



PÁSZTÁZÓ AKUSZTIKUS MIKROSKÓP IPARI FELHASZNÁLÁSRA

/Pásztázó Akusztikus Mikroszkóp Elkészítése

LABView Alkalmazásával - P.A.M.E.L.A. V2.0/

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette:

Agócs Mihály

Gépészmérnök hallgató (BSC), 3. évfolyam

Témavezető: Dr. Pór Gábor BME egyetemi docens, DF főiskolai tanár

DUNAÚJVÁROSI FŐISKOLA

MŰSZAKI INTÉZET

2014

Tartalomjegyzék:

1. BEVEZETÉS	4
2. AZ ULTRAHANGOS MÉRÉSEK ALAPJAI	5
2.1. ULTRAHANG, KÉLTÉSE, DETEKTÁLÁSA.....	5
2.2. BEMERÍTÉSES VIZSGÁLATOKNÁL IS RELEVÁNS ULTRAHANG JELLEMZŐK	6
2.3. HAGYOMÁNYOS ULTRAHANGOS MÉRŐFEJEK	11
2.4. ULTRAHANGOS KÉPALKOTÁSI FORMÁK	14
3. AUTOMATIZÁLT BEMERÍTÉSES ULTRAHANGOS RENDSZEREK A VILÁGBAN.....	16
3.1. KC SERIES IMMERSION TANK [7]	16
3.2. LTI IMMERSION TANK [8]	16
3.3. MISTRAS ULTRASONIC SYSTEMS [9].....	17
4. TÁMOP KERETEIN BELÜL ÁLTALUNK FEJLESZTETT RENDSZER.....	18
4.1. RENDSZER JELENLEGI HARDVERES ÖSSZEÁLLÍTÁSA	18
4.2. JELENLEGI SZOFTVER (V2.0) MŰKÖDÉSE, ÚJ FUNKCIÓI.....	20
4.3. ÚJ ADATFELDOLGOZÁSI ELJÁRÁSOK	21
4.4. ÚJ KÉPFELDOLGOZÓ ELJÁRÁSOK.....	22
4.4.1. Képjavító eljárások.....	24
4.5. A RENDSZER ULTRAHANGOS FELBONTÁSAI	31
5. ALKALMAZÁSI PÉLDÁK	38
5.1. PONTHEGESZTETT KÖTÉS VIZSGÁLATA.....	38
5.2. EGY JÓ PONTHEGESZTETT KÖTÉS FELSZELETELÉSE.....	40
5.3. EGY ROSSZ PONTHEGESZTETT KÖTÉS FELSZELETELÉSE	43
5.4. KONDENZÁTOR KISÜTÉSES CSAPHEGESZTETT KÖTÉS ULTRAHANGOS FELSZELETELÉSE.....	46
5.5. TOKOZOTT ELEKTRONIKÁK ULTRAHANGGAL TÖRTÉNŐ FELSZELETELÉSE	49
6. TOVÁBBI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK	53
6.1. KÖVETKEZTETÉSEK	54
7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	55
8. IRODALOMJEGYZÉK	56
MELLÉKLET	58

Kivonat

A pásztázó akusztikus mikroszkóp egy viszonylag új, ám igen hatékony eszköz az ipari feladatokban a gépek anyagainak vagy akár tokozott elektronikák folytonossági hiányainak felderítésében. Áttekintve a nemzetközi kutatásokat és fejlesztéseket, a Dunaújvárosi Főiskolán működő Magyar Akusztikus Ipari Diagnosztikai Laboratóriumban (MAIDLAB) hoztuk létre a magyar viszonylatban úttörő mérőrendszert. Munkám során a felbontás javításával és a fókuszált fej alkalmazásával, valamint a képek javításával ma már automatikus üzemmódban az ultrahangsugárra merőleges síkban (X-Y irány) akár 200 μm -es, az ultrahangsugár irányában (Z irány) pedig akár 100 μm -es felbontással is képesek vagyunk 3D forgatható leképezést, valamint azt felszeletelve 2D képeket leképezni. Az általam fejlesztett szoftverrel a vizsgálatok eredményei megjeleníthetők az ultrahang vizsgálatokban jól ismert, szabványos A-,B-,C-,D-képekben is. A módszer mentes a szubjektív hibáktól, ami a kézi típusú vizsgálatokról nem mondható el. Az általunk alkalmazott eszközökkel létrejövő rendszer, akár harmadával, negyedével olcsóbb, mint a piacon ma kapható berendezések.

A rendszer már jelenlegi állapotában is alkalmas az MSZ EN ISO 17640-es szabványban előírt Ø3 KHF (keresztirányú hengeres furat) és Ø1- Ø3 mm KTR (körtárcsa reflektor) méretű hibák azonosítására illetve 2D és 3D megjelenítésére. Bemutatásra kerülnek ponthegesztett kötések sikeres vizsgálatai, valamint a kondenzátor kisütéses csaphegesztésben való kiválás mértékének meghatározása, ami már ipari megrendelésre készült. A gyantával kiöntött, tokozott elektronikákban felszeletelésünk még a beöntött mikrochipeket is akár négy rétegre bontják és lábait láthatóvá teszik, de még a gyantában megbúvó buborékokat is. Bemutatott eredményeim bizonyítják a viszonylag olcsó megoldásokkal felépült berendezés használhatóságát, ami lehetővé teszi, az új eszköz bevezetését a kis-és középvállalkozások ipari szegmenseibe, akik kisméretű alkatrészek ellenőrzését akár diagnosztikai akár gyártási ellenőrzés céljából hatékony integrált ultrahangos rendszerekkel kívánják majd megvalósítani. Továbbá azok számára is kedvező választás lehet eljárásunk, akik az ár/érték arány szempontjából a költséghatékonyságot is szem előtt tartják.

1. Bevezetés

A **pásztázó akusztikus mikroszkóp (P.A.M.)** egy olyan eszköz, amellyel fókuszált ultrahangot használva roncsolás nélkül vizsgálhatunk egy tárgyat, amelynek részei különböző akusztikai impedanciával rendelkeznek. Az első pásztázó akusztikus mikroszkópot 1974-ben fejlesztette ki Lemons és Quate [1]. A pásztázó akusztikus mikroszkóp egy ultrahang távadóból származó fókuszált ultrahang nyalábbal működik. Az „adó” üzemmódban kibocsátott, majd visszaverődött hangot ugyanaz az ultrahangos vizsgálófej érzékeli „vevő” üzemmódban. A reflexiókat felhasználva az ultrahangos berendezés megfelelő képeket állít elő. A pásztázás (letapogatás) automatizált mozgatással történik.

A Dunaújvárosi Főiskola TÁMOP projektjében¹ kiemelt szerepet kapott berendezésünk fejlesztése, amelynek eredeti munkálatai korábban egy ipari érdeklődésre indultak meg a Magyar Akusztikus Ipari Diagnosztikai laboratóriumban (MAIDLAB). A téma korszerűségét és fontosságát számos cikk és könyv bizonyítja [1,2,6,21].

A pásztázás (letapogatás) ipari felhasználása, főleg a bemerülés típusú ultrahangos technikákkal együtt alkalmazva, egyre elterjedtebbé vált az elmúlt évtizedben [2]. Ezt azonban elsősorban viszonylag nagy tárgyaknál alkalmazzák, valamint ezek a rendszerek meglehetősen drágák.

Az eredeti fejlesztési feladatunkat az autóipar kezdeményezte, ahol a tokozott elektronikákat széles körben használják. Ezekben fröccsöntött műgyantába öntött áramkörök vannak. A feladatunk az volt, hogy a gyantában lévő légbuborékokat, porozitásokat detektáljuk. Látni fogjuk, hogy ezt el lehet érni akár egy jó felbontásra képes nagyfrekvenciás ultrahangos fejjel.

Dolgozatomban először bemutatom, hogy meddig jutott el az automatizált ultrahangos mérőrendszerek fejlesztése nemzetközi szinten, amikor a munkához láttam. A rendszer elvét és összetevőit a 4. fejezetben mutatom be. Az 5. fejezetben pedig látható, hogy akár jobb, mint 0,1 mm-es felbontást is el tudunk érni. Amint sikerült elérni a 100 mikronnál is jobb felbontást, akkor a rendszert már nem csak elektronikák átvilágítására használtuk, hanem elkezdtünk ponthegeesztések és egyéb hegeesztések kötését is vizsgálni. Ezek az eredmények is az 5. fejezetben találhatók.

¹ TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027: Nagy Teljesítő Képességű Anyagok Kutatása, Projektvezetők: Dr. Verő Balázs és Dr. Trampus Péter

2. Az ultrahangos mérések alapjai

2.1. Ultrahang, keltése, detektálása

A 20 Hz-nél alacsonyabb frekvenciájú rezgéseket infrahangnak, a 20 000 Hz-nél magasabb frekvenciájú hangokat ultrahangnak nevezzük. Az ultrahang emberek számára nem hallható, de az állatok közül sokan hallják, közzismert, hogy a kutyák reagálnak rá. A denevérek és a delfinek maguk is keltenek ultrahangot a tájékozódásuk során [3]. Az ultrahang hullámhossza igen rövid a magas frekvencia következtében. Kis energiaigénye miatt az emberi szervezetet sem károsítja, így az orvosi diagnosztikában széleskörűen elterjedt már napjainkban. Ultrahangot jellemzően a piezoelektromosság vagy a magnetostrikció jelenségét felhasználva állíthatunk elő.

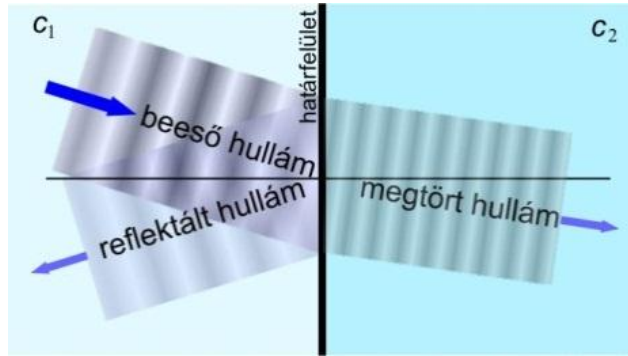
Az ultrahang keltése:

A roncsolásmentes anyagvizsgálatokhoz az ultrahang keltéséhez használt elektromos jel több MHz frekvenciájú szinuszosan változó, néhány periódust tartalmazó rövid hullámcsomag, burkoló görbéje jellemzően impulzusszerű kezdődő és exponenciálisan lecsengő elektromos rezgés. Az elektromos rezgéseket elektromos kábelon vezetik a célnak megfelelően kiképzett sugárzó és egyben detektáló fejbe, az úgynevezett transducer-be (továbbiakban távadó). Ebben foglal helyet az elektródokkal ellátott piezoelektromos anyag. A távadó az elektromos energiát ultrahangrezgésekké alakítja (inverz piezoelektromos hatás), amely a vizsgált anyag felé sugárzódik. Ez az ultrahang impulzus („adás”) csak rövid ideig, néhány periódusig tart (hullámcsomag) [3].

Az ultrahang impulzus megszűnte után bekövetkező „csendben” a távadó „vételre kapcsol”, és a vizsgált anyagból visszaérkező reflektált visszhangokra (echo) vár. Egy bizonyos idő elteltével a gyengült intenzitású „visszhang” eléri a távadót, és deformálja annak piezo kristály elemét. A távadó vevő szakaszában, a bekövetkező elektromos polarizáció következtében, az ultrahang visszaalakul elektromos rezgéssé (direkt piezoelektromos hatás), ami az elektródakon és a kábelon keresztül visszavezetődik egy elektromos jelerősítőbe [4].

2.2. Bemérítéssel vizsgálatoknál is releváns ultrahang jellemzők

Különböző akusztikus impedanciájú közegek határfelületén az ultrahang részben visszaverődik (reflexió), részben behatol a határfelület utáni közegbe (1. ábra). Amennyiben az ultrahang terjedési iránya nem merőleges a határfelületre, az ultrahang az újabb közegben (a fény töréséhez hasonlóan) irányt változtat, megtörik (refrakció) [5].

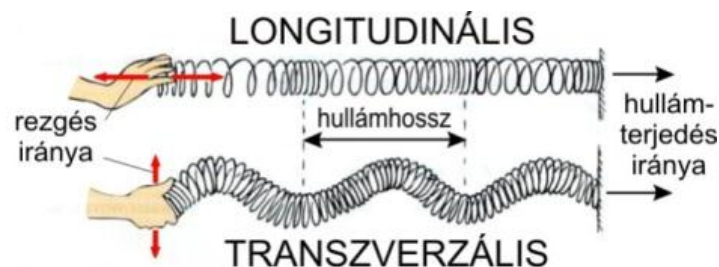


1. ábra: Az ultrahanghullám visszaverődése és törése ($c_1 > c_2$) [5]

Az ultrahang terjedése szempontjából fontos, a közeg akusztikus minőségét jellemző paraméter az akusztikus impedancia (Z): $Z = P \cdot c$, ahol P a közeg sűrűsége és c az ultrahang terjedési sebessége az adott közegben.

Longitudinális, transzverzális hullám:

A longitudinális hullám terjedési iránya megegyezik a rezgés irányával. Ilyen pl. a hanghullám a levegőben. A transzverzális hullám olyan hullám, ami a haladási irányára merőlegesen kelt rezgéseket a közegben, amiben terjed. Ilyenek például egy húron terjedő hullámok, vagy a szabad elektromágneses hullámok (2. ábra) [3].



2. ábra: A longitudinális és transzverzális hullám szemléltetése [3]

Anyagok	Longitudinális terjedési sebesség [m/s]	Transzverzális terjedési sebesség [m/s]
Alumínium	6320m/s	3130m/s
1020 acél	5890m/s	3240m/s
Öntöttvas	4800m/s	2400m/s

1. táblázat Longitudinális, transzverzális terjedési sebességek, különböző anyagok esetén

Összevetve a longitudinális és transzverzális sebességeket (1. táblázat) megfigyelhetjük, hogy a transzverzális sebesség közelítőleg fele a longitudinálisnak. Az ultrahang légnemű és folyékony közegek belsejében longitudinálisan, szilárd anyagokban mind longitudinálisan, mind transzverzálisan terjedő mechanikai hullám [4].

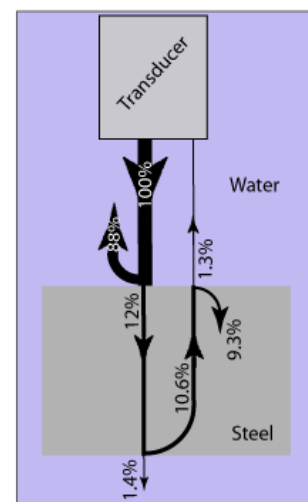
Visszaverődési együttható:

A különböző akusztikus impedanciájú közegek határfelületéről visszavert intenzitás (J_R) és a beeső intenzitás (J_0) hányadosa a határfelület reflexióképessége (R , visszaverődési együtthatónak is nevezik):

$$R = \frac{J_R}{J_0} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$
, amit a képlet szerint a határoló közegek akusztikus impedanciájának (Z_1 , Z_2) ismeretében meghatározhatunk. Az együtthatót 100-al megszorozva megkapjuk, hogy a felületre érkezett energia hány %-a verődött vissza.

Minél nagyobb a határoló közegek közötti akusztikus impedancia különbség, annál nagyobb a reflektált ultrahang intenzitása. Folyadék–gáz, vagy szilárd–gáz határfelületen az ultrahang csaknem teljesen visszaverődik. Ezért van az, hogy amikor bemenítéses ultrahang vizsgálatot akarunk végezni, a távadó és a vizsgált tárgy közötti légrést valamilyen csatoló közeggel (pl. víz, olaj) kell kitölteni.

Amennyiben végigkövetjük a visszaverődéseket és átviteleket egy alkatrészben, a kibocsátott energiának csak egy igen kicsiny része jut vissza a vizsgálófejhez, még akkor is, ha a csillapítást elhanyagoljuk [4]. Ezt a folyamatot a 3. ábrán követhetjük nyomon.



3. ábra Az ultrahang visszaverődései bemenítéses vizsgálatkor [4]

Hibadetektálás és hullámhossz összefüggése:

Amennyiben megváltoztatjuk a frekvenciát, miközben a terjedési sebesség állandó marad, megváltozik a hang hullámhossza is. A hang hullámhossza szignifikánsan befolyásolja egy hiba detektálásának valószínűségét. Ahhoz, hogy egy hibát esélyünk legyen felderíteni, a hiba méretének meg kell haladnia a hullámhossz felét [6].

Az érzékenység és a felbontás két gyakran alkalmazott kifejezés az ultrahangos vizsgálatok témakörében, amelyek leírják a technika hibafelderítő képességét. Az érzékenység az a képesség, hogy képesek legyünk kisméretű folytonossági hiányt felderíteni. A jobb érzékenységet a frekvencia növelésével, azaz a hullámhossz csökkentésével érhetjük el. A felbontás az a képesség, hogy megkülönböztessünk egymáshoz közel eső hibákat, vagy észleljünk olyan hibát, amely közel esik az anyag felületéhez. A felbontás szintén javul, ahogy növeljük a frekvenciát. Megkülönböztetünk az ultrahangsugár merőleges síkban (X-Y irány) lévő és az ultrahangsugár irányában (Z irány) lévő felbontást.

Az ultrahang csillapodása:

Az ultrahangban terjedő energia egy része a testekben elnyelődik, hővé alakul. A sugárzások gyengülésének általános törvénye szerint: $J = J_0 e^{-\mu \cdot x}$, ahol J és J_0 az intenzitás x, ill. $x = 0$ távolságban, μ pedig az abszorpció együttható.

Amikor egy hanghullám áthalad valamilyen közegen, a távolsággal együtt csökken az intenzitása. Ideális anyagban a hangnyomás, azaz a jel amplitúdója csak a hullám szétterjedése miatt csökken. A valódi, nem ideális anyagokban további hatások is gyengítik a hangot. Ezt a további gyengülést a szóródás és az elnyelés jelensége okozza. A csillapítás általában a jel frekvenciájának négyzetével arányos.

Kisméretű hibák felderítése:

A visszavert energia mértékéből következtethetünk a hiba nagyságára. Emiatt az ismert távolságban lévő, de ismeretlen nagyságú reflektort mindig egy ugyanolyan távol lévő, de ismert méretű reflektorhoz viszonyítunk. Ezek lehetnek természetes és mesterséges reflektorok.

Természetes reflektor lehet az alkatrész geometriájából adódó reflektor, egy-egy furat, bevágás vagy akár a lemez éle. Sokkal elterjedtebb azonban a mesterséges reflektorok alkalmazása. Ezek pontosan olyan helyen, méretben és darabszámban készíthetők el, ahogy szükséges.

Általában a vizsgált alkatrészsel megegyező anyagból készült próbatestbe munkálják be őket és egy előzetes próbamérés során veszik fel róluk a viszonyítási szinteket, amiket aztán az alkatrészek éles mérésénél alkalmaznak [5].

Műhibák típusai:

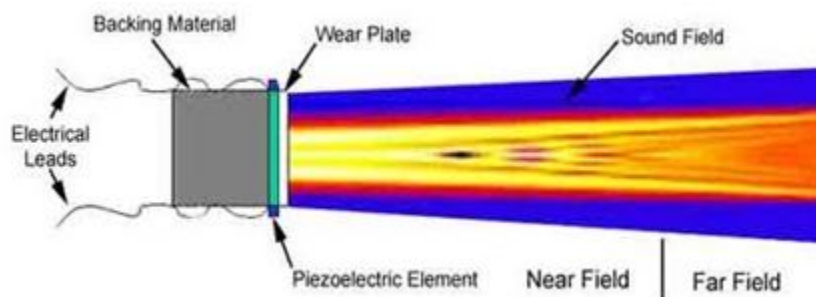
Keresztirányú hengeres furat (KHF): előnye, hogy minden besugárzási szögből alkalmazható, minden irányból ugyanakkora reflektorként jelenik meg.

Körtárcsa reflektor (KTR): a hangnyalábra merőleges fenekű hengeres furat, csupán egy adott besugárzási szög esetén alkalmazható, viszont a róla kapott visszhangjel egyenesen arányos a felületével.

Horony: egyszerű elkészítése miatt alkalmazzák. A róla kapott visszhangjel nagyban függ az alkalmazott frekvenciától, a besugárzási szögtől és a horony mélységétől is.

Hangtér:

A hangtér az akusztikai tér azon része, amely a hangforrás közelében tapasztalható. A piezoelektromos vizsgálófejekből kibocsátott hang nem egyetlen pontból, hanem egy piezoelektromos elemekből álló felületből származik. A kör felületű rezgővel rendelkező fejek hengeres hangteret hoznak létre. A 4. ábrán egy ilyen fej hangtere látható, ahol a világosabb színek nagyobb hangintenzitást jelölnek [3].



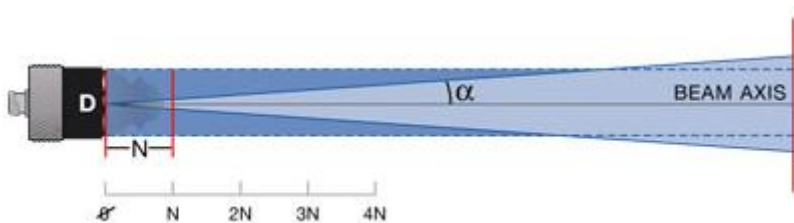
4. ábra: kör alakú rezgő hangtere [3]

A hangteret sok egymáshoz közel eső hangforrás hozza létre, a rezgő közelében a hangtér intenzitása erősen változó a hang interferenciája miatt. Ezt a területet nevezzük közel térnek. A hangnyomás inhomogenitása miatt ebben a szakaszban nagyon nehéz volna hibákat felderíteni.

A közel tér után a hullámok létrehoznak egy homogénebb hangnyalábot, amelyben a hullámok úgy viselkednek, mintha a rezgő középpontjából indulnának ki, ezt nevezzük távoltérnek. A közel- és távoltér átmenetét a rezgőtől N távolságra találjuk, ezt az N távolságot nevezzük a sík (fókuszálatlan) vizsgálófej „természetes fókuszának”. Ez a távolság nagyon fontos, mivel a közvetlenül ezután található terület az, ahol a hangnyaláb megfelelően homogén, és itt éri el a legnagyobb erősségét is. Emiatt az ezen a területen található hibák detektálhatók a legjobban.

Hangnyaláb széttartása:

A kör alakú rezgővel rendelkező fejek hangtere egy hengerhez hasonló, de a hangenergia az anyagban történő haladása közben kihajlik az eredeti irányából, és kúpszerűen széttartóvá válik. Ezt a széttartást leginkább azzal a szöggel jellemezhetjük, amelyet a hangnyaláb két „széle” zár közre a távoltérben. [4]



5. ábra: A hangnyaláb széttartása [4]

Az 5. ábrán jelölt N közel tér távolságot a következőképpen számíthatjuk:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

A hangnyaláb széttartásának α fél szögére pedig az alábbi képlet ad közelítő becslést:

$$\sin \alpha = \frac{0,514c}{2Df},$$

ahol D a rezgőátmérő, f frekvencia, c hangterjedés sebessége, λ a hullámhossz. Ebből látható, hogy a széttartás növekszik, mikor alacsonyabb frekvenciás fejet használunk, illetve ha csökkentjük a rezgőátmérőt.

2.3. Hagyományos ultrahangos mérőfejek

Kontakt fejek:

A kontakt fejek használat közben üzemszerűen hozzáérnek a vizsgált felülethez. A rezgőjüket általában robosztus burkolattal látják el, ami megvédi őket, a különböző anyagokon való csúszás közben keletkező sérülésektől. Ezeknek a fejeknek általában ergonomikus kialakítása van, lehetővé téve a szilárd fogást és a könnyű mozgatást a felületen. Sokszor tartalmaznak cserélhető kopólemezeket, hogy megnöveljék az élettartamukat. Használatukkor csatolóanyagot (olaj, zsír, víz stb.) kell alkalmazni, hogy eltávolítsák a légrést a vizsgált felület és a fej közül. [4]

Adó-vevő fejek:

Az adó-vevő fejek két egymástól függetlenül működő rezgőt tartalmaznak, az egyik folyamatosan adó üzemmódban, a másik folyamatosan vevő üzemmódban dolgozik. Különösen alkalmasak arra, hogy olyan hibákat tárjanak fel, amelyek közel esnek a felülethez, mivel a normál, impulzus-visszhang üzemmódban dolgozó fejek addig nem tudnak venni, amíg abba nem hagyták az adást. Így a nagyon közeli visszhangokat nem érzékelik, ellenben az adó-vevő fejeknek ilyen korlátja nincs. Ezen kívül, hasonló okok miatt vékony anyagok falvastagság mérésére is ezt a fajta fejet alkalmazzák [13].

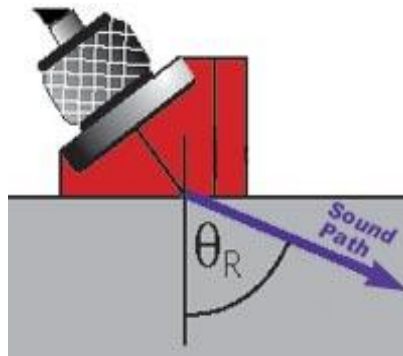
Előtétes fejek:

Az előtétes fejek abban különböznek egy normál mérőleges fejtől, hogy a rezgő elé egy cserélhető előtétet rögzítünk. Ennek többféle célja is lehet. Az előtétet ráköszörülhetjük különböző alakú felületekre, például kis átmérőjű hengerekre, így lehetővé téve a csatolást az ilyen felületek és a sík rezgő között [13].

Egyszerű védőréteget is helyezhetünk a fej elé, amikor üzemszerűen érdes felületen kell használnunk a fejet. Legfőbb alkalmazásuk azonban az, amikor jelentős vastagságú előtétet alkalmazunk, így megnöveljük az ultrahang futási idejét annyira, hogy ne veszítsük el a felület közeli visszhangokat, amik az alatt érnének vissza a fejhez, amíg az még adó üzemmódban van. Így szintén lehetővé válik vékony anyagok vizsgálata, illetve kompozit anyagok rétegeinek elválásának ellenőrzése. Nagy előnye egy hosszabb előtétnek az is, hogy olyan meleg felületeket is vizsgálhatunk a segítségével, amit a vizsgálófej már nem viselne el, mivel az előtét biztosít némi hőszigetelést is [13].

Szögfejek:

A szögfejeket és szögeltéteket arra használják, hogy transzverzális hullámot bocsássanak az anyagba (6. ábra).



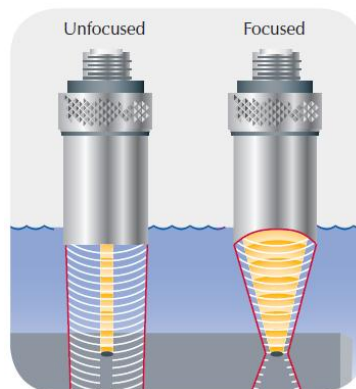
6. ábra: A szögfejjel végzett vizsgálat keresztmetszete [13]

A fejen feltüntetett szögérték mivel függ a vizsgált anyag akusztikus keménységétől, csak egy adott anyag esetén érvényes, ami többnyire acél. A különböző szögekben besugárzott hangnyaláb a vizsgált anyag hátfalának felületéről visszaverődve lehetővé teszi olyan hibák felderítését, amely merőleges fejekkel lehetetlen lenne. Ilyen hibák többek között a hegesztési varratok hibái [3].

Bemerítéses fejek:

A bemerítéses fejek (7. ábra) nem érnek hozzá a vizsgált felülethez. Ezek a fejeket arra tervezték, hogy folyadékkal körülvéve működjenek, és minden csatlakozásuk vízálló. Általában impedancia illesztő réteggel vannak ellátva, hogy minél több hangenergiát tudjanak a vízbe bocsátani, majd azon keresztül a vizsgált alkatrészbe [13].

A bemerítéses fejek készülhetnek sík, hengeresen fókuszált és gömbszerűen fókuszált kivitelben. A fókuszált fejek kisebb területre fókuszálják a hangenergiát, így megnövelik az érzékenységet, és a tengelyirányú felbontást is. A bemerítéses fejeket többnyire víztartályban használják, esetleg egy befecskendezéses letapogató rendszer részeként [13].



7. ábra: Fókuszálatlan és fókuszált bemerítéses fejek [13]

Fókuszált távadó:

A fókuszált távadó olyan ultrahangnyalábot képes létrehozni, mely a távadótól bizonyos távolságban keskenyebb lesz, mint a távadó felületnél (7. ábra). Azt a régiót, ahol az ultrahangnyaláb elkeskenyedik – fokális zóna – az ultrahang intenzitása akár 100-szorosára növekedhet a fokális zónán kívüli intenzitáshoz képest. Az intenzitás növekedés miatt a fokális zónában elhelyezkedő visszaverő struktúra lényegesen nagyobb jelet indukál a távadóban. A fokális zónában elhelyezkedő maximális echo és a távadó közti távolságot fokális hosszúságnak nevezik. A fókuszálásért gyakran maga a piezoelektromos kristály felelős, amelyen konkáv felületet képezhetnek ki [22].

Fázisvezérelt mérőfejek:

A fázisvezérelt mérőfejek több különálló elemből állnak, melyek mindegyike külön pulzál. Ezek lehetnek egyenes vonalban, kör alakban vagy komplexebb alakzatban elrendezve. A fázisvezérelt rendszerek tartalmaznak egy kifinomult számítógépes rendszert, mely képes a több elemes mérőfej által fogadott visszatérő jeleket megjeleníteni több féle módon. A fázisvezérelt rendszer kihasználja a hullám fokozatos megszűnésének elvét, variálva az időt egy sor kimenő ultrahang impulzus között olyan módon, hogy minden egyes hullámot kombinál a többivel, hozzáadva vagy törölve az energiát kiszámítható módon. Mindezt azért, hogy hatékonyan irányítsa és formálja a hanghullámot. Ezt úgy valósítják meg, hogy az egyes elemeket különböző időben pulzáltatják. Az elemeket csoportokba osztják, így elérve az élesebb fókuszálást. A fázisvezérelt fejek képesek rendezni a visszatérő hullámokat érkezési idő és amplitúdó alapján [4].

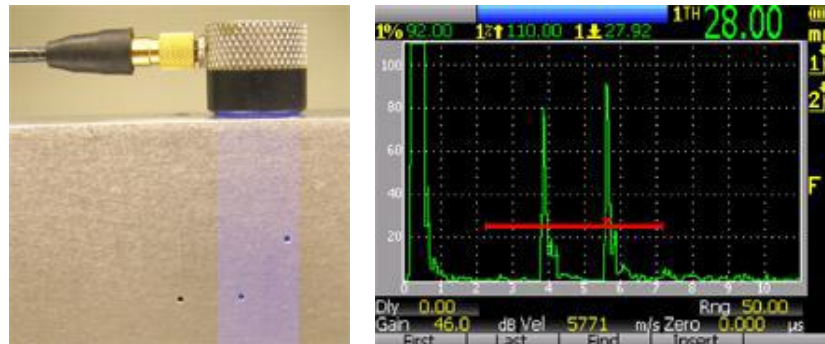
Csatolóanyagok:

A csatolóanyag egy olyan anyag (többnyire folyadék), amely lehetővé teszi az ultrahang energiájának átvitelét a vizsgálófejből a vizsgált anyagba. Minden esetben szükséges csatolóanyagot alkalmazni, mivel a levegő és a szilárd anyagok akusztikus impedanciája közötti különbség olyan nagy, hogy szinte az összes hangenergia visszaverődik a légrésről, és elenyésző mennyiség jut csak át a vizsgálati anyagba. A kontakt fejek esetében általában olajat, vizet alkalmaznak. Bemerítéses módszer esetén általában vizet alkalmaznak erre a célra [3].

2.4. Ultrahangos képalkotási formák

A-kép:

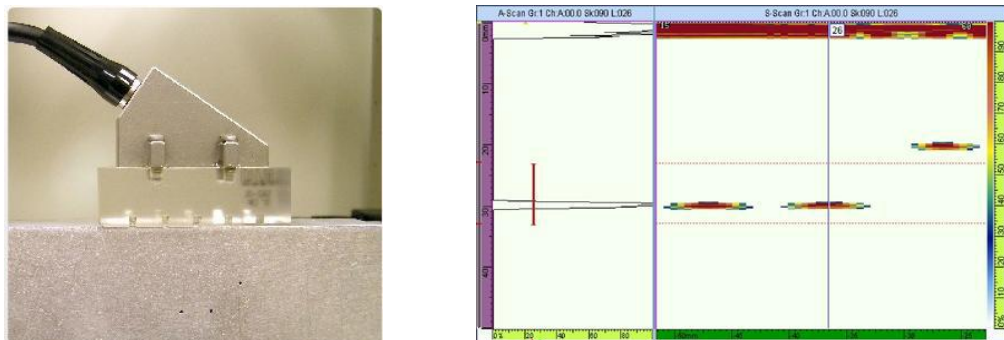
Az A-kép a vizsgálófejhez visszaérkező hangenergia erősségét mutatja az idő függvényében. A vett energia relatív értékét jelenítjük meg a függőleges tengelyen, míg a vízszintes tengelyen az adott erősségű visszhang beérkezéséig eltelt időt. Az A-képek alkalmazásakor egy ismeretlen hiba méretének meghatározásakor összevetjük az ismeretlen méretű, de ismert távolságban lévő reflektorról érkező visszhang energiáját, egy ugyanolyan távolságban lévő, de ismert méretű reflektoréval. A reflektor és a fej közötti távolságot nevezzük hangút távolságnak, amely a hangútnak éppen fele, mivel oda-vissza megteszi a hang [23].



8. ábra: A-scan képalkotás [13]

B-kép:

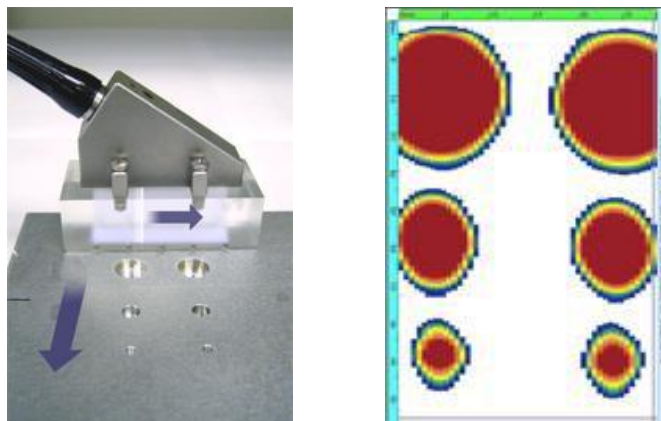
A B-kép lényegében az alkatrész egy keresztmetszeti ábráját mutatja. A függőleges tengelyre az ultrahang futási idejét vagy a hangút távolságot viszik fel, a vízszintes tengelyre pedig a fej lineáris pozícióját. A B-kép alkalmazásakor be kell állítani egy riasztási küszöböt. Amennyiben a küszöbszintet meghaladó visszhangot érzékel a készülék, azt kirajzolja a megfelelő fejpozícióba, illetve hangút távolságra [23]. A 9. ábrán látható az előző alkatrész vizsgálatának B-képes megjelenítése.



9. ábra: B-scan képalkotás [23]

C-kép:

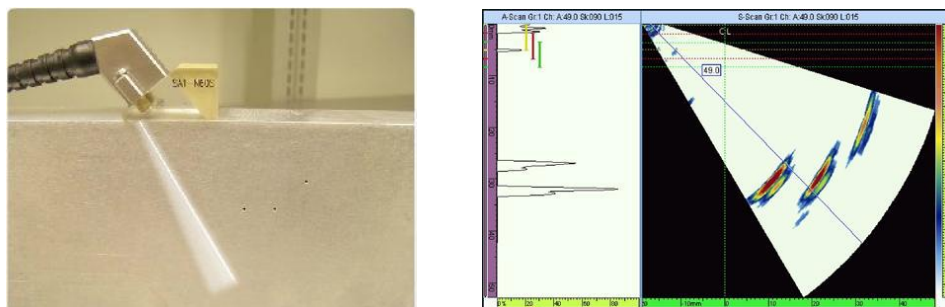
A C-kép egy síkszerű megjelenítése az alkatrésznek, ahol a nézet síkja párhuzamos a felület letapogatásának útvonalával, azaz lényegében a vizsgálati felülettel. A C-képeket automata letapogató rendszerekkel készítik el, mivel folyamatosan ismerni kell a fej pozícióját, illetve az ahhoz tartozó visszhangjelet. A C-képen pontról pontra kirajzolódik a fej útvonala. A pontok színe, (vagy szürkeárnyalat esetén az intenzitása) pedig, vagy az adott pontban lévő hangintenzitást, vagy a vizsgált felületre merőleges hangút távolságot jelöli [23]. A 10. ábrán az alkatrész keresztmetszeti és felülnézeti ábráját láthatjuk, a felülnézeti képen jelölve a fejmozgatás útvonalát is.



10. ábra: C-scan képalkotás [23]

S-scan:

Az S-scan vagy más néven szektoriális kép megjelenítés egy kétdimenziós metszeti nézet. A vízszintes tengely megfelel a vizsgálati darab szélességének, a függőleges tengely a mélységének. A hangsugár végigpásztázza a körcikket a vizsgálati darabon, minden irányban A-képet generálva és ebből állítja össze a körcikk alakú keresztmetszeti képet (11.ábra). Előállításához fázisvezérelt fej szükséges [23]



11. ábra: S-scan képalkotás [23]

3. Automatizált bemerítéses ultrahangos rendszerek a világban

3.1. KC Series Immersion Tank [7]

A GE által gyártott berendezést masszív szerkezet jellemzi, amely behegesztett keretből és rozsdamentes acél tartályból áll. Alapesetben három modell kapható attól függően, hogy az ügyfél milyen méretű tárgyakat szeretne vizsgálni. Terveznek és gyártanak egyéni méretben is merülési tartályokat az ügyfél egyedi igényeinek kielégítésére. Az egyszerű kezelhetőségre lett tervezve és a könnyű karbantartásra. Kínálnak helyszíni telepítést és képzést az eszköz megismeréséhez.

Alkalmazható:

- különböző repülőgép motoroknál,
- öntvényeknél és kovácsolt fémeknél,
- kompozit, acél anyagoknál, csöveknél



3.2. LTI Immersion Tank [8]

12. ábra: közepes KC immersion [7]

LTI cég által gyártott berendezés egy igazán ipari méretű bemerítéses ultrahangos vizsgálatra képes anyagvizsgáló rendszer, amely egy 7,3 méter hosszúságú és 1,5 méter szélességű tartályból áll. A két tengely meghajtással működő rendszer képes A-, B-, és C-kép feldolgozására is. Maximum 6 méter hosszú és 60 cm átmérőjű hengeres rudat lehet benne vizsgálni, ami lapos anyag esetén maximum 6 méter hosszú és 1,2 méter széles lehet, a súlyhatár pedig 2270 kg.

A merülő tartály fel van szerelve egy számítógépes alapú felvevő rendszerrel, amely képes kinyomtatni a vizsgálati adatokat és az eredményeket. Ez előnyt jelent a kézi vizsgálatokkal szemben, amelyekben nincs lehetőség számítógépes alapú felvevő rendszert használni.



13. ábra: Ipari méretű LTI Immersion tank [8]

3.3. Mistras Ultrasonic Systems [9]

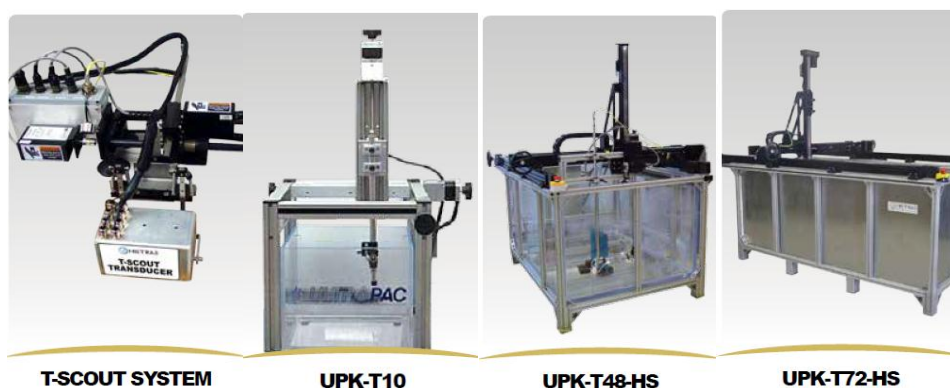
A Mistras az egyik legnagyobb automatizált ultrahangos berendezés gyártó a világon, eladásai alapján az első háromban található. Termékpalettája nagyon széles, a legkülönlegesebb egyéni és ipari igényeknek is megfelelnek termékeikkel. A bemenő rendszerektől egészen a hordozható automatizált ultrahangos rendszerekig, akár több csatornás egyidejű mérési lehetőséggel is a piacon vannak. A hordozható kisméretű integrált rendszerektől egészen az ipari méretű integrált bemenő rendszerekig szinte minden keresleti igényt kielégítenek. Rendszereik közül néhány típus képes hengeres rúd geometriájú nagyméretű anyagok vizsgálatára is.

Hagyományos és fázisvezérelt fejeket is gyártanak a berendezéseikhez, amik kérés szerint fókuszálatlan vagy fókuszált lencsés kivitelben, és akár egyedi megrendeléseket is teljesítenek. Hagyományos fejekből kontakt fejeket (merőleges vagy szögfej), bemenő fejeket és akár gyűrűs kialakítású fejeket is gyártanak.

Egyedi szoftvereivel (UTWIN™ SOFTWARE, TCPWIN™ SOFTWARE), az adatgyűjtéstől a leképezésen át a jelfeldolgozásig valós időben képes megjeleníteni A-, B-, C-képfeldolgozási formában, akár egyszerre az összeset is.

A teljesség igénye nélkül a szoftver képes:

- hullámforma és spektrum grafikon jelentésekre,
- jeladó szimulációkra, teljes karakterisztika elemzésre,
- időtartománybeli és frekvencia tartománybeli eredmények kiértékelésére,
- Excel riport kompatibilitás,
- akár 16 tengely mozgás vezérlésére.



14. ábra Mistras termék család egy része [9]

4. TÁMOP keretein belül általunk fejlesztett rendszer

4.1. Rendszer jelenlegi hardveres összeállítása

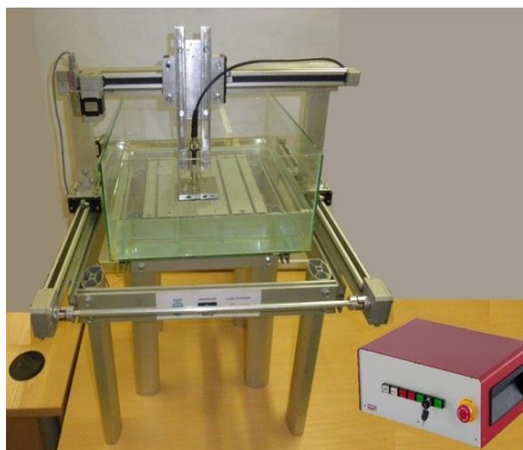
A rendszer részei:

- Olympus Epoch 1000i ultrahangos hibakereső (paramétereit lásd az 1. sz mellékletben)
- Isel gyártmányú step controller [10] a hozzá tartozó léptetőmotorokkal felszerelt asztallal és üvegmedencével együtt
- Epiphan VGA2 USB LR [11] típusú framegrabber
- V376-SU típusú [13] bemenítéses ultrahangos fej (30 MHz-es, fókuszált)
- megfelelő alkalmazásokat (V2.0 és ProNC [12]) futtató számítógép



15. ábra: a rendszer részei

Isel elemekből összeállított mozgató berendezés:



16. ábra Isel mozgató berendezés+léptetőmotorokkal felszerelt asztal és üvegmedence

A mozgatórendszer több egységből épül fel (16. ábra). A kép alsó részén helyezkedik el az Isel cég, mozgatásért felelős IMC-P step controllere. Ez a rendszer 2 fázisú léptető motorokat tud programvezérelten irányítani. A szabályozó integrálja az összes szükséges komponenst, úgymint a kezelőfelületet, mozgatásért felelős vezérlőket, a tápegységet, biztonsági áramkört, és különböző szabályzó elemeket. A mozgatórendszer második összetevője egy üvegből készült medence. A harmadik egység pedig a lineáris egységekből álló felépítmény, ezt vezéreljük a ProNC-vel (CNC vezérlő szoftver) a step controlleren keresztül.

Framegrabber:



17. ábra Epiphan VGA 2 USB LR framegrabber [11]

Erre az eszközre, az ultrahangos rendszer és a fejlesztett szoftver közti kommunikáció miatt van szükség. Alapvető működése az, hogy a bemenetére érkező analóg VGA jelet digitalizálja, majd egy USB csatolón keresztül továbbítja a digitalizált jelet a számítógép felé.

V376-SU típusú vizsgáló fej:



18. ábra V376-SU típusú 30 MHz-es fókuszált vizsgáló fej [13]

				Fókusz távolság	
Frekvencia [MHz]	rezgő átmérő [inch]	rezgő átmérő [mm]	késleltetés [μsec]	[inch]	[mm]
30	0.25	6,35	4,25	1.25	31,44

2. táblázat Gyártó által közölt adatok [13]

4.2. Jelenlegi szoftver (V2.0) működése, új funkciói

Mivel ez a fejlesztés szabadalom előtt áll, a forráskód pontos részleteit nem ismertethetem. A szoftver környezet Labview-ban lett létrehozva.

Labview[14]: A Labview, röviden, egy grafikus program-fejlesztő, amely elsősorban méréstechnikai és a hozzákapcsolódó jelfeldolgozási feladatok ellátására szolgál, de alkalmas más például szimulációs munkák elvégzésére is, ezen kívül egy általános, teljes értékű programozási nyelv.

A berendezés rövid leírása, működése:

A rendszer fontos része az üveg medence, ahol a vizsgált minta-darabokat el lehet elhelyezni a víz alatt (15. ábra). A medence felett egy mozgatható híd helyezkedik el, amin az ultrahangos vizsgálófej került rögzítésre. Az ISEL mozgató rendszer akár 10 mikronos pontossággal is képes léptetni a rögzített fejet. Ezt jelenleg egy ISEL PLC alapú elektronika vezérli, de hamarosan át lesz alakítva úgy, hogy a vezérlés is LabView-val történjen meg, a könnyebb kezelhetőség és az integritásból származó előnyök miatt (pl. közös platform). Az Epoch 1000-i-vel létrehozott hagyományos A-képeket dolgozza fel a jelenlegi szoftvert (V2.0) és a ProNc-t futtató számítógép, a fej minden egyes megállásakor.

A legtöbb rendelkezésre álló ultrahangos mérőrendszer nem rendelkezik digitális kimenetekkel, amin keresztül az A-kép elérhető lenne, ezért kell használnunk a framegrabbert, ami az Epoch 1000-i VGA kimenetén lévő analóg jeleket digitalizálja a számítógép számára, melynek segítségével a tömeges A-képeket már fel lehet dolgozni. Az ultrahangos rendszer automatizált. A letapogatás előtt csupán az ultrahangos berendezést kell a megfelelő méréstartományra és érzékenységre állítani, majd a letapogatás és kiértékelés már automatizálva hajtódik végre.

4.3. Új adatfeldolgozási eljárások

Az Epoch 1000-i-vel létrehozott hagyományos A-képeket, amelyek a fej minden egyes megállásakor készülnek, a rendszer korábbi szoftvere (V1.0) úgy dolgozta fel, hogy minden egyes A-képet bmp képformátumba mentett el, ami több tízezer lépésszám esetén már meglehetősen:

- nagy adatmennyiséget (sok elmentett bmp fájlt),
- merevlemez fragmentációt (töredezettséget),
- nagy feldolgozási időt generált.

Ezek következtében pedig a számítógép jelentős mértékben lassult és erőforrásai feleslegesen voltak terhelve az algoritmus kialakítása és optimalizálatlansága miatt. Ugyanakkor az adatfeldolgozás mértéke nem volt teljes, ez azt jelenti, hogy a nem megfelelő program struktúra nem tette lehetővé, hogy minden fej megállásából származó adat el legyen mentve és a különböző térbeli mérési pontokról származó információkat sem tudta feldolgozni 100%-osan. Így emiatt úgynevezett „üres képet” kellett beilleszteni a megjelenítéshez szükséges adatok közé, amik sötétkéék pixelek formájában jelentek meg a 2 illetve 3 dimenziós eredményekben, aminek következtében jelentős mértékű információvesztés történt vizsgálatonként. Az eredeti adatfeldolgozási módszerek egyik legnagyobb hátránya az volt amellet, hogy az adatfeldolgozás sem volt 100%-os, hogy a rögzített A-képeket tartalmazó bmp képformátumú fájlokat mindaddig meg kellett tartani a számítógépen, amíg újabb posztprocesszálások (utófeldolgozások) készültek a mérési eredményekről.

A jelenlegi szoftverben (V2.0) új adatfeldolgozási eljárásokat vezettem be, amelyek a számítógép erőforrásait hatékonyan kihasználva végzik működésüket, így lehetővé vált az összes hátrányt kiküszöbölni:

- Az adatbegyűjtő algoritmus a vizsgálat során már nem menti el az A-képeket a merevlemezre, hanem az adatokat on-line módon feldolgozza egyetlen fájlba, ennek következtében elég egyetlen mérési adatokat tartalmazó fájlt megtartani a számítógépen.
- Az on-line adatfeldolgozás miatt, az elkészült adatok számát átlagosan több mint 99%-al sikerült csökkenteni, minek következményeként a foglalt lemezterület is átlagosan több mint 99%-ban mérséklődött.
- Az adatfeldolgozó algoritmus kedvezőbb program struktúrája lehetővé teszi, hogy az adatfeldolgozási időt átlagosan több mint 96%-al lecsökkentsük.

- Az adatfeldolgozás jóságát 100%-ra sikerült javítanom. Jelenleg már minden egyes térbeli mérési ponthoz tartozó adatot képes feldolgozni az alkalmazás, aminek köszönhetően nincs adatvesztés, így az egész vizsgált térről rendelkezünk információval.

Az új adatfeldolgozási eljárások előnyei tehát:

- on-line adatfeldolgozás → kis adatmennyiség,
- nincs merevlemez fragmentáció,
- kis adatfeldolgozási idő,
- nincs információvesztés,
- egy mérési adatokat tartalmazó fájlt kell tartani a számítógépen a posztprocesszálások során.

4.4. Új képfeldolgozó eljárások

2D illetve 3D létrehozása:

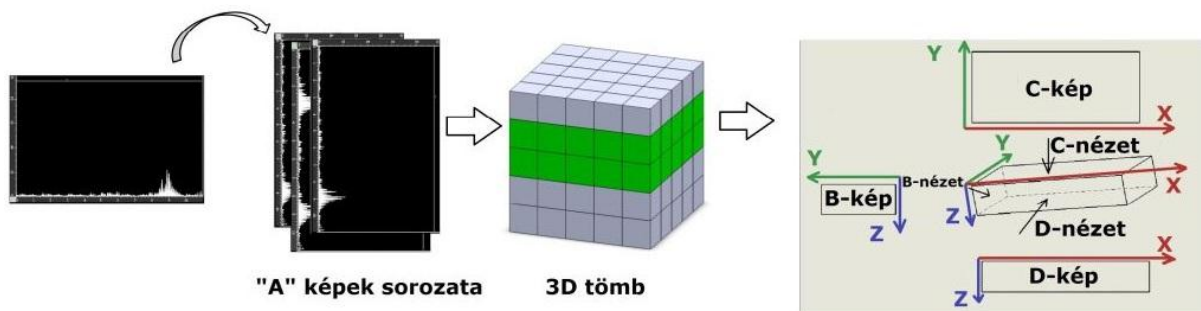
A 2D illetve 3D megjelenítéséhez szükséges adatokat az A-képekből dolgozza fel az alkalmazás. A vizsgálataink során nincsenek kiszűrve még a kis csúcsok sem, mint ahogy azt sok szabványban javasolják, mivel a mintákat raszteresen gyűjti be alkalmazás, ahol a raszter méretét 10 mikron és 10 mm közötti lehet változtatni. Az adatokból az alkalmazás egy 3D-s tömböt készít (minden térbeli pozíciónál lévő A-képek elforgatásával), amit a képfeldolgozó szoftverek fel tudnak dolgozni különböző képeket előállítva (19. ábra). A tömb minden egyes eleme információkat tartalmaz a 3D-ban lévő elhelyezkedéséről valamint a reflexió intenzitásáról az adott helyen.

Színek létrehozása:

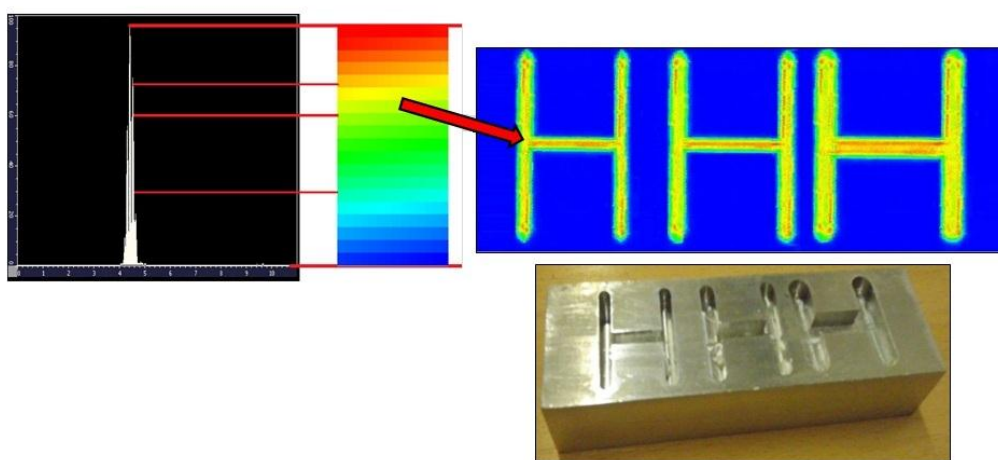
A 2 dimenzióban lévő színeket az adott térbeli mérési pontokhoz tartozó ultrahangos intenzitás értékekből állítja elő a képmegjelenítő algoritmus (20. ábra). Az ábrán látható egy H betűket formáló bemarásokból készült 2 dimenziós ultrahangos C-kép. Ezen a képen, ahol a legkisebb ultrahangos visszhang intenzitás ott kék, a legnagyobb ultrahangos intenzitás értékénél piros, a közöttük lévő tartományban pedig zöld és sárga színek, valamint azok árnyalatai láthatóak. De természetesen, ha szükséges a felhasználó választhat egyedi színskálát is.

A 3 dimenzióban lévő színeket (21. ábra) szintén a felhasználó által definiálható színek alapján állítja elő a képmegjelenítő algoritmus a már ismertetett A-képek feldolgozási módszerével.

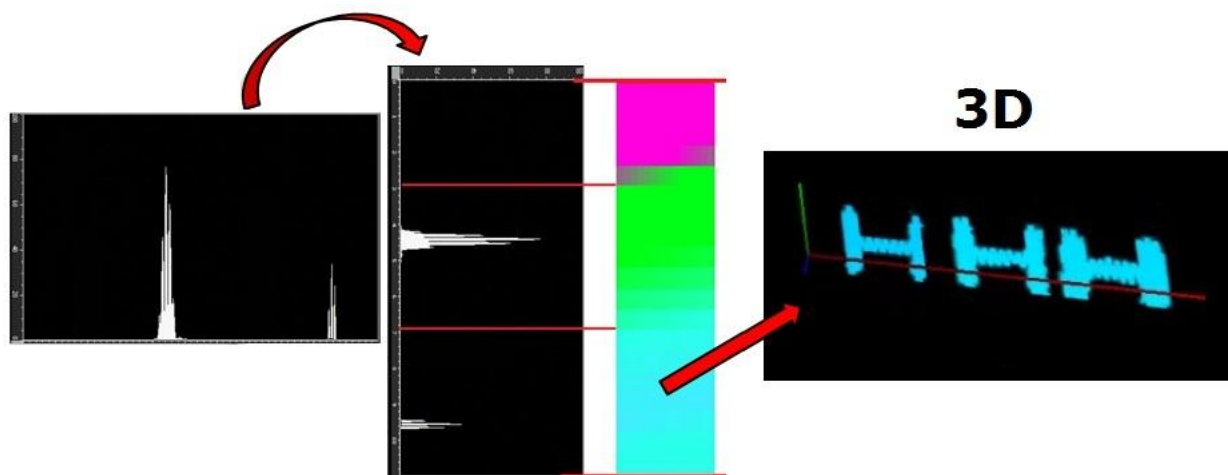
Az ábrán éppen három szín lett definiálva (lila, zöld, kék), ami alapján a 3 dimenziós modell felső rétegei lilák, az alsó kék, közöttük pedig zöld illetve azok árnyalatai látszanak.



19. ábra Hagyományos A-képek átalakítása egy tömbön keresztül B-, C-, D-képpé



20. ábra 2 dimenzióban lévő színek előállítás



21. ábra 3 dimenzióban lévő színek előállítás

A V1.0 (korábbi) képfeldolgozó algoritmus úgy dolgozta fel a megjeleníthető adatokat, hogy az 1x1 mm-es X, Y irányú lépésköznél kisebb lépésközzel készült eredményeket már nem tudta megjeleníteni.

Valamint egy hagyományos 2 dimenziós ultrahangos C-képet [amit maximum 1 mm-es felbontású valódi tomográfiás (rétegfelvétel) képként is képes volt megjeleníteni] és egy 3 dimenziós modell előállítására volt alkalmas. Nem tartalmazott utó képfeldolgozó eljárásokat sem, így amit képes volt megjeleníteni azok „csupán” a nyers, zajtól NEM mentes képek voltak.

Ezzel szemben a V2.0-ban lévő egyedi képfeldolgozó algoritmus már képes, akár a 0,01x0,01 mm-es X, Y irányú lépésközzel készült vizsgálatok eredményeit is könnyedén kezelni, megjeleníteni, hatékonyabban kihasználva a számítógép erőforrásait.

- A memória eljárások megfelelő optimalizálásával a megjelenítési memória igényt több, mint 85%-al sikerült mérsékelni.
- Valamint képes ultrahangos 2 dimenziós A-, B-, C- és D-képek előállítására is, amiket akár 100 mikronnál is jobb felbontású tomográfiás képként is tud szemléltetni, ha szeretné a felhasználó.

A posztprocesszálások során a képjavító eljárásoktól mentes „nyers” képen kívül alkalmazhatunk olyan hagyományos képjavító eljárásokat, amiket nagyon sok népszerű képszerkesztő program is használ. Ezek széles körben alkalmazott eljárások, mint például:

- különböző méretű maszkokkal feluláteresztő (élkiemelő) szűrő,
- különböző méretű maszkokkal aluláteresztő (élsimító) szűrő,
- szakaszonkénti lineáris transzformáció (kontraszt kiemelés),
- hisztogram-kiegyenlítés (lehet globális, lokális),
- valamint különböző él detektálások (roberts-, prewitt-, sobel, gradiens operátorral).

4.4.1. Képjavító eljárások

Az alkalmazott általános képjavító eljárásokat röviden ismertetem, mert a részletes leírásukkal meghaladnám e dolgozat limitált oldalszámát.

A lokális eljárások a kép egy adott pontját, illetve annak környezetét vizsgálják. A vizsgált pont és környezete együttes elnevezése ablak [15]. Az ablakban található értékek reprezentálhatóak egy mátrix segítségével.

A vizsgálatokat az ablak méretének megfelelő vizsgáló mátrix (**más néven maszk**) segítségével végezzük. A bemeneti kép összes képpontjára elvégezve az adott maszk által definiált műveletet kapjuk meg az eredmény képét. A könnyebb vizsgálhatóság céljából az ablak képpontjainak száma általában páratlan.

Az eljárások tulajdonképpen a konvolúció elméletén alapulnak. A képet egy eltolás invariáns operátorral (a maszkkal) konvolálva kapjuk meg az eredményt [16].

Különböző méretű maszkokkal felüláteresztő (élkiemelő) szűrő [16]:

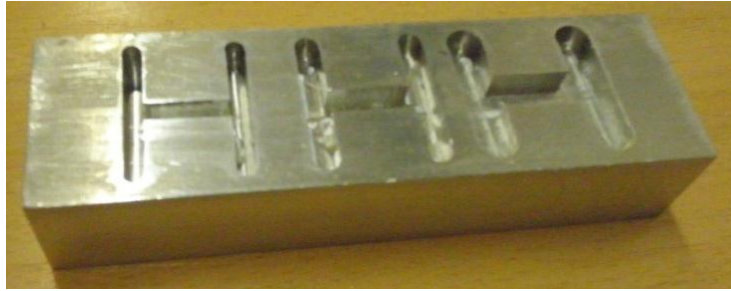
A torzítások (képhibák) egyik csoportja a határátmenetek kiszélesedésében, az élek elmosódásában jelentkezik. A gyors átmenetek (zajok és élek) a kép Fourier transzformáltjának magas frekvenciás összetevőiben jelennek meg. A frekvencia tartománybeli kép élesítés természetes ötletét tehát az adja, hogy a magas frekvenciákat megtartva, az alacsony frekvenciás összetevőket szűrjük ki.

Az eljárás célja az egyes képrészletek közötti átmeneti tartomány szűkítése, a határátmenetek meredekebbé tétele, az elmosódások korrigálása, így ezek lokális jellegűek. Az élkiemelést jelenleg egy statisztikus differencia-operátorral valósítja meg az algoritmus. Az eljárás során egy képpont korrigált világosságkódját úgy számítjuk ki, hogy elosztjuk a környezetében lévő képpontok világosságkódjának eloszlása alapján meghatározott szórással. Az eredményképben a hirtelen változások helyén kis, a homogén tartományokban nagy világosságkód-értékek jelennek meg. Az eljárás hátránya, hogy az egyes zajokat is kiemelheti. A módszert rendszerint konvolúciós szűrővel realizálják.

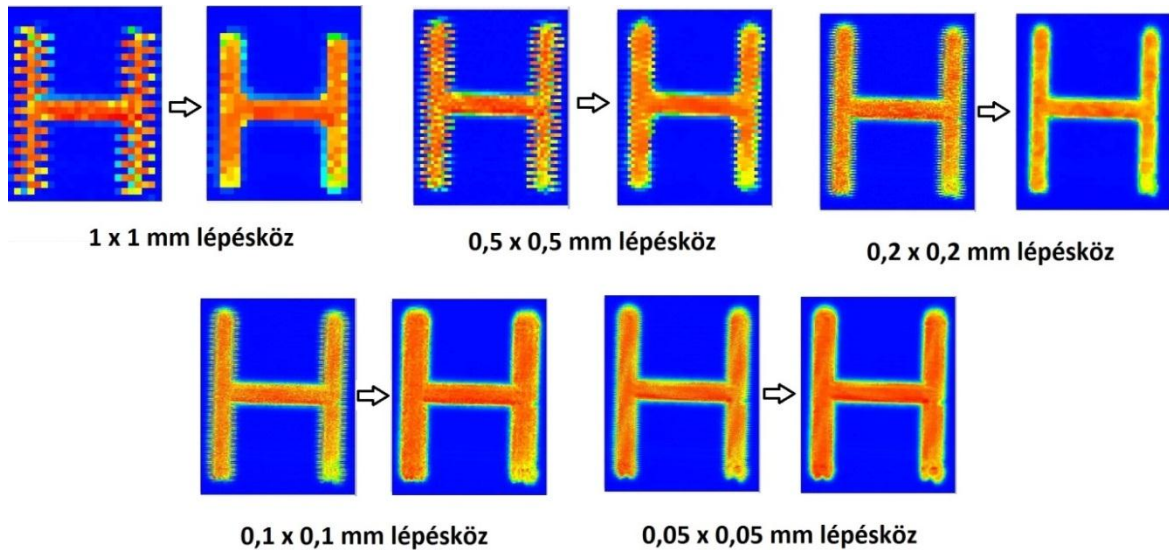
A leggyakrabban alkalmazott élkiemelő függvény az: $f(x, y) - \nabla^2 f(x, y)$, kifejezés ahol, a ∇^2 digitális Laplace-operátor így a függvényt az alábbi Tf1, Tf2, Tf3 jelű konvolúciós szűrő realizálja:

$$\text{Tf1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Tf2} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{Tf3} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

A 23. ábrán láthatóak különböző lépésközökkel készült 2 dimenziós ultrahangos C-képek eredeti „nyers” eredményei illetve a hozzájuk tartozó 3x3 méretű maszkkal készült élkiemelő eljárások képei. A vizsgálat egy H betűket formáló bema­rá­so­kat tartalmazó alumínium minta-darabról készültek, azok közül is minden esetben a 22. ábrán lévő balszélső, legkeskenyebb H betűről, aminek szár szélessége 3 mm, a bema­rá­ás mélysége 5mm.



22. ábra: H betűket formáló bemarkásokat tartalmazó alumínium minta-darab



23. ábra: "nyers" és a hozzájuk tartozó 3x3 méretű maszkkal készült élkimielő eljárások képei

Különböző méretű maszkokkal aluláteresztő (élsimító) szűrő [17]:

Az aluláteresztő szűrés a feluláteresztő szűrésnél leírtakkal éppen ellentétes gondolaton alapul. Nevezetesen, a frekvenciatartomány magas frekvenciás részeit gyengítve (vagy akár teljesen kiszűrve) a képen elmosó hatást érhetünk el.

A képhibák egyik csoportját a zajok alkotják. A képet érő zavaró hatások egy része abban nyilvánul meg, hogy a képpontok eredeti világosságkódja - általában véletlenszerűen - megváltozik. A zavaró hatások eredményét (a képre rakódott "zajt") az érdemi feldolgozás előtt el kell távolítani a képről, vagy legalábbis csökkenteni kell. Az erre irányuló eljárásokat nevezzük zajszűrésnek, zajelnyomásnak, vagy simításnak.

A zaj általában véletlenszerűen előforduló, izolált pontokban jelentkezik, amelyeknek a világosságkódja lényegesen eltér a környezetükétől. A legegyszerűbb esetben minden képpont világosságkódját összehasonlítjuk valamennyi a környezetében lévő képpont világosságkódjának átlagértékével (q_a).

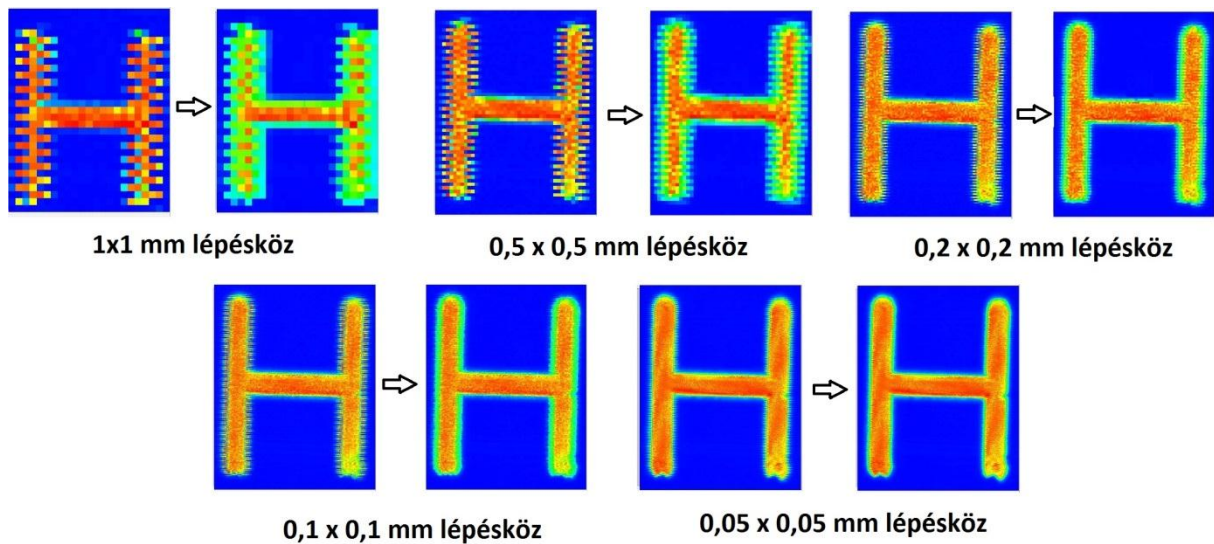
A korrekció képlete: $q_k(k, l) = \begin{cases} q_{\hat{a}}, & \text{ha } |q_b(k, l) - q_{\hat{a}}| > \varepsilon, \\ q_b(k, l), & \text{különben} \end{cases}$,

ahol ε a kép jellegétől függő, kísérleti úton meghatározandó küszöbérték. A $q_{\hat{a}}$ 3x3 méretű környezet esetén például az alábbi szűrőkkel számítható ki.

$$T_{a1} = 1/12 \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{a2} = 1/8 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{a3} = 1/9 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ezek elemei mindig pozitívak, és összegük mindig 1. Többnyire négyzetesek és ritkán nagyobbak 5x5 méretűnél (ezek már nagyon elmosnák a képet). A 24. ábrán láthatóak különböző lépésközökkel készült 2 dimenziós ultrahangos C-képek eredeti „nyers” eredményei illetve a hozzájuk tartozó 3x3 méretű maszkkal készült élsimító eljárások képei, a legkeskenyebb H betűről.

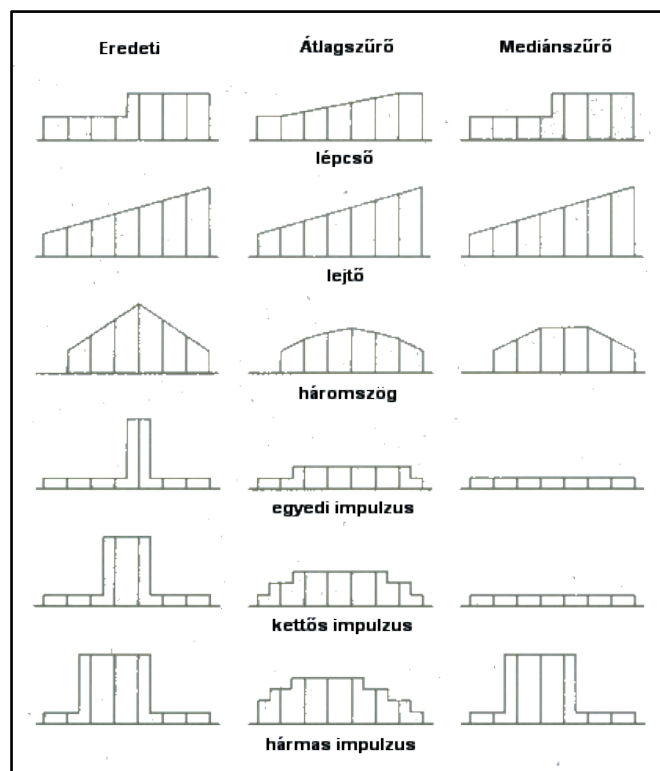


24. ábra: „nyers” és a hozzájuk tartozó 3x3 méretű maszkkal készült élsimító eljárások képei

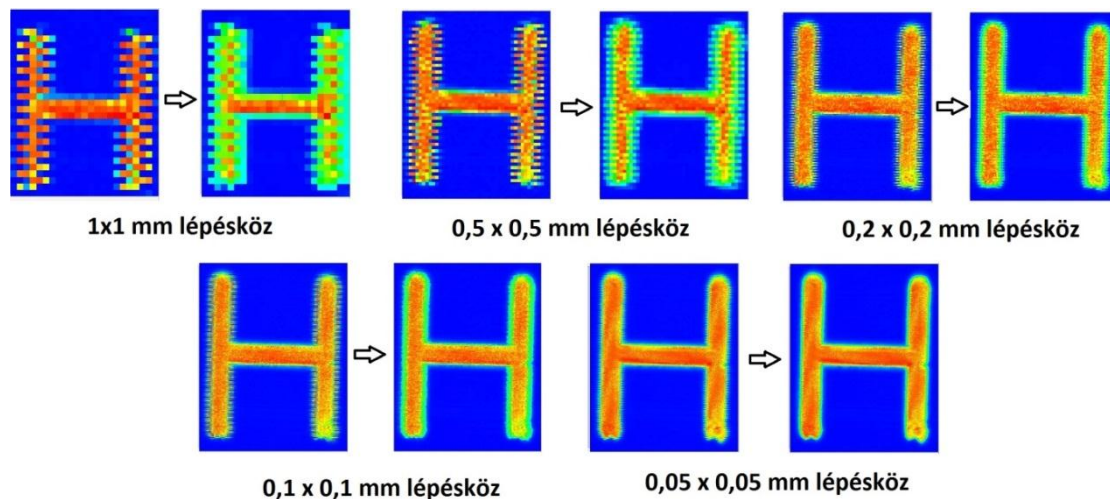
Szakaszonkénti lineáris transzformáció (kontraszt kiemelés) [16]:

A lineáris szűrés a zajhatásokat csak szétosztja egy nagyobb területre. Vegyük minden pixel egy meghatározott környezetét! A pixel valamint a környezet k darab intenzitás értékét rendezzük nagyság szerint növekvő sorba. E sorból vegyük az n -edik elemet; ez lesz a pixel új világosságértéke. Ha $n=1$, akkor mindig a minimális értéket választottuk, ha $n=k$, akkor mindig a k -adikat. Rank szűrő tehát nagyon sokféle van, hiszen a vizsgált pixelkörnyezet mérete, alakja sokféleképpen választható (néhány eset a 25. ábrán látható), továbbá az n érték 1 és k közötti megválasztása is erősen befolyásolja az eredményt.

Különös fontosságú amikor $n=k/2$, vagyis a sorba rendezett világosságértékek közül éppen a középsőt választjuk. Ilyenkor beszélünk mediánszűrésről. A mediánszűrés során a figyelembe vett mintát a szűrőbe eső képpontok világosságkódja alkotja. A szűrést úgy valósítja meg, hogy minden képpont világosságkódját kicseréli a ráillesztett szűrő által meghatározott minta mediánjával. Ez a szűrés a kiugró zajcsúcsokat teljesen eltünteti, és nem csak elkeni, mint a lineáris szűrés. A mediánszűrés nem lineáris, mert a kép konstans szorzásával ugyan felcserélhető, de két kép összeadásával nem. A 26. ábrán láthatóak különböző lépésközökkel készült 2 dimenziós ultrahangos C-képek eredeti „nyers” eredményei illetve a hozzájuk tartozó 3×3 méretű maszkkal készült kontraszt kiemelő eljárások képei, a legkeskenyebb H betűről.



25. ábra: Az átlag és mediánszűrő hatása [16]



26. ábra: "nyers" és a hozzájuk tartozó 3x3 méretű maszkkal készült kontrasztkiemelő eljárások képei

Hisztogram-kiegyenlítés (lokális) :

A hisztogram: megadja a világossággódok eloszlását az adott képben. A hisztogramtáblázat annyi elemű, amennyi a világossággódok értékkészlete és $\zeta(q_i) = N_{q_i}$, ahol N_{q_i} a q_i világossággódú képpontok száma a digitális képben. A hisztogramot oszlop diagrammal ábrázoljuk. A vízszintes tengelyen a lehetséges világossággódokat mérjük fel, a $[q_i, q_{i+1}]$ intervallumhoz tartozó koordináta pedig a q_i világossággódú képpontok relatív gyakoriságával arányos: $\zeta(q_i) = c (N_{q_i} / N)$, ahol N a képet alkotó képpontok száma.

Azt az eljárást, ami a képet úgy transzformálja, hogy a világossággódok egyenletes eloszlásúakká váljanak, hisztogram-kiegyenlítésnek nevezzük. Ez főként olyan képeknél hasznos, amelyek kevésbé kontrasztosak, azaz az intenzitásértékek az intenzitástartomány kisebb részére koncentrálnak.

Lokális hisztogram-kiegyenlítés:

A hisztogram-kiegyenlítés eredménye az eljárás globális volta miatt nem minden esetben kielégítő, mivel nem veszi figyelembe a kép lokális tulajdonságait. Ennek kiküszöbölésére használhatunk lokális eljárást, amely egy lokális szomszédságon belül javítja a képet.

Él detektálások (roberts-, prewitt-, sobel, gradiens operátorral) [18]:

Az emberi szem nagyon érzékeny az intenzitásváltozásokra. Ezek a változások általában az objektumok határvonalainál jelentkeznek, amelyek érzékelése lehetőséget teremt az objektum felismerésére. A képfeldolgozásban ez a kontúr alapú szegmentálásnak felel meg. Azoknak a helyeknek a megkeresése, ahol az intenzitásfüggvény gyorsan változik.

Ehhez természetes módon analitikus eszközöket, az intenzitásfüggvény első és második deriváltját használjuk, amelyek hasznos információkhoz juttatnak az élekkel kapcsolatban.

Gradiens-alapú éldetektálás: A gradiens vektor (érintővektor) a kép első deriváltjaiból képzett $G[f(x)] = (G_x, G_y)$ vektor, ahol $G_x = \partial f / \partial x$, illetve $G_y = \partial f / \partial y$ a gradiens vektor két komponense. A gradiens vektor hosszát (a gradiens nagyságát), illetve irányát euklideszi módon definiáljuk, azaz: $|G[f(x, y)]| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$, illetve $\angle G = \arctan \frac{G_y}{G_x}$ a gradiens nagysága, illetve szöge, $\Delta f = G_x \cos \theta + G_y \sin \theta$ pedig a θ irányba eső változás gyorsaságát mutatja. A gradiens iránya a változás irányát, nagysága pedig a változás mértékét adja meg.

Sobel-operátor:

$$|G[f(x, y)]| = \sqrt{(f(x, y) - f(x + 1, y))^2 + (f(x, y) - f(x, y + 1))^2}$$

amely, egy 2×2-es környezeten belül végez összehasonlítást, az intenzitás eltéréseken alapulva.

Roberts-operátor:

$$|G[f(x, y)]| = |f(x, y) - f(x + 1, y)| + |f(x, y) - f(x, y + 1)|$$

amely, kisebb számításigénnyel jár, vagy bizonyos esetekben jobb eredményt ad.

Prewitt-operátor:

Mivel a kép zajossága felerősödik a derivált képzés során, célszerű ennek csökkentése végett a derivált képzés előtt szűrést alkalmazni. Ez a szűrés viszont nem vonatkozhat az x irányra, mert azzal a különbségképzés esélyei csökkennének. Tehát, olyan operátort kell

alkalmazni, amely kizárólag y irányban hat: $F^y = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix}$

Ezzel a szűrés és a differenciaképzés így írható fel: $D^x = M^x \otimes F^y \otimes A$, ahol $\otimes$ a konvolúció jele. A szűrés + x irányú különbségképzés P^x operátora:

$$D^x = P^x \otimes A, \text{ ahol } P^x = M^x \otimes F^y = \begin{matrix} & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & \otimes 1 & = 1 & 0 & -1 \\ & 1 & 1 & 0 & -1 \end{matrix}$$

Az új képfeldolgozó eljárások előnyei tehát:

- akár a 0,01x0,01 mm-es X, Y irányú lépésközzel készült adatok megjelenítése,
- ultrahangos A-, B-, C- és D-képek előállítás,
- akár 100 mikronnál is jobb felbontású tomográfias (rétegfelvételes) képek létrehozása.

Valamint használhatunk általános képjavító eljárásokat is:

- különböző méretű maszkokkal felüláteresztő (élkiemelő) szűrő,
- különböző méretű maszkokkal aluláteresztő (élsimító) szűrő,
- szakaszonkénti lineáris transzformáció (kontraszt kiemelés),
- hisztogram-kiegyenlítés (globális, lokális),
- valamint különböző él detektálások (roberts-, prewitt-, sobel, gradients operátorral).

4.5. A rendszer ultrahangos felbontásai

Az Epoch 1000-i-vel 30 MHz-es frekvenciájú vizsgáló fejet használunk jelenleg, így a generált hullámhosszúság értéke acél anyagban:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{\approx 6000 \frac{m}{s}}{30 \times 10^6 Hz} = \frac{\approx 6000 \frac{m}{s}}{30 \times 10^6 \frac{1}{s}} \approx 0,002 m \approx 0,2 mm$$

A jelenlegi ultrahangos-rendszer X, Y irányú (laterális) 200 µm-es és Z irányú (axiális) akár 100 µm-es felbontása:

- a fókuszált fej által használt 30 MHz-ből,
- a fókuszált ultrahangos fej ideális fókusz távolságának meghatározásából,
- egyazon térbeli mérési pontban lévő átfedésből (redundanciából) [21],
- az adatbegyűjtés módjának és feldolgozásának sajátosságaiból származik.

Fókuszált ultrahangos fej ideális fókusz távolságának meghatározása:

A 27. ábrán lévő rajz segítségével szemléltetem az ideális fókusz távolság meghatározásának módját. A számolásra van algoritmus, amivel gyorsan meg lehet határozni a keresett értéket, itt csak szemléltetem a meghatározás egy módját. A számolással a fókuszált hangnyaláb keresztmetszetének mértékét határozom meg ismert távolságban lévő reflektor esetén, ebben a példában a vizsgálandó anyag felszínére érkező hangnyaláb keresztmetszetét szemléltetem, számolásban nincs különbség a kettő között.

A 27. ábrán alkalmazott jelölések értelmezése:

a: fókusz távolság [mm]

b: rezgő átmérő [mm]

c1: fókuszált hangnyaláb hossza a vizsgálandó anyag felszínéig [mm]

c2: fókuszált hangnyaláb hossza a vizsgálandó anyagon belül [mm]

c1+c2: teljes hangnyaláb hossza [mm]

d: fókuszált fej és vizsgálandó anyag közötti távolság [mm]

e: vizsgálandó anyag és a fókuszpont közötti távolság [mm]

f: a hangnyaláb és a vizsgálandó anyag felszínénél lévő keresztmetszet fele [mm]

g: fókuszált hangnyaláb fókuszpontja [mm]

h: rezgő átmérő szimmetria vonala [mm]

β : h és c1 által közbe zárt szög [$^{\circ}$]

Ismert adatok:

a: 31,4452 mm [22]

b: 6,35 mm [22]

Adott távolságban lévő hangnyaláb keresztmetszetének meghatározása:

A számolás során d: 29 mm-nek vettem (ez természetesen egy változtatható érték az algoritmusban).

$$\text{A teljes hangnyaláb hossza: } c1 + c2 = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = 31,6051 \text{ mm}$$

$$\beta \text{ szög meghatározása: } \sin \beta = \frac{\frac{b}{2}}{c1+c2} = 0,100458470 \rightarrow \beta = 5,766^{\circ}$$

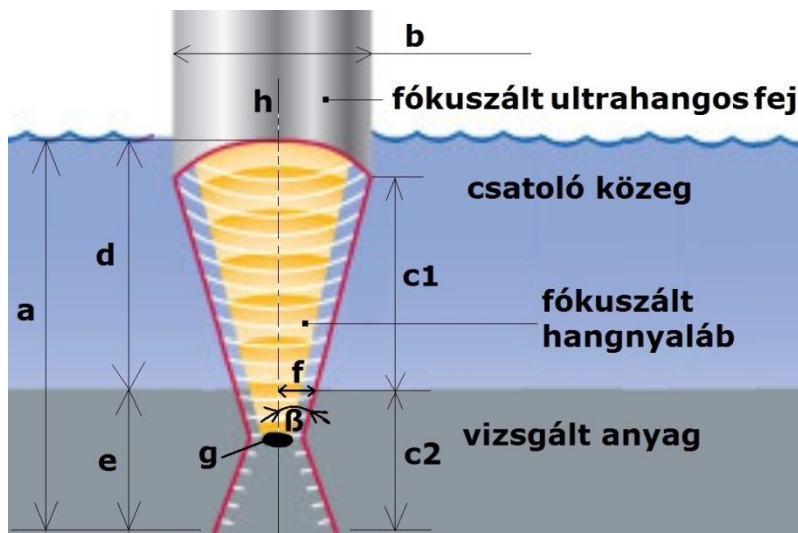
$$e = a - d = 2,4452 \text{ mm}$$

$$c2 = \frac{e}{\cos \beta} = 2,4576 \text{ mm}$$

A „ $\frac{b}{2}$ ” úgy aránylik „c1+c2”-höz, mint az „f” aránylik a „c2”-höz:

$$f = \frac{\frac{b}{2}}{c1 + c2} * c2 = 0,2469 \text{ mm}$$

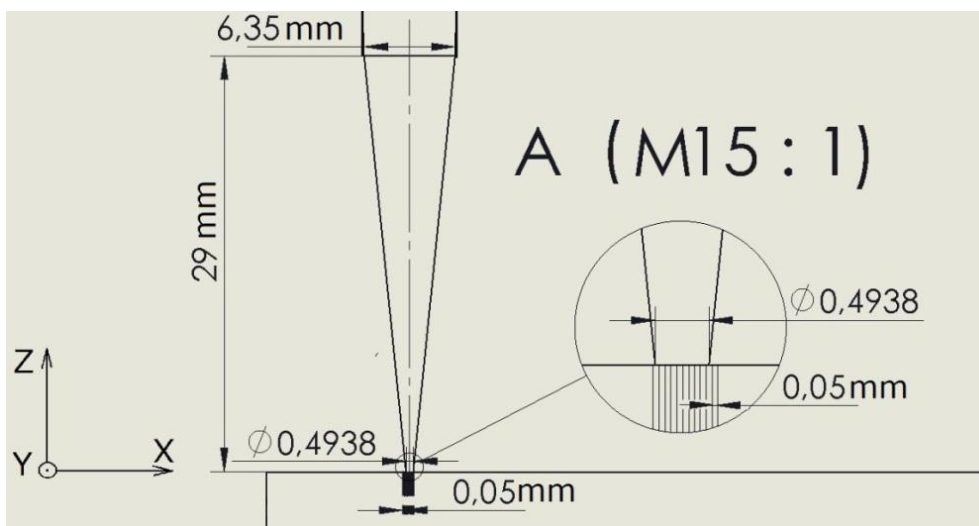
A keresett teljes hangnyaláb keresztmetszetének átmérője adott távolságban (29mm) lévő reflektor esetén: $2*f = \underline{0,4938 \text{ mm}}$, valamint a hangnyaláb területe az ismert távolságban lévő reflektornál (kör geometriát feltételezve): $T = f^2 * \pi = \underline{0,1915 \text{ mm}^2}$



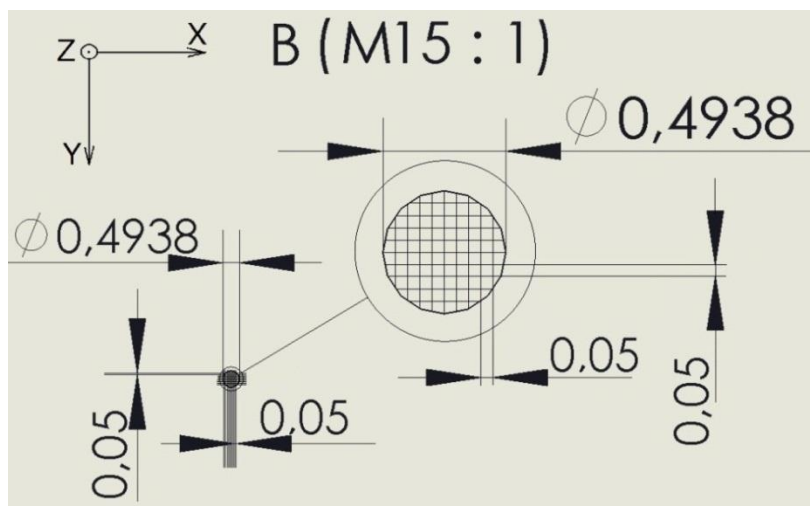
27. ábra: Fókuszált hangnyaláb és fókuszpont szemléltetése

Egyazon mérési pontban lévő átfedés (redundancia) mértéke:

A reflektornál lévő ultrahangnyaláb területének és az X, Y irányú lépésközök mértékének arányából származó átfedés (redundancia) aránya jelentősen befolyásolja a jó ultrahangos X, Y irányú felbontást. Ehhez elengedhetetlen a már levezetett módon meghatározott ideális fókusz távolság meghatározása, amiből kiszámíthatjuk a hangnyaláb területének egy közelítő értékét az ismert távolságban lévő reflektornál. A 28. ábrán (elől nézet) és a 29. ábrán (felülnézet) szemléltetésként látható a 29mm-es fókusz távolság esetén lévő hangnyaláb területe hogyan aránylik a lépésközök területével egy 0,05 mm-es X, Y irányú lépésközzel megvalósított vizsgálat esetén. Az ábrán az A és B ponthoz tartozó rész 15-szörös nagyításban látszik.



28. ábra: A hangnyaláb területe és az X irányú lépésköz mértékének viszonya



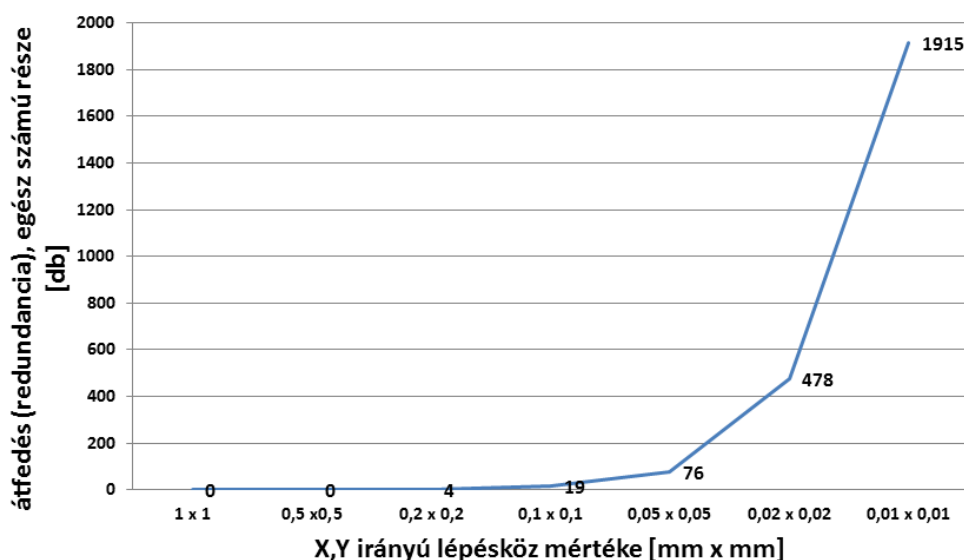
29. ábra: A hangnyaláb területe és az X,Y irányú lépésközök területének viszonya

A 29 mm-es fókusztávolság esetén meghatározott hangnyaláb területre ($0,1915 \text{ mm}^2$) vonatkozó átfedés értékei láthatók a 3. táblázatban különböző X, Y irányú lépésközök esetén.

X,Y irányú lépésköz mértéke [mm x mm]	1 x 1	0,5 x 0,5	0,2 x 0,2	0,1 x 0,1	0,05 x 0,05	0,02 x 0,02	0,01 x 0,01
egy térbeli mérési ponthoz tartozó terület [mm ²]	1	0,25	0,04	0,01	0,0025	0,0004	0,0001
átfedés (redundancia), egész számú része [db]	0	0	4	19	76	478	1915

3. táblázat 29 mm fókusztávolság esetén a hangnyaláb területre vonatkozó átfedés értékei

29 mm-es fókusztávolság esetén a hangnyaláb területre ($0,1915 \text{ mm}^2$) vonatkozó átfedés értékei



30. ábra: 29mm-es fókusztávolság esetén a hangnyaláb területre vonatkozó átfedés értékei

A 29mm-es fókusz távolság esetén a hangnyaláb területre (0,1915 mm²) vonatkozó térbeli mérési ponthoz tartozó mérési bizonytalanság értékei láthatóak különböző X, Y irányú lépésközök esetén a 4. táblázatban a $\tilde{y} = \bar{y} \pm \Delta y = \left(\bar{y} \pm \frac{\lambda \cdot \delta}{\sqrt{n}} \right) [mért]$ összefüggés alapján, ahol:

$\tilde{y}$: eredmény megadási módja,

$\bar{y}$: átfedésekből származó egy térbeli mérési ponthoz tartozó ultrahangos intenzitás értékek várható értéke,

Δy : mérési bizonytalanság,

δ : szórás, a számolás során $\delta = 3$ -al számoltam,

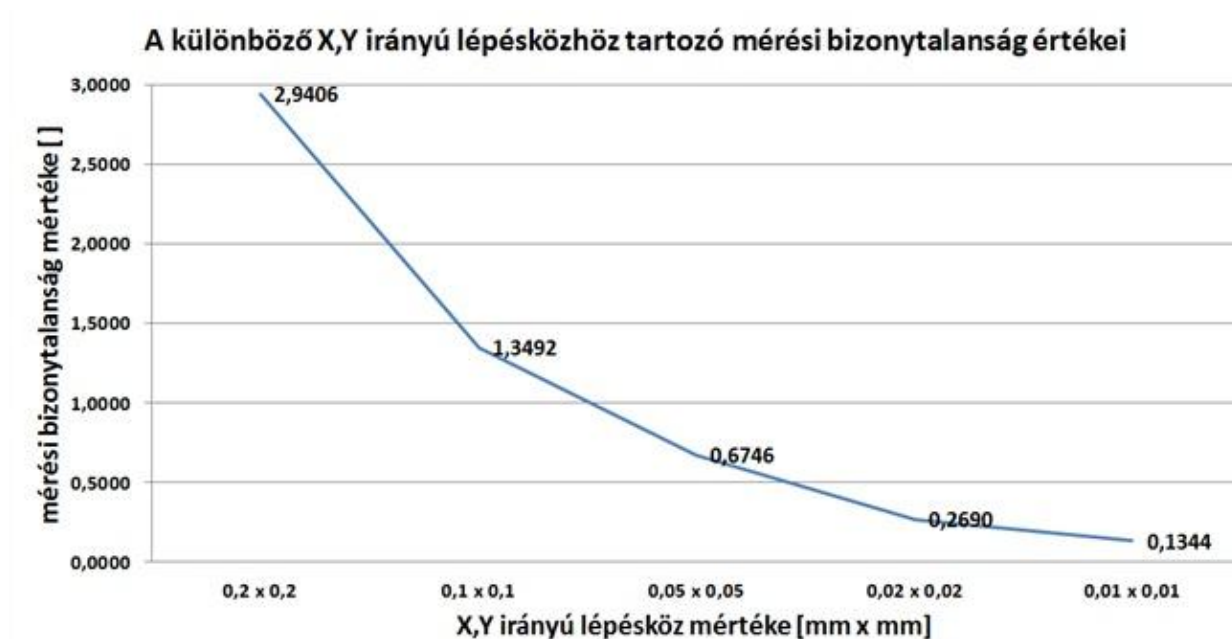
λ : kiterjesztési tényező, értéke most 1,96039 mert $\alpha = 0,05$ szignifikancia szint $\rightarrow$ 95%-os megbízhatósági szinttel számoltam normál eloszlást (Gauss-eloszlás) feltételezve,

n : mérések száma, ami esetünkben megegyezik az átfedésekből származó egy térbeli mérési ponthoz tartozó szám egész részével,

[mért]: mértékegység, ami esetünkben ultrahangos intenzitás értéket jelent.

X,Y irányú lépésköz mértéke [mm x mm]	1 x 1	0,5 x 0,5	0,2 x 0,2	0,1 x 0,1	0,05 x 0,05	0,02 x 0,02	0,01 x 0,01
átfedés (redundancia), egész számú része [db]	0	0	4	19	76	478	1915
mérési bizonytalanság mértéke (Δy)	-	-	2,9406	1,3492	0,6746	0,2690	0,1344

4. táblázat Mérési bizonytalanság mértéke



31. ábra: A különböző X,Y irányú lépésközhöz tartozó mérési bizonytalanság értékei

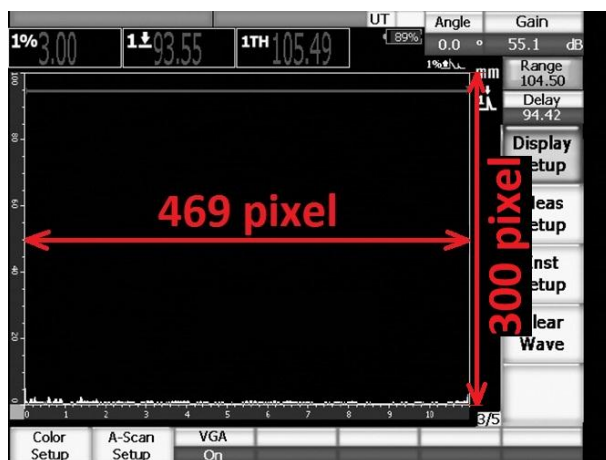
X,Y irányú lépésköz mértéke [mm x mm]	1 x 1	0,5 x 0,5	0,2 x 0,2	0,1 x 0,1	0,05 x 0,05	0,02 x 0,02	0,01 x 0,01
mérési bizonytalanság mértéke (Δy)	-	-	2,9406	1,3492	0,6746	0,2690	0,1344
eredmények ($\bar{y}$)	-	-	$\bar{y} \pm 2,94$	$\bar{y} \pm 1,35$	$\bar{y} \pm 0,67$	$\bar{y} \pm 0,27$	$\bar{y} \pm 0,13$

5. táblázat Mérési bizonytalanság alapján meghatározott eredmények

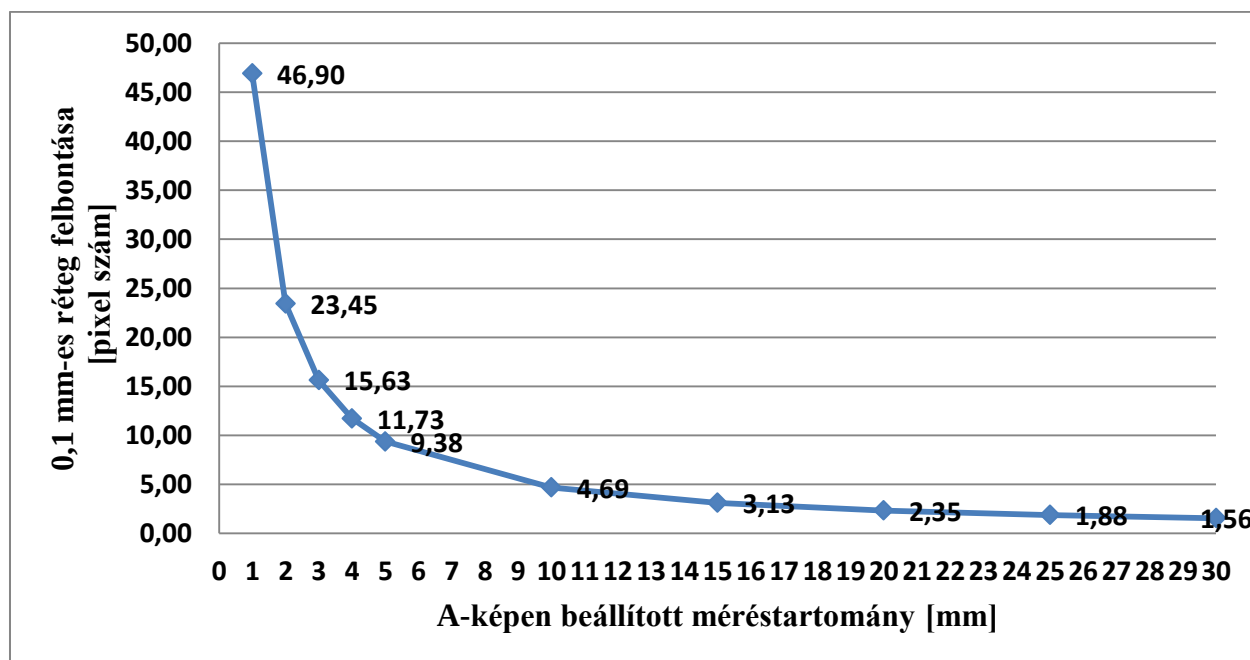
A számolások eredményét, amelyek 95%-os biztonsággal (0,05 szignifikancia szint) normál (Gauss) eloszlást feltételezve lettek meghatározva, az 5. táblázatban találhatjuk az „eredmények ($\bar{y}$)” sorban. Az eredményekből egyértelműen látszik minél nagyobb a hangnyaláb által lefedett terület és a lépésközhöz tartozó terület aránya, annál kisebb az egy térbeli ponthoz tartozó ultrahangos intenzitás értékek bizonytalansága, valamint annál jobb az X, Y irányú felbontó képesség [21].

Adatfeldolgozás sajátosságai:

Az Epoch 1000i kijelzője 640 (szélesség) x 480 (magasság) felbontású. Ebből a felbontásból az A-képek egy 469 x 300 területen jelennek meg (32. ábra). A jó axiális (Z irányú) ultrahangos felbontás szempontjából, az A-kép megjelenítési terület szélességének fontos szerepe van. Például egy 0,1 mm-es réteget annál több pixelen lehet felbontani minél kisebb a vizsgálandó anyag figyelembe vett mélységének az A-képen beállított méréstartomány része. Az A-képen beállított méréstartomány és a 0,1 mm-es réteg felbontása közötti összefüggés látható a 33. ábrán. Az ultrahangos fej fókusz távolságának mértéke (31,4452 mm) miatt, a diagramon 30 mm-ig lett meghatározva a 0,1 mm-es réteg felbontása.



32. ábra: A-kép megjelenési képének szélessége és magassága, pixelben



33. ábra: A-képen lévő méréstartomány és a 0,1 mm-es réteg felbontása közötti összefüggés

5. Alkalmazási példák

A bemelegítési ultrahangos vizsgálatokat minden esetben az Epoch 1000i kalibrálásával és egyéb információk mérlegelésével kezdtem meg:

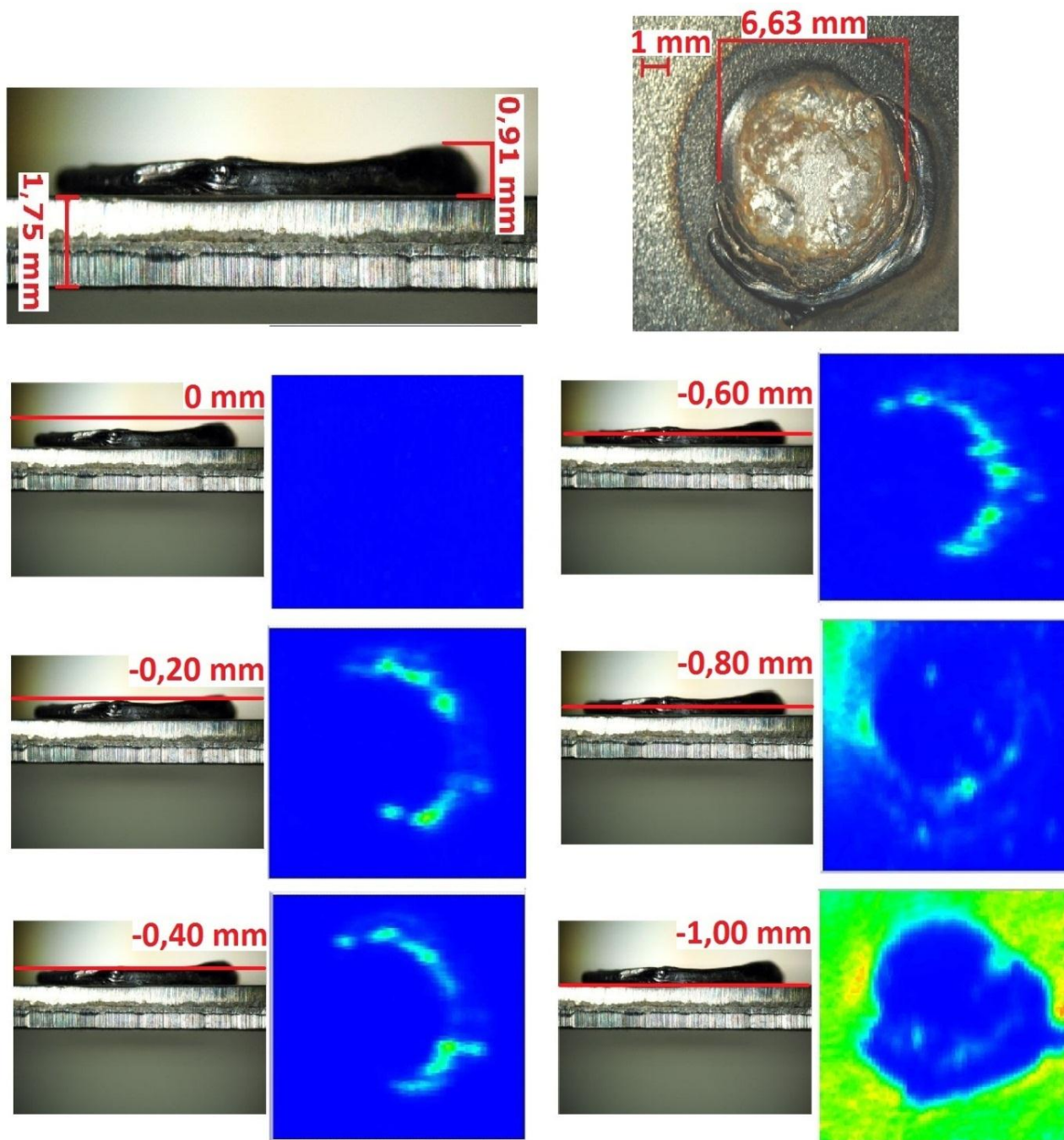
- A vizsgálat megkezdése előtt figyelembe vettem (vagy esetleg más vizsgálatoknál konkrét feladat illetve előírás alapján tudtam), hogy van-e olyan folytonossági hiány, aminek várhatóan tudom a mélységét és a méretét.
- Az anyagban meg kell határozni a mérés megkezdése előtt az ultrahang terjedési sebességét (Velocity). Az anyagon belüli ultrahang terjedési sebességének értékét vagy táblázatból szoktam megkeresni vagy az értékének a kiszámítását az Epoch 1000i-vel szoktam elvégeztetni.
- Erősítés beállítása: A minta-darabok vizsgálatakor, az erősítést úgy állítottam be, hogy a hátfaljelet (referencia) állítottam 4/5-ös (80%-os) képernyőmagasságba. Majd a kapott értéket változtattam 6, 12, decibellel, a kisméretű folytonossági hiányok detektálhatóságához.
- Az ideális fókusz távolság meghatározása alapján állítottam be a megfelelő távolságot az ultrahangos vizsgáló fej és a vizsgált tárgy között.

5.1. Ponthegeesztett kötés vizsgálata

Az ellenállás-ponthegeesztés egy széles körben használt eljárás az autóiparban. A közelmúltban új acélok (TRIP, TWIP stb.) is megjelentek a gyártósorokon. Meglehetősen fontos megvizsgálni a ponthegeesztett kötések minőségét, amelyek a hegesztési paraméterektől függenek, különös tekintettel az említett új acélok hegeszthetőségi tulajdonságaira. A gyors ellenőrzéshez helyszíni ellenőrző rendszereket alkalmaznak [19], amelyek csak egy felületi kötésvizsgálatra alkalmasak, részletek megjelenítése nélkül. Egy ponthegeesztés kötését megvizsgálva (34. ábra) jól érzékelhető a rendszer felbontása is. Az ábra öt darab 0,2 mm-es felbontással szeletelt 2 dimenziós ultrahangos visszaverődési C-képet mutat be.

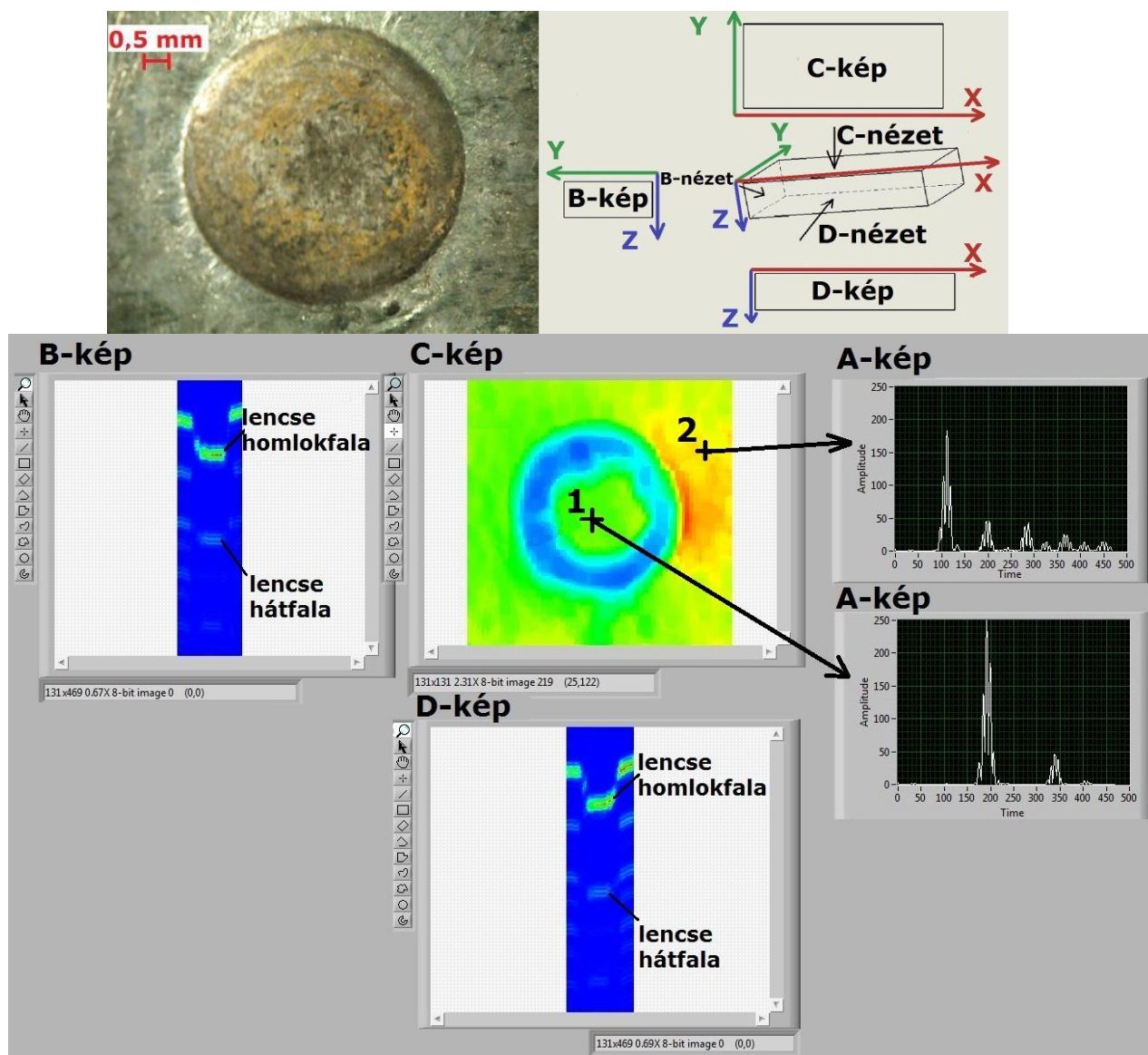
Látható, hogy a bemutatott ponthegeesztés nem jó minőségű, de éppen a kitüremkedő korona teszi lehetővé, hogy bizonyítani tudjuk, mennyire hatékony a módszer, az általunk definiált rétegek leképezésére. Látható, hogy képesek vagyunk a hegesztett kötés különböző rétegeit előállítani. Az ábrán bemutatom a (0,2-0,4-0,6-0,8-1,0 mm) szintekhez tartozó visszaverődések képeit. Az első négy szinten a korona, míg az utolsón már a felső lemez felső szintjének reflexiója látható.

Jól látható, hogy a felső szinten a heglencse mélyebben van, mint a külső fémlemez szintje (1,0 mm). Ugyanakkor a kinyomódásban és körülötte nincsenek reflexiók (amiket a képeken egyenletes sötétkék szín mutat).



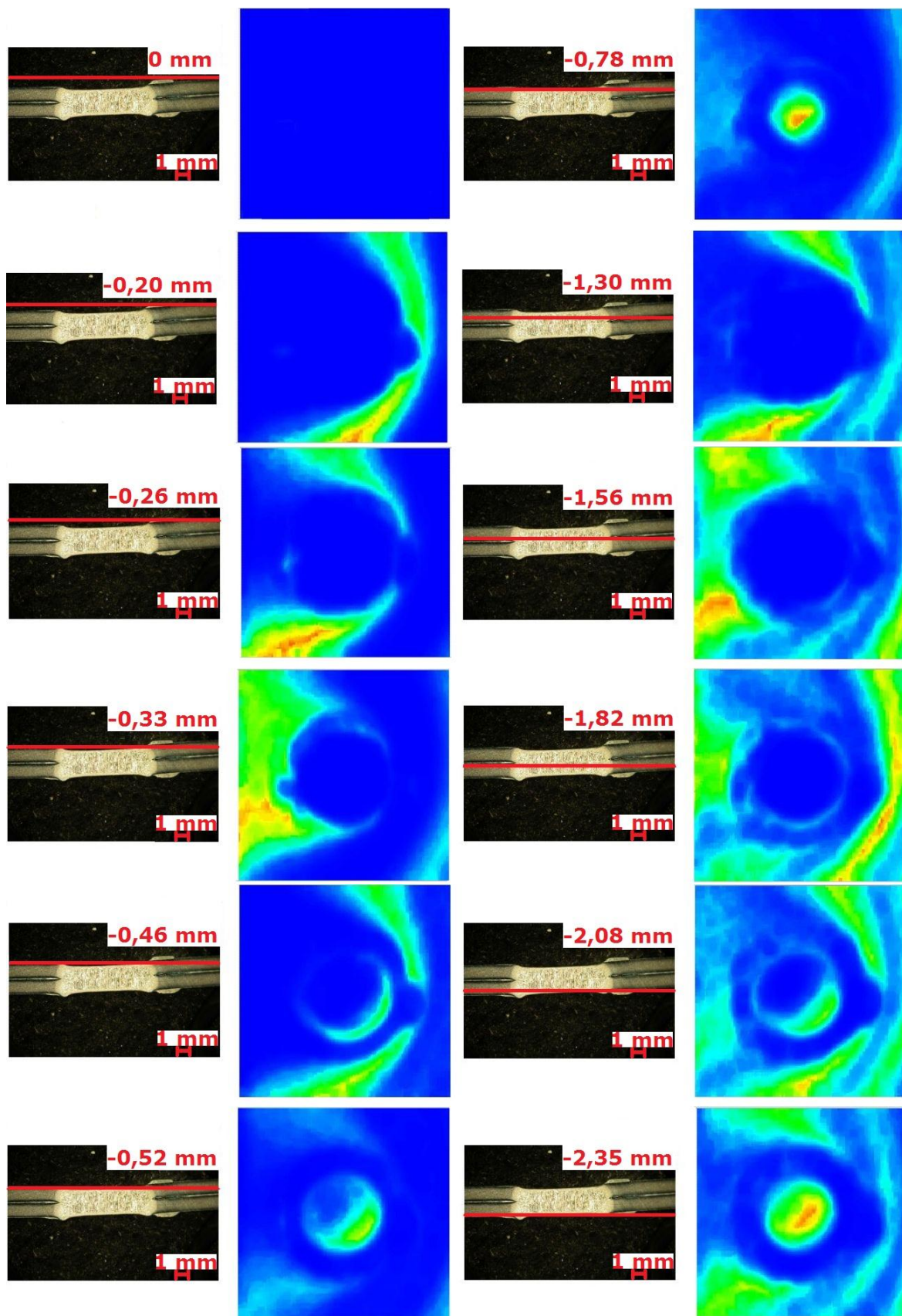
34. ábra: A ponthegesztés kötéseinek felszeletelt ultrahangos képei

5.2. Egy jó ponthegeesztett kötés felszeletelése



35. ábra Egy jó ponthegeesztés ultrahangos A-,B-,C-,D-képének eredményei

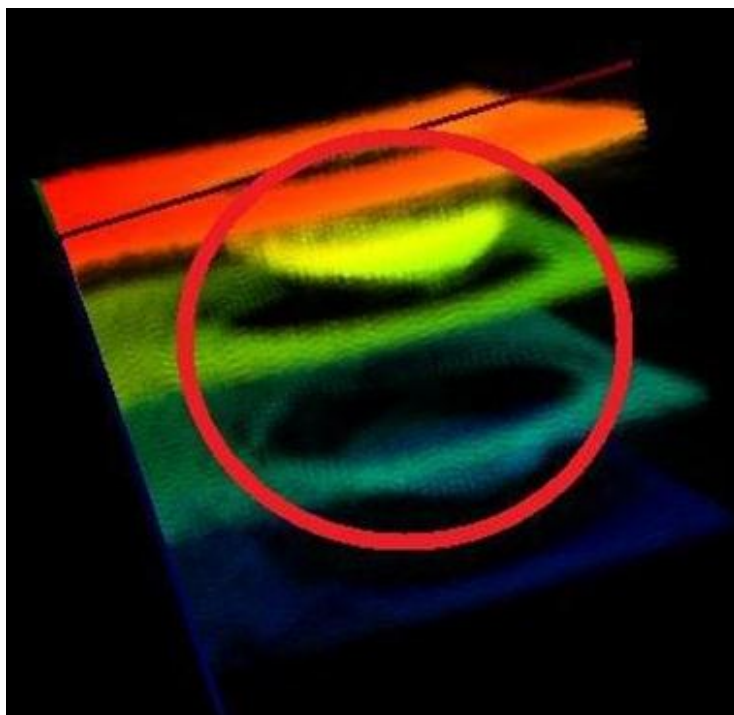
A felhasználói kijelző egy részét mutatja be a 35. ábra alsó képe, a kép felső részén egy jó minőségű ponthegeesztett kötés fényképe valamint a szoftver által előállított nézetek sematikus ábrája látható, a nézetek könnyebb megértése miatt. A kép alsó rész jobb oldalán látható a szokatlan C-kép két jellel ("1+", "2+") megjelölve. A jobb oldalon az "1+" jelhez tartozó lencse A-képe látható, amiből nyilvánvaló, hogy a lencse közepén közel dupla vastagságnak megfelelő hangút van, mint a "2+" jelhez tartozó felső lemez A-képe. Valamint látható még az "1+" jelhez tartozó D- és B-kép is, ahol a lencse ultrahangos visszaverődéséből reprodukált homlok- és hátfala található, amik között egyenletes kék terület van (nincs reflexió). Összegezve mindezt: a hegesztésben az összeolvadás megfelelő volt.



36. ábra A ponthegeztés kötésének mikroszkópos keresztmetszetei, ill. a hozzájuk tartozó különböző mélységekből származó szeletelt ultrahangos C-képek

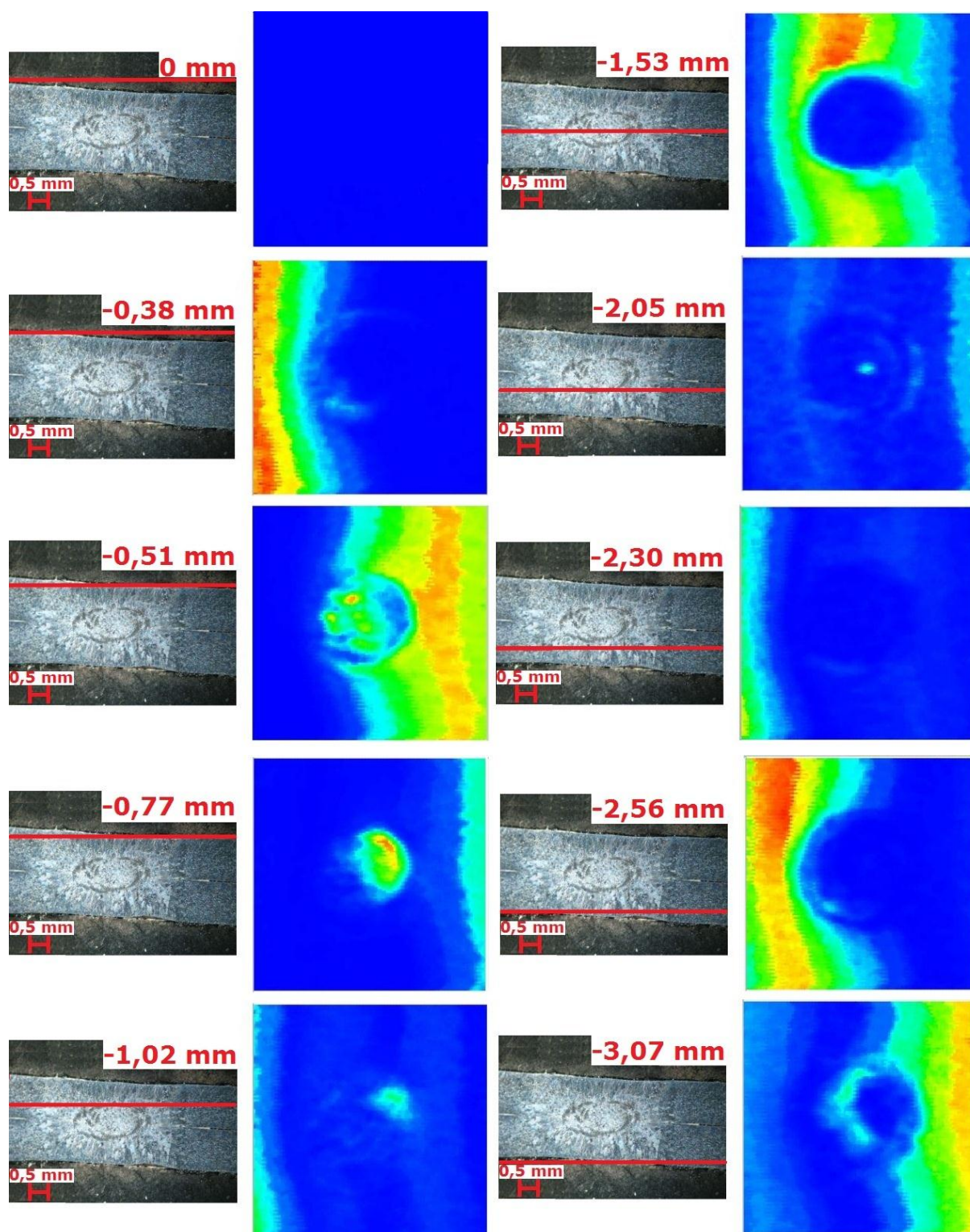
A 36. ábrán láthatók egy jó ponthegeesztési kötés tomográfiás ultrahangos C-képei. Technikai okok miatt nem volt lehetséges, hogy a varrat teljesen vízszintesen legyen a vizsgálat során. Mivel nem volt vízszintes (meg van döntve), a felső fémlemez felső felülete három különböző mélységekben is látható (0,20-0,26-0,33 mm). Ugyanezen ok miatt a lencse felszíne is három képen (0,46-0,52-0,78 mm) látható. A lencse mélyebben helyezkedett el, mint a felső lemez felülete. A 1,30-1,56 mm-es mélységben a felső lemez hátfal visszhangját láthatjuk. Világosan látszik, hogy a lencse rétegeiben (1-30-1,56-1,82 mm) nincsenek reflexiók, ami jól tükrözi, hogy az összeolvadás tökéletes volt. A lencse hátfal visszhangja - 2,35 mm-nél jelenik meg, ami bizonyítja a ponthegeesztés megfelelő minőségét.

Hatékony segítség lehet még a felhasználónak a 3D-s modell is az eredmények vizsgálatához (37. ábra), amit manuálisan lehet forgatni, zoomolni; - így lehetőség van megtalálni a hegesztés belsejében lévő folytonossági hiányokat. A modellben lévő legfelső piros réteg a felső lemez homlokfalát reprezentálja, alatta lévő zöldes színű réteg a felső lemez hátfalából származik, a legalsó rétegek (világoskék, sötétkék) a felső lemez ultrahangos homlok- és hátfal ultrahangos lecsengéseiből erednek. A pirossal bekarikázott részben a sárga bemélyedés a lencse homlokfalát jelenti, a piros kör alsó részén látható kék színű bemélyedés a lencse hátfalából fakad. Látszik, hogy a két réteg (piros és kék) között nincs reflexióból származó semmilyen szín, tehát a fúzió valóban tökéletes volt.



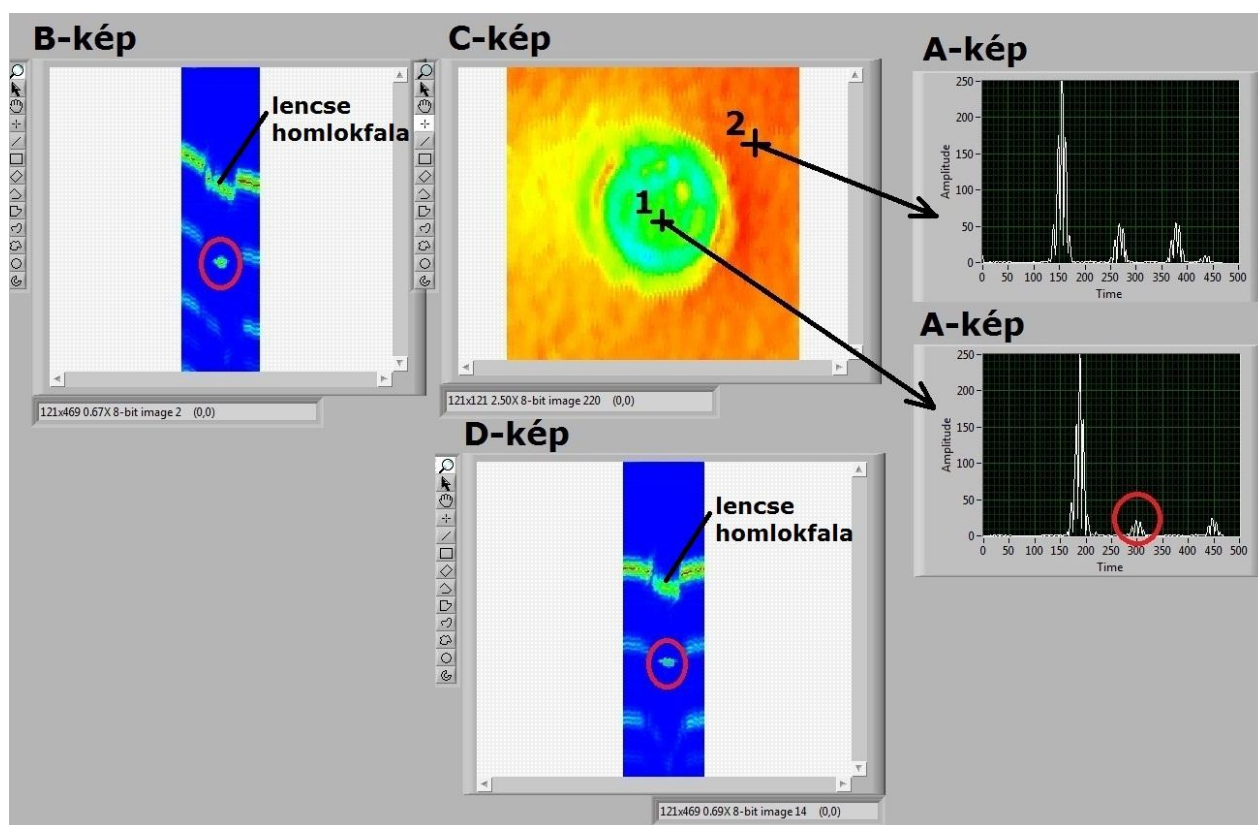
37. ábra Jó ponthegeesztés 3D-s modellje

5.3. Egy rossz ponthegeesztett kötés felszeletelése

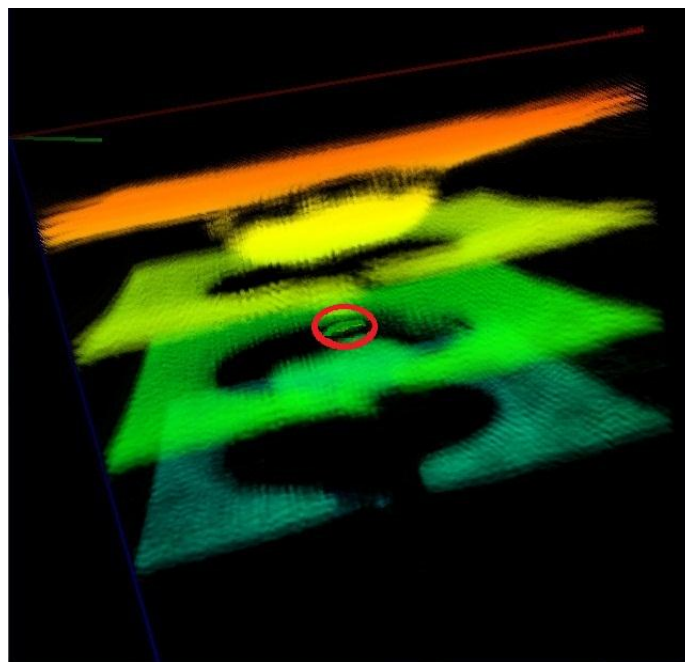


38. ábra: A ponthegeesztés kötésének mikroszkópos keresztmetszetei, ill. a hozzájuk tartozó különböző mélységekből származó szeletelt ultrahangos C-képek

Egy rossz ponthegeesztés esetében onnan kaptunk belső visszaverődéseket, ahol a nem tökéletes összeolvadás miatt az ultrahang reflektorok találhatók. A 38. ábrán a hegesztett kötés mikroszkópi metszeteit és a hozzájuk tartozó különböző mélységből származó szeletelt ultrahangos C-képeket látjuk. A vizsgálat során a lemezek 2 fokkal meg voltak döntve, a metszeti kép is ezt demonstrálja. Figyeljük meg, hogy noha a két lemez összeolvad, de a heglencse belsejében jól láthatók egy felső és egy alsó réteg kontúrjai. A felső fémlemez felső felülete kettő különböző mélységeken is látható (0,38-0,51 mm). Két mélységben (0,51-0,77 mm) található a lencse homlokfal reflexiója is. Majd a lencse homlokfala alatt 1,02 mm-nél a felső hibahelyből, míg 2,05-mm-nél az alsó hibahelyből származó reflexiók tűnnek fel. A két reflektor közötti területen (1,53 mm) a felső lemez hátfal visszaverődése található, míg végül legalul (3,07 mm) a lencse azon „maradék” hátfal visszaverődését látjuk, amit még nem takart el a hegesztésből származó hiba.



39. ábra Egy rossz ponthegeesztés ultrahangos A-,B-,C-,D-képének eredményei



40. ábra Rossz ponthegesztés 3D-s modellje

Az A-,B- és D-képek is lehetőséget adnak a reflektor detektálására. A 39. ábra kép jobb oldalán látható a C-kép két jellel ("1+", "2+") megjelölve. A jobb oldalon az "1+" jelhez tartozó lencse A-képe látható, ahol közel dupla vastagságnak megfelelő hangút van, mint a "2+" jelhez tartozó felső lemez A-képe. Valamint az "1+" jelhez tartozó lencse A-képén láthatunk egy pirossal bekarikázott részt, ami egy a lencséből származó reflektorból ered. Az „1+” jelhez tartozó D- és B-képen is látható a pirossal bekarikázott reflektorból származó reflexió, ami megközelítőleg a lencse közepén helyezkedik el, így a hegesztésben az összeolvadás nem volt megfelelő.

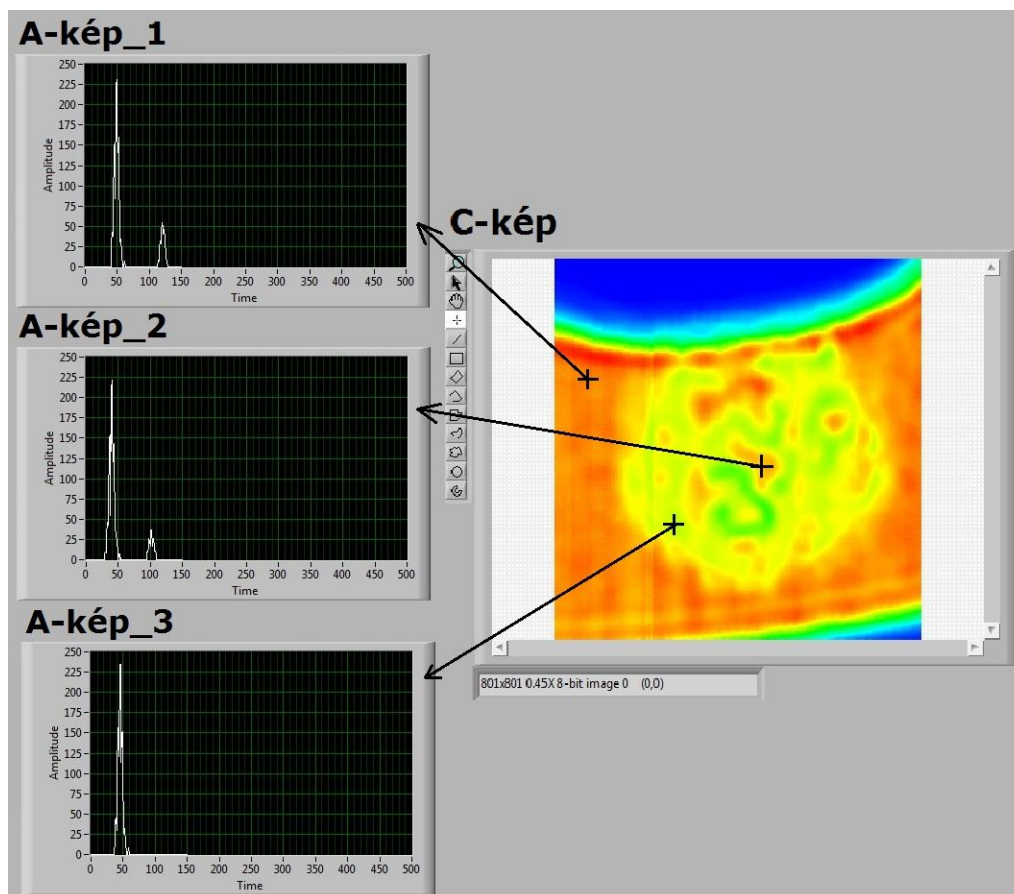
A 3D-s modell (40. ábra) ebben az esetben is megkönnyíti az eredmények szemléltetését. A modellben lévő legfelső narancssárga réteg a felső lemez homlokfalát reprezentálja, alatta lévő sárgás színű réteg a felső lemez hátfalából származik, a legalsó rétegek (világoszöld, világoskék) a felső lemez ultrahangos homlok- és hátfal lecsengéseiből erednek. A sárga bemélyedés (lencse homlokfala) és a kék színű bemélyedés (lencse hátfala) közötti részben pirossal bekarikázva észlelhető a reflektor, ami szintén bizonyítja a fúzió tökéletességének a hiányát.

5.4. Kondenzátor kisütéses csaphegesztett kötés ultrahangos felszeletelése

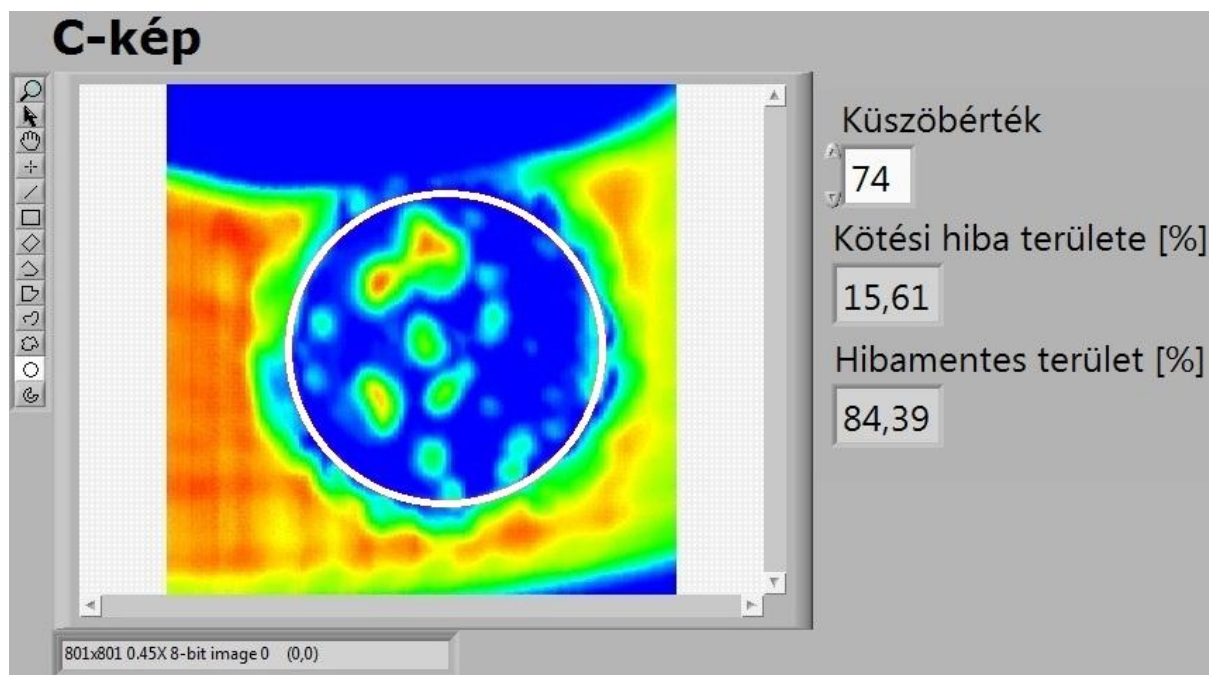
Akár a kondenzátor kisütéses csaphegesztések vizsgálatát is képes ellátni a rendszer. Egy járműipari alkatrészeket gyártó cég felkérésére vizsgáltuk meg a hegesztéseket. A hegesztés során ismeretlen okok miatt a lemezen lévő bevonat egyes alkotó elemei a hegedés során zárványokat hoztak létre a lemez és csap hegesztési rétegében. A feladat az volt, hogy a rendszer vizsgálja meg a hegesztéseket, majd állapítsa meg a hegesztett összterületből mekkora hányadot tesz ki a kötési hiba és a hibamentes terület. A 41. ábrán látható a lemez felületéről egy letört csap keresztmetszete, minek helyén jól látszanak a kialakult zárványok.



41. ábra Letört csap keresztmetszete és a kialakult zárványok



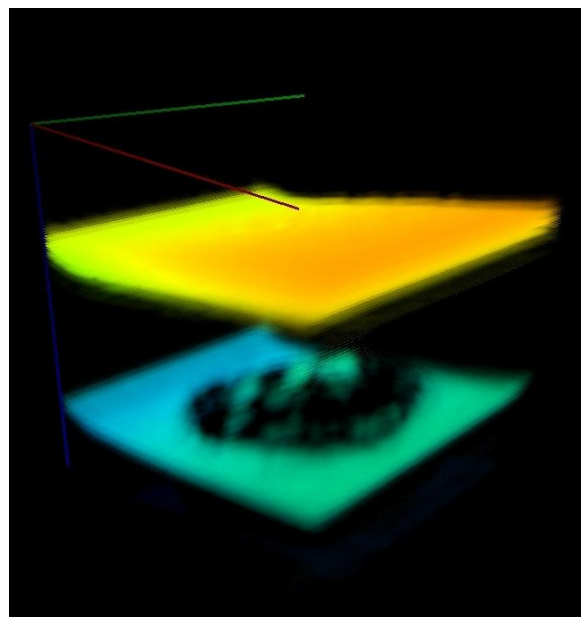
42. ábra Csaphegesztés ultrahangos C-képe és a hozzátartozó A-képek



43. ábra Ultrahangos C-kép a hegedés rétegéről, mértékéről

A mérőrendszer egyik nagy előnye, hogy könnyen illeszthető az adott vizsgálati célokhoz. A vizsgálat során a csapok fejjel lefelé voltak, így könnyebb volt beazonosítani a hegesztési réteget, valamint ideálisabb fókusz távolságot lehetett beállítani. A 42. ábrán látható egy ultrahangos C-kép a csaphegesztésről illetve a C-képen lévő lemez felület és a hegedési réteg egyes részeihez tartozó A-képek. Az „A-kép_1” a lemez homlok- illetve hátfal visszhangját tartalmazza. Az „A-kép_2”-n a hegesztési rétegben lévő egyik zárvány A-képe látszik, ahol a hangút távolságát összehasonlítva az „A-kép_1”-en lévővel észrevehető mennyivel közelebb van, tehát könnyen belátható, hogy valóban a zárványból ered a reflexió. Az „A-kép_3” a hegesztési réteg egy olyan részéből származik ahol a fúzió tökéletes volt, így nem látszik rajta semmi más, mint a lemez homlokfalának visszhangja. Az eredmények számszerű kiértékeléséhez elegendő volt a C-képek vizsgálata, azok közül is pontosan az a réteg ahol a hegedés történt: e réteg megfigyelhető a 43. ábrán, ahol szembe tűnően látszanak a zárványok által keltett reflexiók geometriája. Az értékelő algoritmust úgy készítettem el, hogy az ábrán látható fehér kört automatikusan helyezze el a vizsgálandó hegesztési kör középpontjára. Majd a fehér körön belül lévő megjelenített ultrahangos intenzitás értékek közül vegye számításba azokat, amik az adott küszöbértéket meghaladják (jelen esetben ez a küszöbérték 74). A küszöbérték meghatározása is automatikusan történik, egy kontúr alapú felismerés segítségével. Ebben az esetben a kötési hiba területe 15,61 %-nak adódott.

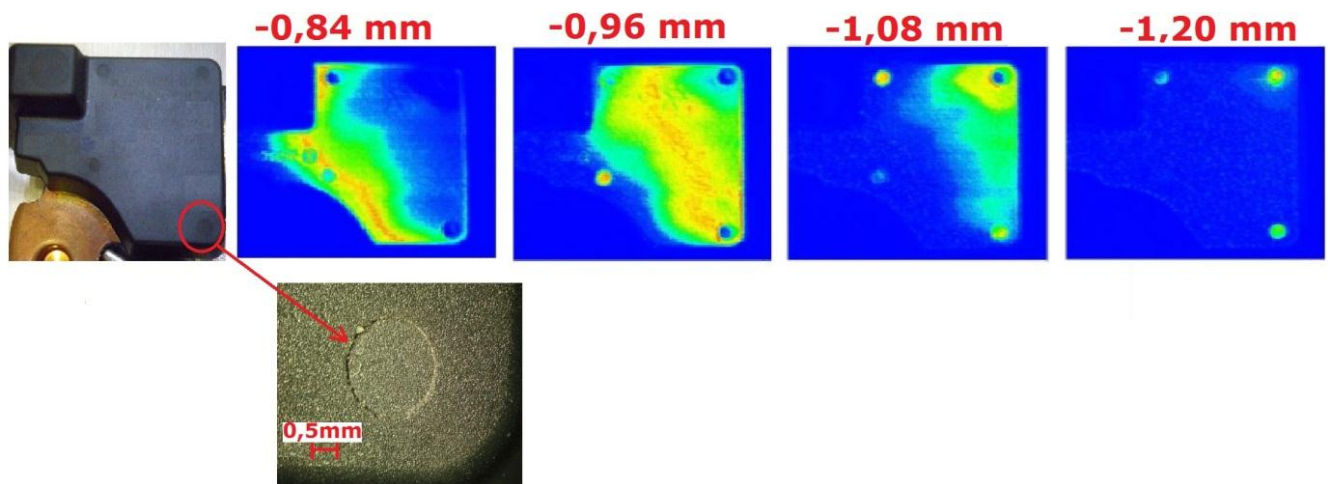
A 44. ábrán lévő 3D modell segítségével könnyen lehet szemléltetni a hegesztési rétegben kialakult zárványokat (alsó kék rétegben lévő foltok). A felső sárga réteg a lemez felső homlokfalának ultrahangos reflexióját reprezentálja.



44. ábra Csaphegesztés 3D-s modellje

5.5. Tokozott elektronikák ultrahanggal történő felszeletelése

A Pásztázó Akusztikus Mikroszkóp egy másik felhasználása lehet még a műgyantába öntött elektronikák ellenőrzése. Amint az már a bevezetésben is szerepelt, ez volt az eredeti cél, amikor elkezdtek a fejlesztést. Műgyantába öntött elektronikákat széles körben használnak az autóiparban, mivel a nedves környezet nincs rájuk hatással. Azonban fontos, hogy a műgyanta monolit legyen. Gyártáskor egy tipikus hiba lehet az, hogy légbuborék, porozitás marad a műgyantában. Ez akkor a legveszélyesebb, ha a buborék közel van a felülethez vagy az nyomtatott áramköri laphoz, de természetesen az elektronika belsejében sem fordulhatnak elő.



45. ábra Műgyanta felső felületének képe és a különböző mélységből származó ultrahangos szeletelés C-képei

A 45. ábrán látható a sajátos szeletelési technológia eredményessége. A műgyanta felületén lévő benyomódás mélysége kisebb, mint 0,1 mm. A benyomódás mégis egyértelműen megkülönböztethető a szeletelt képeken, annak ellenére, hogy a hagyományos képen (ábra bal oldalán) nehéz felismerni a benyomódást.

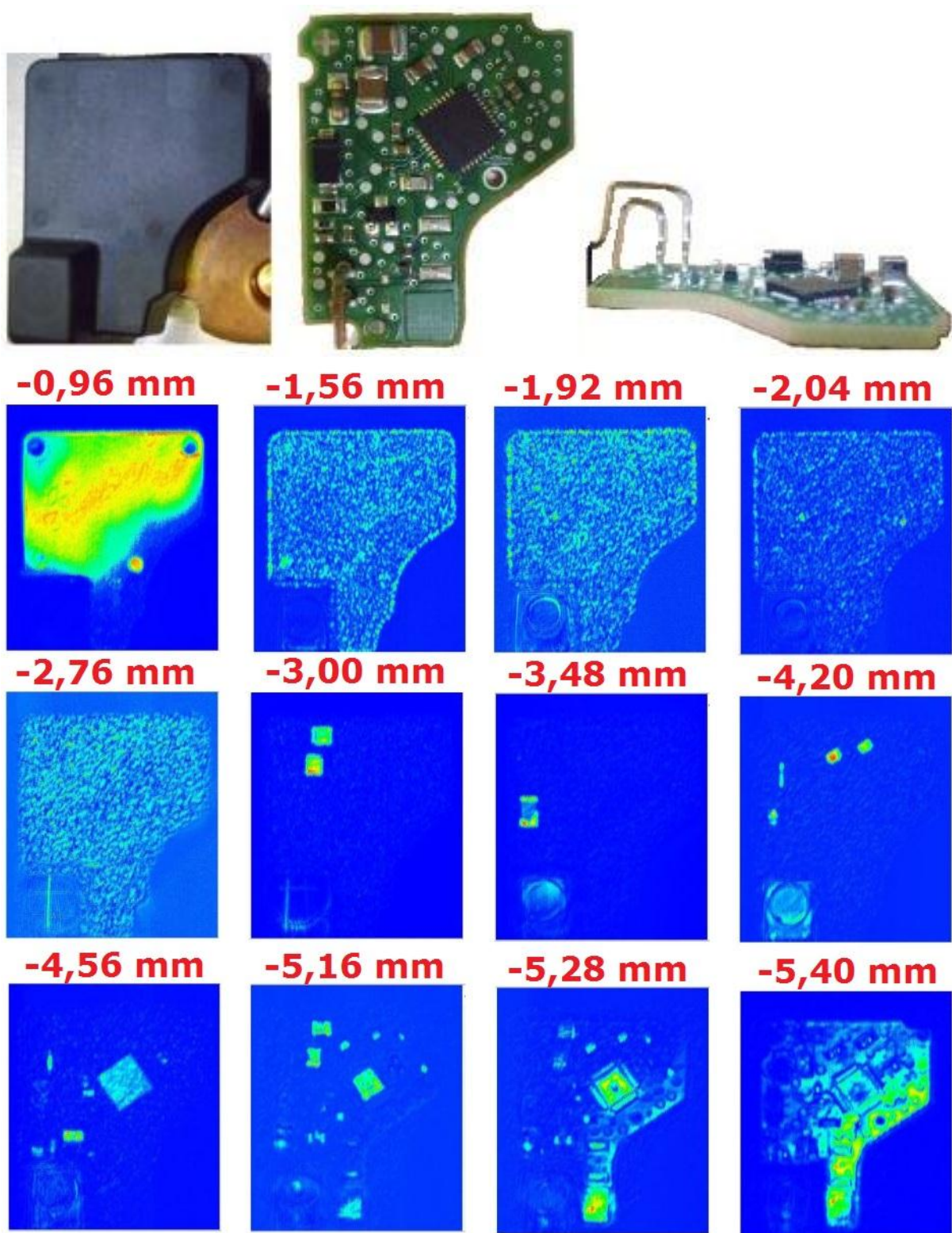
Ultrahanggal azonban nemcsak a felszint láthatjuk, hanem az ultrahang képes a műgyantában lévő elektronikai részletek kimutatására is (45. ábra). Ahhoz, hogy megértsük a 46. ábrán lévő szeletelt képeket, az ábra felső részén bemutatunk képeket a műgyanta felszínéről és a műgyantában öntött elektronika felépítéséről. Ezek a képek segítik a könnyebb megértést, amit a szeletelt képeken láthatunk.

A 46. ábra második sorában az első képen a műgyanta felülete szerepel (lásd 45. ábra). Mélyebbre menve számos pöttyöt látunk a képeken. Ezek apró buborékok, porozitások a műgyantában, amik a funkcionalitást tekintve még nem jelentenek problémát, de ezt még vizsgáljuk. Ez volt az eredeti cél. De ma már a rendszer ennél többet tud.

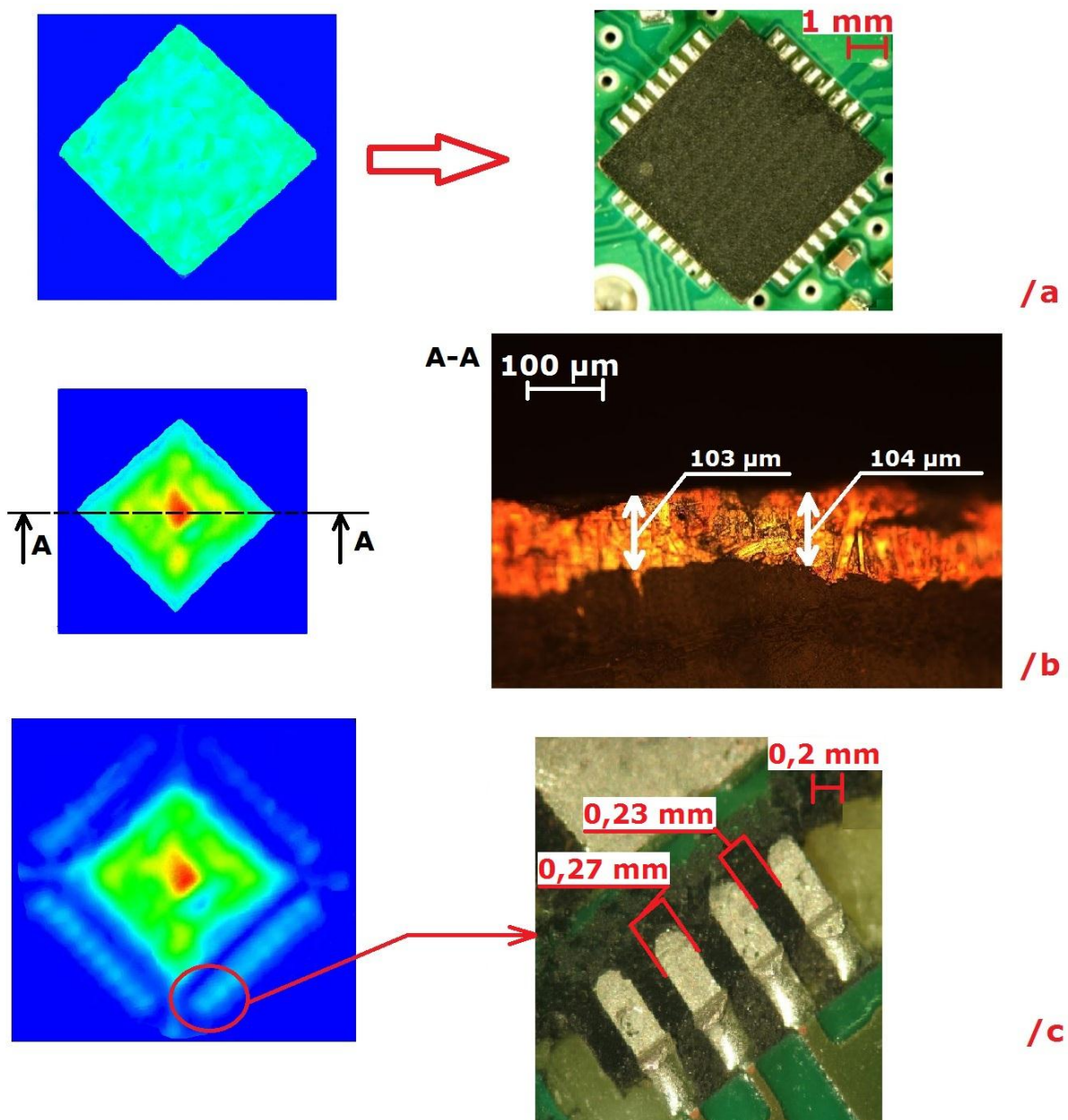
Érdemes felhívni a figyelmet a -3,00 mm-nél lévő két jól érzékelhető reflexióra. Azokat összehasonlítva a jobb felső sarokban lévő képpel, egyértelművé válik, hogy az két elektronikai elem, amelyet a nyáklap felületére illesztettek. A -3,48 mm mélységben a következő elektronikai alkatrész látható, ennek a magasságbeli különbségét a többihez nehéz észrevenni a fényképről. Ezek a képek már a műgyanta belsejéről készültek! A legnagyobb integrált áramkörti elem felülete látható -4,56 mm-nél, ami egy IC. Ahogy haladunk lefelé -5,16 mm-nél az IC-ben lévő fém reflexiója is látszik, ami a legnagyobb valószínűséggel maga a chip. A következő mélységi ponton (-5,28 mm) még az IC nyákra szerelt lábai is látszanak.

A 47. ábrán lévő képek nagyobb részletességgel szemléltetik a nyákra szerelt IC és chip fényképeit valamint a hozzájuk tartozó ultrahangos tomográfiás C-képek eredményeit. A felső sorban (47/a) baloldalon látszik az IC-ről készült ultrahangos C-kép valamint jobboldalon egy IC-ről készült fénykép. A megjelenített C-kép rétege pontosan egybe esik az IC felületi síkjával. Látszik, hogy az IC geometriája egyértelműen megegyezik a tomográfiás C-képpel.

A 47/b. sorban a baloldalon szerepel az IC alatt lévő chip szeletelt C-képe, amihez jobb oldalon tartozik ugyanannak a chipnek félbevágott elektronmikroszkóppal készült metszeti képe is, amelyen egy A-A jelzés is szerepel. Az elektronmikroszkópos metszeti képen jól látszik, hogy a chip magassága 100-105 μm között van. Végül a 47/c. sor baloldalán a chip beforrasztott lábainak reflexióiból származó C-kép figyelhető meg, jobb oldalon a forrasztott lábak egy részéről készült sztereo mikroszkópos fénykép. A forrasztott lábak egymástól megközelítőleg 0,23 mm-re vannak. A C-képen nem teljesen elkülönülten látszanak a lábak, de észrevehető, hogy a forrasztott lábak reflexióiból származó C-kép alaptextúrája közel megegyezik (recézettség miatt) a fényképpel. A rendszer felbontása tehát jobb, mint 0,1 mm a mélységben (Z irány), keresztirányban (X, Y) pedig a 0,2 mm-t is megközelíti.



46. ábra Az elektronika fényképei (felső sor) és a különböző mélységből származó ultrahangos szeletelések C-képei



47. ábra Nyákra szerelt IC és chip fényképei, ultrahangos C-képei

6. További fejlesztési lehetőségek

Fejlesztési lehetőségek közül említésre méltó:

- pontosabb, precízebb mozgatórendszer kidolgozása automatizált Z irányú mozgatással,
- 50 MHz-es fókuszált fej alkalmazása,
- új automatizált szűrési módszerek bevezetése.

A jelenlegi ISEL mozgatórendszerrel már elértük a legjobb X, Y irányú felbontást (0,01 mm), amire még képes a mozgató berendezés. Így jelenleg kialakítás alatt van egy új mozgató rendszer, ami 0,01 mm-nél is jobb felbontással fog rendelkezni. Valamint az automatizált Z irányú mozgás nagy előnye lesz, hogy sokkal jobban ki tudjuk majd használni a fókuszált vizsgáló fej nyújtotta lehetőségeket, előnyöket. Amivel a vizsgálati eredmények pontosságát, megbízhatóságát fogjuk növelni, akár vizsgálat közben is.

Az új mozgató rendszer már kétirányú kommunikáció alkalmazásával fog megvalósulni. Ez lehetővé teszi, hogy a fej pozícióba állása után a mozgató rendszer jelezni fog az adatbegyűjtő algoritmusnak, hogy feldolgozhatja az adatokat, majd annak végeztével a begyűjtő algoritmus vissza fog jelezni a mozgató rendszer felé, hogy tovább mehet a fej. Ennek zökkenőmentes kivitelezéséhez mindenképpen egy platformba lesz integrálva a mozgatasért felelős rendszer irányítása és a fejlesztett alkalmazás (V2.0).

A jelenleg fejlesztés alatt lévő szűrési módszerek még jobban lehetővé teszik majd a végfelhasználók számára, hogy az eredményeket könnyebben, gyorsabban lehessen feldolgozni.

6.1. Következtetések

Sikerült kifejleszteni egy új, viszonylag olcsó és célirányos Pásztázó Akusztikus Mikroszkópot, ami egy bemerítéses típusú fókuszáló ultrahangos vizsgálófejjel működik. Az ultrahangos A-képeket sorozatban kis lépésekkel végrehajtott letapogatás során gyűjtjük össze (minimális lépésköz akár 10 mikron), egy adattömböt állítva elő a visszavert intenzitás mértékeiről a tér megfelelő pozícióiból. Ebből a tömbből számítógépes képfeldolgozó technikákkal A-, B-, C- és D-képet és forgatható 3D-s modellt állítunk elő, vagy vízszintesen szeletelve az objektumokat, akár 100 mikronnál is jobb pontosságot tudunk elérni. A 0,1 mm-es felbontásnak köszönhetően megtalálhatjuk az adott mélységből visszaverődő felületeket, amit megfelelően lehet értelmezni.

Az ellenállás ponthegeztés illetve a kondenzátor kisütéses csaphegeztés kötése in észre lehet venni a belső, nem elégséges összeolvadásból származó visszaverődéseket. Azt is láttuk, hogy milyen sokat számít a ponthegeztés varratfelületének minősége, hogy meghatározhassuk a két lemez közötti hegeztés minőségét. A műgyantába öntött elektronikák esetében ki tudjuk mutatni akár a gyantában lévő buborékokat, összefüggő porozításokat akár a hibásan nyomtatott áramkört elemeket, ha azok nagyobbak 0,1 mm-nél.

Nagyon ígéretes, hogy a 3D-s tömb 10 mikronos felbontással merőleges irányban sok redundanciát tartalmaz, ami lehetőséget teremt a további adatfeldolgozás tökéletesítésére. Ez megnyitotta az utat a szeletelhetőség felé. Úgy gondoljuk, hogy az ultrahang mikroszkóp a gyakorlati életben egy nagyon hasznos eszköz lehet. Az A-, B-, C- és D-képeket nem mindig könnyű megérteni, de a szeletelt képeket könnyebb átlátni. Ez alkalmazható lehet például a ponthegeztéseknél, ahol kimutatható az a szint, ahol az összeolvadásnak meg kell történnie. Ma még csak 0,1 mm a szeletelési pontosságunk, de további javulásokat várunk az 50 MHz frekvenciájú ultrahangos vizsgálófejtől, a kialakítás alatt lévő jobb mozgató mechanikától és a fejlesztés alatt lévő új szűrési módszerektől. Nagy előnye a mérőrendszernek, hogy könnyen illeszthető az adott vizsgálati célokhoz. Itt csak a ponthegeztések, csaphegeztések és az elektronikák eredményének egy részét mutattam be, de további feladatok állnak még előttem.

A rendszer már jelenlegi állapotában is alkalmas az MSZ EN ISO 17640-es szabványban előírt Ø3 KHF (keresztirányú hengeres furat) és Ø1- Ø3 mm KTR (körtárcsa reflektor) méretű hibák azonosítására illetve 2D és 3D megjelenítésére.

Ez a fejlesztés a 2014.10.15.-én megrendezett nemzeti innovációs versenyen [24] (huninno) első helyezést ért el, valamint a különdíjas kategóriában is első helyezést kapott.

7. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni a MAID Labor vezetőjének, konzulensemnek dr. Pór Gábornak, aki lehetőséget adott a rendszer fejlesztésére valamint, hogy betekintést nyerjek egy „igazi” labor működésébe és hozzáférést biztosított a mérő eszközök használatára. Nagy tapasztalata révén sokszor olyan tanácsot adott, amivel megkönnyítette illetve felgyorsította a munkámat. Köszönettel tartozom Neki azért is, hogy betekintést adott az ultrahangos roncsolásmentes anyagvizsgálatok „világába” és megszerettette velem.

Valamint köszönetet mondok azért a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027: Nagy Teljesítő Képességű Anyagok Kutatása szakmai és pénzügyi támogatásáért, amely megnyitotta számomra a lehetőséget OTDK munkám elkészítéséhez, valamint személyesen Dr. Trampus Péternek, a TÁMOP vezetőjének, aki mindvégig figyelemmel kísérte munkámat.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Lemons R. A., Quate C. F. (1974). "Acoustic microscope—scanning version". Appl. Phys. Lett. 24: 163–165
- [2] F. Severin et al: Industrial applications of Scanning Acoustic Microscopy, ME Technical Paper Materials Evaluation, July, 2013
- [3] Ultrahangos anyagvizsgálat [weboldal] [2014.10.05]
<<http://www.controllabor.hu/ultrahangos-vizsgalat>>
- [4] Az ultrahang diagnosztikai és terápiás alkalmazása [Word dokumentum] [2014.10.11]
<<http://biofiz.sote.hu/run/dl.php?id=829>>
- [5] Dr. Mészáros István, Roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálati eljárások [PDF dokumentum] [2014.10.09]
<http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAGM5/letoltes/Roncsolasmentes_jegyzet.pdf>
- [6] Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care & Pain | Volume 11 Number 5 2011, Resolution in ultrasound imaging- Alexander Ng-Justiaan Swanevelder: oldal: 186-188
- [7] KC Series Immersion Tanks [weboldal] [2014.10.12]
<<http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/integrated-systems/immersion-tanks.html>>
- [8] Immersion Ultrasonic Testing for Materials to 5,000lbs. [weboldal] [2014.10.15]
<http://www.labtesting.com/1254/immersion-ultrasonic-testing-for-materials-to-5000lbs/#.U17j_W0lFF9>
- [9] Mistras UT Solutions Catalog [weboldal] [2014.10.12]
< <http://www.mistrasgroup.com/products/solutions/ut-ultrasonics/> >
- [10]. Isel step controller [weboldal] [2014.10.20] <<http://www.isel.hu/index.php/klub-7/piac/1882/mechanika/golyosorsos-linearis-egyseg/les-4-golyosorsos-linearis-egyseg.html>>
- [11] VGA2USB LR [weboldal] [2014.10.06]
<http://www.epiphan.com/products/frame-grabbers/vga2usb-lr/>
- [12] ProNc [weboldal] [2014.10.22] < <http://www.pronc.com/pronc.htm>>
- [13] Flaw detectors High frequency [weboldal] [2014.10.08]
<<http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/highfrequency/>>
- [14] LABVIEW [weboldal] [2014.10.20] < <http://www.ni.com/labview/>>
- [15] Mammográfias röntgenfelvételek elő feldolgozását végző eljárások fejlesztése [PDF formátum][2014.10.26]
<http://home.mit.bme.hu/~laszto/web_data/publications/tdk2002.PDF>

[16] képkorrekciós eljárások [weboldal] [2014.10.24]

< http://mazzola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/segedletek/kepfeld_multm/vargaz/digim-correction.htm >

[17] Fazekas Gábor – Hajdu András: Képfeldolgozási módszerek: oldal: 7-35

< http://www.inf.unideb.hu/~hajdua/km_main.pdf > [PDF formátum] [2014.10.21]

[18] Bohács Gábor – Hermann Gyula: Identifikációs rendszerek [PDF formátum] [2014.10.21]

<[https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CEQQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.tankonyvtar.hu%2Fen%2Ftartalom%2Ftamp412A%2F0018_Identifikacios_rendszerek%2FBohacs-Herman_Identifikacios.pdf&ei=-_9MVJy-](https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CEQQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.tankonyvtar.hu%2Fen%2Ftartalom%2Ftamp412A%2F0018_Identifikacios_rendszerek%2FBohacs-Herman_Identifikacios.pdf&ei=-_9MVJy-EaXU7AaPnoGQBg&usg=AFQjCNG7UMrk34PdyxOrir541EJMXUbSrQ&sig2=aVGlcJuShzUhjBWSzsuFQ&bvm=bv.77880786,d.bGQ)

[EaXU7AaPnoGQBg&usg=AFQjCNG7UMrk34PdyxOrir541EJMXUbSrQ&sig2=aVGlcJuShzUhjBWSzsuFQ&bvm=bv.77880786,d.bGQ](https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=0CEQQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.tankonyvtar.hu%2Fen%2Ftartalom%2Ftamp412A%2F0018_Identifikacios_rendszerek%2FBohacs-Herman_Identifikacios.pdf&ei=-_9MVJy-EaXU7AaPnoGQBg&usg=AFQjCNG7UMrk34PdyxOrir541EJMXUbSrQ&sig2=aVGlcJuShzUhjBWSzsuFQ&bvm=bv.77880786,d.bGQ)>

[19] SpotChecker Ultrasonic Spot Weld Tester [weboldal] [2014.10.30]

< <http://www.gemcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/spotchecker.html> >

[20] Epoch™ 1000 Series User's Manual [PDF formátum] [2014.10.11]

<[ftp://ftp.olympusndt.com/public/Portable%20Flaw%20Detectors/Manuals/EPOCH%201000/910-269-EN_rev_A--EPOCH_1000_Series_\(EN\).pdf](ftp://ftp.olympusndt.com/public/Portable%20Flaw%20Detectors/Manuals/EPOCH%201000/910-269-EN_rev_A--EPOCH_1000_Series_(EN).pdf)>

[21] Basic Physics of Ultrasonographic Imaging, World Health Organization 1 edition (November 30, 2005), Chapter 8: Image characteristics in clinical ultrasound, Nimrod M. Tole , Ph.D.: 72-76

[22] Fókuszált transzcuder [weboldal] [2014.10.28]

<http://www.radiologia.hu/radiwiki/index.php/F%C3%B3kusz%C3%A1lt_transzducer>

[23] Ismeretek [weboldal] [2014.10.29]

<<http://www.olympus-ims.com/hu/knowledge/>>

[24] huninno verseny [weboldal] [2014.10.22]

<<http://www.huninno.hu/innovacios-projektek-nemzeti-versenye/verseny#folyamat>>

Melléklet

Epoch 1000i:

Az Epoch 1000i egy hordozható ultrahangos roncsolásmentes anyagvizsgáló készülék, amit főleg fémekben, csövekben és egyéb tárgyakban lévő folytonossági hibák detektálására használnak. Különböző hagyományos és fázisvezérelt ultrahangos vizsgálatokat képes elvégezni. Robosztus, ipari kivitelű készülék, amely a laborvizsgálatok mellett nyugodtan használható akár a legbarátságatlanabb terepi munkák közben is.

Főbb jellemzők [20]:

- EN12668-1 kompatibilis,
- 37 digitális jelnevő szűrő kiválasztási lehetőség,
- 6 kHz impulzus ismétlési sebesség a nagy sebességű szkenneléshez,
- kódolt vagy idő-alapú C-scan opció,
- automatikus fázisvezérelt fej felismerés,
- intuitív késleltetés és érzékenység kalibrálás,
- programozható analóg / riasztási kimenetek,
- IP66 szerinti védettség,
- digitális magas dinamikus tartományú vevőkészülék,
- full VGA felbontás napfényben is olvasható kijelzővel,
- referencia és mérés kurzorok,
- szabványos dinamikus DAC / TVG,
- szabványos fedélzeti DGS / AVG,
- számítógépes adatkezelés