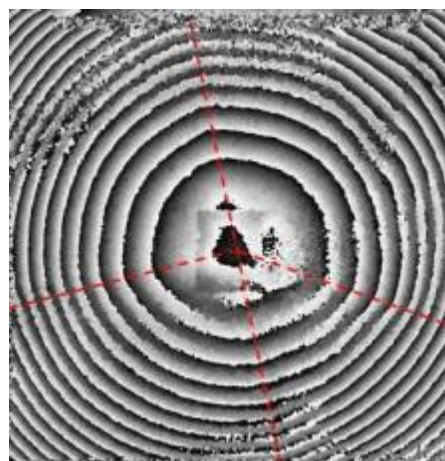
25. táblázat: BC_2_3 minta kísérleti paraméterei



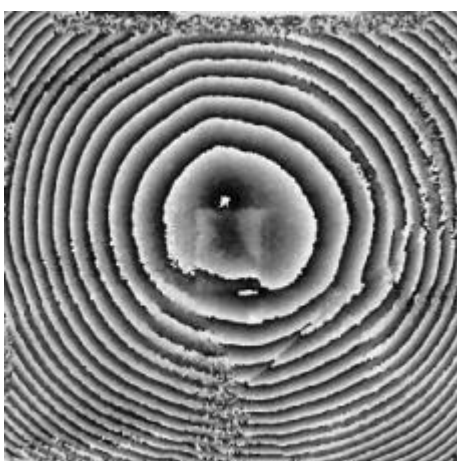
198. kép: BC_2_3 minta lézerrel tisztított területe



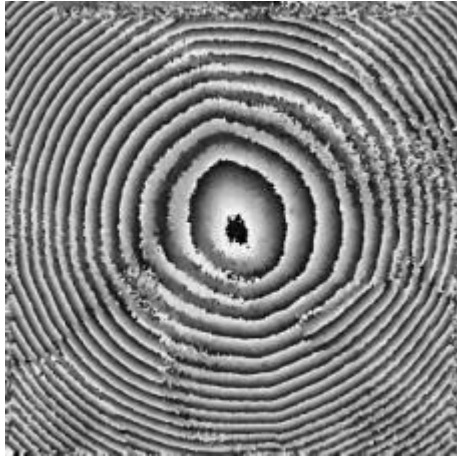
199. kép: BC_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, 15 s gerjesztés, 2. kép



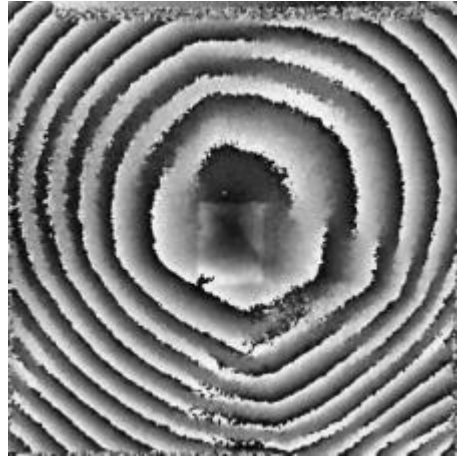
200. kép: BC_2_3 minta lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



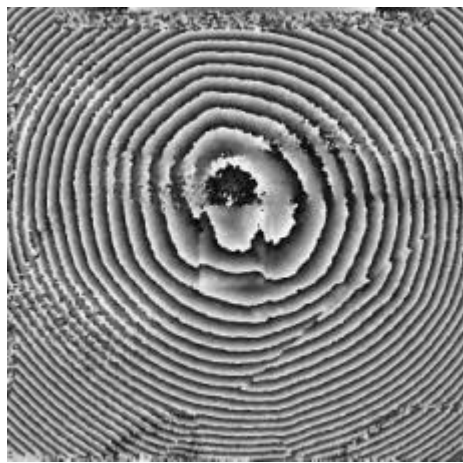
201. kép: BC_2_3 minta, 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 15 s gerjesztés, 3. kép



202. kép: BC_2_3 minta lézeres tisztítás előtt, 30 s gerjesztés, 4. kép



203. kép: BC_2_3 minta lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 9. kép



204. kép: BC_2_3 minta 1 hónappal a lézeres tisztítás után, 30 s gerjesztés, 4. kép



205. kép: A BC_2_3 a lézeres tisztítás és a DHSPI megfigyelés után eltört
A lézeres tisztítás és DHSPI mérések előtt a mintát átneveztem BC_1_5-ről BC_2_3-ra

Vizuális kiértékelés:

- Mivel a lézeres tisztítás közben és után is több olyan eset történt, ami befolyásolta a folyamatot, így nem jutottam összehasonlítható eredményekhez és ezt a mintát kihagytam a kiértékelésből

Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Márton Zsuzsannának, aki az elmúlt években a jelentős szakmai segítség mellett, számos módon segítette a munkámat, bátorított, motivált, terelgetett.

Megköszönöm restaurátor témavezetőmenk, Menráth Péternek, valamint a Restaurátor Tanszék tanárainak a szakmai segítséget, hasznos tanácsokat.

Köszönettel tartozom a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetének, hogy lehetőséget nyújtottak a kísérleteim elvégzéséhez. („A Dél-Dunántúli régió egyetemi versenyképességének fejlesztése, TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0002”)

Hálás vagyok a krétai FORTH intézet munkatársainak, elsősorban Paraskevi Pouli-nak és Vivi Tornari-nak, hogy a kísérleteim elvégzéséhez használhattam az eszközeiket, csoportjaik befogadtak és segítettek a munkámat. (LASERLAB-EUROPE ULF-FORTH 228334, és ULF-FORTH 001880)

Köszönettel tartozom a pécsi Janus Panonius Múzeum Régészeti osztályának, a székesfehérvári Szent István Király Múzeum Tudományos Osztályvezetőjének, Nádorfi Gabriellának valamint Bóna Istvánnak a kísérleteimhez használt eredeti falképtörödékekért.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem laboratóriumának a mechanikai tesztek elvégzésében nyújtott közreműködésükért.

Köszönöm a családomnak, a barátaimnak és kollégáimnak a türelmet és a biztatást.

Irodalomjegyzék

- [1] J. F. Asmus, G. Guattari, L. Lazzarini, G. Musumeci and R. F. Wuerker, "Holography in the conservation of statuary," *Studies in Conservation*, vol. 18, pp. 49-63, 1973.
- [2] C. Fotakis, D. Angelos, V. Zafiropoulos, S. Georgiou and V. Tornari, *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage; Principles and applications*, Boca Raton: CRC Press Taylor&Francis Group, 2007.
- [3] <http://www.quantasystem.com/en/art/>. [2015. 08. 10].
- [4] <http://www.lightforart.com/en/>. [2015. 08. 10].
- [5] <http://www.conservationlasers.com/>. [2015. 08. 10].
- [6] D. Saunders, M. Strlic, C. Korenberg, N. Luxford and K. Birkhölzer, *Lasers in the Conservation of Artworks IX*, London: Archetype Publications Ltd, 2013.
- [7] R. Radvan, J. F. Asmus, M. Castillejo, P. Pouli and A. Nevin, *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*, London: Taylor & Francis Group, 2011.
- [8] I. Kisapáti, *Lézeres tisztítás festett kőfelületeken - szakdolgozat*, Budapest: MKE, 2007.
- [9] Z. Márton, *A grafit ArF lézeres ablációjának mechanizmusa atomi erő mikroszkópos, gyorsfényképezéses és részecske mobilitás méréses vizsgálatok tükrében - doktori értekezés*, Pécs, 2003.
- [10] https://hu.wikipedia.org/wiki/Elektromágneses_sugárzás. [2015. 07. 12.].
- [11] Cost, "Cleaning safely with a Laser in Artwork Conservation," National Museums, Liverpool, 2006.
- [12] P. Pouli, M. Oujja and M. Castillejo, "Practical issues in laser cleaning of stone and painted artefacts: optimization procedures and side effects," *Applied Physics A*, vol. 106, pp. 447-464, 2012.
- [13] Week, "The conservation of the portail de la mère dieu, Amiens cathedral, France," in *Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA I*, Wien, 1997.
- [14] <http://www.conservationlasers.com/photo-gallery/4533647529>. [2015. 08. 12].
- [15] http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/Chapter_2.2.pdf. [2015. 08. 07.].
- [16] D. Almesberger, A. Rizzo, A. Zanini and R. Geometrante, "Laser Cleaning of Peristyle in Diocletian Palace in Split (HR)," in *Lasers in the Conservation of Artworks VI*, Berlin, Springer, 2007, pp. 83-86..
- [17] E. Pummer, "Exists a Demand for Nd:YAG Laser Technology in the Restoration of Stone Artworks and Architectural Surfaces?," in *Lasers in the Conservation of Artworks VI*, Berlin, Springer, 2007, pp. 143-150.
- [18] <http://www.atelier-pummer.com/pictures/laser/laser7.htm>. [2012. 02. 21.].
- [19] <http://www.wmf.org/project/diocletians-palace>. [2012. 02. 21.].
- [20] Z. Márton, I. Sánta, É. Galambos, C. Dobai, Á. Dicső and Z. Kántor, "Comparative study of laser varnish removal from historical paintings," in *Lasers in the Conservation of Artworks*, London, Taylor & Francis Group, 2008, pp. 271-274..
- [21] V. Vergès-Belmin, "Comparison of three cleaning methods – microsandblasting, chemical pads and Q-switched YAG laser – on a portal of the cathedral Notre-Dame in Paris, France," in *Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA I*,

Wien, 1997.

- [22] V. Zafirooulos, C. Balas, A. Manousaki, G. Marakis, P. Maravelaki-Kalaitzaki, K. Melesanaki, P. Pouli, T. Stratoudaki, S. Klein, J. Hildenhagen, K. Dickmann, B. S. Luk'yanchuk, C. Mujat and A. Dogariu, "Yellowing effect and discoloration of pigments: experimental and theoretical studies," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, pp. 249-256, 2003.
- [23] V. Vergès-Belmin and C. Dignard, "Laser yellowing: myth or reality?," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, pp. 238-244, 2003.
- [24] M. Del Monte and C. Sabbioni, "A Study of the Patina Called 'Scialbatura' on Imperial Roman Marbles," *Studies in Conservation*, vol. 32, no. 3, pp. 114-121., 1987.
- [25] L. Lazzarin and O. Salvador, "A Reassessment of the Formation of the Patina called Scialbatura," *Studies in Conservation*, vol. 34, no. 1, pp. 20-26., 1989.
- [26] A. Galanos and Y. Doganis, "The Remnants of the Epidermis on the Parthenon: A Valuable Analytical Tool for Assessing," *Studies in Conservation*, vol. 48, no. 1, pp. 3-16., 2003.
- [27] K. Frantzikinaki, G. Marakis, A. Panou, C. Vasiliadis, E. Papakonstantinou, P. Pouli, T. Ditsa, V. Zafirooulos and C. Fotakis, "The Cleaning of the Parthenon West Frieze by Means of Combined IR- and UV-Radiation," in *Lasers in the Conservation of Artworks VI*, Berlin, Springer, 2007, pp. 97-104.
- [28] V. Vergès-Belmin and M. Labouré, "Poultices as a Way to Eliminate the Yellowing Effect," in *Lasers in the Conservation of Artworks*, Berlin, Springer, 2007, pp. 115-124..
- [29] P. Pouli, C. Fotakis, B. Hermosin, C. Saiz-Jimenez, C. Domingo, M. Oujja and M. Castillejo, "The laser-induced discoloration of stonework; a comparative study on its origins and remedies," *Spectrochimica Acta Part A*, vol. 71, p. 932-945, 2008.
- [30] S. Siano, F. Fabiani, R. Pini, R. Salimbeni, M. Giamello and G. Sabatini, "Determination of damage thresholds to prevent side effects in laser cleaning of pliocene sandstone of Siena," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, p. 47-53, 2000.
- [31] S. Klein, F. Fekrsanati, J. Hildenhagen, K. Dickmann, H. Uphoff, Y. Marakis and V. Zafirooulos, "Discoloration of marble during laser cleaning by Nd:YAG laser wavelengths," *Applied Surface Science*, vol. 171, pp. 242-251, 2001.
- [32] M. Gracia, M. Gavino, V. Vergès-Belmin, B. Hermosin, W. Nowik and C. Sáiz-Jiménez, "Mössbauer and XRD Study of the Effect of Nd:YAG-1064 nm Laser Irradiation on Hematite Present in Model Samples," in *Lasers in the Conservation of Artworks V*, Berlin, Springer, 2005, pp. 341-346.
- [33] P. Pouli, K. Frantzikinaki, E. Papakonstantinou, V. Zafirooulos and C. Fotakis, "Pollution Encrustation Removal by Means of Combined Ultraviolet and Infrared Laser Radiation: The Application of this Innovative Methodology on the Surface of the Parthenon West Frieze," in *Lasers in the Conservation of Artworks V*, Berlin, Springer, 2005, pp. 333-340.
- [34] <http://www.iesl.forth.gr/research/project.aspx?id=42>. [21 02 2012. 02.21.].
- [35] <http://www.laserlab-europe.net/research/laser-science-for-society/cultural-heritage>. [2015. 07. 12.].
- [36] M. Chappé, J. Hildenhagen, K. Dickmann and M. Bredol, "Laser irradiation of medieval pigments at IR, VIS and UV wavelengths," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, pp. 264-270, 2003.

- [37] R. J. G. Sobott, T. Heinze, K. Neumeister and J. Hildenhagen, "Laser interaction with polychromy: laboratory investigations and on-site observations," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, pp. 276-286, 2003.
- [38] L. Shekede, "A preliminary study of their potential for the cleaning and uncovering of wall paintings," in *LACONA I, Restauratorenblätter*, Vienna, 1997.
- [39] M. C. Gaetani and U. Santamaria, "The laser cleaning of wall paintings," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, pp. 199-207, 2000.
- [40] P. Pouli, D. C. Emmony, C. E. Madden and I. Sutherland, "Studies towards a thorough understanding of the laser induced discoloration mechanism of medieval pigments," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, p. 271, 2003.
- [41] R. J. Gettens, R. L. Feller és W. T. Chase, „Vermilion and Cinnabar,” in *Artists' Pigments: A handbook of their History and Characteristics 2*, Oxford, 1993, pp. 159-182.
- [42] M. Spring and R. Grout, "The Blackening of Vermilion: An Analytical Study of the Process in Paintings," *National Gallery Technical Bulletin*, vol. 23, pp. 50-61, 2002.
- [43] K. Kenue and J. J. Boon, "Analytical Imaging Studies Clarifying the Process of the Darkening of Vermilion in Paintings," *Analytical Chemistry*, vol. 77, pp. 4742-4750, 2005.
- [44] M. Oujja, M. Sanz, E. Rebollar, J. F. Marco, C. Domingo, P. Pouli, S. Kogou, C. Fotakis and M. Castillejo, "Wavelength and pulse duration effects on laser induced changes on raw pigments used in paintings," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 102, pp. 7-14, 2013.
- [45] J. K. McCormack, "The darkening of cinnabar in sunlight," *Mineralium Deposita*, vol. 35, pp. 796-798, 2000.
- [46] C. Weeks, "The 'Portail de la Mere Dieu' of Amiens Cathedral: Its Polychromy and Conservation," *Studies in Conservation*, vol. 43, no. 2, pp. 101-108, 1998.
- [47] M. I. Cooper, P. S. Fowles and C. C. Tang, "Analysis of the laser-induced discoloration of lead white pigment," *Applied Surface Science*, vol. 201, p. 75-84, 2002.
- [48] P. Pouli, D. C. Emmony, C. E. Madden and I. Sutherland, "Analysis of the laser-induced reduction mechanisms of medieval pigments," *Applied Surface Science*, vol. 173, pp. 252-261, 2001.
- [49] A. Andreotti, M. P. Colombini, A. Nevin, K. Melessanaki, P. Pouli and C. Fotakis, "Multianalytical study of laser pulse duration effects in the IR laser cleaning of wall paintings from the monumental cemetery of Pisa," *Laser Chemistry*, pp. 1-11, 2006.
- [50] M. Castillejo, C. Domingo, F. Guerra-Librero, M. Jadraque, M. Martín, M. Oujja, E. Rebollar és R. Torres, „From the Lab to the Scaffold: Laser Cleaning of Polychromed Architectonic Elements and Sculptures,” in *Lasers in the Conservation of Artworks VI*, Berlin, Springer, 2007, pp. 185-190.
- [51] S. Siano, A. Brunetto, A. Mencaglia, G. Guasparri, A. Scala, F. Droghini and A. Bagnoli, "Integration of Laser Ablation Techniques for Cleaning the Wall Paintings of the Sagrestia Vecchia and Cappella del Manto in Santa Maria della Scala, Siena," in *Lasers in the Conservation of Artworks*, Berlin, Springer, 2007, pp. 191-202.
- [52] S. Siano, L. Appolonia, A. Piccirillo and A. Brunetto, "Castle of Quart, Aosta

- Valley: Laser uncovering of medieval wall paintings," in *Lasers in the Conservation of Artworks*, London, Taylor & Francis Group, 2008, pp. 191-198.
- [53] B. Graue, S. Brinkmann and C. Verbeek, "PROCON TT 49: Laser cleaning of ancient Egyptian wall paintings and painted stone surfaces," in *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*, London, Taylor & Francis Group, 2011, pp. 53-58.
- [54] Z. Márton, I. Kisapáti, P. Pouli, E. Bernikola and 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*, London, 2013.
- [55] <http://www.quantasystem.com/en/multimedia/pompei-laser-cleaning-villa-mysteries>. [2015. 07. 12.].
- [56] http://www.lisa.gerda-henkel-stiftung.de/projectvideo_diary.php?nav_id=947&video_id=1067. [2012. 02. 21.].
- [57] M. Gómez-Heras, E. Rebollar, M. Alvarez de Buergo, M. Oujja, R. Fort és M. Castillejo, „Laser Removal of Protective Treatments on Limestone,” in *Lasers in the Conservation of Artworks V*, Berlin, Springer, 2005, pp. 149-156.
- [58] <http://www.feltalaloink.hu/tudosok/gabordenes/html/gabdental4.htm#>. [2015. 07. 07.].
- [59] <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-13573631>. [2015. 07. 07.].
- [60] E. Bernikola, A. Nevin and V. Tornari, "Rapid initial dimensional changes in wooden panel paintings due to simulated climate-induced alterations monitored by digital coherent out-of-plane interferometry," *Applied Physics A*, vol. 95, pp. 387-399, 2009.
- [61] L. Lazzarini and J. F. Asmus, "The Application of Laser Radiation to the Cleaning of Statuary," *Bulletin of the American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*, vol. 13, no. 2, pp. 39-49, 1973.
- [62] D. Bertani, M. Cetica and G. Molesini, "Holographic Tests on the Ghiberti Panel 'The Life of Joseph'," *Studies in Conservation*, vol. 27, no. 2, pp. 61-64, 1982.
- [63] P. M. Boone and V. B. Markov, "Examination of Museum Objects by Means of Video Holography," *Studies in Conservation*, Vol. 40, No. 2 (May,), pp. , vol. 40, no. 2, pp. 103-109, 1995.
- [64] G. Gülker, H. Helmers, K. D. Hinsch, P. Meinlschmidt and K. Wolff, "Deformation Mapping and Surface Inspection of Historical Monuments," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 24, pp. 183-213, 1996.
- [65] D. Albrecht, M. Franchi, A. C. Lucia, P. M. Zanetta, A. Aldrovandi, T. Cianfanelli, P. Riitano, O. Sartiani and D. C. Emmony, "Diagnostic of the conservation state of antique Italian paintings on panel carried out at the Laboratorio di Restauro dell'Opificio delle Pietre Dure in Florence, Italy with ESPI-based portable instrumentation," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, p. 331–335, 2000.
- [66] K. D. Hinsch, K. Zehnder, H. Joost and G. Gülker, "Monitoring detaching murals in the Convent of Münstair (Switzerland) by optical metrology," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 10, pp. 94-105, 2009.
- [67] V. Tornari, E. Bernikola, E. Tsiranidou, K. Hatzigiannakis, M. Andrianakis, V. Detalle and J. L. Bodnar, "Micro-mapping of Defect Structural Micro-morphology in the Documentation of Fresco Wallpaintings," *International Journal of Heritage of the Digital Era*, vol. 2, no. 1, pp. 2-22, 2013.
- [68] E. Tsiranidou, E. Bernikola, V. Tornari, T. Fankhauser, M. Lauchli, N. Baschlin

- and C. Palmbach, "Studying transportation effects on canvaspaintings by full field digital holographic techniques," in *Lasers in the Conservation of Artworks*, London, Archetype Publications, 2013, pp. 67-74.
- [69] V. Tornari, A. Bonarou, V. Zafiropulos, C. Fotakis, N. Smyrnakis and S. Stassinopulos, "Structural evaluation of restoration processes with holographic diagnostic inspection," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 4, no. 1, pp. 347-354, 2003.
- [70] E. Bernikola, K. Melessanaki, K. Hatzigiannakis, V. Tornari és P. Pouli, „Real-time monitoring of laser-assisted removal of shellac from wooden artefacts using digital holographic speckle pattern interferometry,” in *Lasers in the Conservation of Artworks IX*, London, Archetype Publications, 2013, pp. 52-58.
- [71] A. Athanassiou, A. E. Hill, T. Fourrier, L. Burgio and R. J. H. Clark, "The effects of UV laser light radiation on artists' pigments," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, no. 1, pp. 209-213, 2000.
- [72] G. Wheeler, *Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone*, Los Angeles: Getty Publications, 2005, pp. 59-76.
- [73] A. P. Ferreira Pinto and J. Delgado Rodrigues, "Stone Consolidation: The role of treatment procedures," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, no. 1, pp. 38-53, 2008.
- [74] A. P. Ferreira Pinto and J. Delgado Rodrigues, "Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 13, no. 2, pp. 154-166, 2012.
- [75] Á. Török, "Surface strength and mineralogy of weathering crusts on limestone buildings in Budapest," *Building and Environment*, vol. 38, no. 9-10, pp. 1185-1192, 2003.
- [76] V. Tornari, E. Tsiranidou and E. Bernikola, "Interference fringe-patterns association to defect-types in artwork conservation: an experiment and research validation review," *Applied Physics A*, vol. 106, no. 2, pp. 397-410, 2012.

Önéletrajz

Kisapáti Ivett
Szeged, 1981. 08. 25.

Munkahelyek

Tömörkény István Gimnázium és Művészeti Szakközépiskola, Szeged	2013 –
Művésztanár	
Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Intézet	2011 – 2013
Tudományos segédmunkatárs	
Szabadúszó restaurátor	2007 - 2011

Tanulmányok

Magyar Képzőművészeti Egyetem, Doktori Iskola, Budapest **2010 -2013**

Kutatási téma: „Római kori falképtöredékek lézeres tisztítása és az eljárás mechanikai hatásainak vizsgálata holografikus interferometriával”

Témavezetők: Dr. habil, DLA Menráth Péter, Dr. habil, PhD Márton Zsuzsanna (PTE)

Magyar Képzőművészeti Egyetem, Budapest **2000 – 2007**

Képzőművész-restaurátor művész

Szakedolgozat témája: „Festett kőfelületek lézeres tisztítása”

Témavezető: Dr. Márton Zsuzsanna

Diplomamunka: Golgota szoborcsoport Szent János alakja, Boconád, 1792

Művészeti rajz, Művészettörténet szakos középiskolai tanár

Szakedolgozat témája: „Remekművek gipszmásolatai”

Témavezető: L. Menyhért László

**Tömörkény István Gimnázium és Művészeti Szakközépiskola,
Szeged** **1996-2000**

Díszítőszobrász szak

Mesterek: Bánvölgyi László, Kalmár Márton

Ösztöndíjak

**HAWK-Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst,
Fachhochschule Hildesheim / Holzminden / Göttingen**
Németország **2004. feb. - jún.**
Képzőművész-restaurátor szak

Accademia Albertina delle Belle Arti, Torino, Olaszország **2003. feb. - júl.**
Erasmus ösztöndíj - Restaurátor szak
Szakmai gyakorlat, Genova, Villa Imperiale **2003. okt.**

Laserlab Europe Exchange program

FORTH, Institute of Electronic Structure and Laser, Kréta 2010. szept.

“Evaluation of structural modifications in laser-cleaned fresco fragments by means of holographic interferometry”

FORTH, Institute of Electronic Structure and Laser, Kréta 2012. nov. - dec.

„DHSPI testing of laser-cleaned model fresco fragments for differentiating the possible photomechanical effects induced by the laser cleaning”

Szakmai kurzusok

„CHARISMA – Advanced laser-based techniques in art conservation, diagnostics and analysis”

FORTH, Institute of Electronic Structure and Laser, Kréta 2012. jún. 18-22.

„CHARISMA – Itinerant course on stone conservation”

Amszterdam 2013. máj. 27 – jún. 07.

Konferenciák, előadások

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. Cvedas, E. Murauskas, N. Slavinskis, K. Jasiunas, M. Trtica: Advanced laser renovation of old paintings, paper, parchment and metal objects

XXXIV. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2009., poszter:
Kisapáti I., Márton Zs.: Római kori freskótöredékek lézeres tisztítása

XXXV. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2010., előadó:
Kisapáti I., Márton Zs., E. Bernikola, P. Pouli: Római kori freskótöredékek lézeres tisztításának ellenőrzése holografikus interferometriával

XXXVI. Nemzetközi Restaurátor Konferencia, Budapest, 2011., előadó:
Márton Zs., Kisapáti I.: Különböző típusú lézerek alkalmazhatósága freskótöredékek tisztítására

LACONA IX, London, 2011., előadás
Zs. Marton, 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 means of Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry

Magyar Képzőművészeti Egyetem, Budapest, 2012., előadó:

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

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

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

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

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,

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

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

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

Publikációk, témavezetés

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**

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

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 Damaszkus szobája*, Műtárgyvédelem, vol. 37-38, pp. 7-37, 2012-13.

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

Kiállítások

- 2015** „Láthatóság”, Polgár Centrum - Újpest Galéria
- 2006** „Megmentett műkincsek”, Magyar Nemzeti Múzeum, Budapest
- 2005** Ericsson Galéria, Budapest
- 2002** „Mesterveretek”, Szeged
- 2002** Önálló kiállítás, Bordány

Tagság szakmai szervezetekben

Magyar Restaurátorkamara

MTA X. Osztály Geokémiai és Ásvány-közzettani Tudományos Bizottságának Archeometriai Munkabizottsága

ICC – International Institute of Conservation

Idegen nyelv ismeret

Olasz: Felsőfok, C típus, CILS Nyelvvizsga Bizonyítvány
Angol: Középfok, A típus, Állami Nyelvvizsga Bizonyítvány