

Deformáció és feszültségeloszlás mérésének új lehetőségei az iparban hordozható digitál-holografikus mérőkamerával

Borbély Venczel^a, Kiss Tamás Rafael^a, Szigethy András^a, Gyimesi Ferenc^b

^a TECHNOORG LINDA Tudományos Műszaki Fejlesztő Kft., H-1044 Budapest, Ipari Park u. 10.
bvenczy@gmail.com

^b HOLOMETROX Holografikus Méréstechnika Kft., H-2131 Göd, Körös u. 17.

Borbély V., Kiss T. R., Szigethy A., Gyimesi F. (2016): Deformáció és feszültségeloszlás mérésének új lehetőségei az iparban hordozható digitál-holografikus mérőkamerával. New measurement possibilities of deformation and stress distributions by portable digital-holographic gauge camera. Acta Pintériana, 2, 23-37.

A holografikus interferometria felületi elmozdulások vizsgálatára alkalmazható mérési eljárás. Ipari elterjedését a hagyományos, speciális körülményeket igénylő holografikus képrögzítési és rekonstruálási technológia hátráltatta. Jó felbontású digitális érzékelők elterjedésével, holografikus igényeknek megfelelő kisméretű lézerek megjelenésével, illetve nagy sebességű számítógépek segítségével a holografikus méréstechnika jelentős teret nyerhet a különböző ipari mérésekben. Az itt bemutatásra kerülő, teljes mértékben magyar fejlesztésű Lézer-SÓLYOMSZEM (L-Ssz) digitál-holografikus kamera deformációt és feszültséget mérő holografikus interferometriai készülék, amely hordozható kivitelű, bel- és kültéri mérésekre egyaránt alkalmas – így számtalan területen bevethető az ipar különleges igényeinek megfelelően. A mérőkamera alkalmazási lehetőségeit, a teljesség igénye nélkül, egy tucat mérési lehetőséget keresztül ismertetjük.

Bevezetés

A L-Ssz mérőkamera hologramok segítségével dolgozik. A hologram készítésének elvi vázlatát az **1. ábrán** láthatjuk.

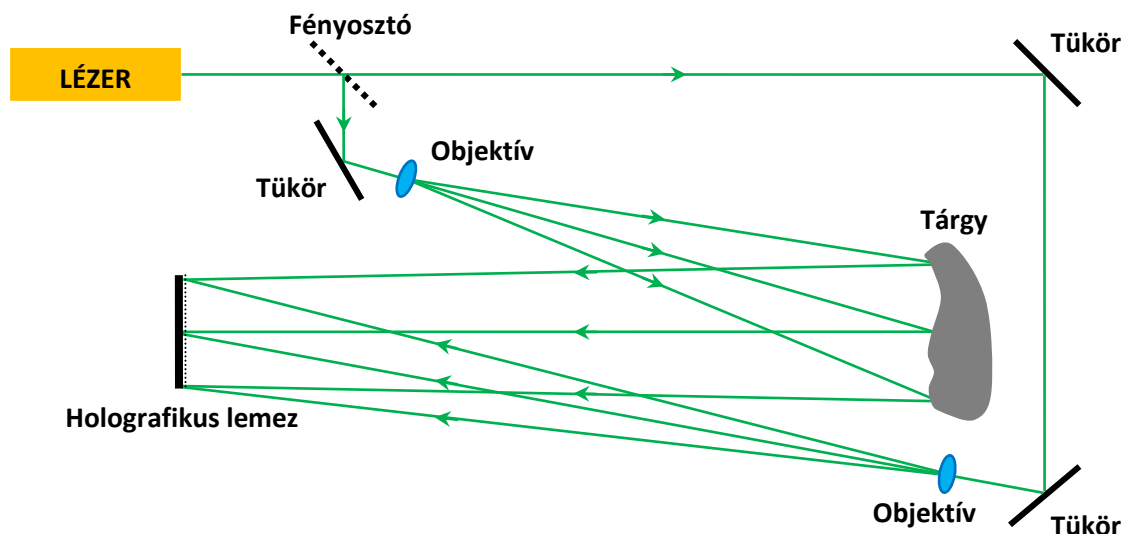
A lézerből érkező nyalábot egy fényosztó segítségével kétfelé osztjuk. Az egyik nyaláb objektíven áthaladva megvilágítja a tárgyat, a másik az ú.n. referencianyaláb. A tárgyról visszaverődő fény a referencianyalábbal találkozva létrehoz egy interferenciaképet. Az interferenciaképet az érzékelővel (holografikus lemez vagy CCD) rögzítve kapjuk a hologramot.

A holografikus interferometria (HI) a holográfia méréstechnikai alkalmazása. Nagy érzékenységgel tized mikrométeres tartományba eső alakváltozások vizsgálhatók akár a vizsgált tárgy teljes felületén egyidejűleg. Érintésmentességének köszönhetően a roncsolásmentes diagnosztikai eljárások közé sorolják.

A mérési módszer a vizsgált tárgy két állapotának összehasonlításán alapszik. Először holografikus felvétel készül a tárgy alapállapotáról, majd valamilyen úton deformáljuk, illetve önmaga deformálódhat, és ezt követően készül a második felvétel.

Az analóg HI-ban e második felvétel ugyanarra a holografikus lemezre készült. A vegyi előhívást követően a hologramot felvételi helyére visszatéve láthatóvá vált a két állapot közötti eltérés az alap- és a deformált állapotot rögzítő hullámok interferenciájaként, a deformációra jellemző

interferometrikus csíkkrendszer segítségével, mint térképen a szintvonalak. A gyakorlatban néhány másodpercig tartó felvételek készítéséhez rezgés- és légáramlatoktól mentes, sötétíthető környezetre volt szükség.



1. ábra. A hologram készítésének elvi vázlata
Figure 1. Theoretical arrangement for recording holograms

Az analóg holográfiát alkalmazó interferométerek speciális igényei hátráltatták a mérés technika széleskörű ipari alkalmazásának elterjedését. Laboratóriumi szinten a HI mérési módszerek több mint ötven éve általánosan ismertek, elfogadottak, de kereskedelmi eszközként – laboratóriumi sikereik ellenére – mérsékelten terjedtek el. A HI első hazai sikerét fémjelzi a BME Fizika Tanszék Koherens Optikai Laboratóriumában 1975 és 1985 között kifejlesztett HIM-3 elnevezésű hordozható holografikus interferometriai mérőrendszer, amelyet 3D-s deformáció- és rezgésvizsgálatra használtak ipari körülmények között (FÜZESSY et al. 1983).

Nagy felbontású digitális érzékelők elterjedésével lehetőség nyílik, hogy a hologramokat számítógépen rögzítsük milli- vagy mikroszekundumos expozíciós idővel. Az egyre nagyobb számolási kapacitással rendelkező számítógépek másodpercek alatt több hologram interferogramját képesek előállítani, modellezve a fény terjedését és rekonstruálva a tárgy különböző állapotainak hologramját. Az interferogramok gyors előállítása és könnyen kezelhetősége mellett óriási előnye a digitális holográfiának, hogy számolások útján a fény fázisa által hordozott információ is numerikusan elérhető, megjeleníthető. Mindezeket egybevéve, lehetővé válik, hogy kevésbé speciális körülmények között is mérni lehessen.

2009-ben indult el az itt bemutatandó Lézer-SÓLYOMSZEM (L-Ssz) digitál-holografikus mérőkamera fejlesztése a TECHNOORG LINDA Tudományos Műszaki Fejlesztő Kft.-ben (GYÍMESI et al. 2009, GYÍMESI et al. 2010, FÜZESSY et al. 2012, GYÍMESI et al. 2013, KATULA et al. 2015, DOBRÁNSZKY et al. 2015, GYÍMESI et al. 2016a, 2016b, 2016c.), amely már digitális alapokon áll, s bár különleges, egyedi alkalmazási irányoknak is megfelelő fejlesztése folytatódik (a TECHNOORG LINDA Kft. és a HOLOMETROX Holografikus Mérés Technika Kft. együttműködésével), jelenlegi formájában már készen áll az ipar által igényelt kihívásokra.

Az alábbiakban a L-Ssz mérőkamerát és alkalmazási lehetőségeit mutatjuk be egy tucat tipikus alkalmazási mintapéldán, melyeket a L-Ssz holokamera eddigi sikeres félszáz alkalmazásából válogattunk ki.

A L-Ssz digitál-holografikus mérőkamera

A L-Ssz a vizsgált tárgyfelület pontjainak elmozdulását méri holografikus úton, három irányban, szubmikrométeres pontossággal. Mérési érzékenysége alapesetben $0,1 \mu\text{m}$, felső méréshatára $10 \mu\text{m}$. A mérés látótere alapesetben $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, térbeli felbontóképessége $0,05 \text{ mm}$. Minden alapparamétere, igény esetén, jelentősen növelhető: érzékenysége kb. $0,01 \mu\text{m}$ -ig, felső méréshatára kb. $500 \mu\text{m}$ -ig, látótere kb. 5-szörösére, térbeli felbontóképessége kb. $0,005 \text{ mm}$ -ig.

A L-Ssz holokamera az igényeknek megfelelően alkalmazkodik a különböző jellegű mérésekhez. A tárgybefogások, illetve a mérési körülmények határozzák meg, hogy a L-Ssz holokamera milyen helyzetében van a tárgy, illetve a vele szemben lévő érzékelő. A **2.a. ábrán** olyan változatát látjuk, ahol a mérőkamera érzékelője lefele néz és a lábakon fekvő sík felületre helyezett asztalon rögzítjük a tárgyat. Ez a megoldás kb. $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ méretű tetszőleges jellegű tárgyak vizsgálatára ad lehetőséget jelenlegi felépítésben. A **2.b. ábrán** látható megvalósításban a L-Ssz holokamera érzékelője felfelé néz és a tárgyat három pontra helyezzük a berendezés fölé. Ezáltal a méretnövekedésből adódó, érzékelő irányú alakváltozások minimalizálhatók és csak a mérni kívánt deformációk kerülnek előtérbe. Ez a megoldás kiválóan alkalmas nem túl nagyméretű nyomástartó edények vizsgálatára, ahol a nyomásnövekedés okozta alakváltozás nemkívánatos elmozdulásai jelentősen befolyásolnák a vizsgálni kívánt, sok esetben jóval kisebb elmozdulással járó valós deformációt. Függőleges felületű tárgyak mérésére a L-Ssz holokamera vízszintes állásban is használható. Ennek egyik megvalósítása látható a **2.c. ábrán**, ahol a berendezés a vizsgált tárgyat tartó eszközre van rászerezve. Különösen nagy tárgyak esetén (pl. óriási tartály) a különálló L-Ssz holokamera használható (**2.d. ábra**), de akár miniatürizált változata is megvalósítható, ahol maga a mérőkamera kapcsolódik rá tárgyra.

A L-Ssz holokamera általános alkalmazási lehetőségei

A L-Ssz holokamera alkalmazási lehetőségei két nagy csoportba sorolhatók: deformáció vizsgálata, illetve feszültségeloszlás mérése, utóbbihoz felhasználva a diagnosztikai lyukfúrás következtében felszabaduló feszültség okozta elmozdulásmezőt.

A deformáció vizsgálatánál közvetlenül a vizsgált tárgy alakváltozásának, illetve a belőle közvetlenül számolható mennyiségek mérése a cél.

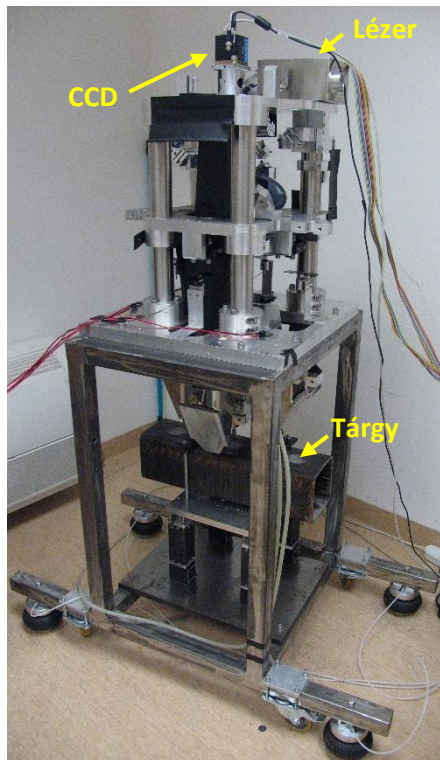
A L-Ssz holokamerával különböző alapanyagok, valamint késztermékek terhelésmentes eldeformálódása (öregedés, fáradás stb.), illetve megmunkálásukkor, a járulékos terhelés következtében (megfogás, befogás, összepréselés stb.) jelentkező deformációk vizsgálhatók. A deformálódás időbeli lefolyása is követhető több lépésben (pl. zsugorodás, duzzadás stb.).

Megfelelő operatív terhelés alkalmazásával kritikus pontok keresése és minősítése, a homogenitás-inhomogenitás ellenőrzése, illetve a terhelés időbeli követése (pl. kúszás) válik lehetővé. Ugyanakkor a terhelésátadás megfelelősége is ellenőrizhető szabad, kötéses, illetve áttételes, illesztő réteges érintkezéseknél. A terhelhetőség és a terhelésátadás deformációs feszültségváltozás alapján is megadható.

Különböző teszt-terhelések alkalmazásával nem látható szerkezeti és anyaghibák, kötési hibák mutathatók ki, repedések viselkedése követhető.

A feszültségeloszlás vizsgálata speciális terhelés alkalmazásával valósítható meg: a vizsgált anyagba diagnosztikai lyukat fúrva a furat a tárgyban lévő feszültség hatására deformálódik. Ebből a deformációból adható meg a tárgyban lévő feszültség. Ez a módszer részben-roncsolásmentes technológiának tekinthető a HI szemszögéből. A mérőbéllyeges feszültségmérési eljárásához

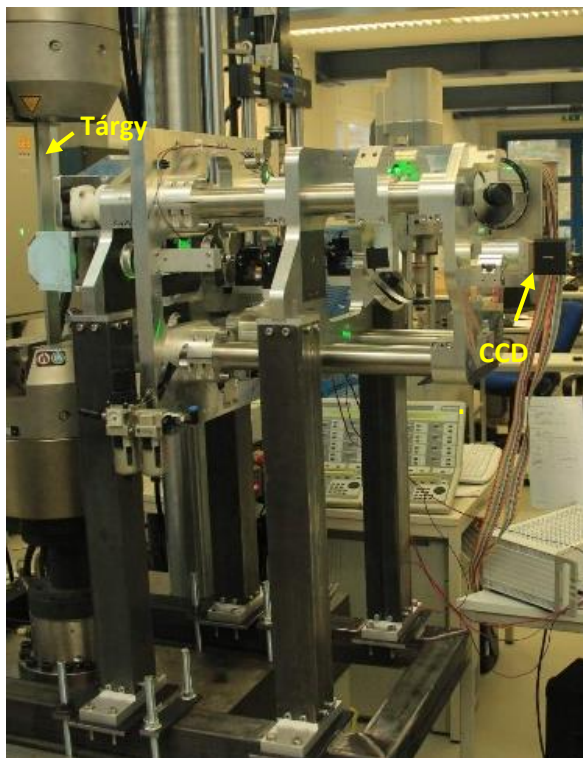
viszonyítva sokkal gyorsabb, speciális fogyóeszközt, illetve sima felületet nem igénylő, a vizsgálati terület minden pontját egyidejűleg mérő eljárás bármilyen anyagú, illetve alakú tárgyon. Továbbá, a tárgy több pontban való egymás utáni, pásztázó mérésére is felhasználható, valós feszültségeloszlást megjelenítve rajta.



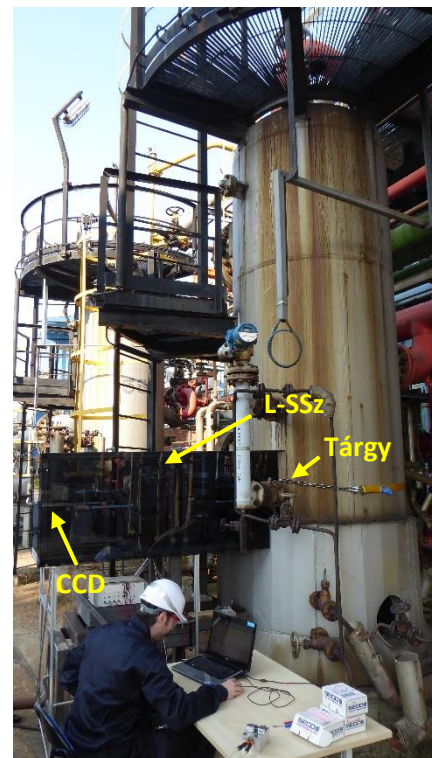
a.



b.



c.



d.

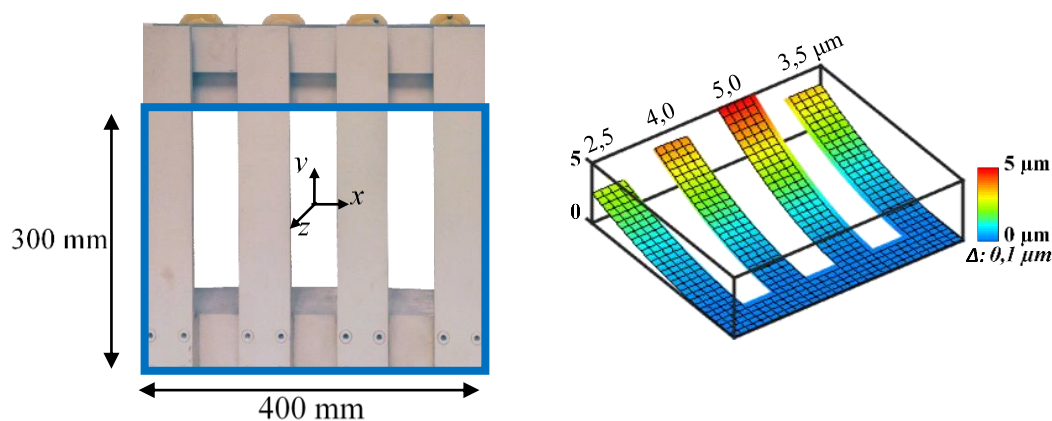
2. ábra. A L-Ssz holografikus mérőkamera hardveres megvalósulásai
Figure 2. Hardware realisations of L-Ssz holographic gauge camera

A maradó, illetve az aktuálisan bevitt feszültség kimutatása késztermékekben, megmunkálást követően vagy a különböző módon előkészített alapanyagokban az egyik, és sok esetben az egyetlen vizsgálati lehetőség. Megfelelő teszt-terheléssel szerkezeti és anyaghibák, kritikus pontok, illesztések közötti rendellenességek, illetve homogenitás-inhomogenitás vizsgálható a feszültségeloszlás alapján.

Tipikus alkalmazási mintapéldák

Az alábbiakban néhány tipikus alkalmazási lehetőséget mutatunk be. A több mint 50 sikeresen végrehajtott mérésből elsősorban azokat a méréseket ismertetjük, amelyek a mérőkamera sokszínűségét, különleges, egyedi mérési lehetőségeit tükrözik: nagyméretű és kisméretű érdekes tárgyak, folyamatok időbeli követése, méréshatárt meghaladó elmozdulások, szokatlan körülmények.

A **3. ábrán** nagyméretű (300 mm × 400 mm) modelltárgy négy konzolgerendájának síkra merőleges deformációját látjuk. A konzolgerendákat különböző módon terheltük mikrométer orsókkal. A L-Ssz holokamerával mért deformáció a mikrométerorsó segítségével ellenőrizhető, validálható. Azonos nagyságú terhelést alkalmazva lehetőség nyílik arra, hogy az egyes konzolgerendákat összehasonlítsuk, ezáltal eltéréseiket, kritikus pontjaikat kimutassuk.



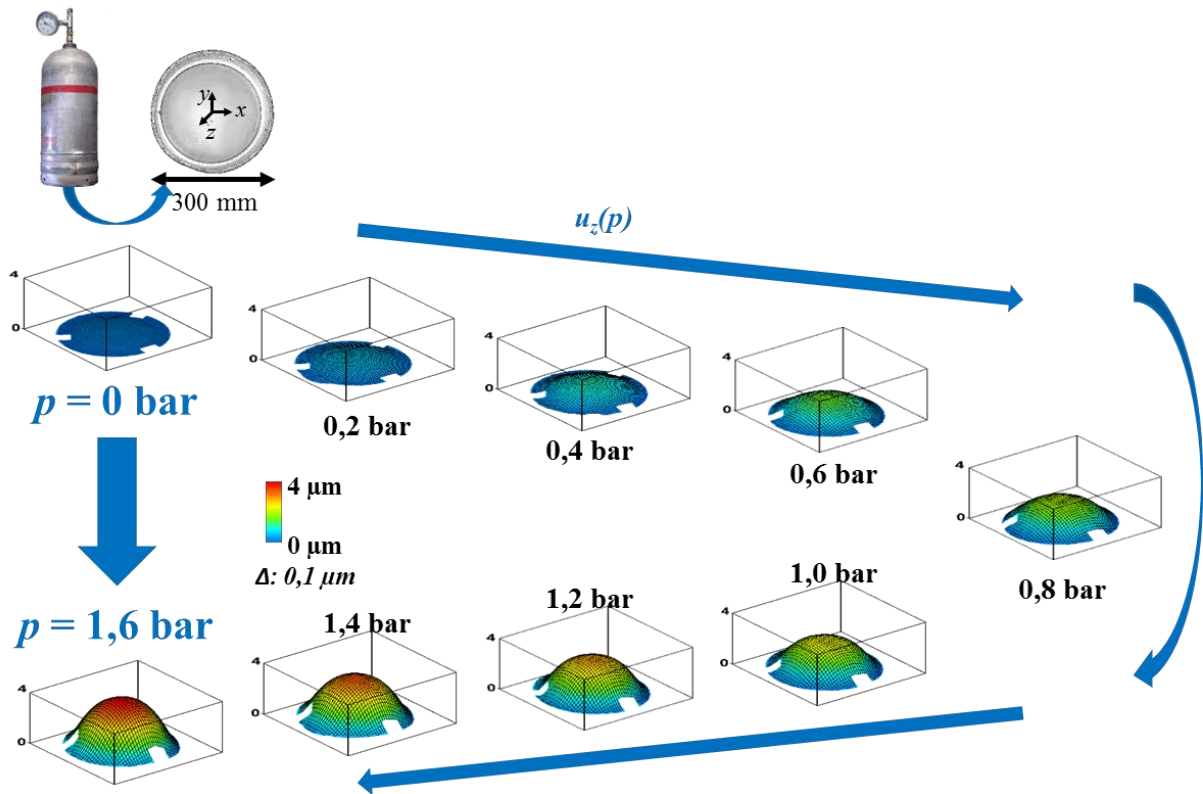
3. ábra. Konzolgerendák deformációja mikrométerorsóval (tetején) végzett különböző nagyságú terhelések hatására

Figure 3. Deformations of cantilever beams performed by micrometer srew (at top) with different loads

A **4. ábrán** gázpalack fenék felületre merőleges deformációjának követését láthatjuk növekvő nyomás hatására. A teljes felület mérése a palack fenék alakváltozásának egyidejű vizsgálatát teszi lehetővé. Egyre nagyobb nyomás hatására eltérően viselkedő kritikus pontok, anyaghibák mutathatók ki.

A palack belsejében kialakult, illetve esetünkben további szimulált korróziós hibák kívülről lokalizálhatók a mérőkamerával (**5. ábra**). Az eltérő átmérőjű és mélységű vakfuratok különböző lehetséges korróziós hibákat képviselnek. Megfigyelhető, hogy a palackban növelt nyomás hatására a palack fenekén, az idő során korrózió útján képződő falvastagság csökkenés (x-szel jelölt) már kis, szokásos töltési nyomáson (kb. 5 bar) is megjelenik. A legkisebb, 2 mm átmérőjű, 1 mm mély szimulált korróziós lyuk viszont csak nagy, nyomáspróbánál alkalmazott nyomásnál (20 bar) válik láthatóvá. A kis lyukak láthatóvá tételéhez a deformált hibákat tartalmazó felületből (bal oldali oszlop) kivontunk egy virtuális felületet és azok különbségét jelenítettük meg (jobb oldali oszlop). A virtuális felület a mért felületre illesztett speciális polinom, amely a kisméretű lokális hibákat nem képes

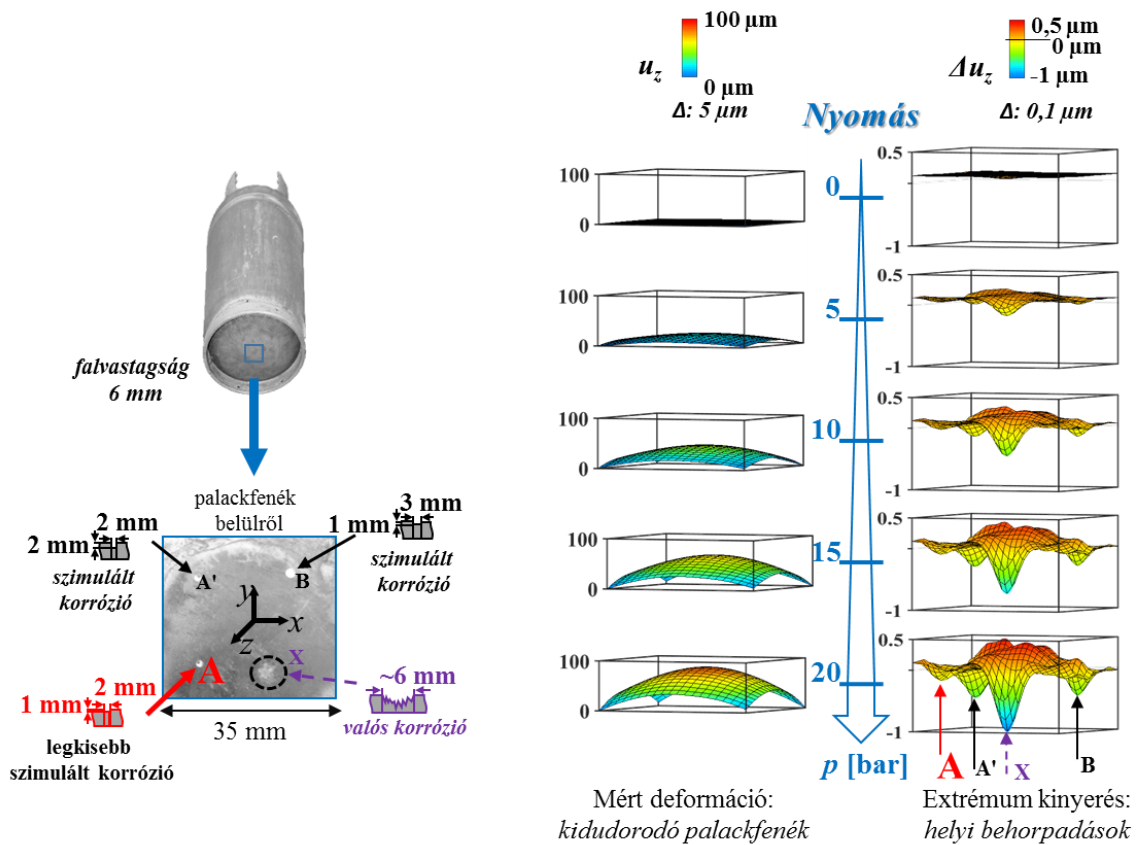
követni, így nem tartalmazza őket. Ezt a folyamatot „extrémum kinyerésnek” nevezzük. A teljes mérést 40 lépésben végeztük, egyrészt a folyamatos végigkövetés miatt, másrészt az egyes lépéseken kialakuló sűrű csíkrendszerek elérték a digitális holografikus interferometria felső méréshatárát. Ezáltal az egy lépésre jellemző néhány mikrométeres méréshatárt terjesztettük ki közel 50-szeresen.



4. ábra. A teljes gázipalack fenék deformációjának követése a nyomásnövekedés függvényében
 Figure 4. The complete deformation process of bulging of a pressure vessel bottom

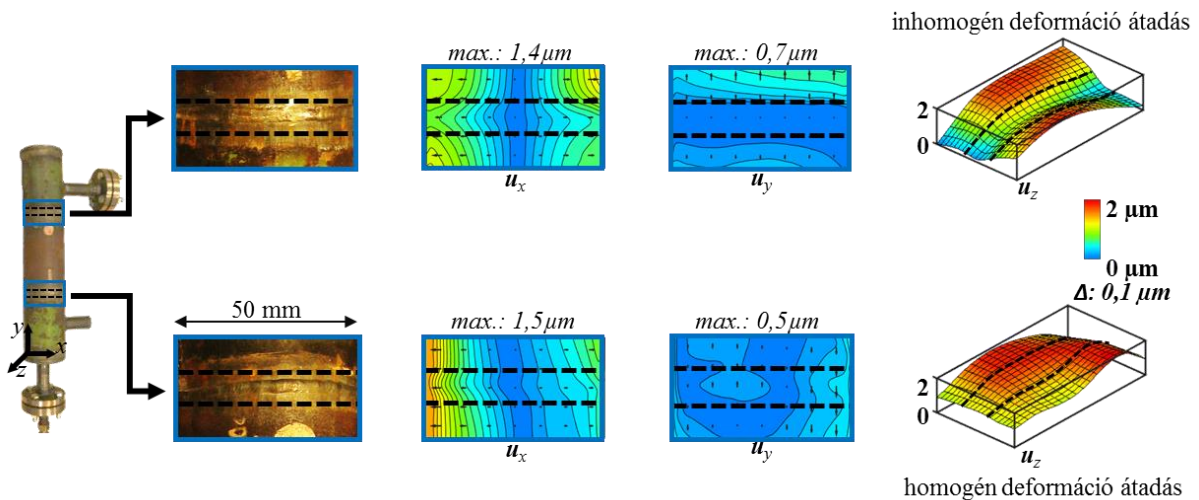
A 6. ábrán belső nyomással rendelkező nyomáscső részeinek összeillesztésekor alkalmazott különböző minőségű hegesztési varratok viselkedését látjuk. Az alsó varratnál a hegesztésre kerülő részek megfelelően elő voltak készítve, a felső varrattal egyszerűen csak összehegesztették a két részt. Az ábrán mindhárom irányú elmozduláskomponens (u_x , u_y , u_z) megfigyelhető. Az alsó varrat mérési eredményeiből kiderül, hogy a varrat a környezetéhez hasonló módon deformálódik. A felső varrat síkbeli komponenseiből (u_x és u_y) látható, hogy a varrat kevésbé deformálódik, mint a környezete, és a síkra merőleges u_z komponens látványosan meg is jeleníti ezt: öv-szerűen belevág a felfúvódó csőbe. A méréssel hegesztési varratok minősíthetők, ugyanis a rossz hegesztési varratok a többszöri deformálás hatására könnyebben eltörnek, szétválnak, mivel kevésbé rugalmasak. Ez a minősítési módszer egyedi, mivel a kötések vizsgálatára a terhelésátvitel a legmeggyőzőbb lehetőség, mégis hiányzik a hegesztési varratok ellenőrzésének eszköztárából.

Egymással érintkező felületek terhelésátvitelét figyelhető meg a 7. ábrán. A gömbkülső-kúpbelső megoldás flexibilis, önbeállító terhelési módot biztosít különböző precíz terheléseknél. A kúpbelst tartalmazó közelem síkfelületű próbatesthez csatlakozik a kúpbelstvel átellenes oldalon. A mérési eredmények azt mutatják, hogy a terhelésátvitel is nemkívánatos eldeformálódásokkal jár. A közelem közel $2 \mu\text{m}$ -t kipúposodott, a szélein is $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$ -t elhajlott, a síkfelülettel érintkező felülete is meggömbült. A mérés pontosan megtervezett precíziós terhelések ellenőrzésére, követésére használható.



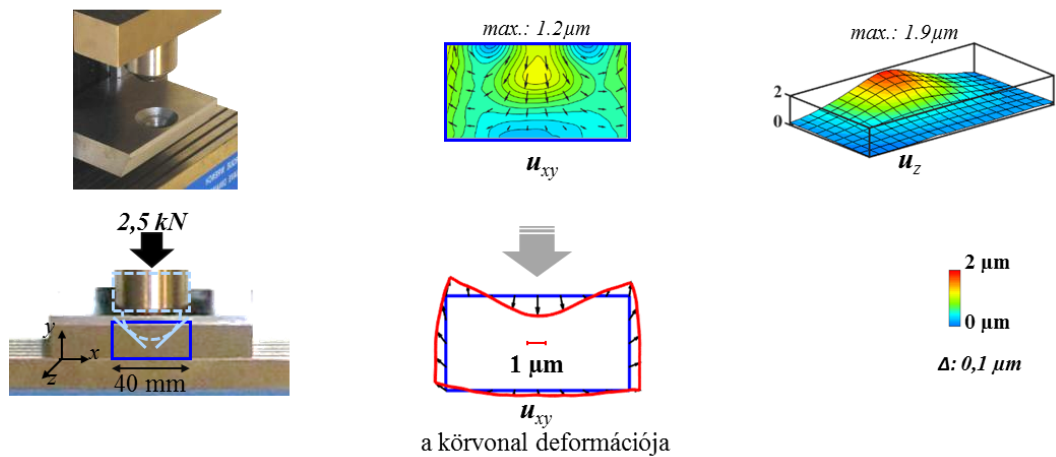
5. ábra. Palack alakváltozása extra nagy nyomás hatására és a kis deformációk kinyerése a belső falvastagság hibák kimutatására

Figure 5. Monitoring of extra-large pressure deformation and extraction of tiny deformation extrema on it at corroded pressure vessel bottom



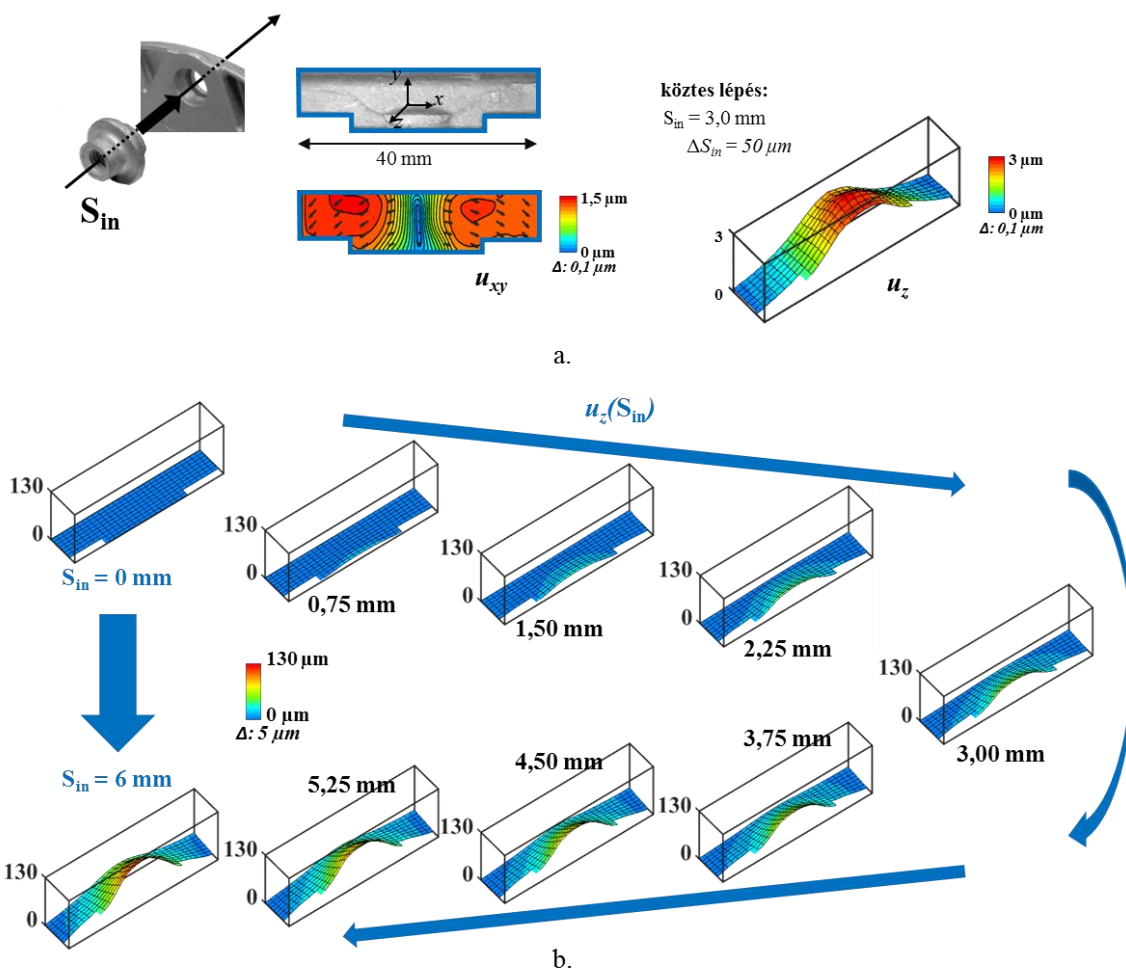
6. ábra. Különböző minőségű hegesztési varratok összehasonlítása környezetükkel és egymással minősítés céljából

Figure 6. Deformation of different welds for comparison with surroundings to control their deformation transfer property



7. ábra. Önbeállító terhelésátadó rendszer fogadó elemének deformációja gömbkülső-kúpbelso felületek érintkezésénél.

Figure 7. The deformation of the receiving element of the self-adjusting load-transfer system at the contact of outer spherical and inner conical surfaces

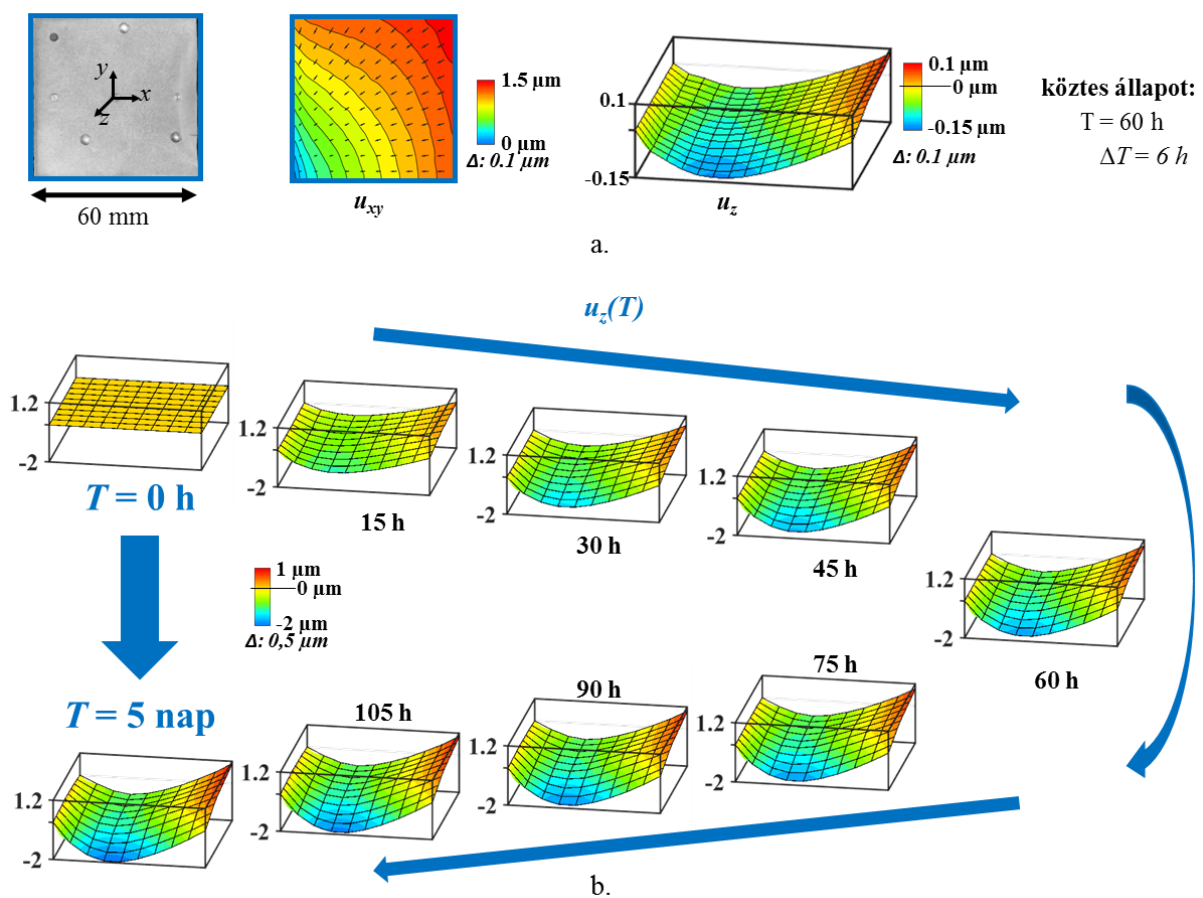


8. ábra. Alumínium dugattyú és hüvely összepréselése során létrejövő deformáció egy köztes lépésben (a.) és a teljes összepréselési folyamat során (b.).

Figure 8. The deformation of pressing of aluminum sleeve and a steel pin into each other: an intermediate step (a.) and the complete deformation process (b.)

Hosszabb ideig tartó folyamatok monitorozása fontos lehet különböző munkafázisok követésénél. A **8.a. ábrán** bal oldalt felül látható hüvelybe egy lépésben belepréselt dugattyú egyszerre túl nagy terhelést jelenthet a lyuk környezetének, a lyuk széle eltörhet, elrepedhet. Az 50 lépésben végigkövetett fokozatos benyomással a folyamat részleteiben vizsgálható. A **8.a. ábrán** egy köztes lépés deformációjának síkbeli (u_{xy}), illetve síkra merőleges komponensét (u_z) láthatjuk. Megfigyelhető, hogy a várt síkra merőleges kidudorodás mellett síkban a tárgy benyomódik, és szélein kissé visszahajlik. A **8.b. ábrán** a teljes deformáció filmszerű követésének néhány kiragadott lépését láthatjuk az u_z komponens esetén.

Hasonlóan több lépésben végigkövethető különböző, már megszilárdult öntvények alakváltozása kiöntés után. A **9.a. ábrán** fröccsöntött műanyag lapka zsugorodása közben kiragadott köztes állapot síkbeli (u_{xy}) és síkra merőleges deformációs komponense (u_z) figyelhető meg. A **9.b. ábrán** a teljes, 150 lépésben, 5 nap alatt rögzített zsugorodási folyamat követhető végig néhány kiragadott állapot síkra merőleges komponense segítségével. Látható, hogy a lapka zsugorodás közben még el is görbült.

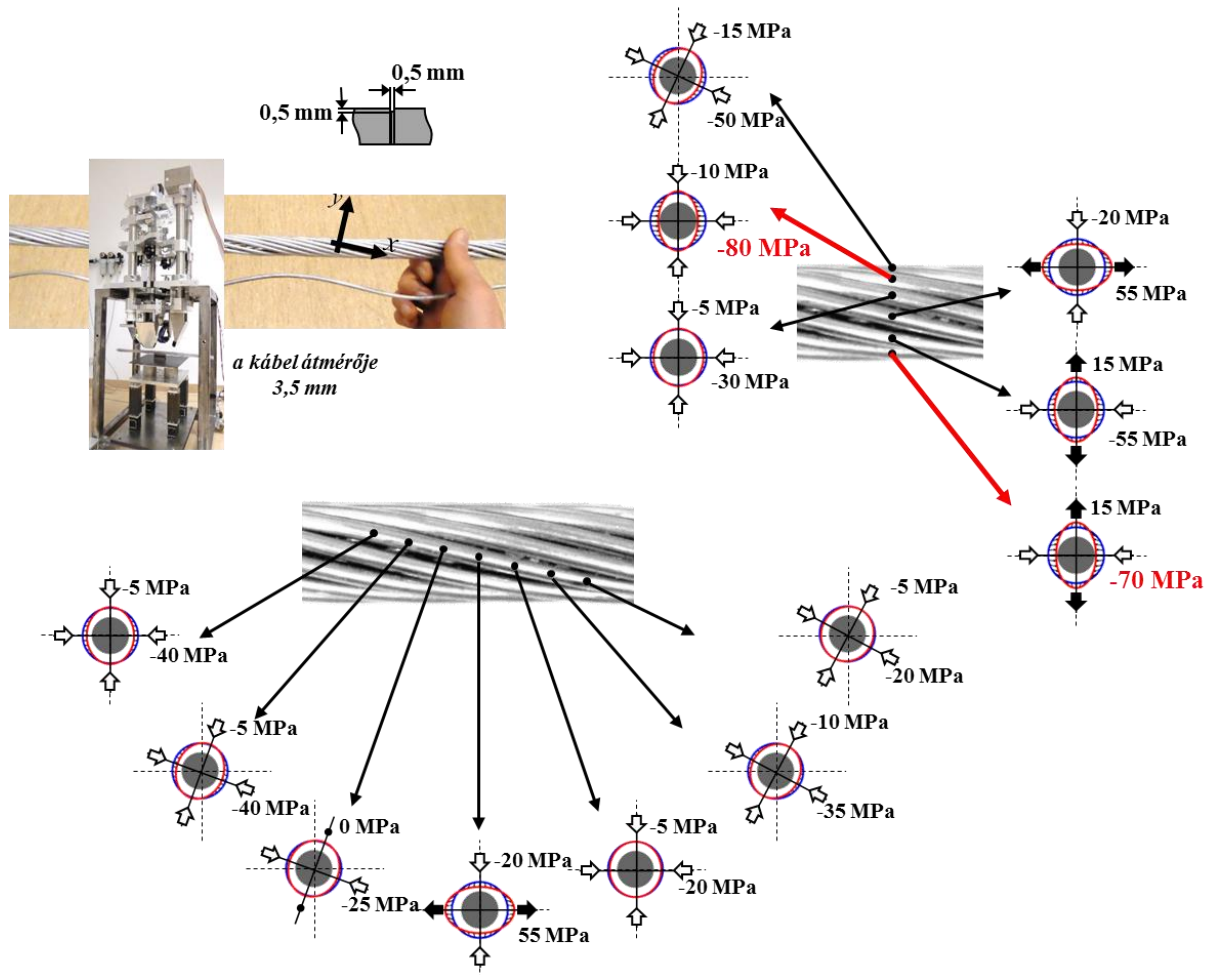


9. ábra. Fröccsöntött műanyag lapka zsugorodása során létrejövő deformáció egy köztes állapotban (a.) és a teljes zsugorodási folyamat során (b.).

Figure 9. The deformation of self-shrinkage of injection molded plastic plate: an intermediate step (a.) and the complete deformation process (b.)

Feszültségeloszlás mérésére is számtalan lehetőség kínálkozik az iparban. A **10. ábrán** összecsavart kábelköteg egyes, kívül lévő szálaiban mért maradó feszültséget (jobb oldalt), illetve egy szálaban megvizsgált maradó feszültségeloszlást láthatjuk (alul). A feszültségméréshez fúrt lyuk deformálódásából meghatározhatók a fő feszültségirányok és nagyságok. Az értékek kiszámolásához a furat körül felvett mérőkör (kék színnel jelölt kör) eldeformálódását (piros színnel jelölt

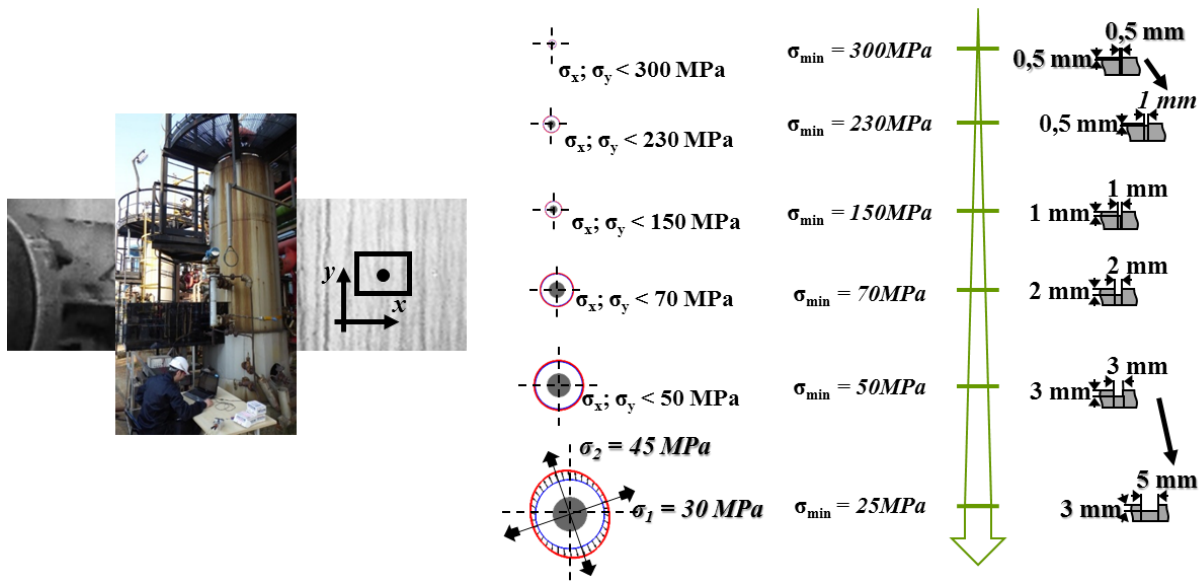
eldeformálódott kör) alkalmazzuk. A mérés felhasználható arra, hogy megjósoljuk a kábel elvágásakor bekövetkező elhajlási tendenciákat. Összességében kismértékű feszültség figyelhető meg a szálakban, illetve a kiválasztott szál mentén. Néhány szálban nagyobb feszültségérték is látható pirossal kiemelve. A vizsgált tárgy kis mérete miatt kis átmérőjű, illetve mélységű diagnosztikai furatot igényelt. Az alkalmazott 0,5 mm átmérőjű és 0,5 mm mélységű furat egyébként alig látható, nem okoz jelentős károsodást még az ilyen kisméretű tárgyakban sem, vagyis a módszer tekinthető részben roncsolás-mentesnek.



10. ábra. Összecsavart kábel egyes külső szálaiban (jobb oldalt fent), illetve egy szálban (alul) mért feszültségértékek és irányok.

Figure 10. Residual stress in wires of twisted multicore aluminum cable: in different wires (right above) and in one wire (below).

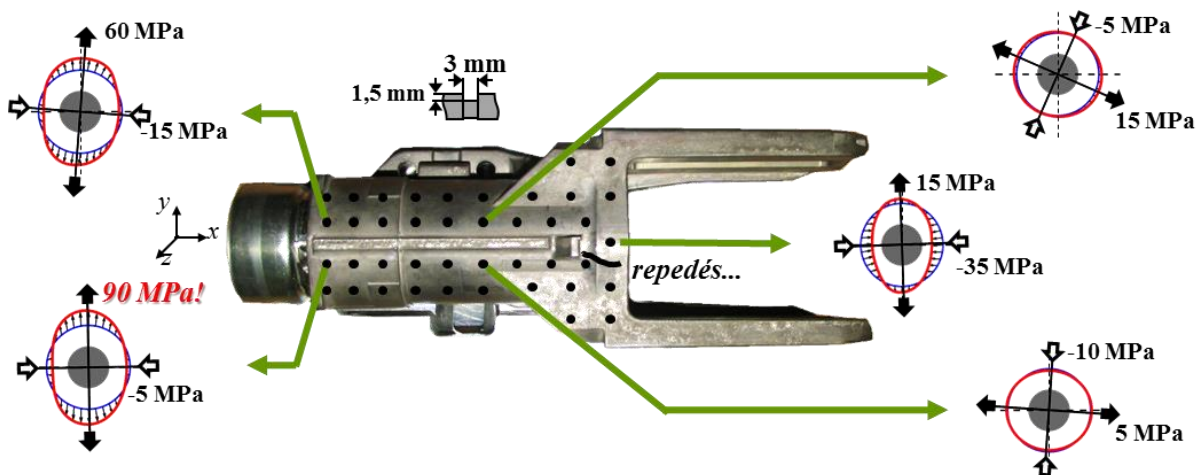
A 11. ábrán hosszú ideje használaton kívüli nyomástartályban mért maradó feszültséget láthatjuk. Ez esetben a legkisebb furatátmérőről és mélységről indulva mindkét paramétert egyre növelve vizsgáltuk a feszültséget, felügyelve a deformációs választ. Az első értékelhető deformációs válasznál a lyukfúrással leálltunk. Ezt az eljárást kontrollált és minimalizált lyukfúrási módszernek nevezzük. Ezáltal a diagnosztikai furat által okozott kárt lehet minimalizálni. Amint látható, a szükséges 30-45 MPa kimutatására 5 mm átmérőjű furatra volt szükség. 300 MPa-os veszélyesen nagy feszültség egyébként már 0,5 mm átmérőjű diagnosztikai lyukkal is láthatóvá tehető. A mérés további érdekessége, hogy egy telephelyen, szabad ég alatt végeztük, vagyis a L-Ssz mérőkamera nomád körülmények között, szinte bárhol használható, nem igényel laboratóriumi, ideális körülményeket.



11. ábra. Maradó feszültség régen használt nyomástartályban kontrollált és minimalizált lyukfúrási módszerrel: fokozatosan növekvő mélységű és átmérőjű furattal.

Figure 11. Residual stress in pressure vessel (after long term use): measured with controlled and minimized incremental blind-hole-drilling.

A 12. ábra összepréselt kormányhüvely néhány tetszőlegesen kiválasztott pontján mérhető feszültségértékeket mutatja. A mérési eredmények azt tükrözik, hogy a hüvely közepe táján alig van feszültség. Ezt támasztja alá a két kiválasztott középső pont feszültségértéke és iránya. A jobb oldalon látható repedés valószínűleg nagy feszültség miatt jött létre, felszabadítva az ott lévő feszültség jelentős részét, de a mellé fűrt diagnosztikai lyuk még minimális feszültségről árulkodik. A bal oldali részen szintén nagy feszültségeket mértünk, tehát ott repedés várható. A 12. ábrán a digitális holografikus interferometriával megvalósított feszültségmérés egyik előnyét is láthatjuk: teljes feszültség-eloszlási térkép készíthető, ha adott távolságokban végigpásztázzuk a rendelkezésre álló felületet.

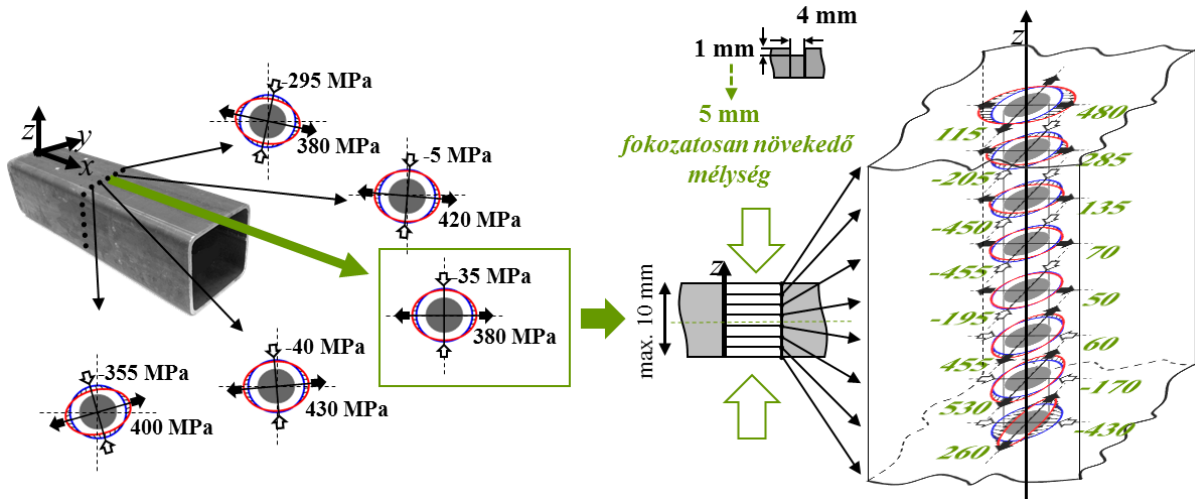


12. ábra. Feszültségeloszlás összepréselt kormányhüvely néhány kiválasztott pontjában.

Figure 12. Stress distribution at few points of a compressed steering bush.

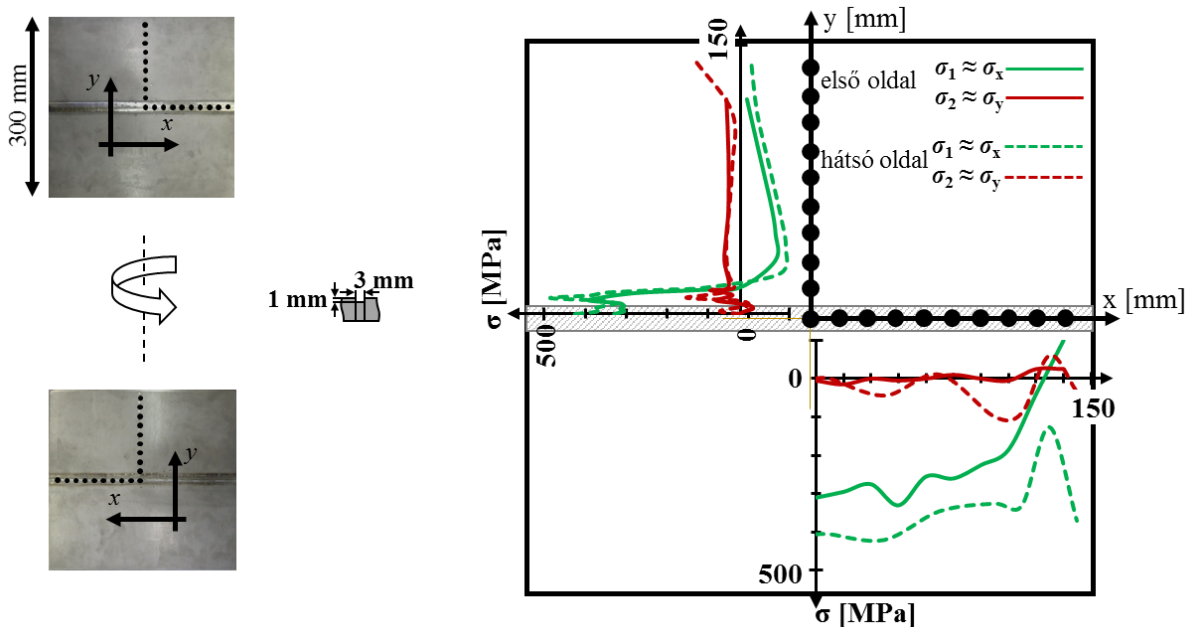
A 13. ábra hegesztett zártszelvény feszültségeloszlását szemlélteti nagyság és irány szerint egy vonal mentén (bal oldalt), illetve mélységben (jobb oldalt). A vonal menti eloszlásnál középre szimmetrikus feszültségi irányelfordulás tapasztalható. A mélységi vizsgálatoknál fokozatosan

növeltük a diagnosztikai furat mélységét a falvastagság közepéig, majd szemből fűrtünk szintén a közepéig. A felületre kivetített hosszanti (x) irányú feszültség értéke csökken a falvastagság közepéig, és teljes átfúrást vizsgálva a feszültség iránya megfordul. Ez a mérés a L-Ssz mérőkamera egy újabb extra tulajdonságát igazolja: mélységi feszültséeloszlás is vizsgálható vele.



13. ábra. A maradó feszültség eloszlása egy vonal mentén (bal oldalt), illetve mélységben (két oldalról, jobb oldalt) hegesztett zártszelvényben

Figure 13. Residual stress distribution in welded hollow section along a contour-line (left) and through full depth (right, from two sides)

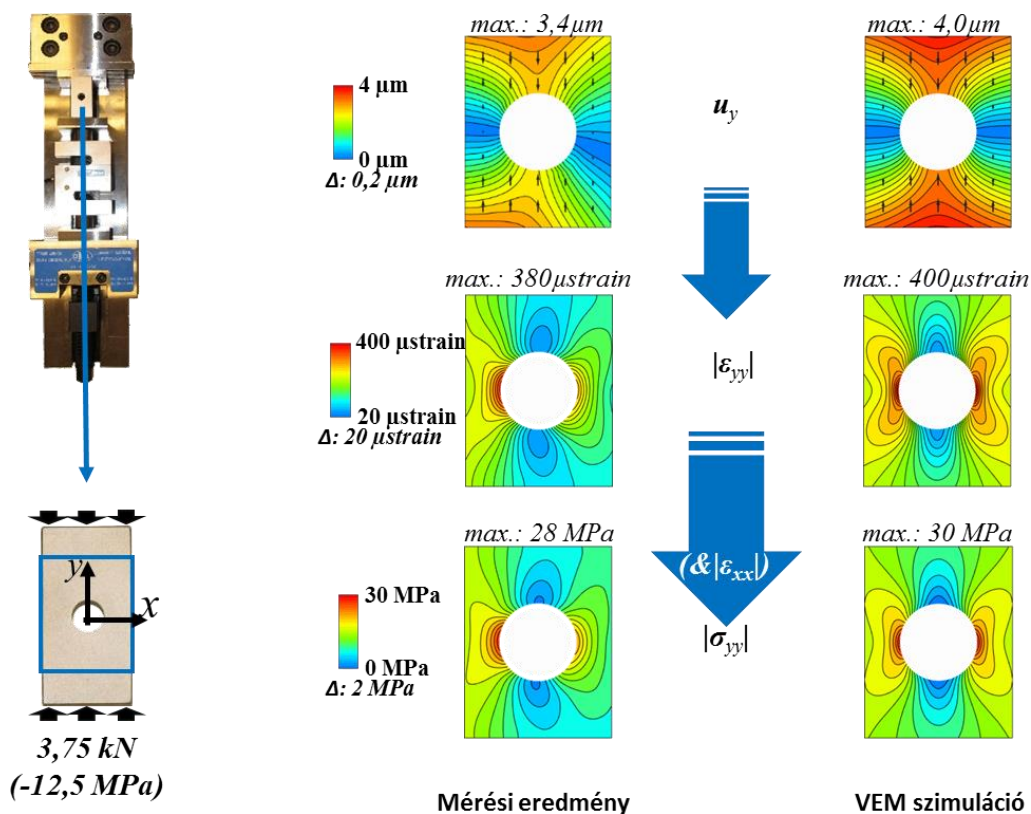


14. ábra. A maradó feszültség eloszlása hegesztett rozsdamentes acéllemezben varrat mentén és varratra merőleges irányban a lemez első és hátsó oldalán

Figure 14. Residual stress distribution along the weld and along a perpendicular line in stainless steel plate at both sides

A **14. ábrán** rozsdamentes hegesztett acéllemez feszültségeloszlásának grafikonjai láthatók a lemez első, illetve hátsó felületén mért adatokból a hegesztési varrat mentén, illetve arra merőlegesen. A fő feszültségirányok többségében a hegesztési varrattal párhuzamosan, illetve varratra merőlegesen találhatóak mindkét oldalon, így közösen megjeleníthetők.

A L-Ssz holografikus mérőkamera mérései és a végeleemes modellezés (VEM) szimulációi között szoros kapcsolat figyelhető meg. A **15. ábrán** egy összenyomott lyukas alumínium modelltárgyat láthatunk. Az összenyomás mérési eredményei (bal oldali oszlop) nagymértékben egyeznek a VEM szimuláció útján született eredményekkel (jobb oldali oszlop), vagyis a mérés felhasználható a szimuláció igazolására. Mindez relatív megnyúlás (ε_{yy}) és az aktuálisan kialakuló feszültség (σ_{yy}) esetén is megfigyelhető.

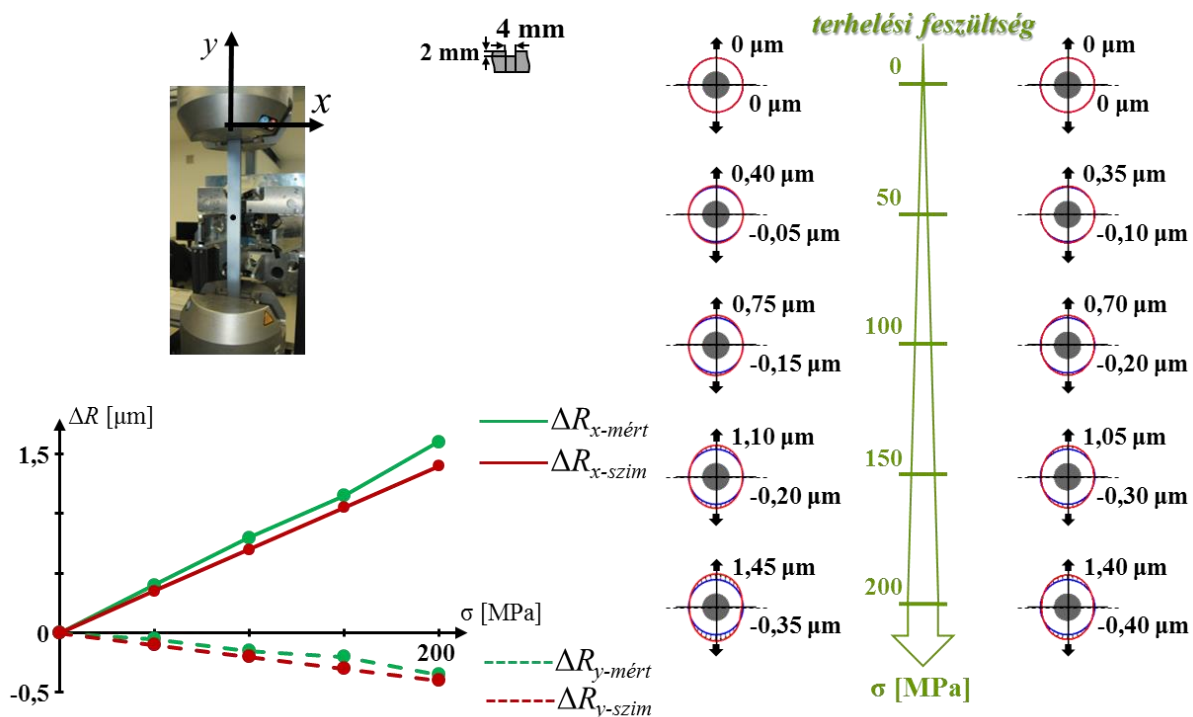


15. ábra. Deformáció (u_y), relatív megnyúlás (ε_{yy}) és feszültség (σ_{yy}) lyukas alumínium tömbben: mérési eredmény (bal oldali oszlop) és VEM szimuláció (jobb oldali oszlop)

Figure 15. Deformation (u_y), relative elongation (ε_{yy}) and stress distribution (σ_{yy}) in aluminum block with hole: measurement (left column) and finite element simulation (right column)

A **16. ábrán** látható mérésben azt illusztráljuk, hogy a VEM szimuláció megjósolhatja a diagnosztikai furat körüli mérőkörön létrejövő elmozdulást a szimuláció során alkalmazott feszültség függvényében, ezáltal feszültségi skálát előállítva. A feszültségi skála felhasználható hasonló anyagú valós tárgyban a feszültségértékek meghatározására, és nem szükséges empirikus skálákat létrehozni. Előnye az, hogy szinte tetszőleges paraméterekkel rendelkező tárgyakhoz előállíthatók ily módon feszültségi skálák. A **16. ábrán** a bal oldali oszlopban a szakítógépen szerkezeti acél konzol megnyújtásával végzett növekvő nagyságú feszültségen létrejövő mérőkör elmozdulásokat, jobb oldalon pedig a VEM szimuláció eredményeit láthatjuk. A mérőkörök mellett megjelenő elmozdulásértékeket jeleníti meg a **16. ábra** bal alsó sarkán lévő grafikon. Látható, hogy nincs jelentős eltérés a mért és a szimulált értékek között. A minimális eltérés oka az lehet, hogy a

valóságban nem feltétlen ideális, irodalomban szereplő paraméterekkel rendelkező anyagokkal mértünk. A szimuláció tehát felhasználható feszültségskálák létrehozására, ezáltal a mért elmozdulás értékek feszültség értékekké konvertálására.



16. ábra. Hosszirányban meghúzott szerkezeti acél konzol deformációja szakítógépen (bal oldali oszlop) és VEM szimulációval (jobb oldali oszlop) – az empirikus skálák kiváltására.

Figure 16. Hole-drilling stress-relief deformation of a loaded steel bar in measurements (left column) versus simulation (right column) – to replace empirical scales by simulation.

Összegzés

A digitális holográfia elterjedésével a holografikus interferometria elhagyhatja a laboratóriumi körülményeket és kiszolgálhatja az ipar által támasztott igényeket. Ennek egyik előfutára a L-Sz holografikus mérőkamera, amelynek jelenlegi változata, nagy pontosságával, részbeni vagy teljes érintésmentességével és egyidejűleg vagy lépésenkénti teljes felületre kiterjedő vizsgálati módszerével, több területen is megállja a helyét deformáció vizsgálat, illetve feszültségeloszlás mérés terén. A bemutatott mintapéldák a L-Sz mérőkamera sokszínű alkalmazási lehetőségeit tükrözik a deformáció- és feszültségmérés területein.

Irodalom

DOBRÁNSZKY J., LÓRINC Zs., GYÍMESI F., SZIGETHY A. & BITAY E. (2015): Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints. 8th European Stainless Steel and Duplex Stainless Steel Conference, Graz, Austria, pp. 138-147.

- FÜZESSY Z., ÁDÁM A., BOGÁR I., GYÍMESI F. & SZARVAS G. (1983): Hologram Interferometric Measuring System For Industry, *Proceeding SPIE 0398, Industrial Applications of Laser Technology*, October 26, 1983, p. 111.
- FÜZESSY Z., GYÍMESI F. & BORBÉLY V. (2012): Upgrading Holographic Interferometry for Industrial Application by Digital Holography, in: "Optical Imaging and Metrology: Advanced Technologies". In: OSTEN W. & REINGAND N. (Eds.): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 413-437.
- GYÍMESI F., FÜZESSY Z., BORBÉLY V., RÁCZKEVI B., MOLNÁR G., CZITROVSZKY A., NAGY A. T., MOLNÁRKA G., LOTFI A., NAGY A., HARMATI I. & SZIGETHY D. (2009): Half-magnitude extensions of resolution and field of view in digital holography by scanning and magnification. *Applied Optics* 48(31): 6026-6034.
- GYÍMESI F., FÜZESSY Z. & BORBÉLY V. (2010): Maradó feszültség, illetve aktuális feszültség mérése minilyuk-fúrásos digitális holografikus interferometriával. GTE Hegesztési Szakosztály konferenciája, 31. Balatoni Ankét: Nyomástartó rendszerek és a gazdasági recesszió (2010. október. 14., Siófok).
- GYÍMESI F., BORBÉLY V., KISS T. R., SZIGETHY D., SZIGETHY A. & BOGÁR I. (2013): Új alakuló lehetőségek a hegesztések ellenőrzésében Lézer-Sólyomszem/V holografikus mérőkamerával. *Hegesztéstechnika*, 24(1): 49-54.
- GYÍMESI F., SZIGETHY A., BORBÉLY V. & KISS R. T. (2016 a): Structural integrity measurement possibilities by L-FE digital-holographic gauge camera. *International Conference on Combined Digital Optical & Imaging Methods applied to Mechanical Engineering*, Monte Verita, Ascona, Switzerland, pp. 93-96.
- GYÍMESI F., SZIGETHY A., BORBÉLY V. & KISS R. T. (2016 b): New measurement possibilities of deformation anomalies and complete stress field distributions by portable digital-holographic gauge camera. *21st European Conference on Fracture, ECF21*, 20-24 June 2016, Catania, Italy. ScienceDirect, *Structural Integrity Procedia* 2: 2307–2314.
- GYÍMESI F., SZIGETHY A., BORBÉLY V. & KISS R. T. (2016 c): New deformation and stress measurement possibilities for structural integrity assessment - by L-Fe digital-holographic gauge camera, *20th Anniversary Structural Integrity Workshop*, 13-15. October 2016, Miskolc, Hungary, in press.
- KATULA L., KOVÁCS L., GYÍMESI F., SZIGETHY A. & BORBÉLY V. (2015): Hegesztési maradó feszültségek kísérleti vizsgálata. *Acélszerkezetek*, 12(4): 67-75.

