

Új lehetőségek a roncsolásmentes vizsgálati technikában

DR. CZINEGE IMRE

egyetemi tanár
Széchenyi István Egyetem

CSIZMAZIA FERENCZÉ DR.

főiskolai docens
Széchenyi István Egyetem

KOZMA ISTVÁN

egyetemi tanársegéd
Széchenyi István Egyetem

Az optikai digitális képkalkotás és képelemzés a roncsolásmentes anyagvizsgálatban egyre gyakrabban alkalmazott technika. Segítségével a mikroszkópos és sztereomikroszkópos felvételek, endoszkópos képek, repedésvizsgálatokkal kimutatott felületi hibák, felületi topológiai jellemzők, klasszikus ultrahangos és röntgenvizsgálati jelek értékelése automatikusan, szubjektív hibáktól mentesen megoldható.

Ebből a gazdag kínálatból két témakörre fókuszál a jelen publikáció: a háromdimenziós képkalkotást megvalósító ipari komputertomográfiára (CT), valamint a felületi topológia térbeli ábrázolására és mérésére alkalmas fénymikroszkópra és konfokális lézermikroszkópra. Mindkét eljárás közös jellemzője az, hogy valós térbeli képet ad, amely kép a korszerű vizualizáló- és elemzőszoftverekkel sokoldalúan jellemezhető.

Optical digital image generation and analysis is more frequently used technique in non-destructive testing. Using this method the evaluation of optical and stereo microscopic images, endoscopic images, surface defects, surface topology characteristics, classical ultrasonic and X-ray signals can be solved automatically, without subjective errors. Present paper is focusing on two topics from this very rich offer: on the industrial computer tomography (CT), which enables three dimensional image analysis and on the spatial description and measurement of surface topology using optical and confocal laser microscopy. Common feature of both processes that they give real stereoscopic images, which can be characterized at a high level by up-to-date visual and analytical software.

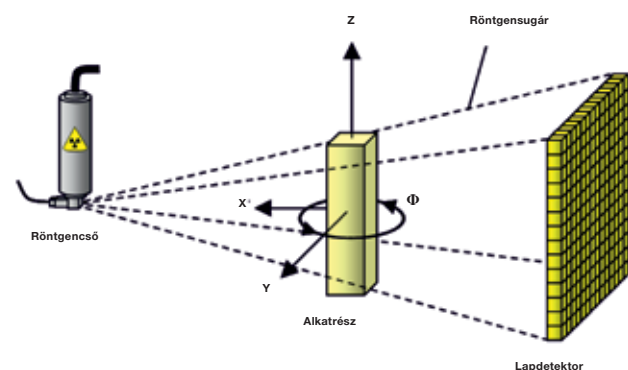
AZ IPARI KOMPUTERTOMOGRAF MŰKÖDÉSI ELVE

A komputertomográf segítségével összetett külső és belső geometriák ellenőrizhetők nagy pontossággal, a síkbeli röntgenfelvételeknél lényegesen gazdagabb információ nyerhető a belső hibákról és a felbontástól függően az anyag szerkezetéről is, mindezt gyorsan és roncsolásmentesen kapja kézhez az anyagvizsgáló szakember. A térfogati anyaghibákat (üregek, zárványok) a kiértékelő rendszer automatikusan detektálja. Ezek a hibák

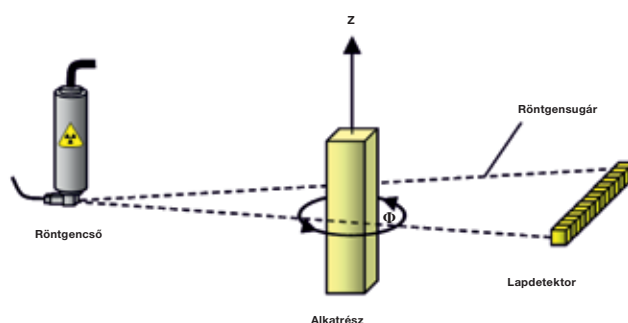
mind a 3D-s geometrián, mind a 2D-s metszeten vizualizálhatók. További előnye a technikának, hogy komplex, több anyagból és alkatrészből álló szerkezetek felépítése, esetleges hibái is ellenőrizhetők, az egyes alkatrészek és azok kapcsolata a szerkezetből kiemelten is megjeleníthető.

Az ipari CT az orvosi diagnosztikai eszközhöz hasonlóan 2D-s röntgenfelvétel-sorozatot készít a vizsgálandó objektumról úgy, hogy a tárgyasztal és az azon felfekvő alkatrész egy kis szöggel sorozatosan elfordul. Ez addig ismétlődik, amíg az alkatrész teljesen körbe nem ér, és ez idő alatt minden egyes szögelforduláskor egy röntgenkép készül. A munkadarab ellentétes oldalán elhelyezett sík- vagy vonaldetektor érzékeli az intenzitásváltozást. Az **1. ábra** a vizsgálati elrendezést mutatja. Az **1. a) ábra** hasonlít a klasszikus röntgenteknikához azzal a különbséggel, hogy nem egyetlen 2D-s átvilágítás készül az alkatrészről, hanem a tárgy minden egyes kis szögelfordulásakor egy röntgenképet tárol a készülék. Az **1. b) ábrán** vonaldetektor érzékeli az intenzitáskülönbségeket, ennél a vizsgálatnál a röntgenszó és a vonaldetektor együtt mozog függőlegesen, és közelítően milliméterenként készül egy szelet a forgó tárgyról. Emiatt a vizsgálat hosszadalmas, például egy hengerfej leképezése több óráig is eltarthat, ugyanakkor az így kapott kép élessége jobb, mint a síkdetektorral felvett képé. Mindkét leképezési mód esetében a mért jelek feldolgozását és sokoldalú elemzését hatékony 3D szoftver segíti.

A Széchenyi István Egyetem Anyagismereti és Járműgyártási Tanszékén 2010 júniusa óta üzemel egy YXLON Y.CT Modular ipari CT-berendezés (**1. c ábra**). A gép különlegessége, hogy 2 röntgensugárcsővel és két detektorral van felszerelve. A kisebb csőfeszültségű (225 kV) mikrofókuszú röntgenszóval akár a 7 µm-es, a nagyobb feszültségű csővel (450 kV) pedig 50 µm-es felbontás érhető el. Az átvilágítható falvastagság acélok esetén 70 mm, alumíniumötvözeteknél 120 mm. A berendezés 7 manipulátorral működő portálrendszerével 800x1200-as kubatúrájú alkatrészek vizsgálhatóak. A gép vizsgálati lehetőségei széles körűek, használható 3D geometriai rekonstrukcióra, inhomogenitásvizsgálatra (porozitás, zárványok, fogyási üregek), falvastagság és egyéb geometriai jellemzők mérésére. Ezen funkciók minőség-biztosítási és kutatási célokra egyaránt alkalmassá teszik.

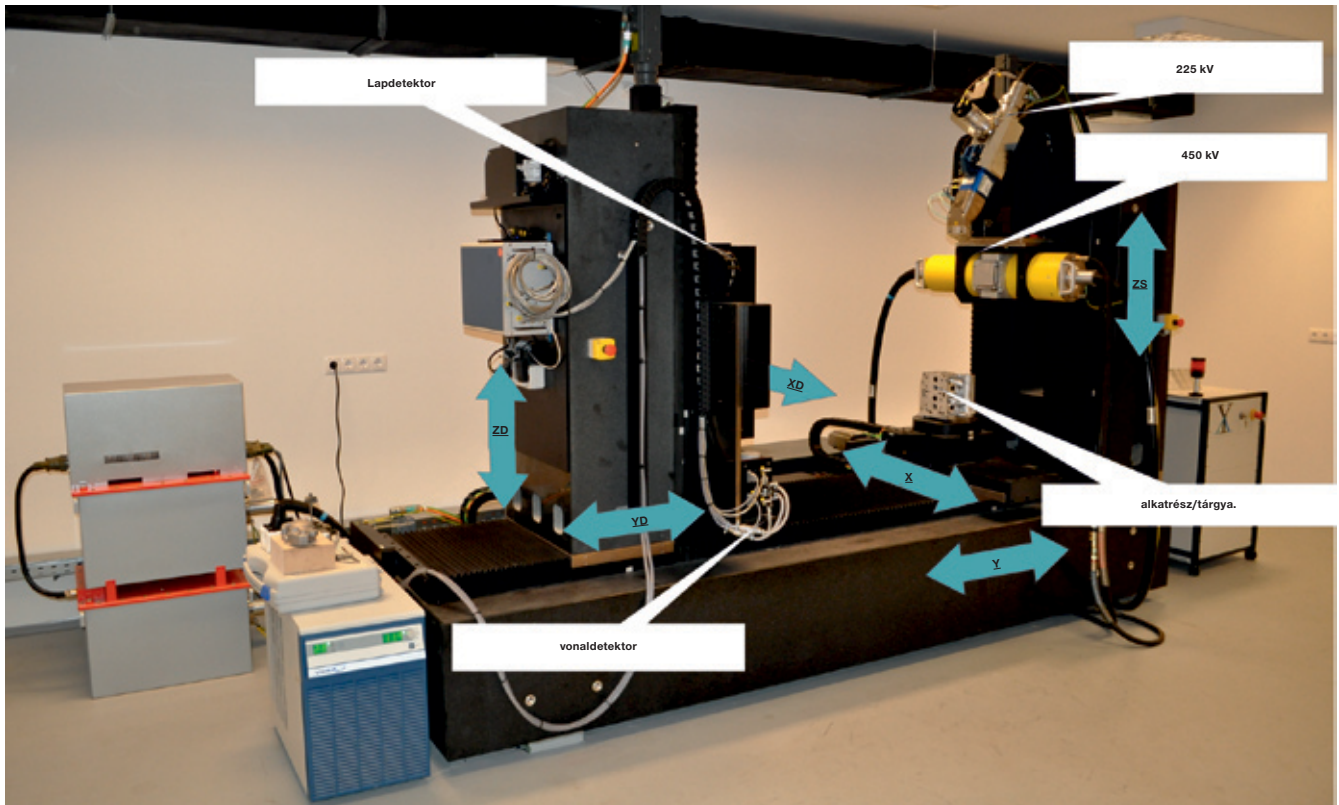


a. Érzékelés lapdetektorral



b. Érzékelés vonaldetektorral

1. a) és b) ábra: CT-vizsgálat elrendezése



1. c) ábra: CT-vizsgáló berendezés

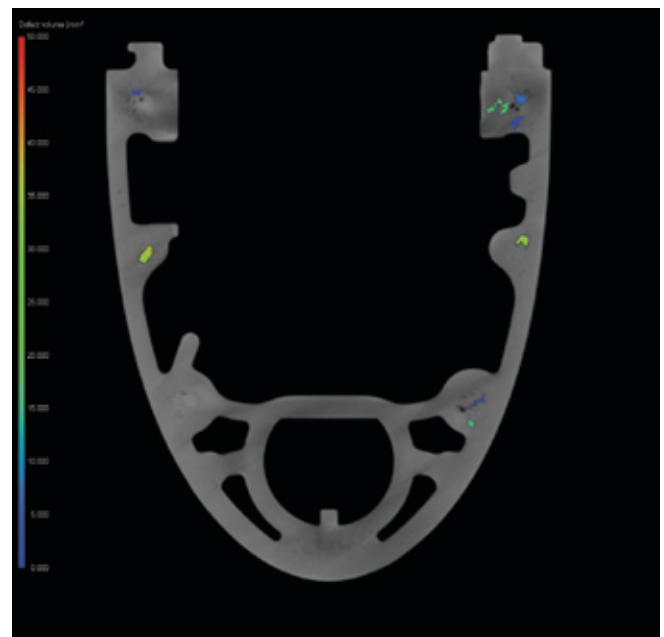
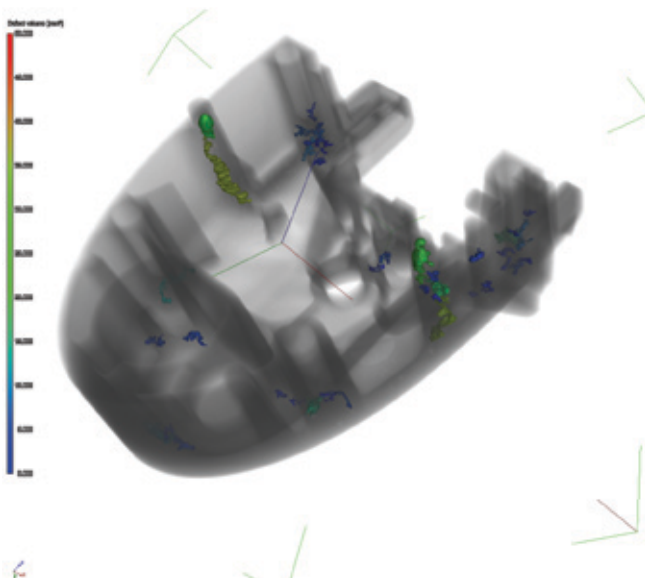
A CT-VIZSGÁLAT ALKALMAZÁSI TERÜLETEI, VIZSGÁLATI TAPASZTALATOK

Az elmúlt időszakban sokféle vizsgálati igényrel jelentkeztek a környező járműipari és egyéb alkatrész-beszállító vállalkozások. Jelentős volt az érdeklődés alumíniumöntvények belső hibáinak kimutatására és komplex szerkezetek elemzésére. A további példák az itt szerzett tapasztalatokat mutatják be.

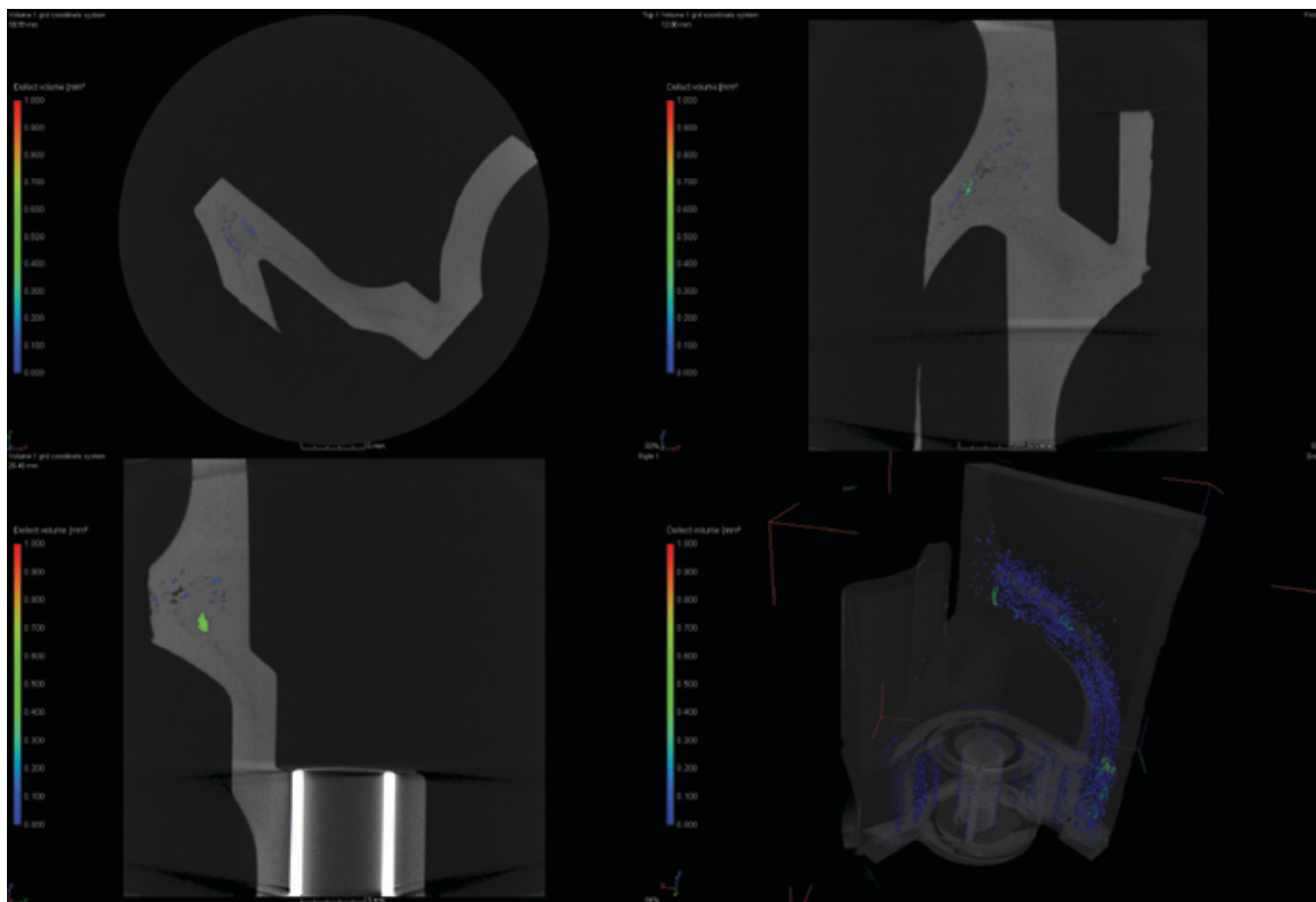
Alumíniumöntvények vizsgálata

Féknyereg komplex ellenőrzése:

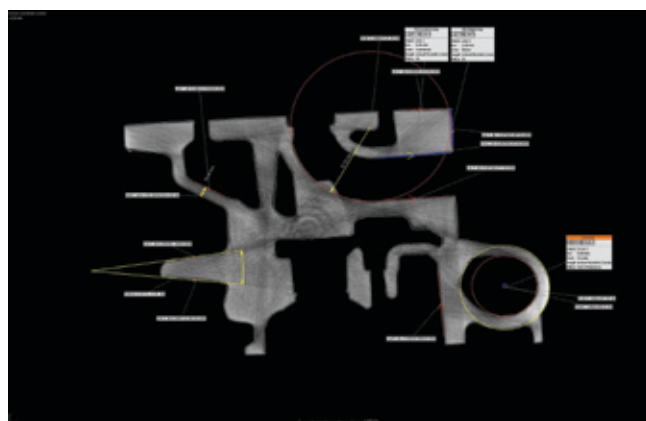
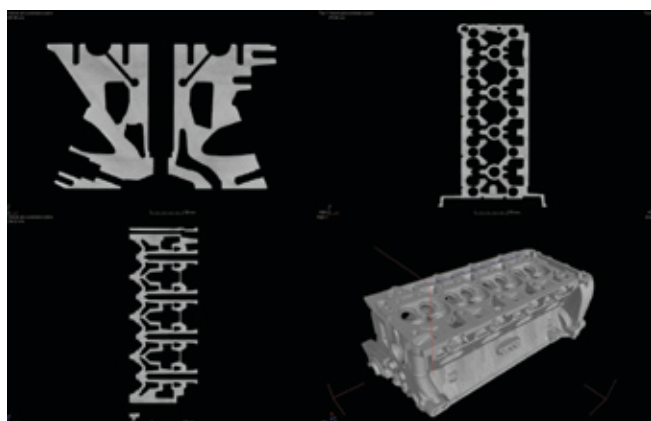
A **2. ábrán** látható alkatrész térbeli felvétele jól mutatja a belső üregek elhelyezkedését, emellett az értékelőszoftver eltérő színekkel mutatja az automatikusan detektált hibák méretét (választható térfogati és hossz méret is). Egy tetszőleges metszeten is bemutatathatók a hibák, és azokról táblázatos adatok is kérhetők, ahol megjelenik a hiba helye és fő méretei. Mód van egyes pórusok mérésére és ábrázolására is.



2. ábra: féknyereg 3D-s és metszeti képe



3. ábra: vízpumpa Al öntvény felvételei



4. ábra: hengerfej komplex vizsgálata

Vízpumpaház vizsgálata

E vizsgálat beszállítói minőség-ellenőrzés céljából készült, ugyanis esetenként szívárgás volt tapasztalható a szerkezetben. A különböző metszetekről bemutatott képek jól illusztrálják az észlelt hibákat, amelyekből a szívárgás útjára lehetett következtetni (3. ábra).

Hengerfej geometriai méreteinek ellenőrzése

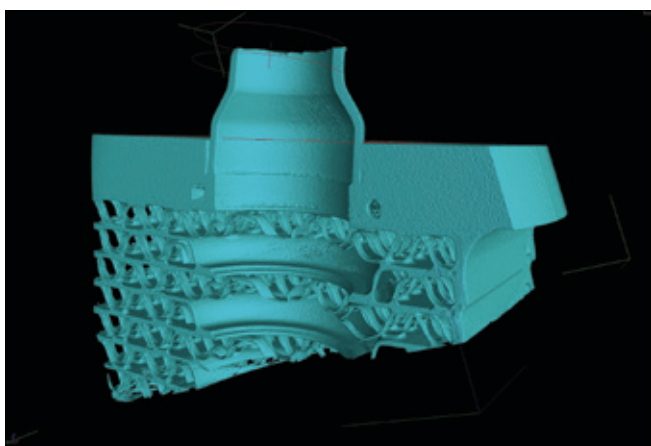
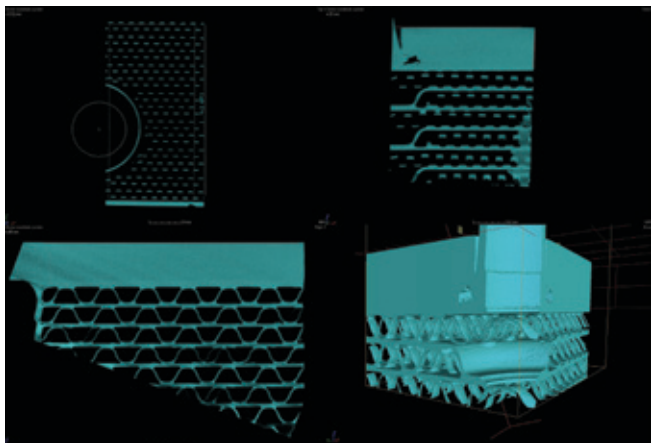
E vizsgálat célja a széria indításakor kötelező mesterdarab-ellenőrzés volt. Korábban a vizsgálatot két részre bontva lehetett elvégezni, a külső geometriai méreteket a GOM digitális optikai mérőrendszerrel végezte az egyetem, a belső hibák detektálására pedig klasszikus röntgenfelvételek készültek. A CT-vizsgálat mindkét vizsgálat elvégzésére alkalmas azzal a többlettel, hogy

ily módon az öntvény belsejében lévő geometriai méretek is ellenőrizhetők, ahogy a 4. ábra jobb oldali képe mutatja.

KOMPLEX SZERKEZETI EGYSÉGEK ELEMZÉSE

Szerelt és forrasztott olajhűtő vizsgálata

Az 5. ábrán látható olajhűtőt rétegenként szerelik össze, majd speciális forrasztási technológiával egyesítik. A vizsgálat célja az volt, hogy egy ilyen komplex szerkezeti egységről egyáltalán milyen információk nyerhetők, lehet-e észlelni az esetleges forrasztási hibákat vagy geometriai eltéréseket? A vizsgálatok azt mutatták, hogy a térbeli geometrián sokoldalúan szemléltethetők az egyes résztelemek és detektálhatók a kérdéses eltérések.



5. ábra: olajhűtő szerkezeti részletei

Katalizátor vizsgálata

Ez a vizsgálat egy hosszabb ideig üzemelő katalizátor lerakódásainak, porszenyeződéseinek detektálására irányult. A megbízó szerint ezeket a változásokat eddig csak roncsolásos úton lehetett vizsgálni, mert a hagyományos röntgenfelvételek nem mutatták ki a változásokat. Az ábra tanúsága szerint a CT-felvételen kitűnően tanulmányozható a katalizátor szerkezete, és a metszeteken jól láthatók a keresett lerakódások (6. ábra).

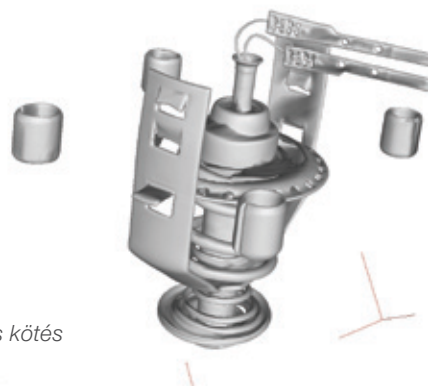
Termosztát szerkezet fásztása

A 7. ábrán látható termostát a járműmotorra felszerelve esetenként hibás jelzéseket továbbított a vezérlés felé. A helytelenül működő egységek vizsgálata a termostátérzékelő villamos kontaktusának

megszakadását mutatta. A magas hőmérsékleten végzett ciklikus rázó vizsgálat közben a villamos érintkezés megszűnését lehetett detektálni, de a termostát belsejében bekövetkezett vezetékszakadás helyét csak roncsolásos vizsgálattal lehetett megállapítani. A műszer beérkezése után elvégzett CT-vizsgálattal a hagyományos gondolkodásmódtól teljesen eltérő, új lehetőségek tárultak fel azzal, hogy az összetett, különböző anyagú alkatrészekből álló szerkezet tökéletesen megjeleníthető volt térbeli ábrán, az egyes alkatrészek külön kiemelhetők és elemezhetők voltak. Ezáltal a szerkezet fásztás közben, az egyes komponensek elhasználódása az idő függvényében kitűnően tanulmányozhatóvá válik, ha ugyanazt az egységet különböző igénybevételi számok után kiemelve vizsgáljuk, majd tovább fásztjuk.

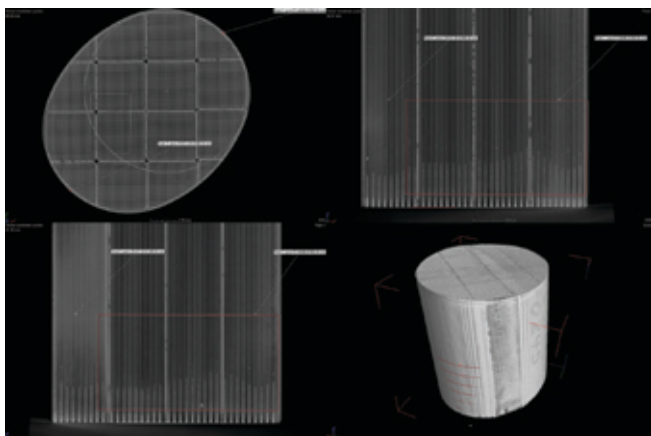


Termosztát fényképe

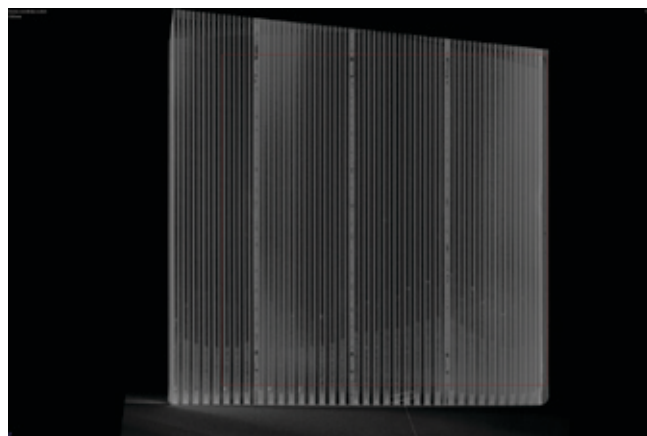


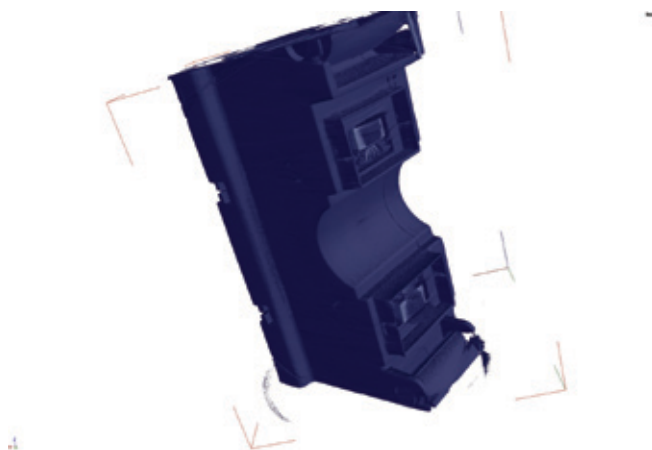
A villamos kötés

7. ábra: termostát belső szerkezetének vizsgálata



6. ábra: katalizátorban felgyűlt por detektálása





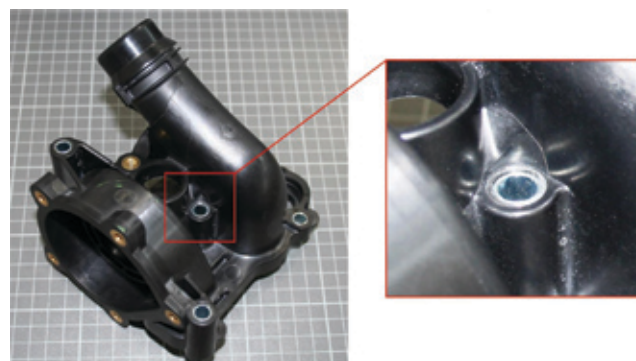
8. ábra: árammérő szonda képe és a mérőtekerces kiemelése

Árammérő szonda vizsgálata

Az árammérő szonda vizsgálati igénye hasonló volt a termosztátéhoz. Itt azt kellett megállapítani, hogy a tekercs stabilizálása érdekében a tekercs és a ház közé beöntött műgyanta vastagsága, ezáltal a tekercs helyzete megfelelő-e? A 3D felvételek ezeket az eltéréseket jól kimutatták (8. ábra).

Kompozit vízpumpaház vizsgálata

Egyes szállítóktól származó vízpumpaházakon repedés jelent meg, a feladat az ok kiderítése volt. Hipotézisként kínálkozott, hogy az erősítő karbonszálak nem megfelelő eloszlása okozza a hibát. A probléma megoldását két irányból közelítettük: Moldflow-szimulációval elemeztük a szálak várható elrendeződését, CT-felvételekkel pedig a repedés környezetének vizsgálatára került sor. A CT-vizsgálat kimutatta, hogy a repedés alatti térben a karbonszálak rendezetlenül helyezkednek el és a fröccsöntés során üregek keletkeztek. A hiba a meglövési pont változtatásával korrigálható (9. ábra).



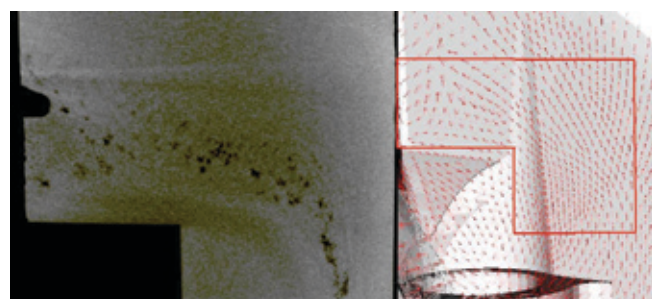
Vízpumpa fényképe és a repedés

A CT ÉS HAGYOMÁNYOS RÖNTGENTECHNIKA ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Mindkét eljárásnak megvannak az előnyei és hátrányai, a vizsgálati cél dönti el, hogy mikor melyiket célszerű alkalmazni. Az 1. táblázat mutatja az összehasonlítást:

Felülettopológiai vizsgálatok fénymikroszkóppal és konfokális lézermikroszkóppal

Optikai mikroszkópos vizsgálatoknál közismert az, hogy egy görbült felületnek egyszerre csak egyes részletei élesek, de a

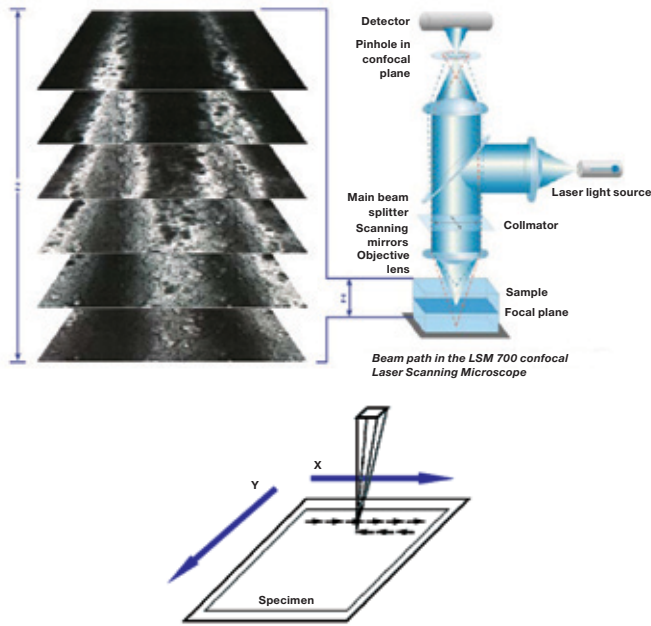
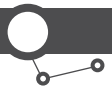


A repedés környezetében megjelenő fogyási üregek és a szimulált kép

9. ábra: vízpumparepedés analízise

CT RÖNTGENBERENDEZÉS	HAGYOMÁNYOS IPARI RÖNTGEN
Teljes 3D képalkotás	Egy vetítési irányból 2D kép
Hibaméret és koordináta	Hibaméretek vetületben láthatók
CAD-modell alkotás	Csak vetített kép látható
Bármilyen külső v. belső méret megmérhető	Méretek korlátozottan láthatók, becsülhetők
A berendezés ára magas	A berendezés ára elfogadható
A felvétel ideje több óra is lehet	Gyors felvételt készítés
Csak laboratóriumi vizsgálatra alkalmas	Helyszíni vizsgálat terjedelmes szerkezeteken lehetséges

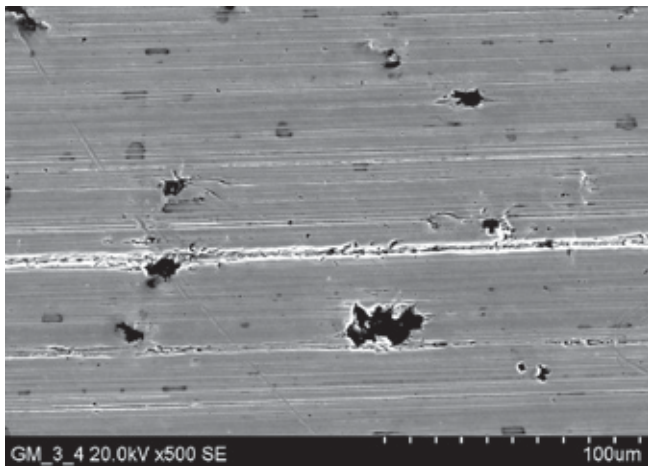
1. táblázat



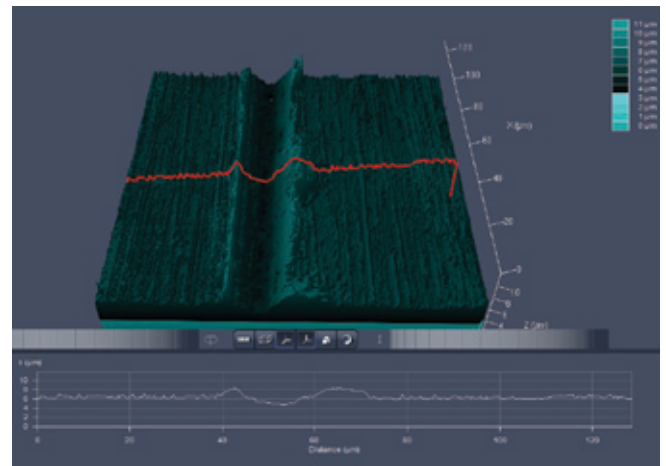
10. ábra: topológiai felvétel készítésének elve konfokális lézermikroszkóppal és a felület pásztázásának megoldása

fókusz-távolság változtatásával más rétegek is élessé tehetők. Ha tehát a mikroszkóp célszerűen választott lépéstávolsággal változtatja a lencse és az objektum közötti távolságot, és az így felvett éles részleteket térbeli képpé egyesíti, akkor olyan felvételek jönnek létre, amelyekhez z-irányú méretek rendelhetők. Ezáltal a hagyományos optikai mikroszkóp az értékelőszoftver segítségével valós térbeli képet ad a felületről, amelyből nagyon sok információ nyerhető. A magassági eltéréseket a szintvonalakhoz rendelt színekkel lehet megjeleníteni, tetszőleges metszetről profilogram vehető fel, amellyel karcok szélessége és mélysége mérhető meg, és a felület kollektív tulajdonságai, például az átlagos érdesség vagy az érdességmagasság is meghatározható. Ugyanezek a mérési lehetőségek adódnak a konfokális lézermikroszkóp alkalmazásával is, de az előbbinél lényegesen nagyobb felbontásban. A leképezés elvét a **10. ábra** mutatja.

A bal oldali kép a különböző élességű felvételesorozatot mutatja, amelyet a képen látható „z” távolság felosztásával állít elő a mikroszkóp. A berajzolt sugármenetek jelzik a különböző fókusz-távolságokat. A jobb oldali kép azt mutatja, hogyan pásztázza le a lézersugár a látómezőt. Megjegyzendő, hogy a mikroszkópasztal x-y irányú mozgatásával egy felületről több látómező is felvehető automatikusan, ezek a mozaikképek, amelyekből a szoftver egységes képet hoz létre. A topológiai mérésekre alkalmas mikroszkópok a pásztázó elektronmikroszkópok hasznos

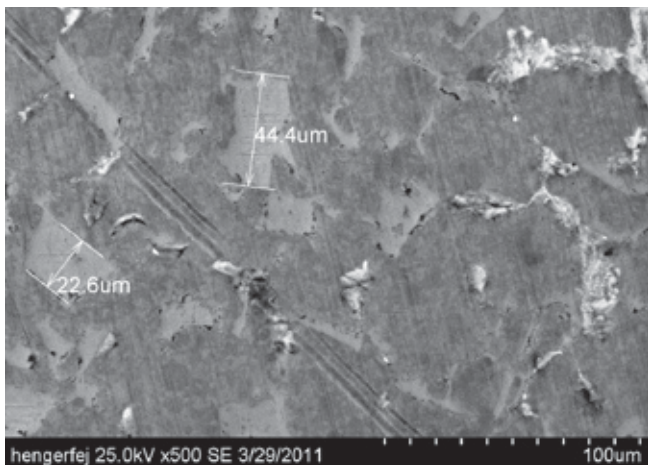


a) Pásztázó elektronmikroszkóp

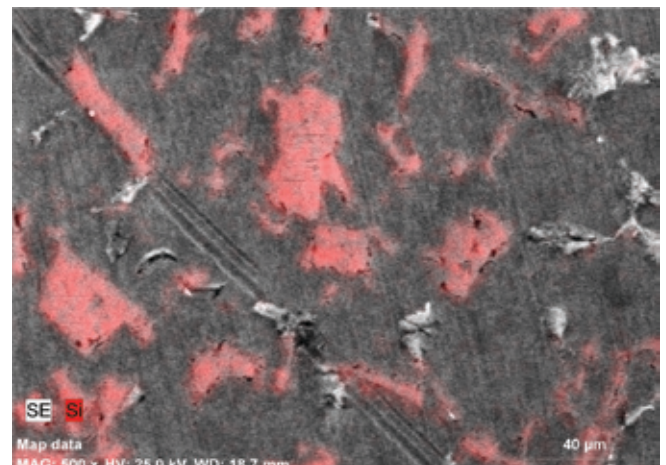


b) Konfokális lézermikroszkóppal felvett profilgörbe

11. ábra: szuperfiniselt felület képe

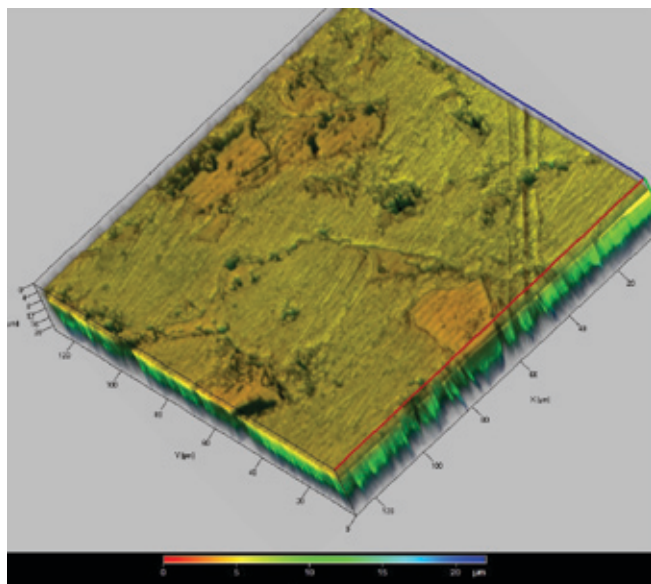
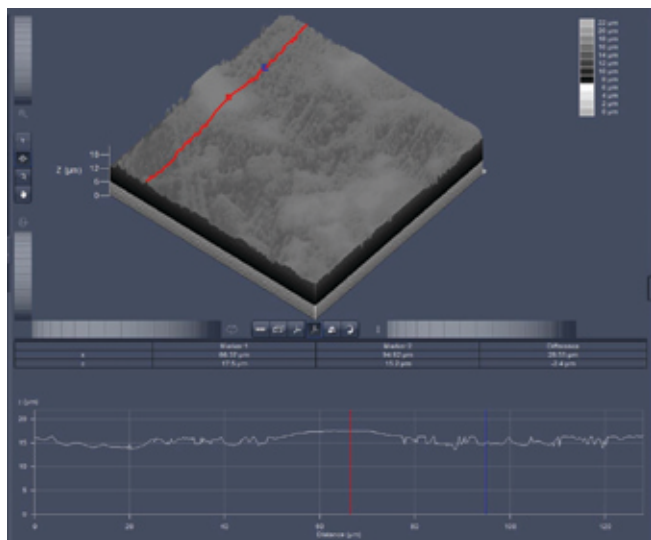


a) Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel



b) EDS-elemzés: Si-kristallitok

12. ábra: alumíniumblokk futófelületének képe



13. ábra: topológiai felvétel és profilgörbe konfokális lézermikroszkóppal felvéve

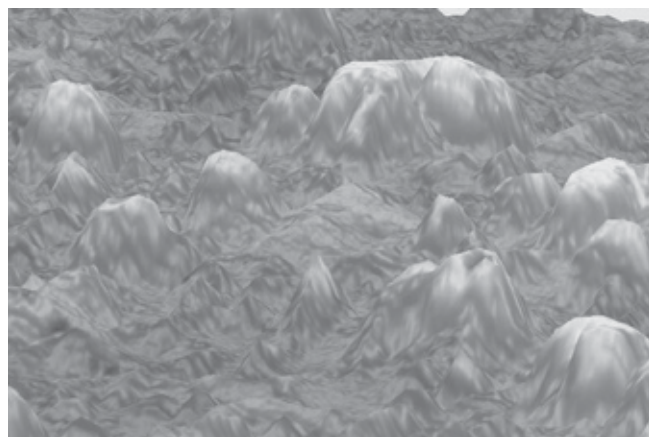
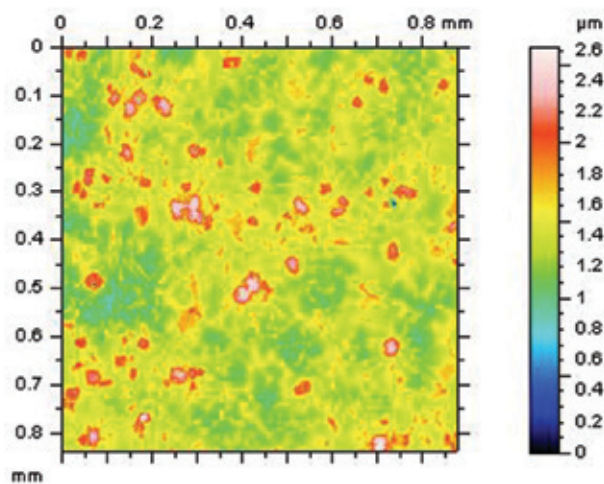
kiegészítői lehetnek azzal az előnyös tulajdonságukkal, hogy a szkennelés képek gazdag információtartalmát a z-irányú mérési lehetőséggel egészítik ki. A továbbiakban a mérési lehetőségek összehasonlítását mutatjuk be.

A **11. ábrán** látható képek gömbgrafitos öntöttvasból készült főtengely löketcsapjának szuperfiniselt felületét mutatják. A pásztázó elektronmikroszkópos képen jól látható egy éles karc, de annak mélységéről nem ad információt a felvétel. A lézermikroszkópos felvételen jól látható a térbeli képen kijelölt metszősík, az alsó képen pedig a profilmagasság változása.

A **12. ábra** a hipereutektikus alumínium-szilícium ötvözetből készült motorblokkok felületét mutatja megmunkált állapotban. A felületkezelési technológia lényege az, hogy hűtés után a primer szilíciumkristályok körül elhelyezkedő lágyabb eutektikumot mechanikus vagy vegyi kezeléssel mélyítik, ezáltal a futófelületet a nagy keménységű primer szilíciumkristallitok alkotják. A bal oldali kép a pásztázó elektronmikroszkópos felvételt mutatja, ahol a Si-kristallitok jól azonosíthatók, és síkbeli méreteik is meghatározhatók. A jobb oldali kép ugyanezen felület EDS-elemzéssel felvett képét mutatja, ahol szintén jól kiemelkednek a Si-kristallitok.

A **13. ábra** ugyanennek a felületnek egy másik részletét mutatja konfokális lézermikroszkópos felvételen. A szilíciumkristalliton áthaladó metszősík definiál egy felületi profilgörbét, amelyen tetőszöleges pontok jelölhetők ki a magasságirányú méretek jellemzésére. A piros jelölővonal a Si-kristallit platóját, a kék jelölővonal az eutektikum mélypontját jelöli. A kettő közötti magasságkülönbség $2,4\text{ }\mu\text{m}$, amely reális érték.

Összehasonlításként megvizsgáltuk a felületet Talisurf CL200 típusú profilmérővel is. A színezett topológiai képet és a letapogatott térbeli alakzatot a **14. ábra** mutatja. Látható, hogy a tűs letapogatás miatt a felület kissé más képet mutat, mint a konfokális mikroszkópos felvételen, de jellegük hasonló, és a z-irányú méretkülönbség is $2,5\text{ }\mu\text{m}$ körüli értékre adódik.

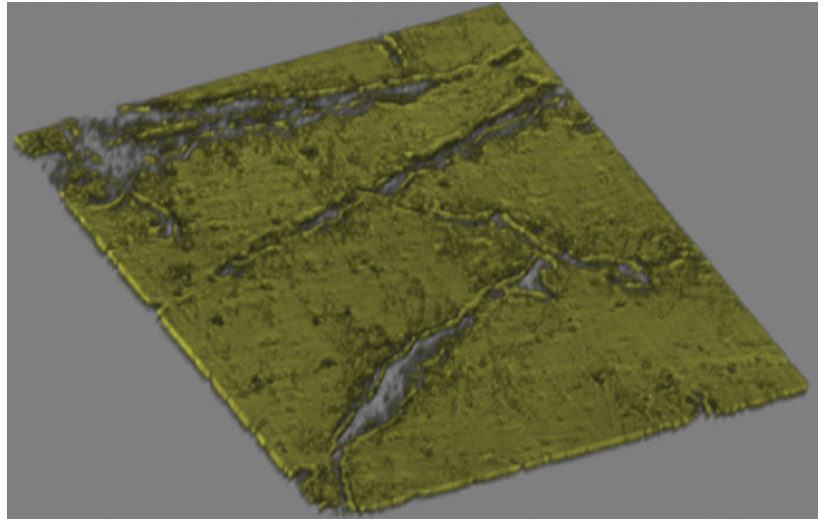
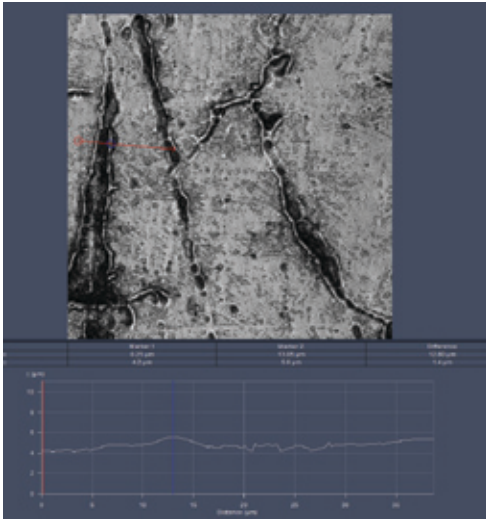
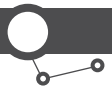


14. ábra: tűs letapogatású felvétel (lépésköz $0,5\text{ }\mu\text{m}$)

A bemutatott felvételek egymást megerősítik a topológiai rajzolat és a mért magasságkülönbségek tekintetében. A konfokális lézermikroszkóp legnagyobb előnye a letapogatással szemben az, hogy lényegesen gyorsabban eredményt ad, és a felületet valóságához közelebbi módon képezi le, ugyanis a tű geometriájából adódó torzulások nem jelentkeznek.

Egy másik érdekes felvételsort mutat a **15. ábra**, amely öntöttvas blokklézerrel kezelt futófelületéről készült. A grafit-lemez legmélyebb pontja és a lemez peremén lévő enyhe dudor magassága közötti különbség $1,4\text{ }\mu\text{m}$, ez a mérés korábban semmilyen mikroszkópos technikával nem volt elvégezhető. Ugyanezen ábra jobb oldali képe a felület 3D ábrázolását mutatja.

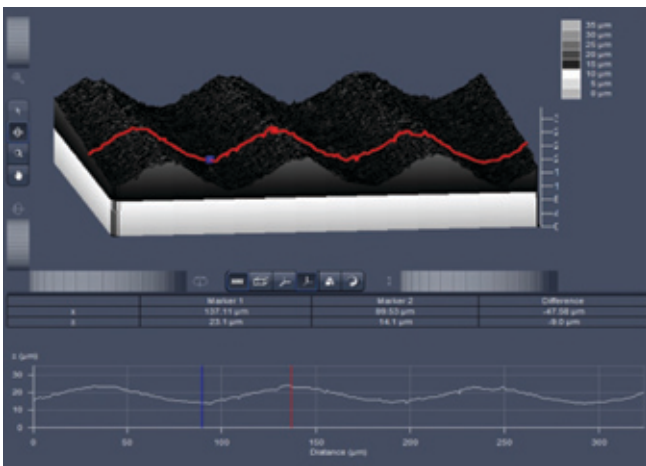
A mért értékek hitelességét érdességi etalonon végzett ellenőrzéssel valósítottuk meg. Az $Rz=9\text{ }\mu\text{m}$ -es etalon csúcs-



15. ábra: lézerrel kezelt öntöttvas hengerfelület

HAGYOMÁNYOS MIKROSKÓP ÉS PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP	KONFOKÁLIS MIKROSKÓP (LÉZER- ÉS FÉNYSZKÓP)
Hagyományos mikroszkóp és pásztázó elektronmikroszkóp	Konfokális mikroszkóp (lézer- és fénymikroszkóp)
Az optikai mikroszkóp csak sík felületről ad éles képet	Görbült vagy térbeli alakzatokról éles képet ad
A SEM felvételek mélységélessége jobb	A mélységélesség 3D ábrázolásban tökéletes
Csak 2D mérések végezhetők	Z irányú mérések végezhetők
Az optikai mikroszkóp relatíve olcsó, a SEM azonos árban van	A konfokális lézer- vagy fénymikroszkópok ára magas
Egyszerűbb felvételtétel és dokumentálás	A leképezés és értékelés bonyolult
Az összehasonlításból látható, hogy mindkét technikának vannak előnyei és hátrányai, az alkalmazási feladat dönti el, mikor melyiket célszerű alkalmazni.	

2. táblázat: a hagyományos és topológiai mikroszkópia összehasonlítása



16. ábra: érdességi etalon mérése

magassága a méréskor ugyanerre az értékre adódott. Mindezek a vizsgálatok igazolják, hogy a konfokális lézermikroszkópos felvételek jól kiegészítik a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat (16. ábra).

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott példák egyértelműen igazolják, hogy az ipari komputertomográf a hagyományos radiográfiát messze meghaladó információkat szolgáltat az alkatrészek geometriai méreteiről, belső hibáiról, illetve magáról az elkészült szerkezetéről. Ezzel a roncsolásmentes vizsgálatok hatékonyságát jelentősen növeli. A mikroszkópos felülettopológiai vizsgálatok a roncsolásmentes eljárásoknak egy új alkalmazását nyitja meg azzal, hogy számszerű eredményeket szolgáltat a felület térbeli méreteiről, a felületi képződményekről, valamint a kollektív felülettopológiai mérőszámokról. ●

FELHASZNÁLT IRODALOM:

- [1] Effenberge, I.: Computed Tomography for Quality Inspection in Rapid Manufacturing, Yxilon belső publikáció
- [2] Julien Noel, J.: Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Part, North Star Imaging Inc – 3D Scanning Magazine, 2008 december
- [3] Kasperl, S., Hiller, S.J.: Artefaktkorrekturen beim dimensionellen Messen mit Röntgen-Computertomographie – Technische Messen, 2009/9
- [4] ZEISS AG: AxioVision User's Guide
- [5] www.wikipedia.de
- [6] http://ctsim.org/