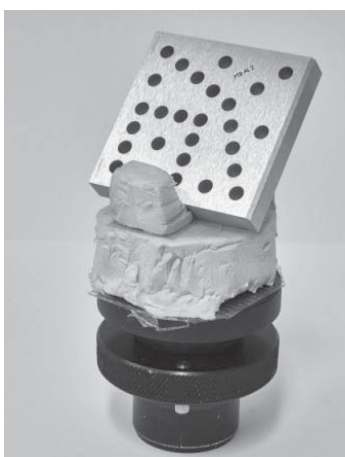
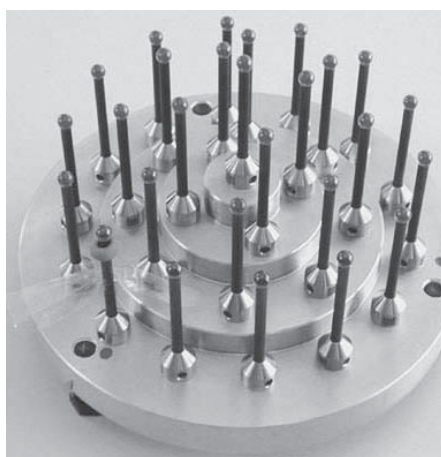


# GÉP

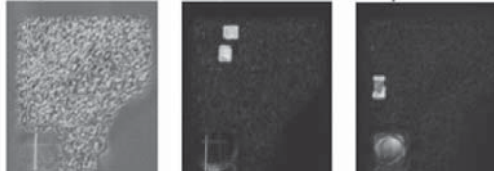
## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



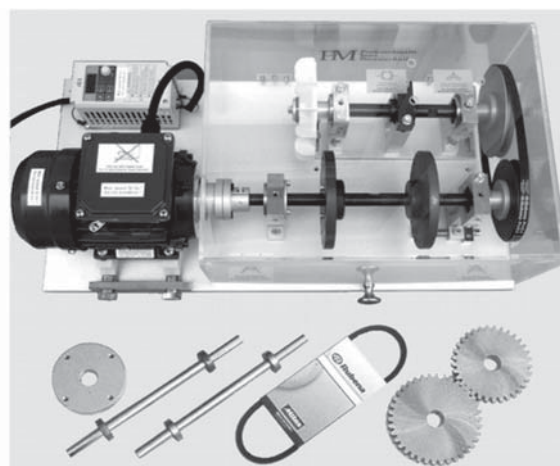
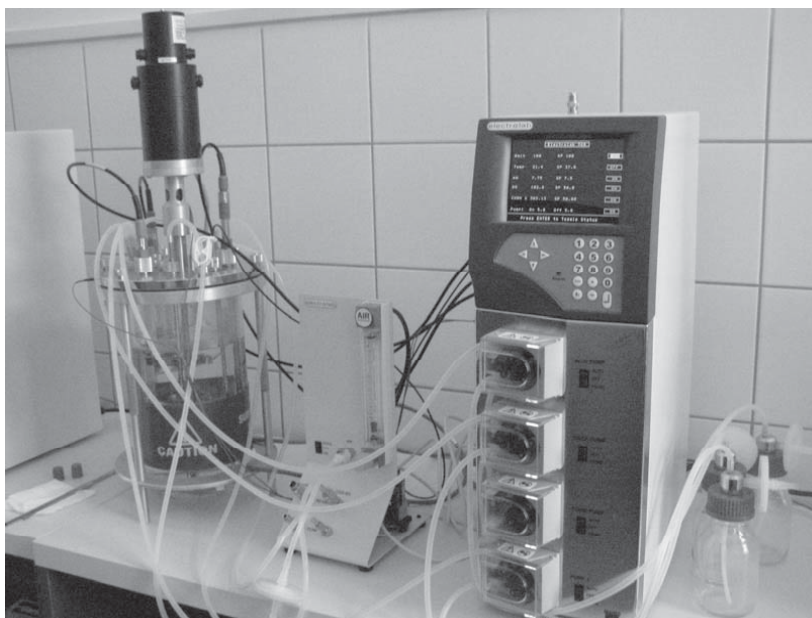
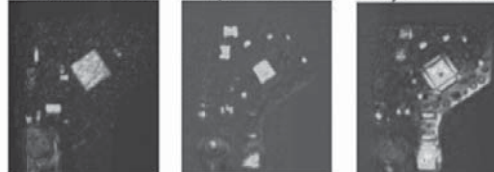
-0,96 mm    -1,56 mm    -1,92 mm



-2,76 mm    -3,00 mm    -3,48 mm



-4,56 mm    -5,16 mm    -5,28 mm



**III. GÉPÉSZETI SZAKMAKULTÚRA KONFERENCIA**  
**„A GÉPÉSZETI FEJLESZTÉS AZ ÖTLETTŐL A HASZNOSULÁSIG”**  
 BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM R ÉPÜLET I. EM. 113 – KONFERENCIA PROGRAM

**PLENÁRIS ÜLÉS**

9:30	Dr. Takács János	A megjelentek üdvözlése, a konferencia nyitó-índító gondolatai
9:40	Dr. Czigány Tibor	A konferencia üdvözlése
9:45	Dr. Haidegger Géza MTA SZTAKI	Az ipar digitalizálásának folyamata Európában
10:10	Tóth Norbert, Dr. Ladányi Richárd, Garamvölgyi Ernő – Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Kft.	Szimulációs modellek felhasználási lehetőségeinek demonstrálása Ipar 4.0 környezetben
10:35	Dr. Czifra György Óbudai Egyetem BGK	Az Ipar 4.0 és az egyetemi oktatás kölcsönhatása

**SZEKCIÓ ÜLÉSEK – 1A. SZEKCIÓ – GÉPÉSZETI FEJLESZTÉS AZ ÖTLETTŐL ...**

*Szekció elnök: Dr. Drégelyi-Kiss Ágota*

11:30	Dr. Habil. Nádasdi Ferenc, Zarándné Vámosi Kornélia – Dunaújvárosi Egyetem – Budapesti Gazdasági Egyetem	Pozicionálás - versenyképesség
11:55	Dr. Hegedűs József	TERMÉKKUTATÓ BÁZISOK létrehozásának lehetőségei a GÉPIPARI TERMÉKEK piacának fejlesztésére
12:20	Zalavári József DLA – Zalavári Stúdió Bt.	Design ideák stratégiái
12:45	Szabó Gyula – Óbudai Egyetem BGK	Az ergonómiai funkciók szerepe a digitalizált termelési folyamatokban, a digitalizált iparban
13:10	Lukács Béla – Marmin Consulting	A Reason tudáskezelés elmélete gyakorlata és módszerei

**SZEKCIÓ ÜLÉSEK – 2. SZEKCIÓ – GÉPÉSZETI FEJLESZTÉS ... A HASZNOSULÁSIG**

*Szekció elnök: Dr. Tóth Sándor*

11:30	Dr. Mikó Balázs – Óbudai Egyetem BGK	Tűrésezési folyamat kapcsolatai és hatásai
11:55	Bakosné Dr. Diószegi Mónika – Óbudai Egyetem BGK	Biogáz laboratórium gépészeti fejlesztései
12:20	Cvetityanin Livia., Szuchy Péter – Óbudai Egyetem BGK	Akusztikus metaanyagok és felhasználásaik a gépészmérnöki gyakorlatban
12:45	Rahne Eric PIM Kft	Oktatási célú gépészeti eszköz fejlesztése
13:10	Fekete Tamás MTA	Nagyméretű nyomástartó berendezések szerkezetintegritási számításairól

**SZEKCIÓ ÜLÉSEK – 1B. SZEKCIÓ – SZAKMAKULTÚRA A MÉRÉSTECHNIKÁBAN ÉS AZ ANYAGVIZSGÁLATBAN –**

*Szekció elnök: Dr. Döbröczeni Ádám*

14:20	Bolyki Zsolt BSc, Dr. Farkas Zsolt PhD	Pneumatikus munkahenger sebességnövelési lehetőségeinek vizsgálata
14:45	Agócs Mihály, Kocsó Endre, Molnár János, Páger Béla, Dr. Pór Gábor – Dunaújvárosi Egyetem	Pásztázó ultrahangos és örvényáramos vizsgálatok bevezetése a roncsolásmentes diagnosztikákba
15:10	Czifra Árpád – Óbudai Egyetem BGK	Mikrotopográfiai sajátosságok alkalmazása műszaki felületek kiértékelésére
15:50	Dr. Drégelyi-Kiss Ágota – Óbudai Egyetem BGK	Hosszmérések mérési bizonytalansága ipari CT esetén
16:15	Horváth Richárd – Óbudai Egyetem BGK	Szénszállal erősített műanyag fúrási vizsgálatai
16:40	Rahne Eric – PIM Kft.	Roncsolásmentes anyagvizsgálat aktív termográfiaival

**2. SZEKCIÓ – GÉPÉSZETI FEJLESZTÉS ... A MEGVALÓSULÁSIG – Szekció elnök: Dr. Váradi Károly**

14:20	Piros Attila, Solti Márton – BME hallgató	Belső tartószerkezetek optimalizálása a térbeli Voronoi-cellák segítségével
14:45	Egri Zoltán, Nagy Dávid – BME hallgató	Egyedi vápakosarak vizsgálata különböző nagyságú acetabulum csonthiány esetén
15:10	Dr. Borbás Lajos - Dr. Ficzer Péter	Az additív gyártástechnológiákkal előállítható orvosi implantátumok méretezési kérdései különös tekintettel az anyagjellemzőkre és a terhelésekre
15:50	Varga Laura, Dr. Takács János – BME	3D-s testmodellek felépítési lehetőségei a testre szabott implantátumok additív gyártáshoz
16:15	Fehér Márk, Dr. Takács János – BME	Testreszabott, additív gyártású fém protézisek anyagtulajdonságai és vizsgálatuk
16:40	Spisák Bernadett, Suhaj Anett – Miskolci Egyetem	Biológiailag lebomló polimerből tervezett kozmetikai termékek fröccsöntés szimulációja
17:10	<b>A konferencia zárása. A szekcióelnökök rövid beszámolója, a konferencia értékelése (Dr. Hegedűs József)</b>	

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

#### elnök

Vesza József

#### főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

#### főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Dr. Zobory István

### TISZTELT OLVASÓ!

Idén február elsején tartotta a *GTE Konstruktív Szakosztálya* a III. Gépészeti Szakmakultúra Konferenciát „*a gépészeti fejlesztés az ötlettől a hasznosulásig*” alcímmel.

2015-ben tartottuk az I., 2017-ben a II. és idén a III. konferenciánkat. Nagy energiát fektettünk abba, hogy a meghívók, tájékoztatók az előzőeknél szélesebb körbe jussanak el. Megkerestük az összes műszaki karral rendelkező magyarországi felsőoktatási intézményt. Így sokkal több területről sikerült előadókat és hallgatókat szervezni, mint előző két konferenciánkon. 3 plenáris és 22 szekció előadás hangzott el. Az 55 regisztrált résztvevő több volt a tavalyinál. 5 kiállító is támogatta részvételével a konferencia színvonalát. Az elhangzott előadások közül 13-an kérték cikk formájában a megjelenést.

A gépészeti szakmakultúra magában foglalja mindazokat a módszereket, eljárásokat, technikákat, amelyeket a gépészeti innovációs folyamat résztvevői alkalmaznak.

*Ennek megfelelően a Gépészeti Szakmakultúra Konferencia tárgykörébe tartoznak mindazon hagyományok, módszerek, tapasztalatok, eljárások, amelyeket a gépészeti termékek életciklusában a piackutatás, a kutatás+fejlesztés+innováció, a tervezés, a gyártás és az üzemeltetés, karbantartás résztvevői alkalmaznak.*

A plenáris ülésen elhangzó előadások az új ipari forradalom, az Ipar 4.0 témáját érintették.

A szekció előadásokat 3 szekcióba soroltuk:

- „*Szakmakultúra a mérés technikában és az anyagvizsgálatban*” volt konferenciánk kiemelt témája. Ehhez sikerült néhány kiállítót is megnyerni.
- „*Gépészeti fejlesztés az ötlettől ...*” A termékek születése. Az értékteremtés. A termékpiac.
- „*Gépészeti fejlesztés ... a hasznosulásig*”. Ebben a szekcióban számos gépészeti fejlesztésről számolunk be. Helyet kapott néhány magas színvonalú, tudományosan is sok újdonságot tartalmazó TDK dolgozat bemutatása is. Több előadás foglalkozott biomechanikai témákkal.

Konferenciánk sikerére alapozva tervezzük, hogy 2019-ben a IV. Gépészeti Szakmakultúra Konferenciát is megszervezzük.

*Weszely István*  
*a Konferencia szervező titkára*

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: 06-46/379-530, 06-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 06-1/202-0656, fax: 06-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, [www.posta.hu](http://www.posta.hu) WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailen a [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu) címen, telefonon 06-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldre és külföldön előfizethető a Magyar Posta Zrt.-nél: [www.posta.hu](http://www.posta.hu) WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), 1900 Budapest, 06-1-767-8262, [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu)

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**A megjelent cikkek lektoráltak.**

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

# TARTALOM

1. Agócs Mihály, Kocsó Endre, Molnár János, Páger Béla, Dr. Pór Gábor: PÁSZTÁZÓ ULTRAHANGOS ÉS ÖRVÉNYÁRAMOS VIZSGÁLATOK BEVEZETÉSE A RONCSOLÁSMENTES DIAGNOSZTIKÁKBA ..... 5	8. Dr. Haidegger Géza, Beregi Richárd: AZ IPAR DIGITALIZÁLÁSÁNAK FOLYAMATA EURÓPÁBAN ..... 46
2. Bakosné Diószegi Mónika: BIOGÁZ LABORATÓRIUM GÉPÉSZETI FEJLESZTÉSEI ..... 12	9. Horváth Richárd: SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT MŰANYAG (CFRP) FÚRÁSI VIZSGÁLATAI ..... 55
3. Bolyki Zsolt, Dr. Farkas Zsolt: FELTÖLTÉSI ÉS LESZELLŐZÉSI IDŐK CSÖKKENTÉSE PNEUMATIKUS MUNKAHENGEREKNÉL ..... 17	10. Piros Attila, Dr. Solti Márton: BELSŐ TARTÓSZERKEZETEK OPTIMALIZÁLÁSA TÉRBELI VORONÓJ-CELLÁK SEGÍTSÉGÉVEL ..... 61
4. Czifra Árpád: MIKROTOPOGRÁFIAI SAJÁTOSságOK ALKALMAZÁSA MŰSZAKI FELÜLETEK KIÉRTÉKELÉSÉRE ..... 21	11. Eric Rahne: OKTATÁSI CÉLÚ GÉPÉSZETI ESZKÖZ FEJLESZTÉSE ..... 67
5. Dr. Czifra György: AZ IPAR 4.0 ÉS AZ EGYETEMI OKTATÁS KÖLCSÖNHATÁSA ..... 25	12. Eric Rahne: RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLAT AKTÍV TERMOGRÁFIÁVAL ..... 72
6. Drégelyi-Kiss Ágota: IPARI CT HOSSZMÉRÉSI FOLYAMATÁNAK ELEMZÉSE ..... 30	13. Dr. Szabó Gyula: AZ ERGONÓMIAI FUNKCIÓK SZEREPE A DIGITALIZÁLT TERMELÉSI FOLYAMATOKBAN, A DIGITALIZÁLT IPARBAN ..... 78
7. Fekete Tamás: NAGYMÉRETŰ NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK SZERKEZETINTEGRITÁSI SZÁMÍTÁSÁIRÓL ..... 36	

# PÁSZTÁZÓ ULTRAHANGOS ÉS ÖRVÉNYÁRAMOS VIZSGÁLATOK BEVEZETÉSE A RONCSOLÁSMENTES DIAGNOSZTIKÁKBA

## INTRODUCTION OF SCANNING ULTRASONIC AND EDDY CURRENT TEST IN NONDESTRUCTIVE DIAGNOSTICS

*Agócs Mihály, Kocsó Endre, Molnár János, Páger Béla, Dr. Pór Gábor  
Dunaújvárosi Egyetem, MAID Laboratórium*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A hagyományos roncsolásmentes vizsgálatokat kézzel végezték, a vizsgáló fejeket kézzel mozgatták. Ez jelentős szubjektív elemet és pontatlanságot vitt be a vizsgálatokba. Az eredmények kiértékelése is a nyers válaszjelek alapján történt, csak a szakértő láthatta át, hogy milyen visszhangok alapján. A mechatronika óriási fejlődése nyomán ma már számítógép vezérelt letapogatást tudunk végezni és vezérelni, a visszhangokat egységes tömbökbe rendezve, akár 2D akár 3D ábrákat tudunk előállítani. A mozgás precízitása (jobb, mint 100 mikron) lehetővé tette, hogy akár ilyen felbontással is észleljünk hibákat. A 2D és 3D megjelenítés már a „közel” valóságos mélységeket és hibákat jeleníti meg színes forgatható képeken.

### ABSTRACT

Traditional non-destructive tests were performed manually. This was significantly subjective and inaccurate. The results were also evaluated based on the basis of on the echo signals, in reality only the expert could see what was the origin of echoes. As a result of the enormous evolution of mechatronics, we can now run computer controlled scans, sorting echo pictures into unified array, and either 2D or 3D models can be produced from that. The precision of movement (better than 100 microns) made it possible to detect errors with similar precision. The 2D and 3D displaying present today "almost" real depths and errors in color rotating images.

### 1. BEVEZETÉS

A mai digitális adatfeldolgozás és mechatronika fejlődésének és terjedésének köszönhetően lehetőség nyílt automatizált roncsolásmentes vizsgálatok elvégzésére képes rendszerek kialakítására, akár ipari igényeket is kiszolgálva. Talán meglepő, de már 1974-ben

kialakították a mai modern automatizált pásztázó akusztikus mikroszkópok őst [1].

A Magyar Akusztikai és Ipari Diagnosztikai laboratóriumban (MAIDLab) a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027:

„Nagy Teljesítő Képességű Anyagok Kutatása” projekt keretében kialakítottunk egy automatizált vizsgálatra képes pásztázó akusztikus mikroszkóp rendszert [2], melyet elsősorban egy autóiipari érdeklődés váltott ki. A feladatunk az volt, hogy fröccsöntött műgyantába öntött tokozott elektronikákban lévő apró légbuborékokat, porozításokat detektáljuk és lokalizáljunk, melyek a gyártás során alakultak ki. Miután sikerrel véghezvittük a feladatot újabb ipari érdeklődésre tovább folytattuk a kutatást és a fejlesztést jelentős eredményeket elérve a ponthegesztések és egyéb hegesztések kötéseinek vizsgálatában. Mindezek után egy másik megkeresés hatására a rendszerünket átalakítva sikereket értünk el belső kulcsnyílású csavarok roncsolásmentes automatizált vizsgálatában, ahol is az akár 1 mm-es méretű csavarfej alatti bemetszéseket is ki tudtuk mutatni, melyek a felületről kiinduló repedéseket modellezték.

Napjainkban az EFOP-3.6.1-16-2016-00003: „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” projekt keretében bővítjük ki rendszerünk alkalmazhatósági körét az örvényáramos elven működő vizsgálatokra. Jelenleg sikerrel végzünk vizsgálatokat ezen elven alapuló vizsgálatokkal szabványos etalonokon. Nem eltolt célunk további ipari igények kielégítésére alkalmas rendszert kialakítani, mint ahogy azt már korábban is tettük ultrahangos „területen”. Eddig elért eredményeink bemutatása során látni fogjuk, hogyan sikerült megvalósítanunk egy az adott célokhoz „illeszhető” mérőrendszert, mely számos előnnyel rendelkezik.

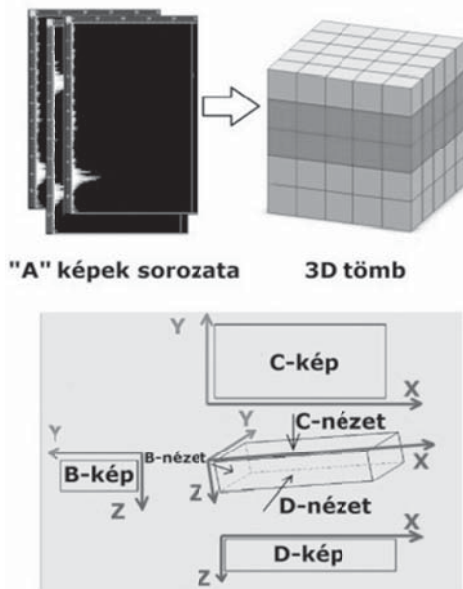
## 2. RENDSZERÜNK MŰKÖDÉSE

Az Isel gyártmányú step controller mozgató rendszerrel [3] akár 100 mikronos pontossággal is tudjuk mozgatni az egykristályos fókuszált 30 MHz-es [4] bemenítéses ultrahangos vizsgáló fejet (1. ábra). Azért használunk fókuszált vizsgálófejet, mert azzal meglehetősen jobb axiális és laterális ultrahangos felbontás érhető el a hagyományossal (nem fókuszált) szemben. A medencében lévő víz az elengedhetetlen csatoló anyag funkcióját látja el, mely az ultrahang megfelelő terjedését biztosítja.



1. ábra. Automatizált vizsgálatra képes pásztaó akusztikus mikroszkóp

A vizsgálat szakaszos mintavételezésű, tehát a fej előre definiált lépésközönként történő megállásánál a szokásos ultrahangos A-képből származó információkat (ultrahang intenzitás értéke, helye) a LABVIEW-val [5] készült program feldolgozza. Az A-képek feldolgozása során mintha „elforgatnánk” azokat és az adatokat a valós raszteres mozgatásnak megfelelően egy 3 dimenziós tömbbe rendezzük (2. ábra).



2. ábra. A-képek „elforgatásával” és 3 dimenziós tömbbe rendezéséből előállítható nézetek értelmezése

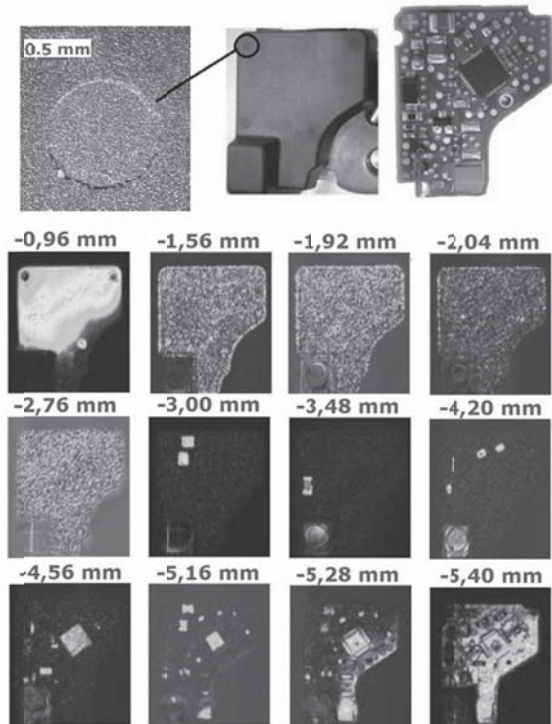
Ezt követően a 3D tömbből már lehetőség van kiolvasni az adatokat oly módon, hogy különböző 2D-s nézetek továbbá egy realiztikus 3D modell jöjjön létre.

Az alkalmazásban számos előre definiált színpaletta van, melynek segítségével a különböző intenzitású jelek mértékétől függően különböző színekben jelennek meg a mérési pontok ezzel is könnyítve az értelmezést, de természetesen a felhasználó használhat egyedi színskálát is. A különböző 2 dimenziós nézetek létrehozásakor lehetősége van a felhasználónak egy általa definiált számra felosztani az eredetileg adott nagyságú tömböt és azokat akár különböző rétegszámtól is meg tudja jelentetni tomográfias rétegeket létrehozva ezzel.

Az eredmények értelmezésénél nagy segítséget nyújthat a felhasználónak a létrehozott 3D-s modell, mely egy forgatható, nagyítható térben helyezkedik el illetve maga a modell zömíthető és nyújtható, akár szabadon definiálható áttetszetőségi értékkel is megjeleníthető. Ezzel a lehetőséggel adott esetben sokkal könnyebb „megtalálni” a vizsgált tárgy belsejében lévő folytonossági hiányokat.

## 3. SIKERES ALKALMAZÁSAINK

### 3.1. Tokozott elektronika vizsgálata



3. ábra. Tokozott elektronika valós képei (első sor) és a különböző mélységekből származó tomográfias C-képei

Mivel a vizsgálat során a felület nem volt teljesen merőleges az ultrahangos vizsgáló fejre, így a vízszintes „felszeletelés” sajátossága miatt egy-egy réteg több képen is látható.

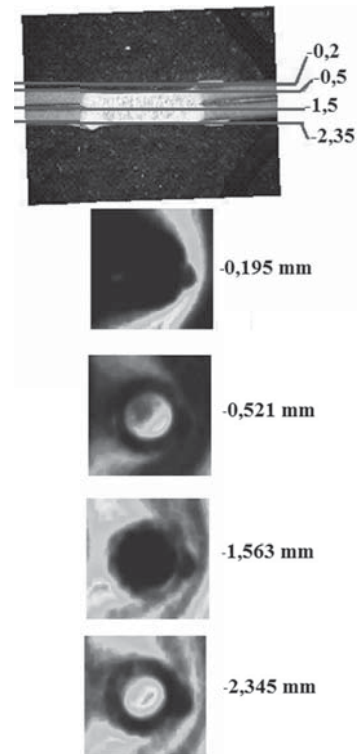
Az első sorban a középső fotó a vizsgált tárgyat mutatja, amelyből balra kinagyítottuk a sarokban lévő benyomódást, ami az alatta lévő első sorban lévő ultrahangos szeletelésen jól látható, jobbra egy kibontott tokban lévő elektronika fotója látható (3. ábra).

A műgyanta felületén lévő 0,1 mm-es benyomódás (első sor első ábra) ultrahangos eredményét mutatja a második sor legelső ábrája. A felület alatt (-1,56 mm) számos apró pöttyöt láthatunk, melyek a légzárványok, porozítások reflexiói. A következő mélységi rétegekben a nyáklapra épített többi elektronikai elemen kívül látható a nagy fekete IC felülete is (-4,56 mm). A következő rétegben az IC alatt lévő chip is kitűnik, melynek magassága 100 mikron körül van.

### 3.2. Egy „megfelelő”, azaz hibátlan ponthegeesztett kötés vizsgálati eredményei

A ponthegeesztés mára már széles körben elterjedt hegesztési technika az autóiparban. A rendszerünkkel való vizsgálat lehetővé teszi a hegesztett kötésekben lévő zárványok illetve egyéb reflexiós felületek kimutatását. Az ultrahang egyik sajátossága miatt, a megvizsgálhatóság feltétele, hogy nem lehet túlságosan egyenetlen a heglencse felülete, mivel azon az ultrahang egy része szóródik.

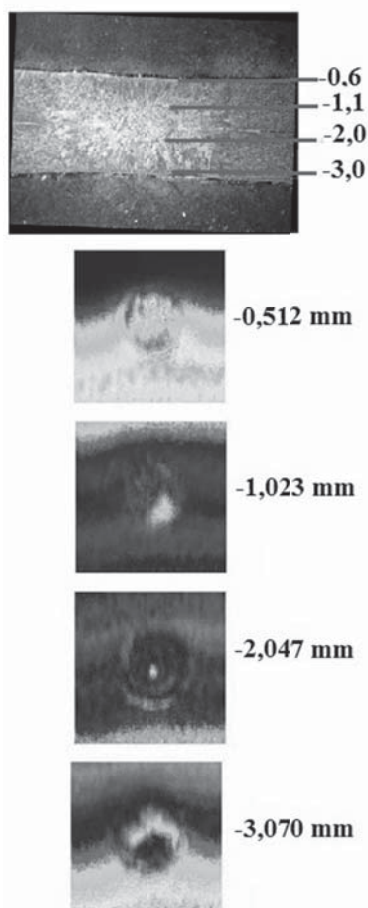
A ponthegeesztett kötés valós keresztmetszetén ábrázoltuk a különböző mélységeket a könnyebb átláthatóság miatt (4. ábra). A már említett ok miatt egy-egy réteg több képen is látható. A felső lemez homlokfalának szintje (-0,195 mm) alatt a heglencse homlokfalának reflexiója (-0,521 mm) látszik teljes geometriai hűséggel. Az ömledék összeolvadásának a szintjében (-1,563 mm) nem látható semmilyen ultrahangos visszaverődés, mivel megfelelő volt az összeolvadás. Az utolsó mélységi szinten a heglencse hátfalának visszaverődéséből származó indikációk jelennek meg.



4. ábra. „Megfelelő” ponthegeesztett kötés keresztmetszete és a különböző mélységekből származó tomográfias C-képei

### 3.3. Egy „nem megfelelő”, azaz hibás ponthegeesztett kötés vizsgálata

A „nem megfelelő” ponthegeesztés (5. ábra) ultrahangos eredményeinek értelmezése teljesen megegyezik a már tárgyalt megfelelő ponthegeesztett kötés eredményeinél elmondottakkal. A meg-nemfelelés” úgy jelentkezik, hogy mivel az összeolvadás nem volt elégséges a heglencsében, ezért a létrejött zárványnak a felső (-1,023 mm) és az alsó (-2,047 mm) részéről is kaptunk reflexiót az olvadási zónában.

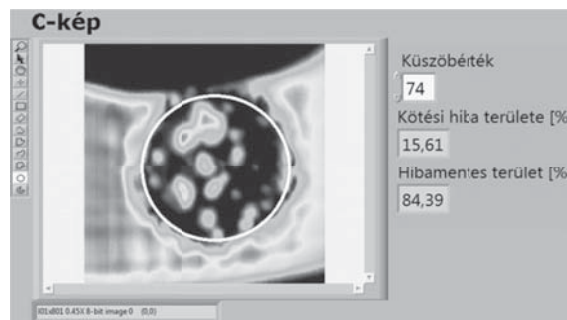


5. ábra. Megfelelő ponthegeesztett kötés keresztmetszete és a különböző mélységekből származó tomográfias C-képei

### 3.4. Kondenzátor kisütéses csaphegeesztett kötés vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál az volt a feladatunk, hogy a hegesztési rétegben létrejött zárványokat detektálva az alkalmazás határozza meg a hegesztett összterületből mekkora hányadot tesz ki a kötési hiba és a hibamentes terület. A zárványok által keltett reflexiók geometriája a hegesztési rétegből származó C-képen egyértelműen azonosítható (6. ábra).

Az alkalmazás a vizsgálatot követően automatizáltan végzi el a kiértékelést, amely során az ábrán látható fehér kört automatikusan elhelyezi a megvizsgált és azonosított hegesztési kör középpontjára. Majd a fehér körön belül lévő ultrahangos intenzitás értékeket analizálva javasol egy küszöbértéket (kontúr alapú felismerés segítségével), vagy a felhasználó definiálhatja az értéket, végül pedig a program meghatározza a kötési hiba és a hibamentes terület mértékét százalékos formában.



6. ábra. Hegesztési rétegből származó C-kép és a zárványok összterületének meghatározása

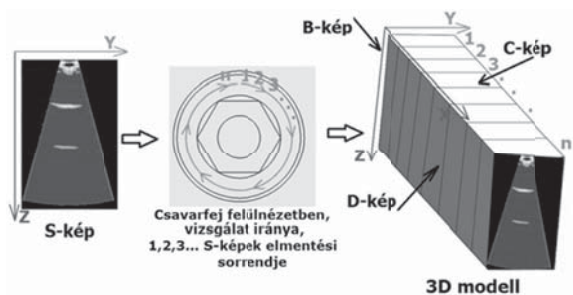
### 4. BELSŐ KULCSNYÍLÁSÚ CSAVAROK VIZSGÁLATA

Egy másik feladatban M12-es belső kulcsnyílású (továbbiakban BKNY) csavarokat kellett automatizáltan eredeti működési környezetükben megvizsgálni, ahol víz van. A csavarokban a jellemző tönkremenetelt a csavarfej alatti repedések jelentették. A hitelt érdemlő eredmények érdekében szikraforgácsolással létrehozott bemetszéssel modelleztük a repedéseket, „etalonnak” számító mintadarabokat létrehozva. A bemetszések 1 mm-es, 3,5 mm-es illetve 5,5 mm-es legnagyobb sugárirányú mélységgel készültek.

Ebben az esetben az Olympus Epoch 1000i kijelzőjén megjelenő S-képeket (szektoriális-kép) használtuk fel, mely a vizsgálati darab egy kétdimenziós metszeti képe. A vízszintes tengely jelenti a vizsgált tárgy szélességének egy részét, a függőleges tengely pedig a mélységének egy részét. Az S-kép előállításához fázisvezérelt ultrahangos fej szükséges, mely több különálló kristályt tartalmaz csoportokba rendezve, így az Epoch 1000i képes az egyes csoportokat különböző időben pulzáltatni, ezzel formálva a hanghullám alakját. Éppen ezért a rendszer összeállítása annyiban különbözik az eddigitől, hogy a csavarok vizsgálatához egy 10L32-A10 típusú fázisvezérelt ultrahangos vizsgálófej használtunk egy SA10-0L jelzésű előtéttel. Valamint egy általunk összeállított vizsgálófej rögzítését és mozgását kivitelező egyszerű mozgató berendezést használtunk, mely lehetővé teszi, hogy az előtét a vizsgálat során meghatározott távolságra legyen a csavarfej homlokfalától. A vizsgálat szintén szakaszos mintavételezésű.

Az eredeti S-képekből származó adatokat a letapogatott vonal (csavarfej körgyűrűjének középvonalához tartozó kör) mentén rendezzük a 3 dimenziós tömbbe, figyelve a megfelelő sorrendre (7. ábra).



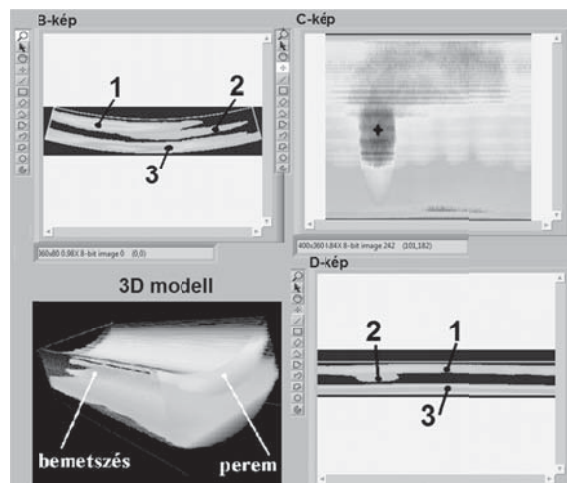


7. ábra. S-képek feldolgozásának értelmezése

Jelenleg csak a legkisebb bemetszéssel (1 mm) készült eredményeket mutatjuk be, mivel ezek a legrelevánsabbak, de természetesen a nagyobb bemetszéseket is tudjuk detektálni és lokalizálni. A megfelelő beállítások alkalmazása mellett egyértelműen meg tudjuk különböztetni a csavarfej bemetszés nélküli alsó peremének és az alsó perem alatti bemetszés reflexióját.

Az alkalmazással lehetőség van szabadon definiálni egy vizsgálati tartományt az eredeti S-képből, ezzel adott esetben az eredmények interpretációja is könnyebbé válhat a felhasználónak. A vizsgálati tartományunknak a csavarfej alsó peremének reflexiója (8. ábra „1” jel) és a csavarfej homlokfalának második (8. ábra „3” jel) ultrahangos „lecsengése” közötti tartományt választottuk, mivel ebben a tartományban figyelhető meg legjobban a bemetszés reflexiója (8. ábra „2” jel). A C-kép egy interaktív terület, így a felhasználó bárhova kattintva megkapja az adott szálkereszthez tartozó hossz (D-kép) illetve keresztmetszeti (B-kép) képet. Az elkészült 3D modellen is jól megfigyelhetők a bemetszésből eredő indikációk.

A felhasználónak lehetősége van az eredmények automatizált kiértékelésére, mely jelentős időmegtakarítást jelent. Lényege, hogy az automatizált vizsgálat elindítása előtt ki kell választani a B-képek közül maximum öt darabot, melyen csakis a csavarfej alsó peremének és a csavarfej homlokfalának ultrahangos „lecsengéséből” származó visszhang látható. A kiválasztott B-képeken a program meghatározza hány darab ultrahang intenzitás érték található, majd azokból képez egy számtani átlagot. Az értékelés során megvizsgál minden B-képet, és egy állítható küszöbérték alapján kiválasztja azokat a képeket, melyek meghaladják a küszöbértéket.



8. ábra. 1mm-es bemetszésű csavar teljes keresztmetszetű C-képén kijelölt szálkereszthez tartozó B-, D-képe illetve a 3D modell

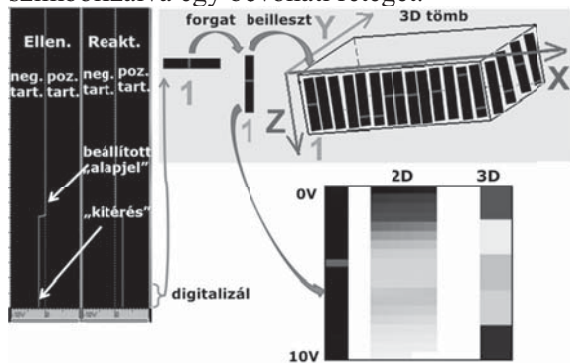
## 5. ÖRVÉNYÁRAMOS VIZSGÁLATOK

Az örvényáramos vizsgálatok során a vizsgálati tárgyban haladó áram impedanciájának az ohmos ellenállását és induktív ellenállását azaz reaktancia változását mérjük.

Amikor a vizsgáló szondát egy paramágneses (pl. alumínium) anyagra tesszük, a benne lévő tekercs ellenállás mértéke megnő illetve induktív ellenállása csökken. Ha egy felszíni vagy felszín közeli repedés felett halad el a szonda, a kevesebb örvényáram képződés miatt, lecsökken a szonda tekercsének ellenállása, míg induktív ellenállása növekszik. Ferromágneses anyag esetében szintén növekszik a tekercs ellenállása, de ebben az esetben növekszik a tekercs induktív ellenállása is, mert pl. az acél mágneses permeabilitása koncentrálna a tekercs mágneses terét. A repedés esetén hasonló jelenség történik, mint a paramágneses anyagoknál.

Az első rendszer összeállításához képest, ebben az esetben egy Omniscan MX örvényáramos hibakeresőt és egy hagyományos 1MHz-es 45<sup>0</sup>-os felületi ceruza szondát használtunk fel. Az adatfeldolgozás során az Omniscan MX kijelzőjén található ellenállás és a reaktancia pozitív és negatív tartományaiban lévő értékeket dolgozzuk fel a szonda minden egyes megállásánál. A mintavételezéskor a két szalagdiagramnak az első intenzitás értékeit digitalizáljuk az eredeti skálaosztásnak (0-10V) megfelelően, majd azokat virtuálisan „elforgatjuk” és elhelyezzük a 3D-s tömbbe a letapogatás sorrendjének megfelelően.

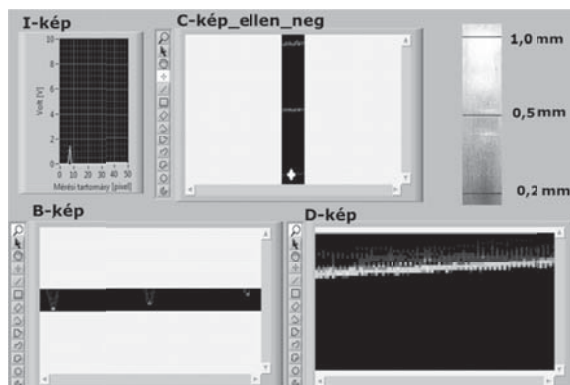
Ezzel létrehoztuk a Z irányt, amely a „mélységet” szemlélteti (9. ábra). Az eddigi hossz (D-kép) illetve keresztmetszeti (B-kép) képen kívül az alkalmazás létrehoz egy I-képet is, melyet az intenzitás szóból származtattunk, ez tulajdonképpen az adott vizsgált térbeli pozícióhoz tartozó intenzitás értéket szemlélteti az eredeti skálaosztásnak (0-10 V) megfelelően. Az elmúlt időszakban több szabványos örvényáramos etalont is vizsgáltunk, melynek eredményeiből most kettőt mutatunk be. Mindkét esetben a megvizsgált felületet egyszeres rétegben fekete PVC szigetelőszalaggal fedtünk le, ezzel szimbolizálva egy bevonati réteget.



9. ábra. Kép - és adatfeldolgozás

### 5.1. NDT SRS-0824A típusú etalon vizsgálata

Az alumínium etalon három darab felületi hornyot tartalmaz, melynek mindegyike 0,16 mm széles valamint 0,2; 0,5 illetve 1,0 mm mély. Az ellenállás negatív tartományához tartozó C-képen illetve az azon kijelölt szálkereszthez tartozó D- illetve B- képen jól megfigyelhető az 1 mm-es és a 0,2 mm-es bemetszés közötti különbség (10. ábra). Az I-képen látszik, hogy a 0,2 mm-es bemetszéshez megközelítőleg 2 V érték tartozik.

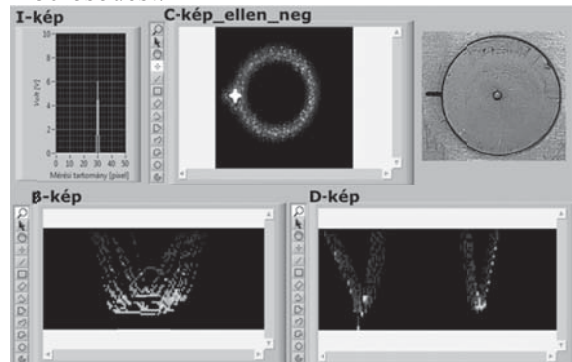


10. ábra. Ellenállás negatív C-képe és a fehér szálkereszthez tartozó B-,D-I-kép eredménye

### 5.2. Olympus SPO-3932 típusú etalon vizsgálata

Az etalon 2 darab alumínium lemezből készült, ahol is az egyik 9 darab alumínium szegeccsel van rögzítve a másikhöz. A szegecsfejek átmérője 7 mm. A mérés során egy szegecskötést vizsgáltunk, amelyhez közvetlenül tartozik egy 0,8 mm hosszú; 0,2 mm széles és 0,2 mm mély mesterséges felületi bemetszés is. A szegecsfej közepén található egy apró kitüremkedés, amely 0,3 mm átmérőjű és 0,05 mm magas.

A C-képen fel lehet ismerni még a felületi bemetszést is, a B-képen és a D-képen most egyszerre több réteg átlagát láthatjuk (11. ábra). A D-képen látszik, hogy a bemetszésből adódó indikációk miatti metszeti rész szélesebb tartományt alkot. A 3D modellben szintén könnyű felismerni a bemetszés felőli kiöblösödést.



11. ábra Ellenállás negatív C-képe és a fehér szálkereszthez tartozó B-,D-I-kép eredménye

## 6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS KILÁTÁSOK

A több éves kutatás és fejlesztés során megvalósítottunk egy viszonylag olcsó és célirányos fókuszált ultrahangos vizsgálófejjel működő Pásztázó Akusztikus Mikroszkópot. A rendszerrel az akár 0,1 mm-es X, Y irányú lépésközönként megvalósuló szakaszos mintavételezésű mozgatás során az A-képeket feldolgozzuk a fej minden egyes megállásánál. A begyűjtött adatokat rendezzük a letapogatás sorrendjének megfelelően egy 3D-s tömbbe, melyből megfelelő eljárásokkal különböző 2 dimenziós ultrahangos A-, B-, C-, D-képet és egy valóság-hű 3D modellt hozunk létre. Ezenkívül lehetőség van szabadon választható mélységből származó tomográfiai rétegeket is megjeleníteni a 2 dimenziós nézetek létrehozásakor.

Ezzel a megoldással számos ipari feladatot meg tudunk oldani. Többek között tokozott elektronikákban lévő apró légzárványok detektálását, ponthegeesztett kötésekben lévő összeolvadások megfelelőségének ellenőrzését, kondenzátor kisütéses csaphegesztésekben a hegesztési rétegben lévő zárványok kimutatását. Fázisvezérelt ultrahangos vizsgálófejet felhasználva belső kulcsnyílású csavarok fejében lévő repedéseket modellező akár 1 mm-es bemetszést is sikerrel ki tudunk mutatni.

Napjainkban örvényáramos vizsgálatokra terjesztettük ki eddigi módszerünket, meglehetősen jó eredményekkel.

Mint ahogy az a bemutatott eredményekből is látható, elmondható, hogy a rendszer nagyon jól adaptálható adott feladatok megoldására akár automatizált kiértékelési módszerrel együtt. Hiszen egy tömeggyártásban előállított termék esetében a gyakran előforduló hibáknál könnyen megoldható az adatok szűrésének automatizálási művelete. További előnye még, hogy részegységei piaci forgalomban is megvásárolhatóak. Integrált rendszert tekintve az összeállított eszközöket a fejlesztett alkalmazás teszi igazán teljessé.

Az általunk fejlesztett rendszer szubjektivitás nélkül, reprodukálhatóan, automatizálva képes megvizsgálni egy berendezés gépegységét roncsolás nélkül sőt akár érintésmentesen. A rendszerrel megoldható egy bevonati réteg alatt

megbújó folytonossági hiány jelenlétének detektálása, lokalizálása sőt még az esetleges terjedésének a folyamatos monitorozása is.

Jelenleg a folyamatos mintavételezés kivitelezésén dolgozunk illetve újabb szűrési módszerekkel szeretnénk felhasználóbaráttá tenni az alkalmazást. Új területet jelent a műanyagok ultrahangos vizsgálata. Továbbra is meghatározó céljaink közé tartozik lehetőségeinkhez mérten az ipari elvárásoknak való maximális megfelelés, de immáron ultrahangos és örvényáramos területen is egyaránt.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Lemons R. A., Quate C. F. (1974). "Acoustic microscope—scanning version". Appl. Phys. Lett. 24: 163–165
- [2] Dr. Pór G.: 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prága, 2014.10.6-10  
<[http://www.ndt.net/events/ECNDDT2014/app/content/Paper/308\\_Por\\_Rev2.pdf](http://www.ndt.net/events/ECNDDT2014/app/content/Paper/308_Por_Rev2.pdf)>
- [3] <<http://www.isel.hu/index.php/klub-7/piac/1882/mechanika/golyosorsos-linearis-egyseg/les-4-golyosorsos-linearis-egyseg.html>>
- [4] <<http://www.produkte24.com/cy/olympus-ndt-1219/ultraschallkoepfe-3312/v376-su.html>>
- [5] LABVIEW: <<http://www.ni.com/labview/>>

# BIOGÁZ LABORATÓRIUM GÉPÉSZETI FEJLESZTÉSEI

## MECHANICAL DEVELOPMENTS OF THE BIOGAS LABORATORY

*Bakosné Diószegi Mónika, Egyetemi adjunktus*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Az Óbudai Egyetem biogáz laboratóriumában számtalan lehetőség adódik a fermentációs kutatásban használt berendezések fejlesztésére. A laboratórium gépészeti egységei között található egyszerűbb és professzionális kivitelű fermentor is. A berendezés értékétől függetlenül a kísérletek során felmerülnek olyan funkcionális hiányosságok és egyéb elvárások is, melyeket saját gépészeti újításainkkal oldunk meg.

**ABSTRACT.** At the biogas laboratory of the University of Óbuda, there are numberless possibilities to develop the mechanical equipment of the fermentation reactor research. There are some simple and more complex professional mechanical fermentation equipments. Independently of the value of the equipment, functional issues which arise during experiments, we are able to solve them with our own mechanical innovations.

### 1. BEVEZETÉS

A biogáz laboratóriumban fellelhető berendezések három nagy csoportra oszthatók: a biogáz előállító berendezések, a biomassza előkezelő berendezések, és az analitikai mérőegységek.

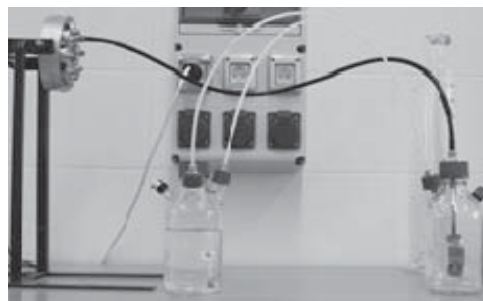
A biogáz előállító berendezések különböző szubsztrátumok (szerves alapanyagok) anaerob lebontására, a biogáz előállítására alkalmasak. A laboratóriumban levő fermentorok között van olyan, ami kereskedelmi forgalomban kapható, illetve azok tovább fejlesztett változata, de használatban van teljes mértékben saját tervezésű reaktor-blokk is. A gépészeti megoldások, újítások, fejlesztések az egyes reaktorokon jelenleg is folynak.

Az alapanyag előkezelő berendezések célja, a szubsztrátum feltárása, fajlagos felületének megnövelése a nagyobb és jobb minőségű gázhozam termelése érdekében. Műszaki paramétereik optimális beállítása nagy fontosságú az ipar számára.

### 2. A VÍZFÜRDŐS REAKTOR-BLOKK

A laboratórium közkezdvelt reaktorai a 400 ml-es kupakkal és szeptummal lezárt laborüvegek.

A rendszer előnye az alacsony beszerzési költség, a kis helyigény és egyszerűség. Zárt inkubátorban elhelyezve akár 12 párhuzamos mérés is indítható az üvegekből összeállított egységgel. Hátránya, hogy mechanikus keverése – ellentétben az ipari üzemből fellelhető fermentorokkal- a zárt inkubációs tér miatt nem megoldott. Kialakítottunk emiatt egy termosztáttal temperáló vízfürdős környezetet, ahol a reaktorokban a keverést már sikerült kivitelezni.

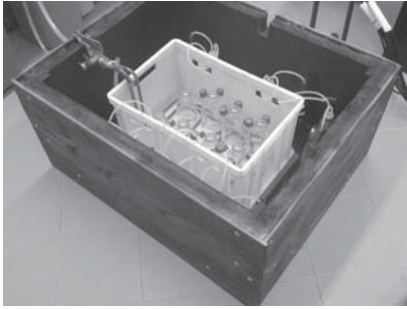


*1. ábra A motor állványa, a hajtásegység, a bowdenszál és a reaktor a keverőszárral*

Egy villanymotor a tervezett fogaskerék áttételen keresztül 8 db bowden szál meghajtására alkalmas. Ezek a szálak csatlakoznak a reaktortestbe vezetett keverőszár felső keverődugó részéhez, mely kialakításánál az üvegben levő anaerob környezet biztosítása miatt kritérium volt a légzárás is. (1. ábra)

A reaktortér homogenizálására a keverőszár végére - egy másik fejlesztési lépésként - keverőlapát kialakítást optimalizáltunk, ami vezérlése időzítő segítségével automatizált. A vízfürdős egységet a szigetelés céljából egy duplafalu ládában helyeztük el. (2. ábra)

A reaktor-blokkon végzett több éves gépészeti és egyéb átalakítások kedvezően alakultak a fermentációs kísérletek során, melyeket a VDI 4630 *Szerves anyagok fermentálása* irányelv alapján végeztünk el. [1]

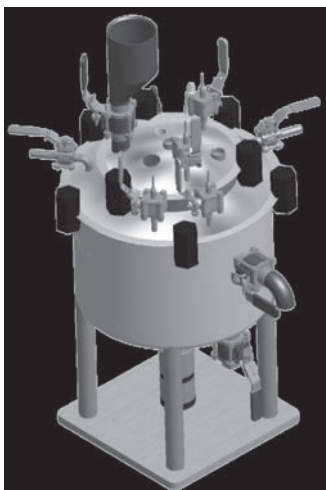


2. ábra A rendszer elhelyezése a duplafalu l ad aban

A sz oras ert ek az el irt hat ar ert eken bel ul ad otak, a reaktorok g azhozam teljesítménye pedig a keverés hatására fel l m lja az eredeti inkub torszekr ny kialakítási hozam értékeit.

### 3. A DUPLA-FAL  FERMENTOR

A labor toriumban található egy szintén saját tervezésű dupla-fal  fermentor. Ennél a kialakításnál a belső termofil reaktortér hullad k je hasznosítva jut az alapanyag a külső mezofil térbe, megvalósítva ezáltal a kétlépcsős rothasztást. Az  budai Egyetem és a Budapesti Műszaki  s Gazdaságtudományi Egyetem oktato nak bevonásával fejlesztett termofil (55-60 C)  s mezofil (37 C) környezetet biztosító reaktor alkalmas félüzemi kísérletekre, melyek szakaszos vagy folyamatos üzemmódban biztosítja az anaerob bomlási folyamatot. (3.  bra)



3.  bra Egyedi tervezésű dupla-fal  fermentor

### 4. HORIZONTÁLIS ELRENDEZÉSŰ REAKTOR FEJLESZTÉSE

A labor torium cs cskatego ri s fermentorai a vezérlőegységgel együtt működtethető 3 db 5

literes Fermac 320 gyártmány, amit elsősorban mikrobiológiai kutatásokra kifejlesztettek ki. (4.  bra). Távoli irányítással és programozható vezérléssel naplózza a beszerelhető szondák segítségével a fermentáció jellemző paramétereit.



4.  bra Fermac 320

Az álló elrendezésű üvegreaktorban nagyon pontos és hatékony kísérleteket lehet végezni kisméretű homogén összetételű anyag biogáz hozamának megállapítására. Ugyanakkor az általunk gyakran használt alapanyag a búzaszalma vizsgálatára a gyárilag beépített keverőlapát nem hatékony, mert a rothasztás során az egyszerre fel sz  és leülepedő részecskék homogenizálására alkalmatlan.

Ez alapján célként t zt k ki a Fermac automatizált tulajdonságaira építve egy egyedi horizontális elrendezésű reaktor megtervezését és kivitelezését. Fontos szempont volt a keverési hibákat új kever lap ttal és az esetleges h fokszab lyoz si problémákat új reaktortest alapanyaggal kijavítani. A tervezett, majd legyártott berendezés működését empirikus és összehasonlító módszerrel ellen rizt k.

#### 4.1. A homogenizáló keverőlapát megtervezése

A keverés célja, hogy nem engedi leülepedni a folyadék közegben a szárazanyagot, valamint homogenizálja a közeget és intenzifik lja a biológiai folyamatokat.  gy a g z termelésért felelős baktériumok számára nagyobb az elérhető felület, több biogáz képződik. [2]

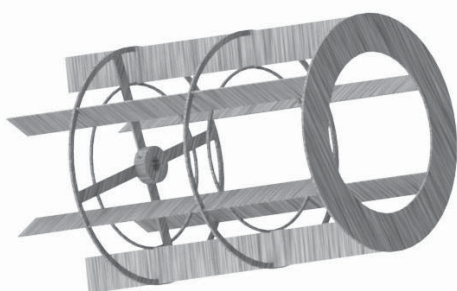
D n kutatók vizsgáltak a keverés intenzitását (minimális, gyenge, erőteljes) 55 C-on batch kísérlet során. Kimutatták, hogy ha túlterhelik a rendszert (t l magas szubsztrátum tartalom) akkor a minimális keverés a leghatékonyabb. Folyamatos rendszer l pedig, betáplálás előtt 10 percig történő minimális keverés az ideális. [3]

Ipari méretekben a bioreaktorok mechanikus úton történő keverése a leggyakoribb módszer. A függőleges síklapú keverőket (Rushton), elsősorban magas fordulatszámú keveréshez használnak. Ez baktérium kultúrák keverésénél ideális, de növényi sejtek keverésénél már kevésbé hatékony. A laboratóriumi Fermac 320-as rendszer is ezzel felszerelt. Növényi hulladék keverésénél hatékonyabb a különböző dőlés szögű propellerek használata, melyekkel axiális irányú keverés is megvalósítható. [4]

Egyéb laboratóriumi méretű berendezések esetében számos különböző konstrukciójú keverővel találkozhatunk. Ipari méretekben általában axiális irányú spirál keverőkkel vagy csiga keverőkkel dolgoznak. A tartály jellegű reaktorok keverése sokszor időben folyamatos.

A gyári Fermac egységhez kompatibilis fekvő elrendezésű reaktortestet kívántunk tervezni melyhez, malomkerékhez hasonló lapátkereket választottunk. (5. ábra)

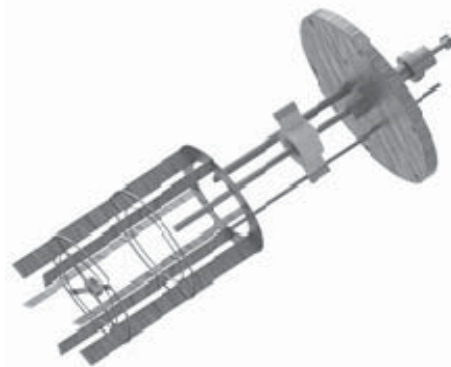
Ez a kialakítás a reaktor majdnem teljes hosszában képes keverni a belsejében lévő folyadékot. A keverőt 1 mm vastagságú korrózióálló acélból hat lapáttal terveztük 60°-ban egymástól elhelyezve. A lapátokat négy gyűrű és egy véglap tárcsa tartja pozícióban. A lézervágott egységek összeillesztése hegesztéssel történt, ezért roncsolás nélkül nem szétszerelhető. A keverő külső átmérője csupán 5 mm-el kisebb, mint a reaktor belső átmérője, annak érdekében, hogy a lehető legtöbb, a reaktor aljára leülepedett szárazanyagot képes legyen megmozgatni.



5. ábra A keverő modellje

A keverő tervezésekor nagy figyelmet kellett fordítani a rögzítési pont kiválasztására, valamint a belső átmérőjére, hogy ne ütközzön a főtengellyel párhuzamosan elhelyezett belső szondákkal. A rögzítési pontot a hőmérséklet

szondához a lehető legközelebb helyeztük el, ezzel is csökkentve a tengely kihajlását. Ez a távolság a keverő végpontjától megközelítőleg a teljes hosszának egynegyede. A fedéllel összeállított és szondákkal feltüntetett elrendezés a 6. ábra, míg az összeszerelt egység modelljét a 7. ábra szemlélteti.



6. ábra. A keverőlapát fedéllel összeállított és szondákkal feltüntetett elrendezése

#### 4.2. A reaktortest

Az irodalomkutatás és a labor igények alapján rögzített testű belső keverésű fekvő reaktor tervezése volt a cél. Kialakításkor felhasználtuk a Fermac 320 több paraméterét és elemét is, ezzel kompatibilissé téve az új rendszert a forgalomban kapható egységgel. A tervezés során fontos szempont volt az összehasonlíthatóság. Ennek érdekében a reaktor úrtartalma megegyezik a Fermac berendezésével, ami 5 liter. Nem csak a belső térfogat, de a fizikai méretek is, mint külső-, belső átmérő és magasság (a fekvő esetében hossz) is megegyeznek. A reaktor legfontosabb alkotó eleme maga a test. A gyári egységek temperált üvegből készülnek. A szerves anyagok fermentálásánál ez nem ideális, mert az optimális biogáz képződés egyik alapfeltétele a baktériumok fénytől történő elzárása. Így minden kísérlet alkalmával egy fényszigetelő burkot kellett a gyári üveg reaktortestekre helyezni.

A tervezett reaktor minden eleme korrózióálló acélból készült. Ez nagyon fontos kitétel, mert az anaerob bomlási folyamat során keletkező kénhidrogén erősen roncsolja a berendezések azon részét, melyek közvetlenül kapcsolatba kerülnek a betáplált anyaggal vagy a keletkezett biogázzal. Az 5 liter nettó térfogatú reaktortest három részből áll. A

központi elem egy 3.5 mm falvastagságú korrózióálló acél cső.



7. ábra. Az összeszerelt egység modellje

Ennek mind a két oldalára furatokkal ellátott peremek lettek hegesztve. A furatok osztóköre és azon való elhelyezkedése megegyezik a Fermac fedelén található furatok pozíciójával. Ez biztosítja a pontos csatlakozási lehetőséget a két elem közt. A henger alakú reaktortest elfordulását a talp gátolja meg, ami egy gumis belső felületű csőbilincs, melyre M8-as toldó anyákat hegesztettünk. Az ezekbe elhelyezett csavarok ki- illetve becsavarásával lehet kitámasztani és stabilizálni a reaktort. További kutatások érdekében megfelelő hosszúságú csavarokkal állítható a reaktor dőlésszöge a vízszinteshez képest. Mivel a csőbilincsnak nincsen meghatározott pozíciója, szabadon megválasztható az emelni kívánt oldala a reaktornak. A bilincs mozgását csupán a fűtőköpeny és a perem határolja be. A kontroll kísérletnél a reaktor vízszintes helyzetben volt.

A fermentációs egység másik oldalát egy plexi lappal fedtük le. A lap polisziloxán alapú tömítő anyaggal ragasztott a peremhez, majd csavarokkal rögzített a végleges pozíciójában. Ez a tömítő anyag ellenáll a kénhidrogén korróziós hatásának, és a megfelelő felületi előkészítést követően folyadék és gázszivárgás mentes zárást biztosít. Az átlátszó lap segítségével betekintést nyerhetünk működés közben a reaktorba így megfelelő demonstrációs eszközként is szolgálhat a laboratóriumban tanuló vagy dolgozó hallgatók számára.

Az összehasonlító kísérletek során a hőmérséklet vizsgálatokor jelentős különbség mutatkozott meg a két reaktor között. Az üvegreaktor gyorsabban melegszik át és közli a hőt a folyadékkal, aminek hatására az előre beállított értékhez képest jelentősen túlfűti a rendszert. Megközelítőleg 42-44 °C-ra melegíti a folyadékot, ami már nem a mezofil tartomány részét képezi. Ezt követően egy lehűlési szakasz

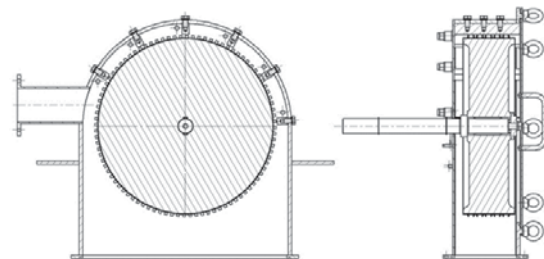
látható, ami jó közelítéssel 37°C-on stabilizálódik. A kívánt 37°C-os hőmérsékletet eléréséhez közel 5 órára volt szükség. További állandó ingadozás tapasztalható a gyári reaktor hőmérséklet diagramján, hiszen az üveg gyorsan veszít a felvett hőből. Ezért a fűtőköpeny óránként 2-3-szor kapcsol ki-be. Minden bekapcsoláskor 1-2°C-al szintén túlfűti a rendszert mielőtt kikapcsol, és csak akkor kapcsol be ismét, ha a folyadék már 35-36°C-osra hűlt. A laboratóriumban végzett egyéb kísérletek rögzített paramétereire képest ez az ingadozás nagyon magas. A fémtestű reaktor esetében nincs túlfűtési szakasz. Az itt megfigyelhető hőingadozás óránként csupán 0.3 °C pozitív és negatív irányban. A korrózióálló acélnek jóval nagyobb a hő tehetetlensége, mint az üvegnek így kiegyenlített a rothasztási folyamat hőmérséklettartománya.

A tervezett fermentációs egység keverője a rothasztás során mért gázhozamok alapján hozta a várt eredményt. A horizontális reaktor kumulált gázhozama 54%-al, a kumulált metánhozama pedig 64%-al magasabb lett, mint a vertikális egységé.

## 5. FERMENTÁCIÓS ALAPANYAG ELŐKEZELŐ BERENDEZÉSEK MŰSZAKI PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSA

Az alapanyag előkezelő berendezések műszaki paramétereinek beállításával optimalizálást végzünk a magasabb biogázhozam érdekében. A laboratóriumban két különböző elven működő mechanikai aprítóberendezés van.

Az egyik a Shark fantázianevű gép egy vágómalom típusú nedves aprító berendezés (8. ábra). A berendezésben az alapanyag fajlagos felületnövelése és roncsolása, folyadéknyírás és ütközés elvén valósul meg. [5]



8. ábra Az aprító egység felépítése

A szerkezetben egy belső forgótárcsás rész a beadagolt maximum 8% szárazanyag tartalmú vizes szubsztrátumot körülbelül 170 m/s sebességre gyorsítva, jelentős nyíróerőt

ébredt a réteg határfelületein, szétroncsolva ezzel a részecskék tekintélyes hányadát. A gép alkalmas a vizes közeg ipari körülmények között történő többszöri recirkuláltatására.

A másik gépegység egy hidrodinamikus kavitációs berendezés. A növényi sejtek mesterséges aprítása történhet kavitációs jelenség segítségével, melynek során a szilárd felületek mentén keletkező buborékokban túszerű benyomódás alakul ki, ami azok összeomlásához vezet. [6] Ezek megsemmisülése nagymértékű változást okoz egymás felületi szerkezetében, reaktivitásában, így az anyagban kémia, szerkezeti és fizika alakutani átalakulások mennek végbe. [7]

Az alapanyagok (búzaszalma, szennyvíziszap) előkezelésének optimalizálása laboratóriumi mérések alapján határozható meg. A kísérlet sorozatok célja a berendezéssel történő alapanyag(ok) előkezelésének azon értékeinek és paramétereinek megkeresése, melyek hatással vannak a fermentációjuk során termelt biogáz hozamra. Ha minden esetben a paraméterek hatásának értékelhetősége miatt csak egy-egy tényező változik, akkor a kísérletek magas számának következtében a vizsgálatok hosszasan lennének csak megvalósíthatók. Ezért alkalmazzuk a kísérlettervezést. Így a vizsgált tényezők egyszerre történő szisztematikus változtatásával (kísérlettervezéssel), a kimenő paraméterek segítségével egyszerre lehet több változó hatását vizsgálni, kevés számú kísérlet mellett. A faktorok (recirkuláció, fordulatszám) két szinten kerülnek meghatározásra, a linearitás ellenőrzése végett még 1 db centrum ponti értékkel beállítva. Az adatok elemzése varianciaanalízis alapján MINITAB szoftver segítségével történik. Következtetések és ajánlások a mért értékek alapján kapott diagramok és egyenletek felhasználása és kiértékelése után esedékes.

A mérési eredmények alapján felállítható a kísérleti térben a biogáz és metántöbblet várható értékének becült regressziós függvénye. Az energiamérleg ismeretében pedig meghatározhatók a reális alkalmazhatósági határok. Az üzemi alkalmazás megbízható eredményéhez szükség van a kísérletek félüzemi vizsgálataira, majd nagyüzemi próbaüzemére. A laboratóriumi vizsgálatok ugyanakkor alkalmasak a kezelt és kezeletlen alapanyag fermentációjának

összehasonlítására, a kezelés hatékonyságának feltérképezésére.

## 6. BEFEJEZÉS

A laboratórium jelenlegi fejlesztései mellett új irányvonal mutatkozik a különböző fizikai elven működő előkezelő berendezések tervezésére, kivitelezésére.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben ismertetett kísérletek és fejlesztések Bakosné Dr. Diószegi Mónika, Tupa Boglárka, Kormos Klaudia, Misi Ádám, Pelle György Tamás közreműködésével az Óbudai Egyetem biogáz laboratórium eszközei segítségével jött létre. Továbbá készült az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával”.

## 8. IRODALOM

- [1] VDI 4630 – Szerves anyagok fermentálása - A szubsztrátum jellemzése, mintavételezés, lényeges adatok gyűjtése, fermentációs tesztek, Verein Deutcher Ingenieure, Düsseldorf, 2006
- [2] Bai Attila (szerk.): A biogáz, Száz Magyar Falu Könyvesháza Kht., 2007
- [3] Prasad Kaparaju, Inmaculada Buendia, Lars Ellegaard, Irini Angelidakia - Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies
- [4] <http://www.biologydiscussion.com/bioreactors/bioreactors-types-top-3-types-of-bioreactors/12213>
- [5] Bakosné Diószegi Mónika: Speciális mechanikus előkezelés hatásának vizsgálata biogáz hozam növelése céljából, Doktori értekezés, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, 2015.
- [6] Miklos Horvath: The Effect of Comminution as a Pretreatment Method Used in the Process of Anaerobe Fermentation of Lignocellulose Substrate on Biogas Yield, In: László Nádai, József Padányi (szerk.), 184 p., Zürich: Springer International Publishing, 2016. pp. 141-152., (ISBN: 978-3-319-28090-5)
- [7] Erzsébet Ancza, Mónika Bakosné Diószegi, Miklós Horváth: Hydrodynamic Cavitation Device that Makes Straw Cuts Suitable for Efficient Biogas Production, APPLIED MECHANICS AND MATERIALS 564: pp. 572-57



# FELTÖLTÉSI ÉS LESZELLŐZÉSI IDŐK CSÖKKENTÉSE PNEUMATIKUS MUNKAHENGEREKNÉL

## DECREASE OF PNEUMATIC CYLINDER'S CHARGING AND DISCHARGING TIME

Bolyki Zsolt, BSc, [zsolt.bolyki@gmail.com](mailto:zsolt.bolyki@gmail.com)

Dr. Farkas Zsolt PhD, [farkas.zsolt@gt3.bme.hu](mailto:farkas.zsolt@gt3.bme.hu)

(Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék)

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Kutatásunk fókuszában egy sűrített levegő hajtású jármű teljesítménynövelése állt. Egy pneumatikus munkahengerfedél geometriai kialakításának a hengertér feltöltési és leszellőzési idejére gyakorolt hatását elemeztük. A különböző geometriai paraméterek változtatásával ugyanis elérhető, hogy kevesebb áramlástani veszteség lépjen fel, ezáltal nagyobb teljesítmény váljon kinyerhetővé a munkahengerből.

**SUMMARY.** In this paper, we focused on the the power increase of a compressed-air-powered vehicle. We studied how the geometry of the pneumatic cylinder's cover influences the charging and discharging time of the cylinder's volume. With different geometrical parameters (e. g. hole diameter, position etc.) we can decrease the fluid mechanical losses and increase the effective power of the pneumatic cylinder.

### 1. BEVEZETÉS

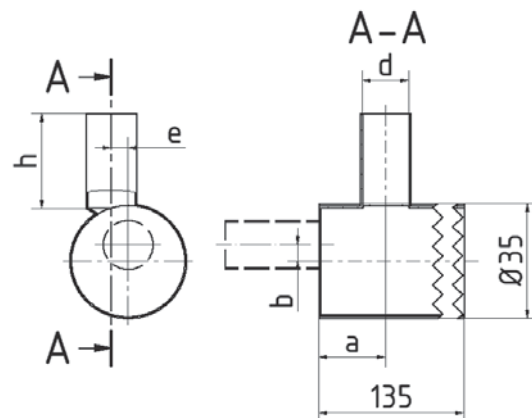
Adott nyomással működő pneumatikus munkahengerek sebességét a terhelés csökkentésével és/vagy kisebb súrlódású tömítő-vezető elemekkel lehet növelni. Ezen kívül megoldást jelenthet, ha sikerül rövidebb idő alatt feltölteni a munkateret. A feltöltés sebességét az egész pneumatikus rendszer befolyásolja: a levegőellátás, a vezérlés és a munkavégzők szintjén lévő elemek, sőt még a vezetékezés és a csatlakozók is. A rendszernek mindig található gyenge pontja, egy olyan legszűkebb kereszt-metszet, amely a feltöltés karakterisztikáját legjobban befolyásolja. Ezeket az elemeket elosztott és koncentrált paraméterű modellekkel is lehet vizsgálni. [1]

Kutatásunk során egy pneumatikus hajtású jármű munkahengerének feltöltését és leszellőzését (tranziens folyamatok) vizsgáltuk numerikus áramlástani szimulációkkal és valós rendszeren végzett mérésekkel.

Ha az eredeti hengerfedélen mért tranziens időket csökkenteni lehet, akkor a munkahenger, ezáltal a jármű nagyobb teljesítményt tud szolgáltatni.

### 2. NUMERIKUS ÁRAMLÁSTANI VIZSGÁLATOK

Definiáltunk egy, az 1. ábra szerinti numerikus áramlástani modellt, amely két, egymásra merőleges hengerből áll, amint az az eredeti hengerfedélen is tapasztalható. A modellen öt paraméter változtatható: a feltöltő/leszellőző furat  $d$  átmérője,  $h$  mélysége,  $e$  excentricitása,  $a$  zárt véglaptól mért távolsága, valamint az opcionálisan elfordított helyzetű henger  $b$  középvonalhoz képesti eltolása.



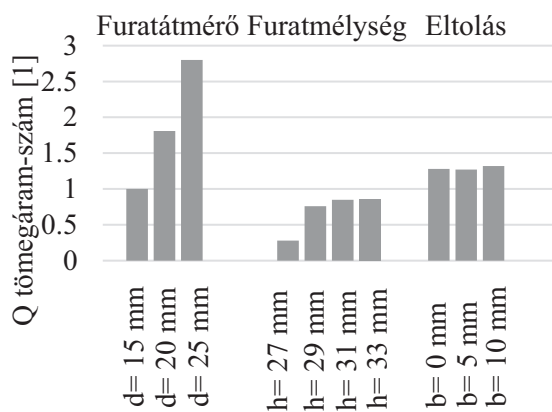
1. ábra. Numerikus áramlástani vizsgálati modell

A vizsgálatoknak nem az a célja, hogy pontosan modellezzük a tranziens folyamatot, hanem hogy a különböző geometriai kialakításokat hasonlítsuk össze időben állandósult állapotban. A vizsgálatok peremfeltétele a felső beömlőnyíláson lévő 15 bar-os túlnyomás, míg a jobb oldali, nyitott véglapon környezeti nyomás. A vizsgált jellemzők a megfelelő metszetekben a sebességprofil, valamint az átengedett tömegáram. Mivel összehasonlító vizsgálatokról van szó, ezért a tömegáramok viszonyításához az (1) összefüggés szerinti

tömegáramszámot definiáltuk. Az  $i$ -edik tömegáramszám az  $i$ -edik, a programban a véglapon lekérdezett tömegáram és az első, az eredeti hengerfedél mérete alapján bemodellezett közelítő geometriához tartozó tömegáram hányadosa.

$$Q_i = \frac{q_{m,i}}{q_{m,ref}} \quad (1)$$

A szimulációk azt mutatták, hogy az  $e$  excentricitással beömlő munkaközeg részecskéi az alsó domború felületről visszaverődve a jobb oldali kiömlőnyílás felé a vízszintes henger kerülete környezetében spirál alakú pályán mozognak. Legnagyobb mértékben – a mérnöki meglátásokkal összhangban – a furatátmérő növelése növelte az átengedett tömegáramot. A furat mélységének csökkentésével váll alakul ki a henger-henger áthatásnál, amely csökkenti a hasznos átáramlási keresztmetszetet, ezáltal a tömegáramot. Az excentricitás növelése még egyenletlenebb sebességprofilokat eredményez a véglapon, míg az  $a$  hosszkoordináta csökkentése csökkenti a bal oldali, zárt véglap környezetében fellelhető holt teret. A két henger tengelyének párhuzamossá tétele, azaz a csatlakozó elfordítása kb. 30%-os tömegáram-növekedést jelent a szimulációs eredmények alapján. A 2. ábrán a tömegáramszámokat ábrázoltuk az átmérő, a mélység és az eltolás paraméterek változásának függvényében.



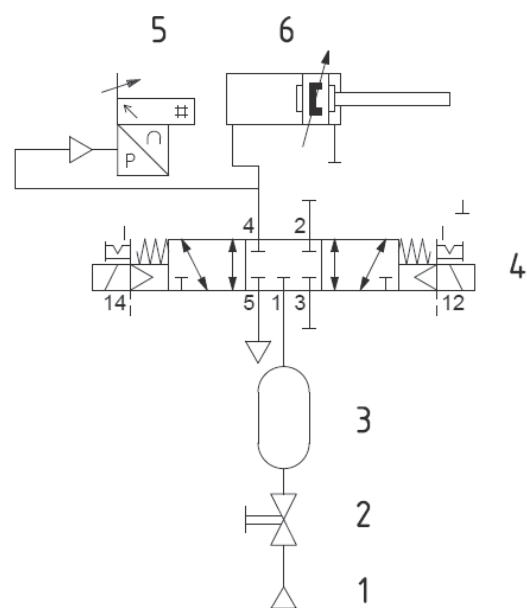
2. ábra. Tömegáramszámok változásai

### 3. PNEUMATIKUS MÉRŐRENDSZER

Pneumatikus méréseken keresztül kívántuk meghatározni az eredeti és az új, általunk tervezett és gyártott hengerfedélre jellemző feltöltési és leszellőzési időket.

A mérőrendszer egy járműből kiserelt komplett hajtás- és vezérlésrendszer volt. Ez a

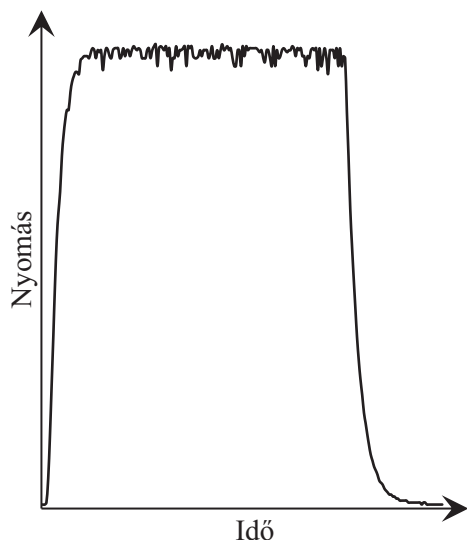
3. ábra szerinti pneumatikus kapcsolási rajzon látható: az (1) jelű kompresszorral feltöltöttük a (3) puffertartályt, majd a kompresszort leválasztottuk a rendszerrel a (2) csappal. A (4) jelű 5/3-as hengert vezérlő szelepet működtettük, amely feltöltötte a (6) munkahenger dugattyúterét. Közben a hengerfedélen elhelyezett (5) szenzor detektálta a nyomásértékeket. Az adatok ARDUINO-ra írt számítógépes program segítségével kerültek kiértékelésre. A folyamatosan csökkenő puffernyomás miatt sikerült különböző nyomásszinteken lemérni a jellemző transziens időket.



3. ábra. Mérőrendszer pneumatikus kapcsolási rajza

### 4. AZ EREDETI HENGERFEDÉL MÉRÉSE

A 4. ábrán az eredeti hengerfedél egy tetszőleges nyomáson végzett mérési ciklusának nyomás-idő jelleggörbéje látható. A feltöltési és a leszellőzési folyamat is hirtelen, nagy meredekséggel indul a nagy nyomáskülönbség miatt, azonban a görbe érintője az időben előre haladva egyre laposodik, beáll az állandósult állapot. Ez azonos a rendszertechnika egytárolós elemének az egységugrás gerjesztőfüggvényre adott válaszával, az átmeneti függvénynek az alakjával. Így a feltöltési és a leszellőzési szakaszok nyomása az idő függvényében a (2) és (3) egyenletekkel írható le, ahol  $K$  az állandósult állapotbeli nyomás, míg  $T$  az időállandó. A mérési pontokra illesztett ilyen alakú görbék regressziós együtthatói 0,98-0,99 körüli értékűek.

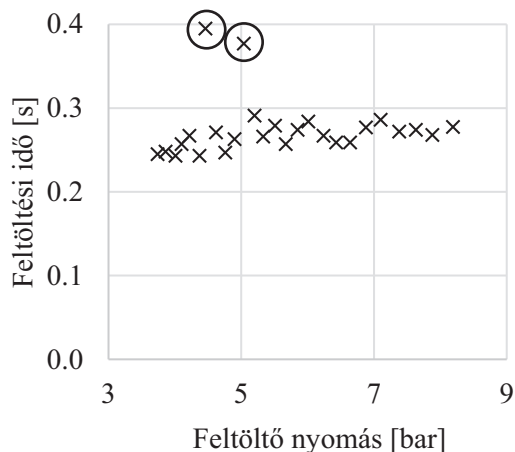


4. ábra. Feltöltési és leszellőzési folyamat nyomás-idő jelleggörbéje

$$p(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{T}t}\right) \quad (2)$$

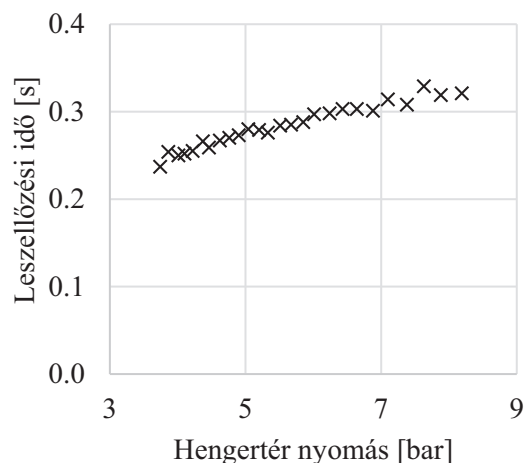
$$p(t) = K \cdot e^{-\frac{1}{T}t} \quad (3)$$

A feltöltési idők a nyomástól függetlennek tekinthetők a vizsgált kb. 3,5-8,3 bar hengertér túlnyomás tartományon, amint ez az 5. ábrán is látható. A két bekarikázott, kiugró pont mérési hibának tekinthető.



5. ábra. Feltöltési idők változása a feltöltő nyomás függvényében

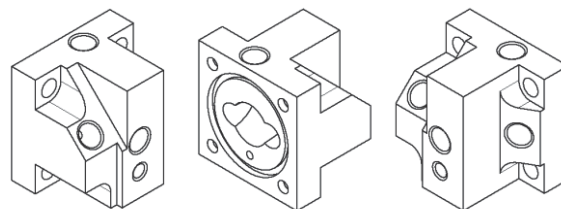
A leszellőzési idők a nyomás csökkenésével csökkennek. Ez azzal magyarázható, hogy a végtelennek és mindig ugyanolyan nyomásúnak tekinthető környezeti térbe egyre kisebb nyomásszintekről egyre rövidebb idő alatt lehet leszellőzni. Ezt a 6. ábra mutatja.



6. ábra. Leszellőzési idők változása a hengertér nyomásának függvényében

### 5.ÚJ HENGERFEDÉL MÉRÉSE

A kutatásokhoz terveztünk egy új, vizsgálati hengerfedelelet, amelyet le is gyártottunk. Az alkatrészen négy pneumatikus csatlakozó került elhelyezésre: felső helyzeti, hátsó véglapi, valamint két, a hossz tengellyel rendre 45°-os és 60°-os szöget bezáró, ahogyan az a 7. ábrán is látható. A vizsgált csatlakozók G1/2-es menetűek.



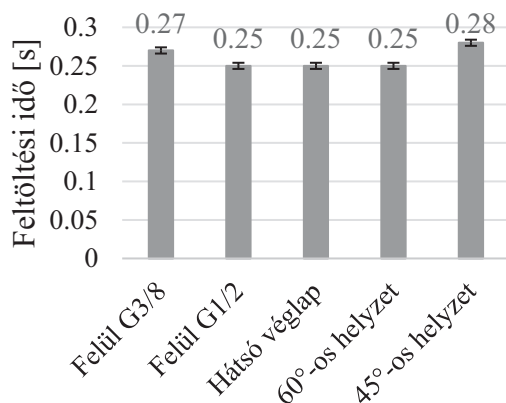
7. ábra. Legyártott hengerfedél több nézetben

A 8. ábra az egyes csatlakozókhoz tartozó feltöltési időket mutatja. Mivel a nyomástól függetlennek tekinthető a feltöltési idő, ezért kényelmesen, oszlopdiagram lehet azokat ábrázolni. Az eredeti, G3/8-os csatlakozóhoz képest kb. 8%-os csökkenést sikerült elérni ugyanolyan helyzetű, de G1/2-es csatlakozóval. Az egyik ipari szereplő katalógusában találhatóak adatok a csatlakozóátmérő és az átengedett névleges térfogatáram között. Ez G3/8-os csatlakozóra  $555 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}}$ , míg G1/2-esre  $600 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}}$ . [2] Az általunk mért változás összhangban áll ezzel az értékkel.

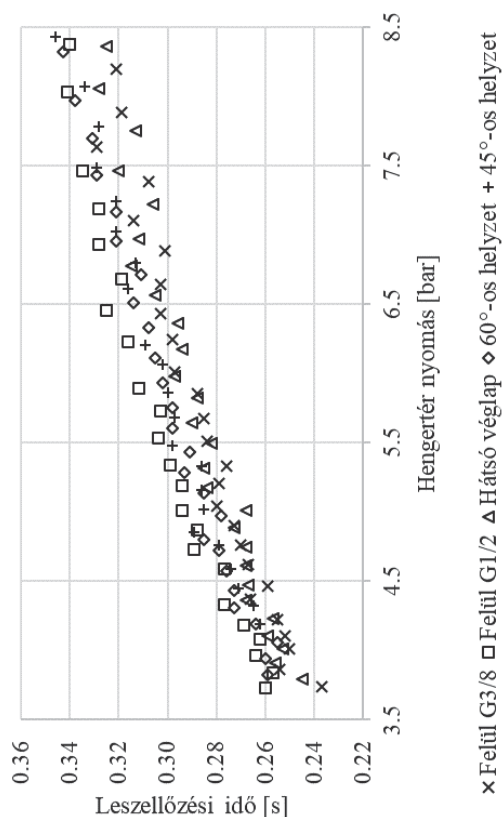
A különböző szöghelyzetek hatását nem sikerült jelentősebb mértékben kimutatni, pedig az irodalom a különböző csökönyökök és

csőívek hidraulikai veszteség-tényezőjének szögfüggését hosszan elemzi. [3] A 45°-os csatlakozó azért adhat nagyobb feltöltési időt, mert az a furat összetett, két irányú törés is található benne.

A leszellőzési időket a különböző hengertér nyomásokon a 9. ábrán mutatjuk be. A mérési pontokra 0,95 érték feletti regressziós együtthatójú egyenesek illeszthetők.



8. ábra. Feltöltési idők a különböző furat elhelyezéseknél



9. ábra. Leszellőzési idők különböző furatoknál

A legkisebb leszellőzési idővel a G1/2-es véglapi, valamint a felső helyzeti G3/8-os

csatlakozó rendelkezik. Előbbi az áramlás irányának legkisebb változásával magyarázható, míg az utóbbi esetben (konstrukciós okok miatt) máshol kellett elhelyezni a nyomásmérő szenzort, így ez okozhatott mérnöki meglátásokkal nehezen magyarázható eredményt. A két ferde helyzetű csatlakozó leszellőzési ideje jelentősen nem különbözik egymástól.

## 6. EREDMÉNYEK, TOVÁBBFEJLESZTÉS

A numerikus áramlástani modellel sikerült bizonyítani, hogy a furat felbővítése, illetve a homlokfelületre való áthelyezése növeli az átengedett tömegáramot. Valós pneumatikus mérőrendszeren kimértük az eredeti hengerfedél tranziens idejeit, majd terveztünk és gyártottunk egy új, vizsgálati hengerfedeleket, amelyen több csatlakozó furatot is elhelyeztünk. Mérések sorozatával igazoltuk, hogy a következő szabványos méretű csatlakozó alkalmazásával 8%-os csökkenést lehet elérni a feltöltési időben. Ezt az eredményt fel lehet használni a következő évadra készülő jármű tervezésénél.

Az eredmények további fejlesztési lehetőségekre világítanak rá. A numerikus áramlástani modellel tranziens folyamatokat is lehetne szimulálni. Valós méréseket lehetne végezni dinamikus, a dugattyúrudak működtetésével, majd terheléssel is. A levegőrendszer minden elemét szisztematikusan cserélve és újabb méréseket végezve újabb gyenge pontokat lehetne feltárni. Végezetül célszerű lenne az egész pneumatikus rendszer koncentrált paraméterű modelljét felállítani.

Zárásként szeretnénk köszönetet mondani a *Műszakik Pneumobil Team* csapat tagjainak, akik áldozatos munkájukkal segítették kutatásainkat.

## IRODALOM

[1] Szente V.: Pneumatikus teljesítmény-átvitelirendszerek áramlástani jellemzői. Ph. D. értékezés, Budapest, 2008, 22. p.

[2] J. P. Hasebrink: A pneumatika alapjai. A pneumatika gyakorlata I., Bosch Rexroth AG Service Automation Didactic, Erbach, 1991, 39. p.

[3] Lajos T.: Az áramlástan alapjai. 4. átdolg. és bőv. kiad., Mackensen Kft., Budapest, 2008, 489-491. p.

# MIKROTOPOGRÁFIAI SAJÁTOSSÁGOK ALKALMAZÁSA MŰSZAKI FELÜLETEK KIÉRTÉKELÉSÉRE

## APPLICATION OF MICROTOPOGRAPHIC FEATURES FOR CHARACTERISATION OF ENGINEERING SURFACES

*Czifra Árpád, PhD*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** A mikrotopográfiai sajátosságokon alapuló jellemzés a felület olyan geometriai elemeit értékeli, melyek dominánsan kapcsolódnak a gyártási vagy működési folyamathoz. Jelen munka néhány műszaki felület topográfiai sajátosságokon alapuló jellemzését mutatja be. A vizsgálatok célja az, hogy feltárja, melyek azok a sajátosságok, melyek egy átfogó mikrotopográfiai sajátosságokon nyugvó kiértékelési rendszer elemeit képezhetik.

**ABSTRACT.** Feature based microtopographic characterisation focusing on the geometric element that dominantly connected to the production or operational process. This work present some feature based characterisation example of engineering surfaces. The goal is to find the most important surface features, and to establish the basic concept of feature based microtopographic characterisation system.

### 1. BEVEZETÉS

A felület mikrotopográfiai jellemzése a gyártási folyamatok ellenőrzésének és a tribológiai folyamatok közben tartásának egyik fontos eleme. Számos kiértékelés technikai módszer mellett mára megjelent a felületi sajátosságokon alapuló kiértékelési módszer. Számos szakirodalom említi a módszert (pl. [1]), ugyanakkor a legtöbb esetben a felületi sajátosságok (features) alatt az ISO/DIS 25178-2 szabvány [2] által definiált ún. Wolt féle szeletelő technikát értik (ld.: [3, 4]). Ez azonban mindössze a felületek érdességcsúcsainak és völgyeinek azonosítására szolgáló módszer, mely az azonosított érdességcsúcsok és völgyek „átlagos” jellemzését adja egy-egy mikrotopográfiai paraméterrel (pl. S10z, S5p, S5v paraméterek). Néhány esetben találkozunk ezen túlmutató értelmezéssel is. Bruzzone és Costa [5] a tribológiai folyamatok tükrében a mintázat jellegére utaló geometriai elemeket azonosít felületi sajátossággként („features in the texture patterns”). Átfogóan kiterjeszhetjük a

mikrotopográfiai sajátosságok értelmezését úgy, hogy sajátossággként definiáljuk azokat a geometriai jellemzőket, melyek dominánsan kapcsolódnak a gyártási vagy működési folyamathoz. Ez szemléletváltást jelent, mert a korábban a felületi érdességmérésre jellemző „statikus” kiértékelési módot egy „dinamikus” váltja fel, abban az értelemben, hogy a sajátosság már nem értelmezhető pusztán a mikrotopográfiai geometriai jellemzésével, hanem szorosan kapcsolódik a tribológiai folyamathoz. Így egy adott felületi érdességmérés sajátosságai egészen mások, ha a felületet létrehozó gyártási folyamatot szeretnénk jellemezni, mint akkor, ha a tribológiai folyamatba lépő gépalkatrészt vizsgáljuk. (Természetesen a mérés hordozza mindkét típusú geometriai információt, de más-más szempontokat veszünk figyelembe azok meghatározásánál.) A mikrotopográfiai sajátosságok ilyen értelemben vett rendszere jelenleg még nem kidolgozott.

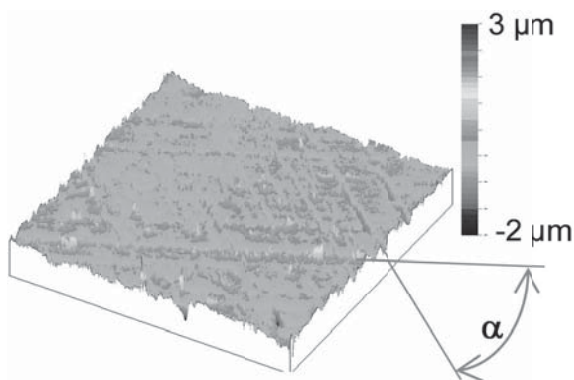
Jelen munka néhány műszaki felület topográfiai sajátosságokon alapuló jellemzését mutatja be. Többek között hónolási, porkohászati és „hagyományos” forgácsolási megmunkálású felületek domináns elemeinek azonosítása révén értékeli a felületeket. Továbbá különböző kopási mintázatú topográfiai sajátosságainak kiértékelése révén jellemzi a tribológiai folyamatokat. Minden bemutatásra kerülő esetben azonosításra kerülnek azok a domináns jellemzők (sajátosságok), amik a működési folyamattal összefüggést mutatnak. Jelen cikkben nem kerülnek részletezésre az egyes példák mérési, kiértékelési, stb. paraméterei, csak azon hivatkozások, melyek ezeket a részletes vizsgálatokat tartalmazzák.

A vizsgálatok célja az, hogy feltárja melyek azok a sajátosságok, melyek egy átfogó mikrotopográfiai sajátosságokon nyugvó kiértékelési rendszer elemeit képezhetik.

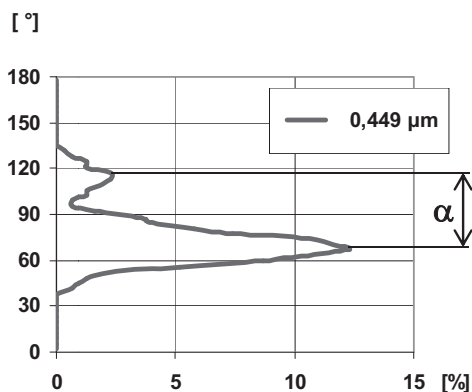
### 2. MEGMUNKÁLT FELÜLETEK TOPOGRÁFIAI SAJÁTOSSÁGI

A mikrotopográfiai sajátosságok fogalmának megjelenése tipikusan olyan működő

felületekhez kötődik, melyek speciális körülmények között, speciális gyártástechnológiával készülnek. A legelső ilyen jellegű kutatások belső égésű motorok hengerének felületi megmunkálásával foglalkoztak. Mára kialakultak azok az irányelvek, amik a hónolási technológia részletes, a hagyományos érdességmérési paramétereket nélkülöző, jellemzéséhez vezettek. Ezen jellemzők közül kiemelt szerepe van a megmunkálási barázdák szögének (ld. [6]). Az 1. ábra egy hónolt felület topográfiáját mutatja, míg a 2. ábra a szeletelő technikával elemzett karcok irányultságát jellemzi. A kutatás részleteit és a kiértékelés módszertanát a [6] és [7] irodalmak foglalják össze.



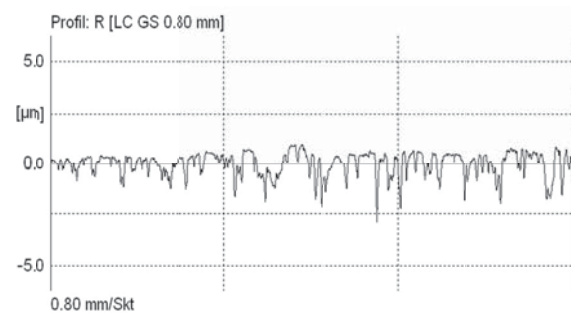
1. ábra. Hónolt felület mikrotopográfiája



2. ábra. Karcok orientációjának eloszlásgörbéje

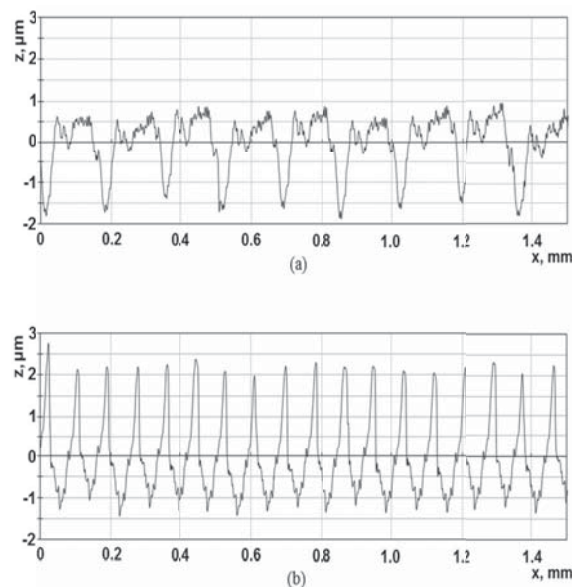
A felületi megmunkálások jellemzése kapcsán az új technológiák jelentenek új kihívást. Napjainkban különösen jellemzőek az olyan megmunkálások, melyek platószerű hordfelületet hoznak létre. Ezek olyan dominánsan meghatározzák a felület tribológiai

működését, hogy feltétlenül szükséges a platószerű viselkedés jellemzése. A 3. ábra fém fröccsöntési (metal injection molding) technológiával gyártott alkatrész érdességmérési profil részletét mutatja (részleteket ld.: [8]).



3. ábra. Turbófeltöltő lapát (fém fröccsöntés) érdességmérési profilja

A 3. ábrán látható profilhoz nagyon hasonló felületet kaphatunk forgácsolási technológiával is. Alumínium klímakompresszor házak esztergálása során a hagyományos ISO és a Wiper élgeometriájú szerszámmal készült érdességi profilt mutat a 4. ábra (a kutatás részleteit ld.: [9]).

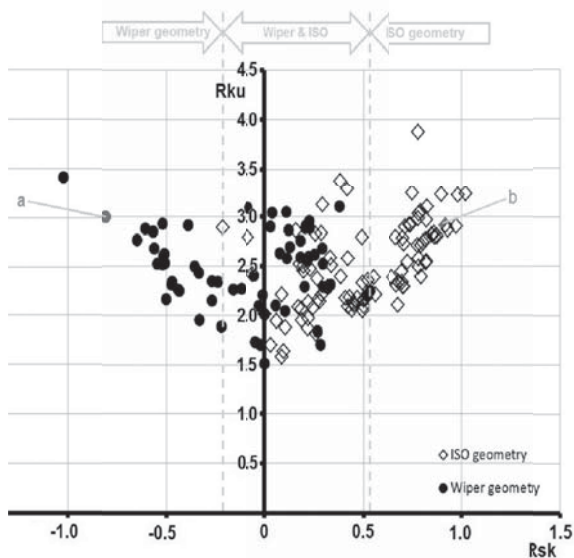


4. ábra. Esztergált felület  
(a) Wiper élgeometria; (b) ISO élgeometria

A platószerű hordfelület jellemzésére a hordozófelületi és magasság eloszlási görbéket jellemző RSK és Rku paraméterek alkalmasak. Együttes alkalmazásukkal topológiai térkép létrehozását javasolja Whitehouse [10], mely

térképen nagy negatív RSk érték és nagy pozitív Rku jelent platószerű hordfelületet.

A különböző forgácsolási paraméterekkel elvégzett kísérletek eredményeként (közel 2000 érdességmérési profil felhasználásával) készült topológiai térképet mutat az 5. ábra. A forgácsolószerszám élgeometriája az a döntő tényező, ami a forgácsolás tribológiai folyamatait meghatározva pozicionálja az egyes felületeket a topológiai térképen. A Wiper élgeometria – akárcsak a porkohászati, vagy fém fröccsöntési technológia – platószerű hordfelületet hoz létre. A 4. ábra két profilja az 5. ábra „a”-val és „b”-vel jelölt méréseit mutatja.



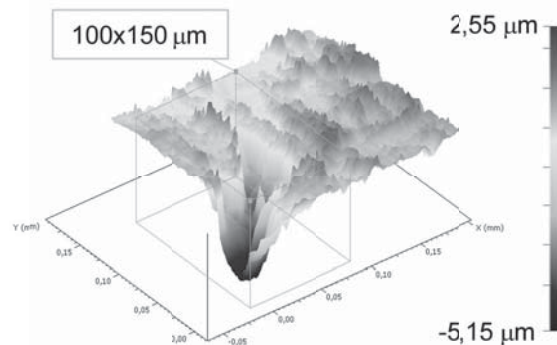
5. ábra. ISO és Wiper élgeometriájú szerszámmal forgácsolt alumínium alkatrészek topológiai térképe

### 3. MŰKÖDŐ FELÜLETEK TOPOGRÁFIAI SAJÁTOSÁGI

Működő és kopott felületek mikrotopográfiai jellemzése igen komoly kihívás elé állítja az érdességméréssel foglalkozó szakembereket. A működés során megjelenő egyedi felületi jelenségek alakja, mérete, megjelenési intenzitása rendkívül változatos.

Vasúti féktuskó (P10 öntöttvas anyag) kopási viselkedésének feltárása során [11] a felületen a 6. ábrán látható mély kiszakadások voltak megfigyelhetők. Ezek forrása a keresztmetszeti csiszolatokon vált világossá: „Az alapanyagban jelenlevő grafit a mechanikai igénybevételek hatására közvetlenül a felszín alatt összetöredezett. A további igénybevételek azok kiszakadáshoz vezettek, melynek

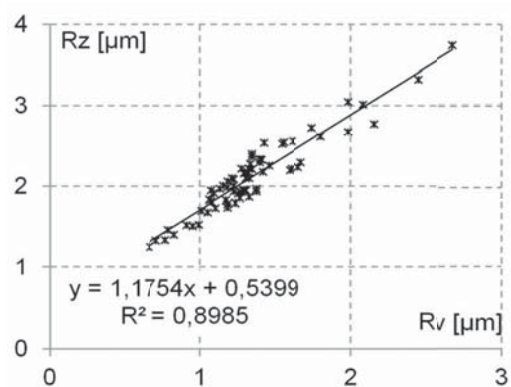
következményeként a felületen 5-15  $\mu\text{m}$  mélységű kráterek keletkeztek.” [11].



6. ábra. Vasúti féktuskó felületi sérülése

Az ilyen jellegű sérülési nyomok azonosítása nélkülözhetetlen a működési folyamatok megértéséhez. Ennek tipikus példája a fáradásos igénybevételnek kitett felületeken megjelenő pitting.

Sok esetben a működés során olyan összetett felületi struktúra jön létre, melynek geometriai jellege a hagyományos érdességi paraméterekkel értelmezhetetlennek tűnik. BTR-80 katonai szállítójármű radiális csúszótárgas differenciálművének alkatrészénél a völgyzóna mélysége az elvégzett 120 érdességi profilnál 0,3  $\mu\text{m}$  és 9,4  $\mu\text{m}$  tartományban változott. A felület jellege azonban sok hasonlóságot mutatott a különböző léptékű kopási nyomok esetén (ld. 7. ábra).



7. ábra. Kopott differenciálmű alkatrész Rz és Rv paraméterének kapcsolata

A felület tagoltságára, önhasonlóságára vonatkozóan a felületet jellemző fraktál dimenzió utalhat. Inhomogén felületi struktúrák esetén sok esetben ez a paraméter ad stabil kiértékelési lehetőséget [13].

#### 4. A MIKROTOPOGRÁFIAI SAJÁTOSságOK RENDSZERE

A bemutatott példák alapján – kiegészítve a szakirodalom eredményeivel az alábbiakban a mikrotopográfiai sajátosságokat lehetséges megjelenési módjuk szerint osztályozzuk:

Csúcszóna jellemzői (hordozó és abrazív tulajdonságokkal összefüggő tényezők):

- érdességcsúcsok mérete;
- érdességcsúcsok sűrűsége;
- felületi platók kiterjedése;
- hordfelületi jellemzők (RSk; RKu);
- elnyújtott csúcsok, gerincek.

Völgyzóna jellemzői (kenéssel, adhezív és fáradásos kopással, valamint megmunkálási nyomokkal összefüggő tényezők):

- völgyzóna mélysége;
- völgyek kiterjedés;
- kiszakadások, völgyek alakja;
- karcok szélessége, mélysége.

A felület tagoltságát jellemző sajátosságok (a kapcsolódó felület tapadó képességével összefüggő tényezők):

- fraktálok;
- felületarány (Sds paraméter);
- átlagos lejtés (Sdq paraméter).

A felület irányultságát jellemző sajátosságok (meghatározzák a működés irányát, a kenőanyag áramlását, stb.):

- orientáció;

A felület periodicitását jellemző sajátosságok (összefüggenek a rezgésekkel):

- domináns hullámhossz;
- korrelációs függvények.

#### 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A mikrotopográfiai sajátosságok rendszere a gyártáshoz vagy működéshez köthető domináns geometriai elemek azonosításán alapul.

A módszertan igényli a topográfiai szintű feldolgozást.

A felületi mikrotopográfia sajátosságokon alapuló értékelése megteremti a működéshez optimált mikrotopográfia tervezésének lehetőségét: A megfelelő sajátosság felismerése után célszerűen megkövetelhetjük annak gyártástechnológiai előállítását.

#### 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka az Új Nemzeti Kiválósági Program (ÚNKP-17-4) támogatásával, a „Mikrotopográfiai sajátosságokon alapuló kiértékeléstechnika fejlesztése műszaki felületek jellemzésére” projekt keretében valósult meg.

#### 7. IRODALOM

- [1] Richard Leach: Characterisation of Areal Surface Texture, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2013)
- [2] ISO/DIS 25178-2: Geometrical product specification (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2. Terms, definitions and surface texture parameters (2012)
- [3] J Blanc, D Grime, F Blateyron: Surface characterization based upon significant topographic features, Journal of Physics:ConferenceSeries 311, 012014 (2011)
- [4] Nicola Senin, Michele Moretti and Liam A Blunt: Identification of individual features in areal surface topography data by means of template matching and the ring projection transform, Surface Topography: Metrology and Properties, Vol 2, No1 (2013)
- [5] A.A.G. Bruzzone, H.L. Costa: Functional characterization of structured surfaces for tribological applications, Procedia CIRP 12, 456–461 (2013)
- [6] Horváth S., Czifra Á.: Motorblokk hengerfelületének mikrotopográfiai vizsgálata, OGÉT XXI, pp. 170-173., Kolozsvár (2013)
- [7] Czifra Á, Váradi K, Horváth S: Three dimensional asperity analysis of worn surfaces, MECCANICA 43:(6) pp. 601-609. (2008)
- [8] Horváth S, Czifra Á: Modern technológiával készült gépelemek mikrogeometriája, OGÉT XIX. pp. 172-175. Kolozsvár (2011)
- [9] Horváth R, Czifra Á, Drégelyi-Kiss Á: Effect of conventional and non-conventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools, Advanced Manufacturing Technology 78:(1-4) pp. 297-304. (2015)
- [10] Whitehouse, D.J.: Handbook of surface metrology, Inside of Physics Publ., Bristol (1994)
- [11] Czifra Á, Fábrián E R, Kozma M: Vasúti féktuskó kopásának vizsgálata, GÉP 64:(7) pp. 82-85. (2013)
- [12] Árpád Czifra, Béla Palásti Kovács: Microtopographic features of worn surfaces, 5th World Tribology Congress, Torino, (2013)
- [13] Czifra Á, Goda T, Váradi K, Garbayo E: Wide frequency range 3D power spectral density analysis of plunger's topography of brake system, 12th Met & Props. pp. 377-381 Rzeszów (2009)



# AZ IPAR 4.0 ÉS AZ EGYETEMI OKTATÁS KÖLCSÖNHATÁSA

## INTERACTION OF INDUSTRY 4.0 AND UNIVERSITY EDUCATION

*Dr. Czifra György, mestertanár*

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az I4.0 a hallgatók és az oktatók részéről is megköveteli a megfelelő képzettséget, problémamegoldó-képességet, és természetesen a megfelelő tudományos felkészültséget. A felsoroltakat csak megfelelően kialakított környezetben lehetséges elérni, ezért az egyetemek kényszerítve vannak a megfelelő oktatási feltételek kialakítására. Cikkünkben arra teszünk kísérletet, hogy megtaláljuk azt az utat, amelyen járva képesek leszünk felkészíteni a hallgatókat az I4.0 kihívásaival való küzdelemre.

### ABSTRACT

I4.0 requires from students and educators to have the adequate skills, problem-solving skills and, of course, the appropriate academic skills. These skills can be achieved only in an adequately designed environment. Universities are therefore forced to develop their educational conditions according to I4.0 requirements. In our article, we effort to find the way how we will be able to prepare our students for the challenges of I4.0.

### 1. BEVEZETÉS

A technológiai fejlődés drámai változásokat okozott a termelékenység területén. A gőzgépek megjelenése a 19. században, az elektrifikáció a huszadik század elején, valamint az automatizáció térhódítása a 80-as évek elején mind ipari forradalmat indított el. Napjainkban a technológiai fejlődés negyedik hullámát éljük, melyet digitális ipari forradalomként ismerünk és az Ipar 4.0-nak nevezünk. Hálózatba kapcsolt kiber-fizikai rendszerekről beszélünk, melyek standard internetes kommunikációt biztosító protokollok segítségével kapcsolatba tudnak lépni egymással. A rendszerek adataik elemzése alapján hiba-előrejelzésre is képesek, újrakonfigurálják magukat és így képesek alkalmazkodni az ismert és ismeretlen változásokhoz is. Az I4.0 lehetővé teszi közvetlen adatgyűjtést az egyes berendezésekről, lehetővé téve ezzel a gyorsabb, rugalmasabb, hatékonyabb gyártási eljárások alkalmazását a magasabb minőségű,

olcsóbb termékek gyártását. A felsoroltak miatt megnövekszik a termelékenység, amely a gazdaságot is előbbre mozdítja, elősegíti az ipar fejlődését és alapjaiban változtatja meg a vállalatok versenyképességét.

### 2. MI IS AZ AZ IPAR 4.0?

Az Ipar 4.0 kifejezés a negyedik ipari forradalom fogalmát jelenti, ami magában foglalja az információs forradalmat, a kommunikációs forradalmat, az automatizálás mesterséges intelligenciával való bővítését, valamint a nagy adattömegek mozgatását és a felhőalapú adatfeldolgozást is.

Mint az az előbbi felsorolásból is látszik, nagyon sokrétű és szerteágazó folyamatokról beszélünk, amelyek lassan behálózják az egész ipari környezetünket. Okos gyárak, okos termelőeszközök, okos és intelligens járművek, önálló döntéshozatalra képes eszközök, amelyek az egymás közötti információcsere segítségével emberi beavatkozás nélkül képesek váratlan eseményre helyesen reagálni, vagy az ember által definiált célt saját erőforrásaikat mozgósítva, szervezve és átszervezve elérni.

A folyamat egyértelműen a humán erőforrás felhasználásának minimalizálása és a mesterséges intelligencia által irányított okos eszközök maximális használata felé irányul. Alapjában véve ez a trend kívánatos, hiszen az ember, mint jelentős hibaforrás kizárása a folyamatokból a termelés és ellátás maximális minőségét, időfüggetlenségét és egyenletességét jelenti.

Ahhoz, hogy a különböző folyamatok, az intelligens gyárak, közlekedési rendszerek el tudják látni a rájuk bízott feladatokat, több feltételnek is meg kell felelniük.

Az első feltétel, hogy a folyamatokban részt vevő rendszer elemek megfelelő adatokat, információkat legyenek képesek előállítani, amelyek leírják a pillanatnyi állapotukat, az általuk végzett tevékenység aktuális lefolyását. A következő feltétel, hogy az így keletkezett adatokat, információkat megosszák egymással, illetve továbbítsák egy biztonságos, állandóan rendelkezésre álló tárhelyre – ezt a felhőalapú számítógépes adatfeldolgozási eljárások teszik lehetővé.

Mivel minden egyes, a rendszerbe integrált eszköz adatokat állít elő, másodpercenként elképzeltetlen mennyiségű adat forgalmát kell lebonyolítani. Egészen különleges adatforgalmazási eljárások felhasználásával ez a probléma megoldható.

Az adatok, információk óriási mennyisége kezelhetetlen tömegként semmire nem jó, ezért ki kell fejleszteni olyan intelligens adatelemző eljárásokat, amelyek segítségével egyszerű, átlátható és döntésképesítő támogató információs képernyők jeleníthetők meg, illetve a mesterséges intelligencia különböző szintjein dolgozó rendszerek képesek önálló döntéseket hozni.

A döntéseket felügyelő rendszereknek tanulóképeseknek kell lenniük, hogy a már előfordult problémák megoldásait adaptálni tudják a hasonló, de még az előzőekben nem tapasztalt meghibásodások kezelésére.

### 3. MIBŐL ÉPÜL FEL AZ I4.0?

Bármilyen I4.0 -ás rendszer esetében meg tudunk különböztetni legalább négy alapvető tudományterületet, amelyek egymással összekapcsolva azt működőképessé teszik.

#### 3.1 Mechanika

A mechanikai komponens képezi a rendszer gerincét, felel a mozgás, az erőátvitel, a statika, a kinematika és dinamika megvalósításáért.

#### 3.2 Elektrotechnika

Az elektrotechnikai komponens képezi a rendszer idegpályáit, felel a megfelelő impulzusok átviteléért.

#### 3.3 Informatika

Az informatikai komponens képezi a rendszer irányító, vezérlő és kontroll impulzusainak forrását. Adatok, információk forrása és címzettje is.

#### 3.4 Kibernetika

A kibernetikai komponens képezi a rendszer agyát, vezérlését, intelligenciáját. Biztosítja a tanulást, a megfelelő reakciók generálását, a rendszer lelke.

Természetesen a fenti felosztás csak nagy vonalakban tükrözi egy I4.0 kompatibilis rendszer fő alkotóelemeit, azonban világosan látjuk, hogy a hagyományos gépész, villamosági szakember, informatikus és kibernetikus felosztást bátran elfelejthetjük. Valójában a mechatronika az, ami a legjobban megközelíti az általunk meghatározott tartalmat, ám az informatikát és a kibernetikát is integrálnunk kell, ha pontosak akarunk lenni. Így talán egy új kifejezés, a MEKI (Mechanika-

Elektronika – Kibernetika – Informatika) lehet a legkifejezőbb...

Az előbbi gondolatsor valójában azt hivatott bemutatni, hogy milyen sokrétű, szerteágazó tudásra és információhalmazra van szüksége annak a szakembernek, aki helyt akar állni az ipar 4.0 által életre hívott versenyben.

### 4. SWOT ANALÍZIS

Ha elvégzünk egy SWOT analízist az I4.0-t illetően, érdekes összefüggésekre deríthetünk fényt.

Vegyük először az **erősségeket**:

- Az eljárások hatékonysága nagyobb pontossághoz és minőséghez vezet
- Biztonság
- Kevesebb emberi beavatkozás
- Személyre szabás
- Energiafelhasználás csökkentése
- Lean és egyszerű nyomon követés

Lássuk a **lehetőségeket**:

- Versenyelőny a folyamatok hatékonyságából kifolyólag
- Tudásalapú ipari megoldások
- Flexibilitás

Nézzük a **gyengeségeket**:

- Adatbiztonság a felhőben
- Bonyolult és drága implementáció
- Csökkenő emberi munkaszükséglet
- A technológiától való idegenkedés gátolja a bevezetést
- Félelem a gyermekbetegségektől

Vessük össze a **veszélyekkel**:

- Visszautasítás az alkalmazottak részéről
- Konkurenciától való félelem -nem osztják meg az adatokat
- Félelem a munka külsőtől való megrendelése miatt
- E-commerce –alacsony megtérülési mutató

A felsorolt mutatókból látható, hogy az erősségek között szerepel a kevesebb emberi munka – csökken az emberi hiba lehetősége, ugyanakkor a gyengeségek között szerepel a csökkenő emberi munkaszükséglet – ez munkaerőfelesleget idézhet elő a munkaerő piacán.

Látszólag ellentmondás feszül a két állítás között, azonban részletesebben vizsgálva kiderül, hogy a szükséges munkaerő struktúrája változik. Kevesebb alacsony képzettségű, rutin

műveleteket végző, betanított munkaerőre van igény, viszont megemelkedik a magasan kvalifikált, gépészethez, elektrotechnikához, informatikához és kibernetikához értő szakemberek iránti igény.

Milyen szakemberek kellene tehát?

## 5. MILYEN KÉPZÉS KELL?

Kilenc olyan kulcstechnológiát lehet felsorolni, amelyek oktatása elengedhetetlen egy mai, a kor követelményeinek megfelelő, felsőfokú végzettséggel rendelkező szakember részére:

1. Szimulációs rendszerek (Process Simulation),
2. Kiterjesztett valóság (Augmented Reality),
3. Autonóm robotok (Autonomous Robots),
4. Additív gyártás (Additive Manufacturing),
5. A dolgok internete (Internet of Things),
6. Felhő alapú számítástechnika (Cloud Computing),
7. Big data és elemzés (Big Data Transfer and Processing),
8. Kiber biztonság (Cyber Security),
9. Horizontális és vertikális rendszer integráció (Horizontal and Vertical System Integration).

Jól látható, hogy túlnyomórészt az elektronika, informatika és kibernetika témakörei azok, amelyben előre kell lépni és a megfelelő laboratóriumok kialakításával, a hozzá illeszkedő tananyag elkészítésével – természetesen e-learning alapon – el kell érni az ipar számára értékes és hasznos szakemberek képzését. Nyilvánvaló, hogy a képzés nyertesei nemcsak a vállalatok, hanem a képzésben résztvevők is, hiszen munkaerő-piaci pozíciójuk magasan az ilyen képzést nem abszolválóké felett lesz.

Tudatosítanunk kell azonban, hogy a megszerzett tudást megerősítő gyakorlati készségek elsajátítását lehetővé tevő szakmai kapcsolatok megerősítése, új kapcsolatok létrehozása nélkül a laborok és a tantárgyi tematikák sem használhatók megfelelő hatékonysággal.

A modern oktatásban – és az itt szereplő sokféle tudományág miatt törvényszerűen – csak a projektorientált, önálló és kollektív feladatmegoldásokat lehetővé tevő módszertan alkalmazása hozhat megfelelő eredményt.

## 6. TANTÁRGYI TEMATIKÁK

A kulcstechnológiákhoz szorosan kapcsolódó tantárgyi tematikák előkészítése, oktathatóvá tétele és mielőbbi bevezetése a mindennapi

rutinba meghatározza az innováció sikerességét. Minden késlekedés, hezitálás hátrányosan érintheti az egyetemet magát, de a képzésben résztvevő hallgatókat is. A végzős hallgatók elhelyezkedésének akadályja lehet a modern technológiák ismeretének hiánya, a gyakorlati képzésben résztvevő hallgatók pedig hamarabb találkozhatnak a vállalatoknál az I4.0 kihívásaival, mint a képzési helyükön.

Milyen tantárgyi tematikák felelnek meg a kulcstechnológiák valamint a képzés szempontjából? Vegyük sorba őket:

### *Szenzorotechnika és mérés technika*

A szenzor és mérés technika döntő jelentőségű, hiszen az intelligens rendszerek adatforrásait jelentik. A termelésben, a szállításban, a raktározásban – a sor szinte végtelen – mindenütt jelen vannak az érzékelők, a mérőműszerek, amelyek adatok tömegét állítják elő és küldik tovább tárolás és feldolgozás céljából.

### *Kommunikációs technológiák*

A szenzorokból és mérés technikai elemekből származó hatalmas adatmennyiség továbbítása nem kis feladat. Az adatáramlás sebessége, megbízhatósága, redundáns biztosítása hatalmas feladatot ró az ezzel a szegmensen foglalkozó szakemberekre. Tudatosítanunk kell azonban, hogy – bár nem kimondottan informatikai képzést nyújtó intézményekről van szó – ahhoz, hogy megtalálják a közös hangot a felhasználók és a fejlesztők, a felhasználóknak is tisztában kell lenniük az adatforgalmazás elméleti alapjaival és technikai hátterével is.

### *Irányítástechnika*

Minden intelligens gyár alapeleme a megfelelő irányítástechnikai felszereltség. Mellőzve a részleteket, nyilvánvaló, hogy az előbb említett mérés technikai és kommunikációs technológiai bázisra épülő irányítástechnika a kulcsa egy jól működő, autonóm gyártásnak, anyagellátásnak – és a sort folytathatnánk. A szabályozás, vezérlés témakörét nem ismerő, a munkaerő piacára éppen belépő fiatalnak esélye sincs nem egy jó helyre, egyáltalán bármilyen munkahelyre bekerülni.

### *Programozás és szimuláció*

Itt meg kell állnunk egy pillanatra. Jogos a kérdés: programozás? A programozás valóban egy külön tudomány, azonban a programozás része a feladatmegoldás algoritmizációja is. Az algoritmizáció viszont szisztematikus gondolkodást igénylő, elemző és integráló munka, amire egy kibernetikus rendszerrel

dolgozó felhasználónak elengedhetetlenül szüksége van. Valójában nem programozási nyelvek megtanulása a lényeg, hanem a probléma-analízis, az absztrakció, dedukció, az indukció folyamatainak és összefüggéseinek megértése és alkalmazásának elsajátítása a cél.

#### *Hajtástechnológiák*

Ha Nemo kapitány gondolatát idézem, amit a Nautilus bejárati nyílása fölé íratott: „Mobilis is mobilis”, akkor egyértelmű, hogy mozgásban van minden körülöttünk. A mozgást pedig csak megfelelő eszközökkel, célzott tervezéssel, alapos számítások és méretezés után tudjuk előállítani. Nemcsak a mozgások elindítása, hanem a megfelelő időben és helyen történő megállítása is komoly feladatot jelent a jövő mérnökei számára. Egyre gyorsabb, egyre pontosabb, egyre erősebb hajtásokra, mozgást előállító egységekre van szükség, a szerszámgépek főorsóitól kezdve az önvezető elektromos hajtású gépkocsig, és a lista korántsem teljes. Ma egy átlagos személygépkocsiban több, mint 50 villanymotor van a különböző mozgások, mozgatások biztosítására. Belátható, hogy a hajtások ismerete elengedhetetlen egy pályakezdő számára.

#### *Robotok és programozásuk*

A gyártásban, anyagellátásban egyre nagyobb szerepet töltenek be a különféle robotok, a velük kapcsolatos technológiák. A legfejlettebb rendszerek kollaboratív robotokat alkalmaznak, melyek képesek az ember környezetében „empatikusan” viselkedni, mozogni, különböző feladatokat ellátni. Már nem a hagyományos robotizáció a meghatározó, hanem az emberrel egy térben együtt dolgozó robotok világa az, amibe a végzős hallgatók belépnek. A kollaboratív robotok tulajdonságainak, lehetőségeinek, korlátainak ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy biztos talajt érezzenek a lábuk alatt az egyetemet elhagyó fiatal mérnökök. Természetesen a robottechnika és technológia ismerete elképzelhetetlen az előzőekben említett alapismeretek elsajátítása nélkül.

#### *Anyagmozgatás és raktározás*

Az már látszik, hogy igaz az a mondás, hogy minden mindennel összefügg (Alain Aspect, 1982 -es kísérlete). A mi esetünkben – mivel egy komplett intelligens gyárról beszélünk – az anyagellátás, mozgatás, raktározás, nyilvántartás erős összefüggést mutat a gyártórendszerekkel. Nemcsak az anyag, hanem a szerszámellátás és a kiegészítő anyagokkal

való ellátás is kritikus egy automatikus rendszerben. A megfelelő szakismeret, az összefonódások, ok-okozati összefüggések ismerete, a különböző stratégiák, nyilvántartási rendszerek, egymással történő kommunikációja olyan hálót képez, amely ismerete nélkül áttekinthetetlen lesz a gyártmány útja a nyersanyagtól a késztermékig. Kellenek az ilyen irányú ismeretek, ez minden kétséget kizáróan így van.

#### *Biztonságtechnológia a gyártásban*

Elérkeztünk az egyik legfontosabb, az utóbbi időben egyre inkább a figyelem középpontjába kerülő technológiához. A nagy mennyiségű adat biztonságos továbbítása, tárolása, feldolgozása, a belőlük származó információk visszajuttatása, az irányításhoz szükséges további feldolgozás biztonsága – mind olyan magas szintű figyelmet kíván, amely a kiberbiztonság feladatkörébe tartozik. Mai világunkban, ahol az adatokhoz való hozzáférés mindennapos tranzakció, kritikus jelentőségű a jól képzett szakemberek jelenléte és munkája a különböző rendszerek működtetése terén. Csak ismételni tudom az előzőekben már felsorolt összefüggéseket – nincs biztonságban egyetlen komponens sem egy intelligens gyárban, ha nem tudunk gondoskodni a megfelelő szintű védelemről és elhárításról, valamint az esetleges okozott károk minimalizálásáról vagy eliminálásáról.

#### *Gyártásszervezés és felügyelet*

Ahhoz, hogy egy gyártórendszer, egy „okos” gyár működhessen, rendkívüli mértékben megnövekszik az igény olyan gyártásszervezést támogató rendszerek iránt, amelyek képesek önállóan, emberi beavatkozás nélkül kezelni a váratlan helyzeteket, megoldani a megrendelők kívánságai szerint megváltozott gyártási programok futtatását, felügyelni az anyagellátás, gyártás, kiszállítás menetét. A feladatot csak jól képzett, a gyártásszervezést és a támogató rendszereket kiválóan ismerő szakemberek tudják elvégezni, a nyilvánvaló összefüggések ismeretében.

#### *Vállalati felügyeleti rendszerek*

A vállalati felügyeleti rendszerek témaköre szorosan kapcsolódik az előbbi szervezési feladatkörhöz, kiegészítve a döntéstámogató rendszerekkel, valamint az egyéb, kiegészítő feladatokat ellátó rendszerekkel. Az egy képernyős összefoglalók, az egész rendszerről szűrt, tagolt és súlyozott információkat szolgáltató felügyeleti rendszerek tervezése, beüzemelése majd üzemeltetése elképzelhetetlen a kiszolgált rendszerek, a

feldolgozandó adatok és információk, a felhasználók igényeinek ismerete nélkül.

## 7. MIK A TEENDŐK?

Ahhoz, hogy meg tudjunk felelni az előttünk álló feladatoknak, a teljesség igénye nélkül sorolom fel a teendőket - hiszen egy rendkívül dinamikus folyamatról lévén szó, szinte hetek alatt változhatnak a követelmények:

- ✓ megfelelő felszereltséggel rendelkező laboratórium kiépítése,
- ✓ a laboratórium felszereltségéhez igazodó tantárgyi program (programok) kialakítása,
- ✓ a megszerzett tudást megerősítő gyakorlati készségek elsajátítását lehetővé tevő szakmai kapcsolatok megerősítése, új kapcsolatok létrehozása,
- ✓ projektorientált, önálló és kollektív feladat-megoldásokat lehetővé tevő módszertan alkalmazása,
- ✓ a hallgatók bevonása a laborfelszerelés kialakításába,
- ✓ Tudományos Diákköri Konferencia – témák kiírása,
- ✓ megfelelő szakdolgozati témák kiírása,
- ✓ az Ipar 4.0 szakterületeihez kapcsolódó tantárgyak projektorientált szervezése – laborfejlesztési feladatok, segédeszközök tervezése és gyártása,
- ✓ Kandó Kálmán, Neumann János és Bánki Donát együttműködése – közös projektek megfogalmazása,
- ✓ pályázatok és hallgatói és tanári mobilitás-programok szervezése.

Amint a felsorolásból is kitűnik, van mit tenni annak érdekében, hogy az Óbudai Egyetemen végzett hallgatók meg tudjanak felelni a velük szemben támasztott igényeknek.

## 8. ÖSSZEGZÉS

Az elmondottak alapján megállapíthatjuk, hogy a munkaerő szerepe megváltozik. A passzív gépkezelői-operátori tevékenység átalakul aktív, kreatív, problémamegoldó, optimális innovatív megoldásokat kereső munkává, melynek feltételeit az egyetemi képzésben nagyon gyorsan meg kell teremteni. Abban az esetben, ha szemléletváltás, a környezet innovációja, az új tanulmányi programok, tantárgyak nem épülnek be az oktatásba belátható (1-2 év) időn belül, visszafordíthatatlan folyamat, a lemaradás és a kimaradás folyamat fog elindulni és lavinaként maga alá temeti a megújulásra képteleneket.

Tudom, erős szavak. Az élet azonban nem áll meg, a fejlődés exponenciális. Nagyon gyorsan kell cselekedni.

Az egyik megoldás lehet a vállalati szféra bevonása a képzésbe. Egyre növekszik azoknak a vállalatoknak a száma, amelyek saját szakemberképzést indítanak, saját erőforrásaikat képezik ki. Nagyon fel lehetne gyorsítani a felkészítés ütemét, ha erős szövetségben az erre nyitott vállalatokkal közös platformokon el lehetne indítani képzéseket, amelyekre a későbbiekben biztosan lehet építeni.

## 13. IRODALOM

- [1] <http://www.industry4.hu/hu/ipar4>
- [2] <https://autopro.hu/trend/>
- [3] <https://www.i40platform.hu/>
- [4] <http://www.festo-didactic.com>
- [5] <https://www.boschrexroth.com/hu/hu/felno-ttkepzes/ipar-4-0-oktatas/>
- [6] <http://smartfactory.de/en/>
- [7] <http://www.cnc.hu/digitalization/>
- [8] <http://www.techmonitor.hu/>

# IPARI CT HOSSZMÉRÉSI FOLYAMATÁNAK ELEMZÉSE

## ANALYSIS OF DIMENSIONAL INDUSTRIAL CT MEASUREMENT PROCESS

*Drégelyi-Kiss Ágota, PhD, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Az ipari gyakorlatban egyre elterjedtebben használják az ún. ipari CT berendezéseket roncsolásmentes anyagvizsgálatok mellett dimenzionális mérésekre. A CT-vel történő három dimenziós, optikai elven történő hosszúságmérések népszerűek, mivel a mérések ideje a 3D mérőgépekkel történő méret-meghatározáshoz képest lényegesen kisebb, valamint belső méretek is meghatározhatók roncsolásmentesen, amelyekre egyéb hosszmérőeszközök elérhetőség hiányában nem adtak megoldást. Cikkemben egy alumíniumból készült tesztadarab dimenzionális mérésének tervezését, folyamatát mutatom be ipari CT-vel történő meghatározás során.

**ABSTRACT.** More recently, the industrial CT equipment is used not only for non-destructive analysis but to perform geometrical evaluations. The three dimensional, optical dimensional measurements made by CT are popular because the measurement time is much more less than in case of traditional 3D measurement machines, furthermore the inner geometries can be determined by non-destructive manner. In this article the design of an aluminum test cube by industrial CT are described and the evaluation of the measurement data are shown.

### 1. BEVEZETÉS

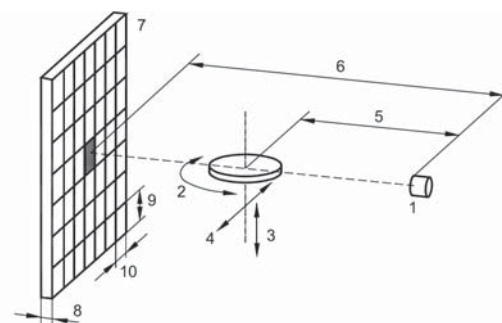
A computer tomográf (CT) egyre elterjedtebben használt mérőeszköz az ipari gyakorlatban. Először anyagvizsgálati feladatokat végzetek rajta, mind öntési hibák, levegő zárványok és nagyobb méretű szennyező anyagok mennyisége az alkatrészekben, majd 2000-es évek második felében a technológiai fejlődés következtében hosszúságok mérésére is elkezdték használni. Számos olyan gépelem van, amelynek méretei roncsolásmentesen nem mérhetőek meg, mint például a nagyon mély és szűk furatok átmérője, beszúrások méretei. Az ipari CT-k alkalmazásával lehetővé vált, hogy ezen méreteket roncsolásmentesen meghatározhassuk. Ma a CT-vel történő hosszúságok 0,01 mm felbontást érnek el, mert

a bonyolult mérési eljárás nem teszi lehetővé a pontosabb méret meghatározást [1].

A CT rendszer röntgen sugárforrásból, forgóasztalból, egy röntgen detektorból és egy adatfeldolgozó egységből áll, amely számításokat végez, vizualizál és elemzi a mérési adatokat. A CT berendezés felépítése az 1. ábrán látható. A CT lényegileg a röntgensugárforrásból, a detektorból és a vizsgálati tárgyat mozgató egységből áll. A mozgatóegységnek van translációs (3,4) és transzformációs tengelye (2). A translációs tengelyek a vizsgálati tárgy pozicionálására szolgálnak, míg a forgó tengely a mérések alatt forgó tengelyként működik. A translációs vagy segédtengelyeken történő mozgatással érhető el, hogy a tárgy geometriai nagyítását a detektorsíkon beállítsuk. A nagyítás mértéke a következőképpen határozható meg:

$$M = \frac{SDD}{SOD}$$

ahol *SDD*: a sugárforrás és detektor távolság (6), *SOD*: a sugárforrás és a vizsgálati tárgy távolsága (5).



1. ábra: Ipari CT-vel történő mérés elve [1]  
(1: sugárforrás, 2: forgó tengely, 3: z-tengely, 4: y-tengely, 5: sugárforrás - tárgy távolság (SOD), 6: sugárforrás - detektor távolság (SDD), 7: detektor; 8: szcintillátor vastagsága, 9: pixel magasság, 10: pixel szélesség)

A mérés végrehajtásához a vizsgálati tárgyat általában 360°-ban megforgatjuk a röntgensugárban, és nagy számú egy vagy kétdimenziós képfelvételt készítünk, attól függően, hogy milyen a detektor ill. a sugárforrás.

A CT berendezéssel elkészült 2D képek feldolgozásának első lépése a 3D rekonstrukció, amelynek során a kétdimenziós képekből matematikai algoritmusokkal három dimenziós térfogatot állítunk elő. A rekonstruált 3D képek voxelekből állnak össze. A voxel a 3D képek elemi része, hasonlóképpen, ahogy a pixel a 2D képek elemi része. A voxelméret függ a 2D képek pixelméretétől, és a  $SOD$ ,  $SDD$  távolságoktól. A voxel mérete meghatározó a hosszmerések pontosságának az elérésében.

A rekonstrukció során kapott térfogati modellben minden voxelnek lesz egy szűrkeségi értéke, amely attól függ, hogy ebben a térfogatelemben mennyi röntgensugárzás nyelődött el. Ezután meg kell határozni, hogy hol található a határvonal, mely voxelek tartoznak a tárgyhoz és melyek tartoznak a háttérhez, a levegőhöz. A küszöbérték (threshold) azt határozza meg, hogy mely szűrkeségi értéket tekintjük az egyik vagy a másik anyaghoz tartozónak. A küszöbérték kritikus paraméter a felület határának a meghatározásához, tehát nagy jelentőségű a későbbi geometriai mérések pontosságát illetően.

A küszöbérték meghatározása után a felület előállítás a következő lépés. A számítógéppel történő felület-meghatározással előállt modellen 3D mérés technikai módszerekkel méréseket tudunk végezni.

## 2. ETALONOK A CT-VEL TÖRTÉNŐ DIMENZIONÁLIS MÉRÉSTECHNIKÁBAN

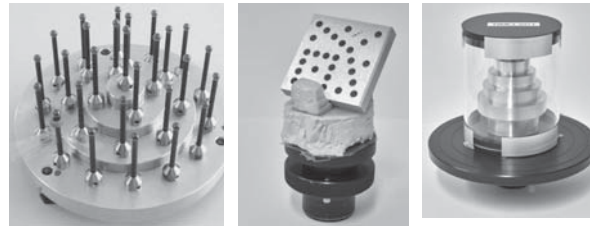
Az ipari CT-vel történő dimenzionális mérések alapja, hogy a mérés eredménye visszavezethetősége adott legyen. A mérések visszavezethetősége egy mérési eredménynek az a tulajdonsága, hogy dokumentált, mérési bizonytalansággal ellátott kalibrálások megszakítatlan láncolatán keresztül kapcsolódik megadott referenciákhoz [2]. Hosszmerések esetén ez azt jelenti, hogy kalibrált etalonokon keresztül a mérési eredménynek a méter definíciójáig kell visszavezetett legyen.

A CT-vel történő mérések során a mérési folyamat nagyon összetett, a szabványok és előírások még nem kidolgozottak, így a mérés visszavezetettsége nem teljesen megoldott [3]. A CT gépek gyártói és a nemzetközi mérésügyi szervezetek a legkülönbözőbb etalonokat és vizsgálati darabokat találták ki saját gépeik ellenőrzésére, kalibrálására (2. ábra, [4]):

a) 27 rubin gömböt tartalmazó „torta” (Zeiss)

b) 28 db 4 mm-es átmérőjű furattal ellátott sík (48 mm x 48 mm x 8 mm)(PTB)

c) lépcsős tengely (NMIJ)

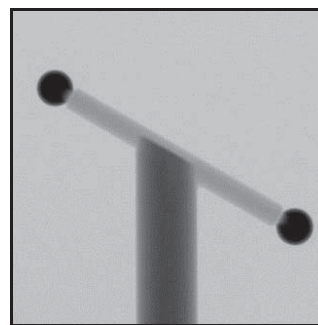


2. ábra: CT mérésben használatos etalonok

Az etalonok nagyon pontosan megmunkált elemeket tartalmaznak, a méreteiket kalibrált tapintós koordináta mérőgépekkel nagy pontossággal határozzák meg, így a referenciaértékeket az etalonok kalibrálási bizonyítványából ismerjük.

A CT-vel történő hosszmeréseknél tehát az etalonnal történő mérés az első lépés, és a kapott mérési eredményeket összevetjük az etalon kalibrálási bizonyítványában szereplő értékkel. Amennyiben ez eltérő, akkor a CT-vel történő mérési folyamat felület meghatározási fázisában korrekciót hajtunk végre, hogy a kapott 3D modellen a kalibrálási jegyzőkönyvben szereplő érték jelenjen meg a CT mérés végeredményeként.

Ezt az adat vagy skála korrekciót általában golyós rúd (ball bar, 3. ábra) vagy furatos rúd (hole bar) felhasználásával végezzük el.



3. ábra: CT felvétel a golyós rúdról

Itt ismert a két gömb vagy a két furat középpontjának a referencia távolsága, és skála korrekció során a voxel méretet változtatjuk meg a következő szerint:

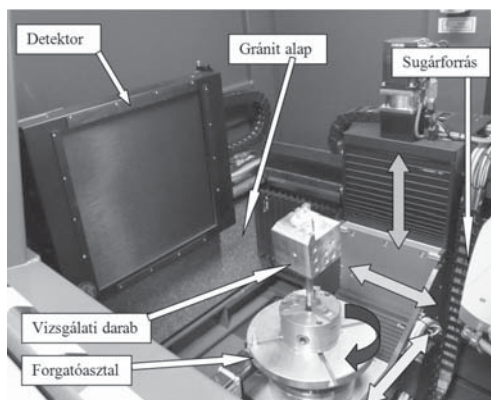
$$s = s_0 \cdot \frac{d_{Ref.}}{d_{mért}}$$

ahol  $s_0$  az eredeti voxelméret,  $s$  az új voxelméret,  $d_{Ref.}$  a referencia méret,  $d_{mért}$  a mért méret.

A skálakorrekciót minden esetben ajánlott elvégezni, ha a vizsgálati tárgy sugárforrástól való távolsága megváltozik (SOD változik), és célszerű a referencia etalont a vizsgálati tárggyal egy időben mérni, amennyiben ez megoldható [5].

### 3. CT-VEL TÖRTÉNŐ MÉRÉSI FOLYAMAT BIZONYTALANSÁGI ÖSSZETEVŐI

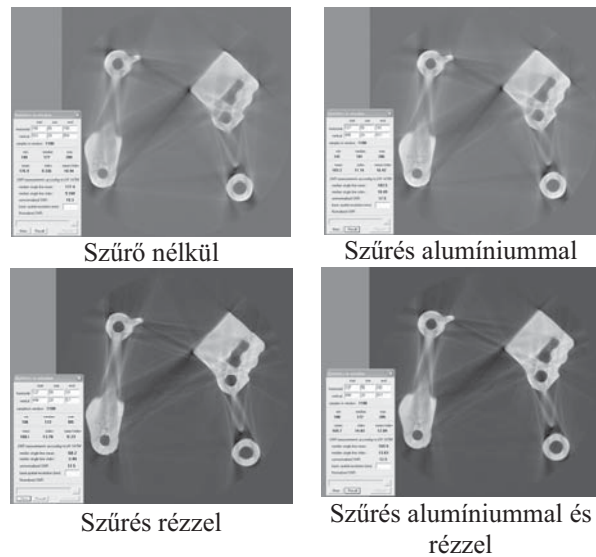
Az ipari CT-vel történő hosszmeréseket befolyásoló tényezők a mérési folyamat összetettsége miatt számos okra vezethető vissza [3]. A mérésre hatással van a CT berendezés típusa és felépítése (röntgen sugárforrás, tengelyek, detektor és burkolat, 4. ábra); a vizsgálati tárgy és a mérési paraméterek; az elemzési folyamat (rekonstrukciós szoftver és a voxel adatok alapján végzett adatelemzések); a környezeti körülmények (hőmérséklet, páratartalom, rezgések, por); valamint a mérési stratégia és ennek alkalmazása.



4. ábra: A CT berendezés munkaterének elemi és mozgásviszonyai

#### 3.1. CT berendezésre visszavezethető hatások

Az ipari CT berendezésben található sugárforrás működéséhez be kell állítani a kívánt feszültséget, áramerősséget. E két paraméter meghatározza a teljesítményt, a sugárnyaláb intenzitását. A feszültségben és áramerősségben fellépő ingadozások a projekciók képi minőségében okoznak eltéréseket. A sugárzás spektrumát változtatja meg a szűrésre szolgáló anyagok jelenléte (rézlemez, ón lemez), e szűrők anyagvastagságának változása és az anyag inhomogenitása a keletkező kép minőségét befolyásolja (5. ábra).



5. ábra: A szűrés változtatásának hatása a CT kép minőségére [6]

A röntgencső működése közben felmelegszik, ez a mérési folyamatba hibát visz bele. A vizsgálati tárgyat körülforgatjuk, és 720-1440 db projekció készül a tárgyról, amely képek elkészülési ideje alatt a kezdeti 20 °C-os hőmérséklet megemelkedhet akár 5 °C-kal is a vizsgálat idejétől függően. A hosszmerések során, különösen a mikrométeres méretek meghatározása során nagyon fontos, hogy a hőtágulásból származó méretváltozást ki tudjuk küszöbölni. Ez jelenleg még nem megoldott technológiailag, ez is okozza azt, hogy kis méretek mérésére nem alkalmas ez a mérési eljárás.

A CT berendezés fizikai felépítésében fontosak a tengelyek, ezek helyzete egymáshoz képest és a detektorhoz képest. A tengelyek nem tökéletesen merőlegesek egymásra, amely mérési bizonytalanságot okoz. A vizsgálati darab súlya megváltoztatja a forgó tengely jellemzőit, gondosan kell eljárni, hogy hogyan helyezzük el a vizsgálati tárgyat a forgótengelyhez rögzítve.

A detektor kialakítása, jellemzői, minősége és működése nagy hatással van a keletkező 2D-s felvétel minőségére, és az azt követő hosszmerés pontosságának az alakulására. A detektornak olyan kialakítása van, hogy a külső és belső szórt sugárzásokat lehetőleg csökkentett mértékben detektálja. A detektor nem megfelelő hűtése az állapotát instabillá teheti, amely befolyásolja a mérés eredményét. A detektor pixelmérete és pixel száma fontos, mivel a mérés felbontóképességét meghatározza a nagyítás mellett. A minél magasabb



pixelszám azért előnyös, mert azonos sugárzási körülmények között egy jobb jel/zaj viszonyt eredményez.

A detektor minősége az időben változhat. A magas pixelszámú detektorok esetén gyakrabban előfordulnak különböző típusú pixelhibák, amelyeket a rekonstrukciós folyamat során rögzíteni kell, hogy ezen értékeket ne vegyük figyelembe a kiértékeléskor.

A CT berendezés környezete is befolyásolja a hosszmerések eredményét. Légkondicionálás szükséges, hogy stabil hőmérsékletet biztosítsunk, amely elengedhetetlen feltétele a stabil geometriai elemek eléréséhez. A hőmérsékleti gradienseket figyelembe kell venni, és – mintától függően – figyelni kell a környezet páratartalmának közel állandó értéken tartására is. A mérés során fellépő rezgések és zajhatások befolyásolhatják a mérés eredményét. A 2D projekciók képi minőségét erősen befolyásolják a berendezésből vagy a gép nem sugárzó komponenseiből származó szórt sugárzás mértéke. Minél több ilyen jellegű, nem a mérésből eredő szórt sugárzást detektálunk, annál gyengébb kontrasztú és minőségű projekciókat kapunk eredményül [6].

### *3.2. A vizsgálati tárgyval és a mérési paraméterekkel kapcsolatos hatások*

A vizsgálati tárgyat megfelelően kell rögzíteni, hogy a CT felvétel készítése közben a forgatás során ne mozduljon el. A tárgy elmozdulása asszimmetrikus szkennelést eredményez, amely rekonstrukciós hibát okoz. A vizsgálati tárgy elhelyezését a forgatóasztalon úgy kell elvégezni, hogy lehetőleg a forgatási tengellyel merőleges síkok ne legyenek, mert ez esetben homályos felvételeket kapunk erről a síkról.

A vizsgálati tárgy anyaga a röntgensugárzás abszorpciójának mértékében fontos tényező. A magas abszorbeáló képességű anyagok (pl. a magasabb rendszámú elemek) gyengébb jelű projekciókat eredményeznek.

A mérési paraméterek közül a kép minőségét jelentősen befolyásolja az elő-szűrés. Ez megvalósítható például különböző vastagságú alumínium, réz, ón lapka használatával. Szűrő nélkül és a csak alumíniummal történő szűrés esetén homályosabb felvételt kapunk, mint a másik két típus esetén.

A forgatás során be kell állítani, hány képet kívánunk készíteni egy körülforgatás alatt. A forgási szög beállításának pontossága miatt

célszerű, hogy a felvett képek száma lehetőleg a 180 többszöröse legyen (pl. 720; 1080; 1440). Folyamatos forgatás a detektor típusától függően lehetséges. Minél nagyobb számú röntgenfelvételt készítünk, annál jobb lesz a felbontás, de annál hosszabbá válik a rekonstrukciós idő is. Ha a forgatás során nem tudunk minden szögben felvételeket készíteni, az rekonstrukciós hibákhoz vezethet.

A tárgy pozíciója a detektor és a sugárforrás között meghatározza a nagyítás mértékét. Ennek beállítása fontos az elérhető legnagyobb mérési pontossághoz.

### *3.3. Az elemzési folyamat hatása*

Az elemzési fázis akkor kezdődik el, amikor a nagy számú 2D röntgenfelvétel elkészül. Ennek első lépése a rekonstrukció, amikor a 2D adatokból voxel adatokat állítunk elő. A különböző ipari CT berendezésekhez tartozó rekonstrukciós szoftverek egymástól eltérő algoritmusok használatával végeznek számításokat, és a kapott eredmények nem abszolút mértékűek, az algoritmustól függően eltérhetnek egymástól, amelyek hatással vannak a mérés eredményére.

Az elemzési folyamat második lépése a már rekonstruált modellen történő tulajdonképpen 3D mérések elvégzése. Hasonlóan a 3D mérés technikai szoftverekhez az ipari CT berendezéshez tartozó szoftverek a voxel adatokra különféle algoritmusok szerint felületmodellt hoznak létre. A felületmodell készítése során a voxel modell pontjaira illeszthetünk geometriai elemeket, mint például hengereket, síkokat, éleket. Az illesztés során az alkalmazott matematikai algoritmus befolyással van a kapott eredményre, a hossz mérés bizonytalanságára.

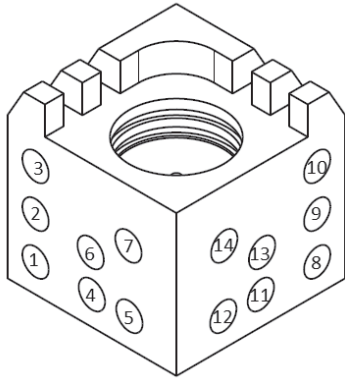
### *3.4. Egyéb hatások*

Az ipari CT berendezéssel történő hosszmeréseket erősen befolyásolja az alkalmazott mérési stratégia. A mérési stratégia meghatározásánál körültekintően kell eljárni az etalonok használatával. Lehetőség szerint a vizsgálati tárgyval együtt kell az etalont is mérni, hogy a mérés visszavezethetősége megfelelő legyen. Így az etalon méretét ismerve a vizsgálati tárgy méretei is megfelelő pontosságúak lesznek. A mérés körülményeit, a paraméterek beállított értékeit gondosan rögzíteni kell, hogy az eredmények reprodukálhatóak legyenek.

## 4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 4.1. Vizsgálati munkadarab tervezése

Az ipari CT berendezés metrológiai tulajdonságainak vizsgálatára terveztem egy teszt munkadarabot, amely anyaga AlMgSi1, befoglaló mérete 90mm x 90mm x 90mm (6. ábra).



6. ábra: Alumínium vizsgálati tesztadarab a furatok sorszámaival

### 4.2. Mérés körülményei

A dimenzionális mérésekhez GE phoenix v|tome|x m mikro-CT berendezést használtam. 2024x2024 pixeles detektorral, max. 320 W, 320 kV-os röntgenső. A mérés során használt beállítások: 250 kV, 360  $\mu$ A, 330 ms-os képfelvétel, binning 1x1, szűrők: 0,5 mm Sn és 0,5 mm Cu, felvett képek száma 1440. Az így elért voxelméret 73,44  $\mu$ m. A rekonstrukcióhoz használt szoftver a VGStudio Max 2.2.2. volt.

## 5. MÉRÉSEK ÉS ÉRTÉKELESLÉSEK

### 5.1. Etalon mérése és korrekció

Az alumínium tömb átvilágítása és az 1440 projekció elkészítése közel másfél órát vett igénybe. A rekonstrukció után elsőként meghatároztam az etalonon szereplő két rubingömb távolságát. Eredményként 15,908 mm-t kaptam. Következő lépésben korrekciót kellett alkalmazni, mivel a kapott méret nem egyezett az etalon kalibrált méretével.

$d_{mért}=15,908$  mm;  $d_{Ref}=15,9329$  mm;  
 $s_o=0,07344$  mm.

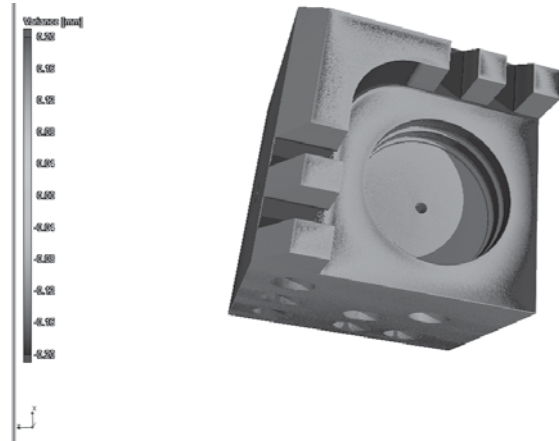
Az új voxelméret tehát:

$$s = 0,07344 \cdot \frac{15,9329}{15,908} = 0,07356 \text{ mm}$$

### 5.2. Alumínium teszt darab mérése

A felületmodell elkészítésével elérhetővé válik, hogy a vizsgálati darab méreteit

összehasonlítsuk akár a névleges CAD-moddellel, akár a vizsgálati darab méreteinek helyes értékeivel. Jelen munkában a mérés során kapott felületmodellt a munkadarab névleges CAD modelljével vettem össze (7. ábra).



7. ábra: 3D rekonstrukció illesztése CAD modellhez

Az illesztés során automatikus beállítást alkalmazva a szoftver a legnagyobb pozitív eltérést vörös színnel, míg a legnagyobb negatív eltérést lila színnel jelölte meg. A zöld színű területek ezek legközelebb a névleges mérethez. A baloldali skáláról leolvasott értékek alapján az eltérés + 0,2 és - 0,2 mm között van.

## 6. ÖSSZEGZÉS

Egy vizsgálati darab megtervezése egy CT berendezésre komplex feladat. Figyelembe kell venni, hogy mit szeretnék mérni, milyen gépen szeretnék mérni és nem utolsó sorban a gyárthatóságot.

A kutatás további célja, hogy a későbbiek során a vizsgálati darab pontos méretét meghatározzuk tapintós, 3D mérés technika segítségével, majd az így előállt mérési adatokon alapuló CAD modellt hasonlítsuk össze az ipari CT berendezéssel kapott eredményekkel. A pontos mérettel történő összehasonlítással elérhetővé válik, hogy az ipari CT hosszmerések bizonytalanságát meghatározzuk a CT mérés paramétereinek a függvényében forgácsolt alkatrész esetén.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-IV-6 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

## IRODALOM

[1] VDI/VDE 2630 Part 1.1: Computed tomography in dimensional measurement - Fundamentals and definitions, 2014.

[2] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition), JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections)

[3] VDI/VDE 2630 Part 1.2: Computed tomography in dimensional measurement -

Influencing variables on measurement results and recommendations for computed-tomography dimensional measurements, 2010.

[4] Cantatore, A., & Müller, P. (2011). Introduction to computed tomography. Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering.

[5] Bartscher, M., Illemann, J., & Neuschaefer-Rube, U. (2016). ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation.

[6] Lifton, J. J. (2015). The influence of scatter and beam hardening in X-ray computed tomography for dimensional metrology (Doctoral dissertation, University of Southampton).

# NAGYMÉRETŰ NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK SZERKEZETINTEGRITÁSI SZÁMÍTÁSAIRÓL

## STRUCTURAL INTEGRITY CALCULATIONS OF LARGE SCALE PRESSURE VESSELS

*Fekete Tamás*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Az energetikai iparban használt, nagyméretű nyomástartó edények tervezése, üzembevételének engedélyezése és üzemeltetése során kiemelkedő szerepet töltenek be a biztonsági számítások. Manapság egy gyorsan fejlődő, multidiszciplináris tudományterület, a Szerkezetintegritás foglalkozik az üzemelő berendezések biztonsági elemzéseinek kérdéseivel. A Szerkezetintegritás új tudományos-mérnöki paradigmának tekinthető, amelynek alapja a felhasznált elméleti és kísérleti módszerek között fellelhető szinergikus kapcsolatok kihasználása. Az alábbiakban a Szerkezetintegritás koncepciójának lényegét ismertetjük.

**ABSTRACT.** Safety calculations are critical parts of the design, certification procedures and safety analyses of large scale pressure vessels, used in electric power generation industry. Recently a new scientific-engineering paradigm, Structural Integrity is being developed that is based on synergistic collaboration between a number of scientific and engineering disciplines. The article summarizes the essence of Structural Integrity.

### 1. BEVEZETÉS

A nagyméretű és nagy értékű műszaki létesítményeket, rendszereket (pl. a konvencionális és az atomerőműveket, a vegyipari üzemeket stb.) és szerkezeteket (pl. hidakat, repülőgépeket, hajókat stb.) valamilyen, korlátozott idejű – általában 15-60 éves– üzemeltetésre tervezik, az adott időszakban alkalmazott műszaki szabványok és irányelvek figyelembe vételével. A szabványok (pl. az ASME Code [3], [4], a KTA Standards [12], a VDI Standards [23]) és a tervezési irányelvek (pl. PNAE [20]) általában a megelőző néhány év vagy évtized tudományos ismeretszintjét, technológiai színvonalát jelenítik meg. A tervezés során történő betartásuk az esetek túlnyomó többségében biztosítja a szerkezetek megfelelő ideig tartó, biztonságos működtetését, azonban a technika történetében –ha ritkán is– előfordultak olyan események, ame-

lyek egy-egy szerkezet vagy berendezés emberi életet is követelő, katasztrófális tönkremeneteléhez vezettek [15] –és nem zárható ki abszolút biztonsággal, hogy ilyen események a jövőben nem fordulhatnak elő–. Ilyen esemény volt pl. a Titanic katasztrófája, majd később a Liberty-típusú hajók hideg tengeri viszonyok közötti sorozatos tönkremenetele [21]. Magyarországon a répcelaki CO<sub>2</sub> feldolgozó üzemben 1969 január 2-án következett be katasztrófális következményekkel járó ridegtöréses baleset. Az időjárás akkor már hosszabb ideje rendkívül hideg volt. A rendszer egyik nagyméretű és nagy nyomás alatt üzemelő nyomástartó edénye ridegtöréssel tönkrement. A baleset 9 ember életét kioltotta, sokan súlyosan megsérültek, és az anyagi kár is jelentős volt [13].

Az említett és nem említett, de hasonló balesetek hívták fel a mérnök társadalom figyelmét arra, hogy a szerkezeti acélok ridegtörésének okait, a ridegtörés bekövetkeztének feltételeit addig nem vették kellő mértékben figyelembe. A balesetek körülményeinek és kiváltó okainak tisztázása, valamint az általános tanulságok levonása után az eseményekben nem érintett, üzemelő létesítményekre vonatkozóan számításokat, anyagvizsgálatokat, valamint az elemzéseket verifikáló egyéb kísérleteket végeztek, amelyekkel felmérték a helyi kockázatokat, és javító intézkedéseket hoztak a veszélyek csökkentésére. A később üzembe állított, hasonló rendszerek esetén a tanulságokat már tervezési követelményként vették figyelembe. A szabványokba a ridegtörés veszélyével szembeni vizsgálatok, és az azokkal szemben támasztott követelmények némi késéssel kerültek be. Az atomenergetikai iparban, a nyomottvízes technológiával épített erőművek történetében a Rancho Seco (1978) és a Three Mile Island (1979) létesítményekben történt egy-egy, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség Nemzetközi Nukleáris Esemény Skáláján 5. fokozatba sorolt baleset. Ez a két rendkívüli esemény akkoriban arra hívta fel a figyelmet, hogy a rendszert kezelő személyzet tévedése, hibája miatt egy egyébként enyhe következményekkel járó üzemzavar (amely a mai besorolás szerint a

tervezési alapba tartozó várható üzemi eseménynek, vagy súlyosabb esetben tervezési üzemzavarnak lenne tekinthető) is súlyos következményekkel járó, tervezésen túli üzemzavarrá válhat (ld. az NBSZ 10. [18] és 3. [17] kötetét). Más, súlyos következményekkel járó ipari káresetekkel együtt [15] a felsorolt balesetek tanulságai jelentősen hozzájárultak a szerkezetintegritás fogalmának kialakulásához, és relatíve önálló, nagy gyakorlati jelentőséggel bíró, tudományos kutatási területté fejlődéséhez.

## 2. A SZERKEZETINTEGRITÁS FOGALMA

A nagyméretű és nagy értékű energetikai, erőművi berendezéseket korlátozott idejű üzemre tervezik. A korlátozott üzemidőre történő tervezés alapja az a régi tapasztalat, hogy a berendezések üzemeltetése közben a szerkezeti anyagok teherviselő kapacitása folyamatosan – és megfordíthatatlanul – csökken. A csökkenés annál gyorsabb, minél nagyobbak az anyagra ható igénybevételek. A szerkezeti anyagok viselkedésének ezt a fajta változását az anyag öregedésének nevezzük. A szerkezeti anyagok öregedését a bennük különböző hossz- és időskálákon zajló belső –elsősorban átrendeződéssel járó– folyamatok [16] okozzák, amelyek között keresztreakciók, keresztteffektusok is felléphetnek. Ezért az anyagok öregedésének leírása rendkívül összetett, nyitott tudományos kérdés, melynek megoldásában minden bizonynyal a modern termodinamika kulcsszerepet játszik majd [2]. Ma a nagyméretű berendezések mérnöki elemzése során a szerkezeti anyagok öregedésének gyakorlati szempontból legfontosabb megjelenési formáját, az *anyag ridegtörésre való hajlamának változását* kísérik kiemelt figyelemmel. Az öregedés egységes rendszerben történő leírása még a jövő feladatai közé tartozik [1].

A berendezések terveit a tervezés idején érvényes műszaki szabványok és irányelvek szem előtt tartásával dolgozzák ki. A műszaki szabványok és irányelvek általában ugyan a beruházást megelőző évek, évtizedek tudományos ismeretszintjét, színvonalát tükrözik, azonban figyelembevételük megkerülhetetlen, mert olyan –a szakterületre vonatkozó, az érintett szervezetek, szakértők közreműködésével létrehozott és közzétett– felhalmozott ismeretanyagot tartalmaznak, amely az előzőleg már bevált tervezési, gyártási, üzemeltetési, felügyeleti és karbantartási eljárásokat egységes rendszerben rögzíti és szabályozza. A szabályrendszer ki-

dolgozásának alapelve az, hogy az alkalmazásra ajánlott összefüggéseknek az adott szakterület problémáira egyszerűen áttekinthető és megoldható, olyan megoldásokat kell szolgáltatniuk, amelyek a berendezésekben zajló folyamatokat biztonsági szempontból kedvezőtlenebbnek ítélik meg, mint ahogyan azok a valóságban zajlanak. Ezt úgy nevezik, hogy a leíró összefüggéseknek a rendszerekben, szerkezetekben zajló jelenségeket *konzervatíván kell megítélniük*.

A műszaki szabványok, irányelvek és szabályzatok figyelembe vétele a tervezési folyamatban többek között azért nélkülözhetetlen, mert: (1) ezek a beruházásban érintettek számára közös nyelvet, értelmezési keretet teremtenek a biztonság és az elfogadható műszaki megoldások megítélése szempontjából; (2) a tervezőket segítik a jó megoldások kidolgozásában oly módon, hogy a már bevált konstrukciós elveket, megoldási módszereket ismertetik, azt feltételezve, hogy az addig kipróbált és bevált megoldások hasonló geometrián és hasonló üzemi körülmények között szintén beválnak majd. Ezzel „újrahasznosításra” kínálják fel a rögzített, ’kanonizált’ tudást; (3) a szabványok a bennük feldolgozott tudományos ismereteken túl, nagy mennyiségű, az ipari, üzemeltetési gyakorlatból, vagy mérésekből leszárt, tudományosan még nem teljesen tisztázott, fontos empirikus tapasztalatot is tartalmaznak, és ezeknek a tervekbe történő integrálása a megvalósítandó létesítmény megbízhatóságát, biztonságát növeli; (4) a szabványok a szerkezeti anyagok tulajdonságainak olyan, nagyszámú kísérleten alapuló, többszörösen ellenőrzött adatkönyvtárait tartalmazzák, amelyek még a berendezések legyártása előtt lehetővé teszik azok biztonsági határainak és a tervezési információk alapján megengedhető üzemidejének becslését.

Az erőművi berendezések, rendszerek tervei hosszú, több lépcsőből álló folyamat során alakulnak ki [11]. A tervezés első lépcsőjében a rendszer hőségmáját (termodinamikai/energetikai rendszertervét) alakítják ki. A tervek kidolgozásának második lépcsőjében a termodinamikai rendszerterv alapján –a klasszikus méretezési számításokkal– meghatározzák a folyamatok kiszolgálására létesítendő, nagyméretű főberendezések fő méreteit, és kiválasztják a hozzájuk szükséges anyagokat. A méretezési számításokat a beruházás támogatására választott műszaki szabványok előírásait követve végzik. A harmadik tervezési lépcső a részletes tervezés fázisa, melynek során a berendezések

alapvető méreteinek ismeretében kidolgozzák a rendszer megvalósításához (gyártásához, szereléséhez) szükséges részletes geometriai tervet. A részletes tervezés fázisa önmagában is igen bonyolult, iteratív folyamat, melynek eredménye a rendszer olyan pontosságú geometriai modellje a megfelelő anyagok specifikációival, amelyek alapján a komponensek gyártása, szerelése, majd a teljes rendszer készre szerelése végrehajtható. A részletes tervek kimunkálása során a méretezési számításokat folytatják azon elemekre, amelyeket ebben a tervezési fázisban specifikálnak. A tervezés negyedik fő lépésében készítik el a *tervezési biztonsági elemzéseket*, amelyek célja annak bizonyítása, hogy a nagyméretű és nagy igénybevételeknek kitett berendezések, rendszerek a beruházás célkitűzéseinek megfelelő üzemeltetés esetén, legalább a specifikációban meghatározott időtartamon át biztonságosan üzemeltethetők lesznek. A tervezők a berendezés várható élettartamát elsősorban az alkalmazott szabvány(ok) által ajánlott elemzési eljárásokkal, szabványos (ezért a ténylegesnél kedvezőlenebb) anyagjellemzőkkel, és az üzemelési technológiából származtatott, a külső környezet és a terhelések időfejlődésére tett, előzetes feltételezésekkel becsülik meg.

Mint már említettük, a szabványok tervezés során történő betartása az esetek túlnyomó többségében biztosította a szerkezetek megfelelő időn át történő biztonságos működtetését, azonban előfordultak már olyan katasztrófák is, amelyek akár emberi életet is követeltek [15]. Ezen katasztrófák utólagos elemzéseinek egyik fontos tanulsága az volt, hogy a katasztrófák jövőbeli elkerülése érdekében kiemelt figyelmet kell szentelni a biztonságos üzem és a katasztrófális meghibásodás közötti állapotok elemzésének. Ezért egészítették ki az energetikai nagyberendezések biztonsági számításait a törésmechanikai szempontokat is tartalmazó baleseti elemzésekkel, amelyek a berendezések ridegtöréssel szembeni biztonságát is értékelik. Az új szempontokkal kiegészített biztonsági számítások bevezetése idején, az akkor már üzemelő berendezésekre a hiányzó elemzéseket elvégezték, a később épülő tervezése során ezeket a számításokat már a tervezői biztonsági számítások részeként készítették el. Körülbelül innen számítható a *szerkezetintegritás*, mint önálló tudományos terület egyre gyorsabb fejlődése.

„A szerkezetintegritás a tudományos diszciplínák és a mérnöki technológiák azon

területeinek kiaknázása, amelyek a mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltetése érdekében a biztonságos üzem és a meghibásodás közötti tartomány elemzését szolgálják ...” áll az ESIS (European Structural Integrity Society, azaz az Európai Szerkezetintegritási Társaság) honlapján [7].

Mint már említettük, a tervező a berendezés várható élettartamát a szabvány által ajánlott számítási eljárásokkal, a szabványban rögzített (ezért konzervatív) anyagjellemzőkkel, és az üzemeltetési előírásokból származtatott, a külső környezet és a terhelések időfejlődésére vonatkozó feltételezett adatokból határozza meg, és erre vállal garanciát. A berendezések anyagvizsgálati és diagnosztikai programjait eredetileg azért írták elő, hogy azok a tervezői biztonsági számítások feltételeinek teljesülését ellenőrizzék. A konstruktőr által meghatározott *tervezési élettartam* általában rendkívül konzervatív és nagy bizonytalansággal terhelt. Az élettartam konzervatív volta könnyen belátható abból a tényből, hogy a berendezés számítások során feltételezett anyagjellemzői a valóságosnál biztosan kedvezőtlenebbek, továbbá a terheléseket és a külső környezeti feltételeket is kedvezőtlenebbnek választják, mint azok a valóságban várhatók. Mivel az elemzésekben használt, és a megvalósuló szerkezet anyagjellemzői, valamint a feltételezett és a majdan a berendezésre ható terhelések közötti különbség a tervezési biztonsági elemzések során ismeretlen, annak eredményei meglehetősen nagy bizonytalansággal terheltek.

A megvalósult, üzembe állított berendezés *műszakilag megengedhető élettartama* akkor határozható meg pontosabban (azaz kisebb bizonytalansággal), minél több és pontosabb információ áll rendelkezésre:

- a berendezés geometriájáról és az anyagában elhelyezkedő folytonossági hiányok méretéről és eloszlásáról;
- a berendezésben zajló technológiai folyamatok releváns paramétereiről és azok időfejlődéséről;
- a berendezést érő környezeti hatásokról és azok időfejlődéséről;
- a berendezésre ható mechanikai terhelésekről és azok időfejlődéséről;
- a szerkezeti anyagok viselkedéséről, és azok változásáról az üzemeltetés során (az anyag üzem közben várható öregedéséről), és

- olyan elemzési metodológiát használunk, amellyel a kérdéses érték a fenti információhalmaz alapján kellő pontossággal (és hozzá rendelt bizonytalansággal) számítható ki.

E szempontrendszer kielégítése nagyon összetett feladat. 30–50 évvel ezelőtt, amikor Amerikában, Európában és Magyarországon nagy számban építettek nagy nyomáson és magas hőmérsékleten üzemelő, nagyméretű vegyipari berendezéseket, egyre nagyobb egységteljesítményű, magas kezdeti paraméterű konvencionális erőművi blokkokat, valamint nagy egységteljesítményű, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten üzemelő atomerőművi blokkokat, a tudományos és a technológiai információgyűjtés lehetőségei nagyon korlátozottak voltak. Az utóbbi 20-30 évben a kvantumfizikában, az arra épülő alkalmazott tudományokban, a mikroelektronikában, valamint az informatikában bekövetkezett óriási fejlődés lehetővé tette:

- olyan mérési módszerek és eljárások kidolgozását és alkalmazását, amelyek segítségével a szerkezeti anyagok multiskálás (nano-mikro-mezo-makro) szerkezetét egyre mélyebben megismerhetjük;
- olyan diagnosztikai rendszerek kifejlesztését, amelyek a korábbiakhoz képest sokkal megbízhatóbb eredményeket szolgáltatnak;
- olyan teljesítményű hardverek és szoftverek alkalmazását a problémák megoldására, amelyekkel:
  - egy berendezésről üzem közben korábban elérhetetlen mennyiségű és részletességű adat gyűjthető;
  - a számítások során egyre fejlettebb, pontosabb modelleket alkalmazhatunk a problémák megoldására;

Ezek a feltételek tették lehetővé a szerkezetintegritás, mint tudományág utóbbi időkben tapasztalható, rohamos fejlődését. A szerkezetintegritás magába foglalja a témában felhalmozott és tudományosan rendszerezett általános ismereteket, a témakörben releváns, felhasznált elméleteket (pl. kontinuumok termomechanikája, törésmechanika, anyagtudományok, méréselmélet stb.), az alkalmazott elméleti és gyakorlati módszereket (pl. szimulációs módszerek, mechanikai anyagvizsgálati módszerek, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek stb.); ám ezek nem önmagukban fontosak, hanem a közöttük fellelhető,

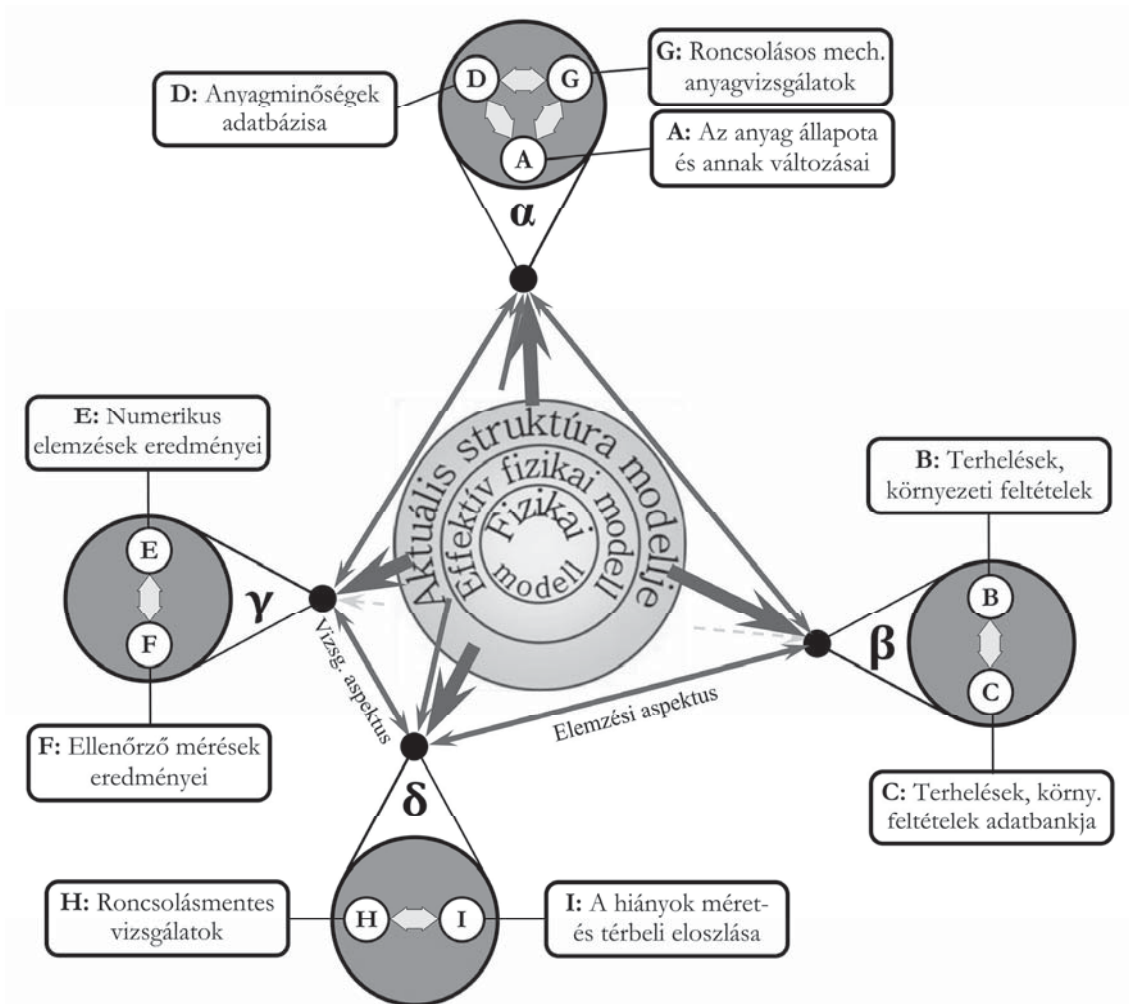
szinergikus kölcsönhatásokkal együtt, egységes rendszerben kezelve. Ez a megközelítés az utóbbi évtizedekben egy egyre inkább terjedő problémamegoldási modellé vált. Ilyen értelemben a szerkezetintegritás Kuhn nyomán [14] speciális tudományos-mérnöki paradigmának tekinthető.

Bár egy erőművi berendezés szerkezetintegritási számításai során mindig *az adott rendszerre vonatkozó, egyedi feladatot* kell megoldani, a problémakör egységes módszertani keretben tárgyalható. Eszerint a szerkezetintegritási vizsgálatok eredményei az alábbi négy kulcsszempont egységes rendszerben történő tárgyalásával érhetők el:

- Modellezési aspektus, melynek célja a szerkezetek számítási modelljének elméleti megalapozása, és a berendezés-specifikus modellek kidolgozása; a modellezés a következő tevékenységeket foglalja magába:
  - a jelenségkör általános fizikai modelljének kérdései (a jelenségkör mögött álló fizikai háttérelmélet megtalálása);
  - a rendszer effektív fizikai modelljének kidolgozása az általános fizikai modelltől (a konkrét rendszer leírására szolgáló speciális egyenletek levezetése az általános modelltől);
  - a berendezés aktuális modelljének megalkotása (a konkrét, numerikus számításokra alkalmas modell kidolgozása az effektív fizikai modell alapján);
- Elemzési aspektus, melynek feladata, illetve célja a szerkezet állapotának számításokkal történő meghatározása, figyelembe véve:
  - az anyagban létező vagy feltételezett folytonossági hiányok méret- és térbeli eloszlását;
  - a terhelési, környezeti feltételek időfejlődését;
  - a szerkezeti anyagok állapotának időben történő változását.
- Vizsgálati aspektus, amely kísérleti/mérési eljárásokkal szolgáltat adatokat az elemzések számára:
  - roncsolásmentes anyagvizsgálatokkal, amelyek adatokat szolgáltatnak az elemzések során figyelembe vett folytonossági hiányok méret- és térbeli eloszlásáról, illetve verifikálják a számításokban figyelembe vett hiányok megfelelőségét;

- roncsolásos vizsgálatokkal, amelyekből az elemzések számára szükséges, releváns anyagjellemző adatok levezethetők –a vizsgálatok megtervezése és végrehajtása során figyelembe véve az anyagok öregedését–;
  - ellenőrző mérésekkel, amelyek az elemzésekkel meghatározott állapotjellemzőket verifikálják.
- Informatikai aspektus, amelynek feladata:
- a terhelésekről, környezeti feltételekről rögzítendő adatok gyűjtése és azok megfelelő rendszerben történő feldolgozása, tárolása;
  - a szerkezeti anyagok –elemzések során felhasználandó jellemzőinek– gyűjtése és tárolása;
  - a számítások végrehajtásának, a keletkezett eredmények rögzítésének, további feldolgozásának és tárolásának lehetővé tétele.

A fenti kulcsszempontok egységes rendszerben történő ábrázolására fejlesztettük ki Lukács szerkezetintegritási tetraéder modellje [15] (200. old.) alapján a szerkezetintegritás hipergráf modelljét, melyet az 1. ábrán mutatunk be. A modell kialakítása mögött álló megfontolásokat részletesebben egy korábbi tanulmányban ismertettük [8]. A hipergráf modellben a modellezési aspektust a tetraéder súlypontjába helyezett koncentrikus gömbök rendszere ábrázolja, amely azt fejezi ki, hogy a szerkezetintegritási vizsgálatok során a berendezés állapotát egy, az aktuális szerkezet alkotta geometrián értelmezett fizikai probléma leíró egyenleteinek megoldásai jellemzik. A konkrét rendszerre vonatkozó összefüggések mögött egy általános fizikai elmélet áll (amely ma még további kutatások tárgyát képezi). A tetraéder csúcaiban a gráf ún. hipercomópontjai helyezkednek el, amelyek az egymással valamely módon összehasonlítható mennyiségek egymással való erős kapcsolatát fejezik ki.



1. ábra: A szerkezetintegritás hipergráf modellje



### 3. A KONCEPCIÓ ALKALMAZÁSA NAGY-MÉRETŰ NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK BIZTONSÁGI ELEMZÉSEI SORÁN

Az előzőekben vázolt szerkezetintegritási koncepciót ipari feladat megoldása során alkalmaztuk. A cél az MVM PA Zrt. blokkjaiban üzemelő, négy VVER-440/V-213Cs típusú reaktortartály *műszakilag megengedhető üzemidejének* realisztikus becslése volt. Mind a négy tartály a nyomottvízes reaktorok második generációjába tartozik, és 1976 és 1986 között a pilseni Skoda művekben gyártották azokat. A reaktortartályok tervezői biztonsági számításai szerint a *tervezési üzemidejük* legalább 40 üzemév. A tervezői biztonsági elemzések az 1980-as évek elején készültek, az akkor érvényes szovjet műszaki szabványok előírásai és anyagjellemző adatai alapján. Tekintettel arra, hogy a berendezéseket a gyártóműben felszerelték a szerkezeti anyagok gyorsított öregítésére alkalmas rendszerrel, valamint megfelelő mennyiségű, a tartályok gyártása során, azok anyagából készített anyagvizsgálati próbatesttel, valamint az előírt anyagvizsgálati ellenőrző programot végrehajtották, a munka megkezdésének idejére ismertté váltak azok az anyagjellemző adatok, amelyek az egyedileg legyártott reaktortartályokat külön-külön jellemezték. Ezen felül a gyártóműben a tartályokat gondosan átvizsgálták, és dokumentálták az anyagokban észlelt, számottevő méretű hibákat. A berendezéseket üzembehelyezésük előtt, majd üzembe helyezés után is az előírásoknak megfelelő rendszerességgel, roncsolásmentes vizsgálatoknak vetették alá. A roncsolásmentes vizsgálatokat az időközben felmerült követelményeknek eleget téve minősítették, így azok eredményei kellően megbízhatónak tekinthetők. Mindezek összegezve azt jelentik, hogy a biztonsági számításokat a szabványban rögzített értékek helyett az egyes berendezésekre jellemző anyagjellemzőkkel lehetett elvégezni. A vizsgálatok berendezés-specifikus jellege azért volt fontos, mert az anyagvizsgálati ellenőrző program eredményei szerint az egyes tartályok anyagjellemző mennyiségei és öregedési tulajdonságai között szisztematikus eltérések vannak.

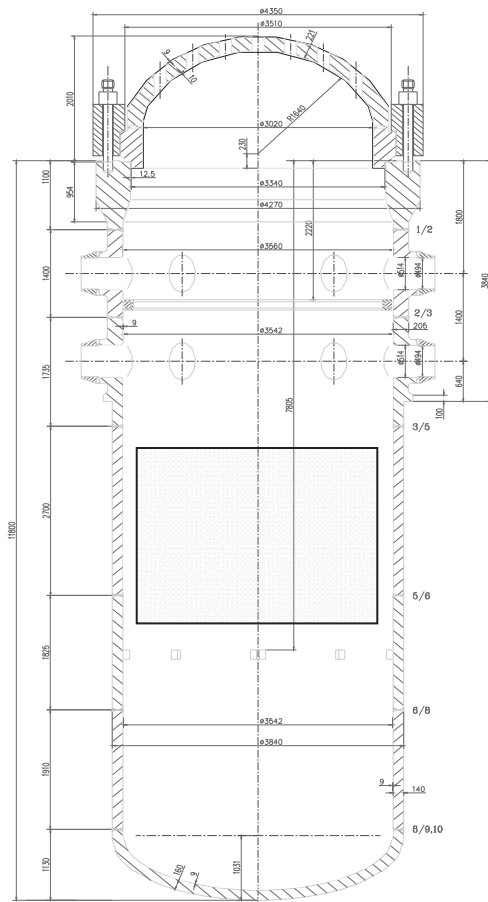
#### 3.1. A VVER-440 reaktortartályok fő jellemzői

Egy VVER-440/V-213Cs reaktortartályt hét részből, a peremből, a felső és az alsó csonkzónából, három hengeres gyűrűből, valamint az alsó elliptikus fenékből állították össze, fedettívű hegesztési technológiával. A teljes szerkezet magassága 11 800 mm, belső átmérő-

je  $\approx 3\,540$  mm. A tartály hét fő komponensét 15H2MFA típusú, Cr-Mo-V-mal ötvözött reaktoracélból, kovácsolással készítették. A perem felül 465 mm vastag, alsó része a csonkzónával megegyezően 205 mm vastagságú. A hengeres gyűrűk 140 mm vastagságúak, míg az elliptikus fenék 160 mm vastag. A csonkzónák mindegyike hat csonkot tartalmaz, amelyekhez a fővízköri vezetékek egy-egy  $\varnothing 492$  mm ága csatlakozik. A reaktortartály belső felületét 08H18N10T típusú, fedőporos hegesztéssel felvitt, korrózióálló acéllal plattírozták. A plattírozás termomechanikai jellemzői jelentősen különböznek az alapanyagétól, ami makroszkopikus szinten is észrevehetően inhomogénné teszi a rendszert. A tartály 15H2MFA alapanyaga a mikroskálán BCC kristályszerkezettel bír, ennek következtében makroszkopikus skálán határozott törési tulajdonságaiban határozott rideg-szívós átmenettel jellemezhető viselkedést mutat. A rideg-szívós átmenetet a kritikus ridegtörési átmeneti hőmérséklettel jellemzik, amely a szerkezeti anyag öregedésére igen érzékeny. Az energiatermelő zóna hossza  $\approx 2\,500$  mm; vízszintes metszete hatszög-szimmetriát mutat. A 2. ábrán bemutatjuk a reaktortartály fő méreteket tartalmazó hosszmetését, valamint egy még beszerelés előtt álló tartály fényképét.

#### 3.2. A VVER-440 reaktortartályok nyomás alatti hűtés számításainak módszere és eredményei

A reaktortartályok biztonsági elemzéseinek módszertana a nemzetközi jó gyakorlaton [10], [22] alapult, de azt az előző pontban bemutatott általános koncepció alapján tovább fejlesztve, saját számítási metodikát alkalmaztunk [9]. Mint említettük, a projekt célja a tartályok műszakilag megengedhető üzemidejének realisztikus becslése volt. A tartályok műszakilag megengedhető üzemideje az az üzemidő, amelyet elérve a berendezés egy igen kis valószínűséggel bekövetkező esemény, a zóna üzemzavari vészhűtőrendszer beavatkozása következtében hirtelen hűtése során fellépő nyomás alatti hűtés esetén is még gyors –katasztrofális következmények veszélyével járó– repedésterjedés nélkül túlél. A *nyomás alatti hűtés* eseményt az angol *Pressurized Thermal Shock* kifejezésből alkotott *PTS* rövidítéssel nevezik még a magyar szaknyelvben is. A továbbiakban a szerkezetintegritási koncepció szerint, vázlatosan áttekintjük a számítások módszerét. Az érdeklődők a módszertan részletesebb kifejtését a [8] és [9] publikációkban találhatják meg.



2. ábra: Egy VVER-440/V-213Cs reaktortartály metszete a fő méretekkel (bal) és a tartály fényképe

Az elemzéseket a következő, berendezés-specifikus adatfajtákra alapoztuk, amelyek egy tartály esetén a következők:

- a tartály geometriai adatai, amelyeket a berendezések gyártási dokumentációja tartalmaz;
- a tartályon végzett ISI vizsgálatok eredményei: ezen adatok alapján bizonyítható volt, hogy a reaktortartályok plattírozása az öregedéssel érintett zónákban makroszkopikus szinten hibamentesnek tekinthető, továbbá az alapanyagaikban a gyártás után észlelt hibák stabilak maradtak; ezek alapján a számítási modellekben ésszerűen konzervatív méretű, ám realiztikus elhelyezkedésű (plattírozás alatti) repedéseket lehetett feltételezni;
- a neutron fluencia számítások eredményei: a validált reaktorfizikai számítások eredményei teremtettek alapot a tartályok öregedett állapotban érvényes anyagjellemzőinek a valóságot jobban közelítő meghatározásához;
- a tartály szerkezeti anyagainak termomechanikai jellemzői, amelyeket a gyártási dokumentáció tartalmaz;

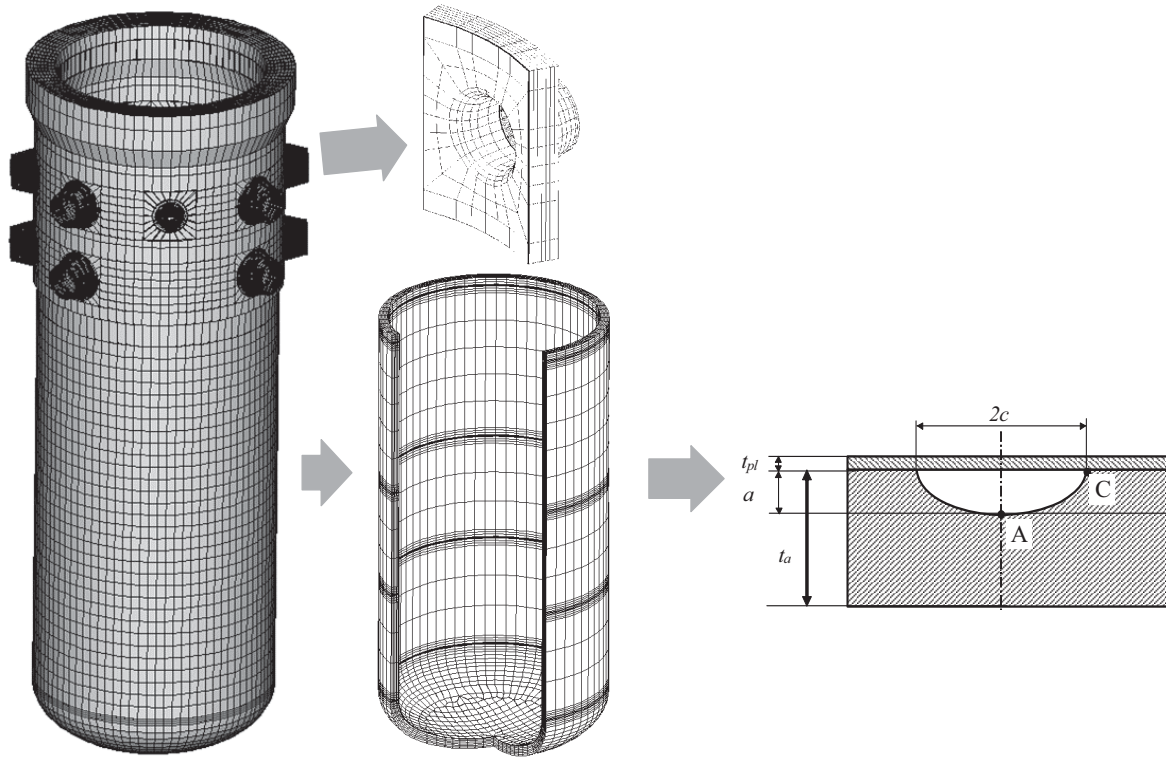
- a tartály anyagainak rugalmas-képlékeny jellemzői: a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során elvégzett mérések eredményein alapulnak;
- a tartály anyagainak törési szívósságát leíró törésmechanikai adatok: a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során elvégzett mérések eredményein alapuló adatok;
- a termohidraulikai tranziens-számítások által szolgáltatott eredmények: a termohidraulikai elemzések a megvalósult rendszerek aktuális –és jövőben feltételezhető– állapotaira készültek, és az üzemeltetés megkezdése óta végzett módosítások, átalakítások hatásait is figyelembe vették.

A számítások kiinduló adataiban figyelembe vettük a berendezések egyedi gyártásából adódó különbségeket is. Ezt egyebek között az indokolta, hogy a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során végzett mérések kimutatták, hogy az egyes berendezések anyagtulajdonságai és öregedési jellemzői között olyan szisztematikus eltérések léteznek, ame-

lyek indokoltá teszik a tartályok egyedi vizsgálatát.

A reaktortartályok elemzéseikhez 3 dimenziós véges elemes modelleket fejlesztettünk ki. Ezt egyfelől a zónából kiszökő inhomogén neutronfluxus okozta öregeedés térben inhomogén volta, másfelől a tartály ejtőkamrájába beáramló hűtőközeg erősen aszimmetrikus, inho-

mogén hőmérséklet- és sebesség-eloszlása indokolta. Így a számítások a valóságot lényegesen jobban közelítő geometriai modelleken készültek, mint a tervezői elemzések. A tartály teljes 3 dimenziós modellje, legjobban terhelt részeinek térbeli modelljei és a repedés sematikus modellje a 3. ábrán látható.



3. ábra: A VVER-440/V-213Cs reaktortartály teljes VEM modellje (bal), részmodelljei (közép) és a számítások során feltételezett repedések sematikus modellje (jobb)

A berendezések biztonsági számításai minden termohidraulikai tranziens esetre egy hőfeszültség [19] és hozzá csatolt törésmechanikai elemzést [6] jelentettek, a következő eljárás szerint (részleteiben ld. a [8] és [9] publikációkat):

- hőtani számítás, melynek során a tranziens idején a tartály falában kialakuló hőmérséklet-eloszlásokat határozzák meg a hűtőközeg hőmérséklete és a hűtőközeg – fal közötti hőátadási tényező függvényében, a falban hővezetést, a fal és a hűtőközeg között konvektív hőátadást feltételezve;
- szilárdsági számítás, melynek során a hőmérséklet-tranziens és a tartályban kialakuló nyomás hatására a tartályfalban kialakuló alakváltozási- és feszültségmezőt határozzák meg a rugalmasság- (ill.

képlékenységtan) egyenletei rendszerének [5] megoldásával;

- törésmechanikai elemzés, melynek során a falban feltételezett repedések stabilitási viszonyait elemzik a tranziens teljes során. A törésmechanikai számítás kiindulási adatait az előző lépésekben meghatározott hőmérséklet-, alakváltozási- és feszültség-eloszlások szolgáltatják. A stabilitásvizsgálat a következő lépésekből áll:
  - a repedésekre (pontosabban azok megfelelő pontjaira) jellemző törésmechanikai mérőszámok ( $K_I$  feszültségintenzitási tényező, vagy a  $J$ -integrál) meghatározása a repedés körüli deformáció, ill. feszültségmező alapján;
  - az anyag törési szívósságának ( $K_{Ic}$ ) meghatározása a repedések megfelelő pontjaira;

- a megfelelő paraméterek összehasonlítása, azaz a stabilitási feltétel teljesülésének vizsgálata –a vonatkozó szabályzatban megadott–  $K_I \leq K_{Ic}$  törés kritériumon keresztül,

A számítások eredményei azt bizonyították, hogy a vizsgált reaktortartályok műszakilag megengedhető élettartama az eredetileg garantált 40 üzemévet jelentősen –akár évtizedekkel is– meghaladhatja.

#### 4. ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány vázlatosan áttekintette a nagyméretű és nagy értékű energetikai berendezések szerkezetintegritási elemzéseinek alapjait. Bemutatta, hogy a szerkezetintegritási számítások gyökerei a tervezői biztonsági számításokra nyúlnak vissza, azonban míg a tervezői biztonsági elemzések nagymértékben szabványos, általános adatokra és becslésekre támaszkodnak, az üzemelő berendezésekre végzett számítások reálisabb alapokra helyezhetők. Ezt a szerkezetintegritási koncepció alapján megtervezett üzemeltetési, anyagvizsgálati és karbantartási program teszi lehetővé. Mindezek együtt vezethetnek oda, hogy megfelelő információk birtokában egy berendezés műszakilag megengedhető élettartama akkor is nagyobb, mint a tervezői elemzések alapján garantált érték, ha időközben a berendezéssel szemben támasztott biztonsági követelmények lényegesen megnöttek a tervezés idején érvényben lévőkhöz képest.

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ\_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott. A szerző ezúton is kifejezi külön köszönetét Dr. Elter Józsefnek és Rátkai Sándornak a több mint két évtizede tartó, sikeres szakmai együttműködésért és támogatásért.

#### 7. IRODALOM

- [1] Amiri M., Khonsari M.M.: On the Role of Entropy Generation in Processes Involving Fatigue. *Entropy* 14(1), 24–31. (2012) doi: 10.3390/e14010024
- [2] Amiri M., Modarres M.: An Entropy-Based Damage Characterization. *Entropy* 16, 6434–6463. (2014) doi:10.3390/e16126434
- [3] ASME Boiler & Pressure Vessel Code. The American Society of Mechanical Engineers, Section XI. New York (2007)

- [4] ASME 2015 Boiler and Pressure Vessel Code Complete Set, ASME, New York (2015)
- [5] Béda Gy., Kozák I., Verhás J.: *Kontinuummechanika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1986)
- [6] Broek D.: *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, Springer Netherlands (1982)
- [7] ESIS, <http://www.structuralintegrity.eu/esis/> megtekintve: 2017. szeptember 27.
- [8] Fekete T.: Methodological Developments in the Field of Structural Integrity Analyses of Large Scale Reactor Pressure Vessels in Hungary. *Fratt. ed Int. Strutt.* 36 78-98. (2016) DOI:10.3221/IGF-ESIS.36.09
- [9] Fekete T.: Review of pressurized thermal shock studies of Large Scale Reactor Pressure Vessels in Hungary, *Fratt. ed Int. Strutt.* 36 100-112. (2016). DOI: 10.3221/IGF-ESIS.36.10
- [10] Kang K.S., Kupča L. (eds.) *Pressurised Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment, Handbook on Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel*. IAEA TECDOC-1627, IAEA, Vienna (2010)
- [11] Kolonits F.: *Energetikai csővezetékek tervezése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1985)
- [12] KTA Program of Standards, [http://www.kta-gs.de/common/regel\\_prog1.htm](http://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm) megtekintve: 2017. október 1.
- [13] Kurucz I.: *Indulatok nélkül: a répcelaki robbanásról*. Magyar Olajipari Múzeum, Zalaegerszeg (2009)
- [14] Kuhn T.: *A tudományos forradalmak szerkezete*. Gondolat Kiadó, Budapest (1984)
- [15] Lukács J. (szerk): *Fejezetek a Szerkezetintegritás témaköréből*. Miskolci Egyetem, Miskolc (2012)
- [16] Maugin G.A.: *Configurational Forces. Thermomechanics, Physics, Mathematics and Numerics*. CRC Series: Modern Mechanics and Mathematics. CRC Press Taylor&Francis Group Boca Raton, London, New York (2010)
- [17] NBSZ 3. kötet. *Üzemelő atomerőművek tervezési követelményei*. OAH, Budapest (2015)
- [18] NBSZ 10. kötet. *Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai*. OAH, Budapest (2015)

- [19] Nowacki W.: Thermoelasticity. Pergamon Press, Oxford (1986)
- [20] PNAE G-7-002-86: Equipment and pipelines strength analysis norms for nuclear power plants. (in Russian) Energoatomizdat, Moscow (1990)
- [21] Sawyer L.W., Mitchell W.H.: The Liberty Ships: The History of the 'Emergency' Type Cargo Ships Constructed in the United States During World War II, Cornell Maritime Press, Cambridge, Maryland (1970)
- [22] Trampus P.: Ensuring Safety of Structures and Components at Nuclear Power Plants. Proc. Eng. 86 486–495 (2014)  
DOI:10.1016/j.proeng.2014.11.062
- [23] VDI Standards, <http://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/> megletekintve: 2017. szeptember 15.

# AZ IPAR DIGITALIZÁLÁSÁNAK FOLYAMATA EURÓPÁBAN

## HOW EUROPE CHANGES THE INDUSTRY BY DIGITIZATION

*Dr. Haidegger Géza, Beregi Richárd, MTA SZTAKI,  
[geza.haidegger@sztaki.mta.hu](mailto:geza.haidegger@sztaki.mta.hu); [beregi.richard@sztaki.mta.hu](mailto:beregi.richard@sztaki.mta.hu)*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** A nemzetgazdaság digitalizációs folyamatában az ipari termelés kiemelkedő szerephez jutott. Az újraiparosítás digitális, forradalmi átalakítását IPAR 4.0 fogalommal jelezzük, amit más országban az INDUSTRY 4.0 szóhasználattal definiálják ezt a kormányzati szándékkal is támogatott fejlődést. Az Európai Közösség, az OECD, továbbá az Európai Unió is számos kezdeményezéssel tett katalizáló lépéseket az infokommunikációs és automatizálási technológiák széleskörű ipari bevezetésére. Jelen cikkben a szerzők ismertetnek néhány kiemelkedően jelentős hatású nemzetközi akciócsomagot, amelyek a robotika, az ipari termelési, a kommunikációs és hálózati technológiák tudatos kutatás-fejlesztésére alapozódtak.

Az összefoglaló rámutat néhány kiemelkedő eseményre és szerveződésre, szabvány-fejlesztési igyekezetre, amelyek hol kevesebb, hol több nemzetközi figyelmet keltettek.

A beszámoló végén a szerzők ismertetik az EUREKA INTRO4.0, Hopenix Kft-vel közösen kidolgozott K+F+I projektben előkészített use-case prototípusokat, amelyek mintapéldaként szolgálhatnak más termelővállalatok számára.

**ABSTRACT.** Just as most other EU countries act on the development of a digital economy, and within that on the re-industrialization, - or in other words, on the implementation of the digitalized industry, - this process in Hungary initiated the establishment of the IPAR4.0 National Technology Platform. The paper gives an overview on the process of governmental and regional actions promoting the re-industrialization of the economies via robotics and digitalization. Industrial networking evolution takes place at least at two dimensions: on the technology-development of industrial machine-2-machine telecommunication techniques, and also at the technology of human-2-human networking. Some examples were elaborated and now being presented.

By the foundation of the Hungarian National IPAR4.0 Technology Platform, some working groups started to catch up with the international counterparts. The conclusion points out the

necessity of inclusive, open, EU-wide harmonized solutions. Unique automation solutions will not get a chance to survive as a sustainable enabling technique. At the end of the list of activities, the authors point out some planned use-case prototypes developed within the INTRO4.0 EUREKA project, to serve as best practice for other production-oriented SME-s.

### 1. BEVEZETÉS

A nemzetgazdaságok digitalizációs folyamatában az ipari termelés kiemelkedő szerephez jutott. Az elmúlt 10 év jelentős iparvállalati és szintén kiemelkedő és tudatos állami beavatkozásai révén Európa kezdi megerősíteni a fenntartható, magas hozzáadott értékű termelésben élenjáróvá váló ipar-gazdaságát. Ugyanakkor a világ más kontinensei között is jelentős potenciál-átrendeződési folyamatok indultak el, és ezeknek a dinamikáját figyelve sok kihívója akad továbbá lesz Európának.

A HARMADIK IPARI FORRADALOM-, mely kifejezésen az elektronika, mikroelektronika ipari automatizálásban elnyert megbízható szerepét értjük, megteremtette a hatékony, gazdaságos tömegtermelést. Erre alapozva indulhatott el az ipar jelentős mértékű digitalizációja, mely folyamat napjainkban is zajlik, hiszen még messze nem értük el a teljességet; noha mind horizontális, mind vertikális vonatkozásban jelentős átalakulás történt a termelő iparvállalatoknál. Különösen jól megfigyelhetők ezek a folyamatok a diszkrét alkatrészgyártásban, a szerelő és a folyamatos termelésű üzemekben (pl. vegyipar, olajipar), valamint nem elhanyagolhatóan a BATCH-jellegű gyártósoroknál (pl. élelmiszer- és gyógyszeripar).

Az ipari termelés számítógépekkel való „elárasztása” nagy anyagi ráfordítást igényelt, és nem minden esetben tudta teljesíteni az elvárt gazdasági eredményt. Jelentősebb időbe telt, amíg ráébredtünk az egyik alapvető hiányosságra: az integrációs technika elmaradottságára. A digitális számítógépekre, zömében PC-kategóriájú eszközök, majd az egyre jobban elterjedt workstation konfigurációjú berendezésekre sok vállalati

feladatot lehetett bízni, többek között a terméktervezésben, a gyártástervezésben, az anyagfolyamatok tervezésében és irányításában eredményezett hatékonyság-növekedést a digitalizálás.

Ezen folyamatok (gyorsabb vagy lassabb) sikeréhez kapcsolódtak a tudatos vállalati és kormányzati erőfeszítések, amelyeket a szakmai közösségek jelentős K+F erőfeszítései is kísérték. A szabványfejlesztésekben is igyekeztek a cégek és szervezetek ezekkel lépést is tartani.

## 2. NÉHÁNY JELENTŐS NEMZETKÖZI ÖSSZEFOGÁS

### *Szabványosítás*

Az iparilag fejlett országokban a szabványok fejlesztésére is sokat költöttek. Az Európai Közösségben a nemzeti szabványok helyett igyekeztek az eredmények egységesítésére, ez vezetett a EN European Norm kialakulásához, míg a volt szocialista országokban a GOST –ról az EN-re való áttérés további energiákat emésztett fel. Az USA-ban az IEEE és az ASME, SME mérnökszervezetek, szövetségek intenzív munkájával, majd az állami NIST szerepének megerősítésével tudtak jelentős eredményeket felmutatni a vezető iparvállalatok által kidolgozott technológiai megoldások egységesítésében.

Az ISO, mint a globális szabványszervezet, sajnos csak nagyon lassan és rossz hatékonysággal tudott lépést tartani olyan területek szabványosításában, mint az ipari adathálózatok, vagy az automatizált gyártás, az integráció, a CAD, CAM, CAXX technikák.

Az európai vezető cégek a kontinens országaiban zajló egyedi K+F munkák integrálásában látták a kiutat, és sok közösségi forrást sikerült megmozgattatni az ESPRIT, a MECHATRONIKA, az ACTS területeken folyó, nemzetközi összefogással kidolgozott eredmények eléréséhez.

Az ISO-n belüli jelentős átstrukturálódás után most a SMART FACTORY, kiberfizikai eszközök és rendszerek területen indult el egy munkacsoport Joint ISO/IEC „Smart Manufacturing Standards Map” Task Force névvel.

### *ENSZ, UNCTAD közös gondolkodás*

Az ENSZ tudomány-technológia fejlesztés bizottsága évente ülésezik. Megvitatják azokat a témákat, amelyek serkenthetik a digitális lehetőségek elterjedését egyben arra is

gondolva, hogy miként segíthetik elő a fejlett és a lemaradt országok közötti különbségek csökkenését, a lemaradás enyhítését.

### *Nagy multi-cég vállal vezető szerepet*

Érdekes és tanulságos példa az amerikai General Motors nevéhez fűződő kezdeményezés, amely a gyárak automatizálásának egységes számítógépi-hálózati protokollját (MAP Manufacturing Automation Protocol) kívánta gyorsabb ütemű fejlesztéssel elérhetővé tenni a gyáraiban. Gyártócsarnokaiba kizárólag olyan számítástechnikai-automatizálási eszközparkot tervezett megvásárolni az IBM-től, a SIEMENS-től, a FANUC-tól, a GE-től, az Allen-Bradley-től, a HP-től, stb. amelyek a 7-rétegű ISO-OSI modell szerinti protokoll-stackkel rendelkeztek. (Azok viszont még sok évig nem készültek el egységes megoldással.)

### *EK, EU-s K+F szervezetek EUREKA együttgondolkodása*

Az ezredfordulón már jól bevált lehetőséget kínált az EUREKA nemzetközi K+F kezdeményezés, amelyhez Magyarország elég korán csatlakozhatott (elsőként a vasfüggöny mögötti országok közül). Ennek keretében nemzetközi K+F konzorciumok nemzeti forrásból kaphattak támogatást illetve fedezetet munkájukhoz. A FACTORY témakörben évenkénti kétszeri tanácskozással összejött szakértők közös európai megoldásokra tettek javaslatokat, és ajánlatokat. 2004-ben arra vonatkozó javaslatot terjesztettek elő az akkor még EK, majd EU döntéshozói felé, hogy miként kellene az ipari termelés erős gyengülését megállítani, a Távol-Keletre kivonuló gyárakat visszahozni Európába, milyen módszerrel kellene hosszútávon, fenntarthatóan megreformálni Európa iparát.

## 3. SZAKMA-POLITIKAI HÁLÓZATOK MEGJELENÉSE: ETP-k

Az EU-s döntéshozók – az átláthatóságuk biztosításáért is – a szakma képviselőitől csak előre definiált eljárásrendben fogadtak el álláspontokat, fejlesztési terveket, ötleteket. A Platformoknak nevezett érdekcsoportoktól megkövetelték, hogy valamennyi érintett piaci, akadémiai, oktatási, kereskedelmi szabványosítási érdekelt harmonizált véleménye együttesen szerepeljen az előterjesztésekben. Így alakult meg - kéttucat másik platform mellett - az EURÓPAI

ManuFuture Technológia Platform, amely műszaki, társadalmi, technológiai és etikai szempontok alapján készített elő strukturált munkaanyagokat, mint pl. a 2020 víziót 2010 körül, majd annak továbbgondolásával a hiányt lefedő stratégiai kutatási terveket 2012 körül, míg végül azok konszenzusos kiértékelésével 2013-ban kidolgozták az u.n. ROAD-MAP munkaanyagot. Ez képezte mindazokat a K+F+I körvonalakat, amelyek alapján az Európai Bizottság kiírta a pályázati felhívásokat kétévenként frissített WORKPLAN – MUNKATERVEK formájában.

A ManuFuture ETP kivívta azt az elismerést és felelősséget, hogy a Bizottság elsődlegesen a ManuFuture ETP gondolatai és elképzelései alapján allokálja a rendelkezésre álló erőforrásokat Európa gazdasági, tudásalapú fejlődéséhez, ipari korszerűsítéséhez. A ManuFuture 2017-es év-értékelőjében büszkén mutatta be az alábbi EU-s adatokat részben saját sikerként is:

- EURÓPA ipara egyre fontosabb;
- a gyártás központi szerepet kap az iparban, hiszen a gyártás garantálja a prosperálást, a jólétet, az innovációt, és teremt munkahelyeket;
- Európa gyártási tevékenységével 30 millió közvetlen munkahelyet, és
- 60 millió közvetett, többnyire KKV munkahelyet tart fenn;
- valamint a teljes EU exportjának 80%-át állítja elő.

A ManuFuture ETP több munkacsoportban tevékenykedik. Az INDUSTRIAL Support Group is és a High-Level Group is évente legalább kétszer ülésezik. A jogi keretet az EFFRA, European Factories of the Future Szövetség biztosítja, ez a szervezet tud jogilag partnerként dolgozni a Bizottsággal.

#### *EFFRA, European Factories-of-the-Future Research Association*

Az EFFRA több mint 100 taggal, tagok csoportjaival rendelkezik, köztük kis- közepes- és nagyvállalatokkal, egyénekkal, szövetségekkel, de továbbra is nyitott, és PPP konstrukcióban a közösségi finanszírozás mellett ipari pénzeket is be tud vonni.

#### *EU DIGITIZATION – Digital Single Market*

A gazdaság, államigazgatás, egészségügy, oktatás, szabványosítás, stb. területein EU-szinten is foglalkoznak a digitalizáció

serkentésével. Az EU Biztosai gyakran terveznek programokat valamennyi tagországban, és látványosan megkövetelik a munkát a tagországok vezetőitől is.

#### *INDUSTRIE4.0*

Sokszor idézett esemény történt egy hannoveri Ipari Vásár-standon 2010 környékén, amikor Merkel kancellárasszonynak bemutatták a számítógépekkel összekapcsolt ipari gyártósorokat és a termelékenységekben, eredményességben kimutatható 25-30 %-os növekedést. A Kancellárasszony úgy vélekedett, hogy ha ez kihat a gazdaság majd-minden területére, akkor felér egy új, immáron negyedik ipari forradalommal. Majd hozzátette: Legyen Németország ennek az új, kiber-fizikai ipari rendszer technológiának bölcsője, és leggyorsabb alkalmazója, felhasználója, hasznosítója. Hamar megalakult az INDUSTRIE4.0 Nemzeti Technológiai Platform, mint nyitott szervezet, és a német mérnökakadémia, az ACATECH rövid időn belül előállította az átalakulás, átalakítás, a készülték-szint mérés, a befogadó készség mérés, az átalakítás-folyamat hatékonyság-feltérképezés módszertanait. Érdemes megjegyezni, hogy a németek felismerték a vezető szerepük adta piaci előnyök lehetőségét, valamennyi munka-anyagukat a nemzeti platformon belül is elsődlegesen angol nyelven, és csak részben a német nyelven állították elő. A módszertan tekintetében is példamutatóak, a platformjukban többszáz vállalat sok-száz use-case bemutatásával, leírásával adnak további kedvet az ipari vezetőknek.

#### *Sorra alakultak az EU-s és tengerentúli INDUSTRY 4.0 platformok*

Noha az USA-ban Connected Factories a neve, Kínában „Made-in –China2025”, Hollandiában SMART-Factories, a legtöbb országban a 4.0 elé teszik az IPAR megjelölést is. De a 4. ipari forradalom velejárájaként sok országban az ipari terület mellett máshol is jelentkezik az áttörés: Egészségügy-4.0, Oktatás-4.0, Kormányzás-4.0, stb.

#### *Öttinger EU-s Biztos kézbe veszi a folyamatot*

Noha több EU-s biztos által felügyelt tématerület is aktív a digitalizációs folyamatokban, Öttinger az EFFRA 2016 őszi értekezlet-konferencia nyitóbeszédében kifejezett követelményként beszélt a



tagországok IPAR4.0 platformjainak meglétéről és aktivitásáról, hozzáfűzve a nemzeti források allokálásának szükségességét is.

#### *First Stakeholder Forum – for Digitising EU Industry*

2017. január utolsó napjára összehívták az EU tagországok 4.0-Platform- érintettjeit Essenbe. Megfogalmazódott, hogy a gyártási folyamatokat a teljes termelési értéklánc mentén kell összehangolni, hiszen az elszigetelt digitalizációs megoldások zsákutcát jelentenek a továbblépés lehetetlensége miatt. A résztvevő országok standhelyet kaptak kivetítőkkel, monitorokkal a bemutatkozás interaktív és folyamatos lehetőségével.

#### *DIGITAL DAY-60, Róma*

2017. március 23. egy nagyon nevezetes nap volt: ekkor ünnepelte az EU valamennyi államfője és miniszterelnöke a Római Szerződés megkötésének 60. évfordulóját. Amikor 1957-ben a 6 vezető európai ország (német, olasz, francia és benelux államok) megállapodott az áruk és munkaerő szabad áramlásában, megteremtették az EK csiráját, amiből kinőtt maga az EU. Az ünneplés mellett miniszteri szintű megállapodásokat és tanácskozásokat is tartottak 4 tématerületen:

- Európa ipari digitalizálásáról,
- High-performance computing - HPC témában,
- kooperatív és kapcsolt, automatikus járművekről,
- munkahelyek és munkaerő-képességek digitális transzformáció hatásáról.

Az ipar digitalizálásának felgyorsításával és a nemzeti erőforrások allokálásával kapcsolatosan hangzottak el elvárások, ígérek. Itt külön érdemes részletezni az e-mobility, autonóm járművek terén a tanácskozás részleteit. Valamennyi tagország csúcs-szintű képviselője (minisztere vagy helyettese) beszámolt vállalásáról, majd egy közös nyilatkozat aláírásával rögzítették a terveket: a tagországok minden igyekezetükkel töreksenek egy egységes, harmonizált szabványos megoldás felé. Céljuk, hogy az utak, úthálózatok, közlekedési rendeletek, törvények, szabályozások egységesek legyenek az EU-ban, azaz az autonóm jármű ne csak egy ország határáig tudjon működni, közlekedni, hanem zavartalanul a teljes kontinensen. Ezen cél eléréséhez nagyon sok kérdést kell

megoldani elméletileg és a gyakorlati megvalósítás során is. Öttinger biztos kiemelte, hogy ezen közös EU-s fejlesztés lehet az EU eddigi legnagyobb, leghosszabb időre előreszóló akciója, összehangoltan fejlesztett-fejlesztendő területe, amely meghaladhatja az energetikait is.

Az ugyanakkor megtárgyalt „oktatás és munkahelyek” (jobs & skills) EU-s kihívások megoldására is nagy figyelmet kell fordítani EU-s szinten.

Érdekességként említhető meg a helyszínen, a kb. 200-as résztvevő által kitöltött on-line kérdőíves felmérés arról, hogy mely technológiák jelenthetik a legnagyobb lehetőséget a hagyományos kisvállalatok számára a közeljövőjében?

- A Felhő és HPC új technológiák vezet 23%-kal,
- IoT és CPS 19%,
- AI mesterséges intelligencia 17%
- BigData 15%
- Robotika 14%
- 3Ds nyomtatás 12%.

#### *EFFRA-Factories4.0 and beyond*

AZ EFFRA [1] kialakított egy állásfoglalást arról, hogy mit tekinthetünk INDUSTRY4,0 háttérü gyárnak, és ezt egy kétperces videóban összefoglalta. A Horizon 2020-ban az FoF 18-19-20 aktualizált Munkaprogramjához az 5 kulcs-prioritást az alábbiak szerint jelölte meg:

- agile value networks- egyedi és elosztott gyártás;
- gyártási kiválóság, selejtmentes, zero-hibás termelési és szolgáltatási folyamatok,
- humán tényezők, a technikai lehetőségekkel harmonizáló emberi kompetenciák,
- fenntartható értékláncok, körciklusos gyártási gazdaság,
- interoperábilis gyártási platformok-kapcsolódás gyártási szolgáltatásokkal.

#### *World-Manufacturing-Forum – Mexico*

A hajdan az Intelligent Manufacturing Systems –Japán-EU-USA globális együttműködésre épülő szövetség idén Mexico Cityben tartotta ülését. [2] A 30 országból érkezett magas rangú előadók anyagából áttekintést kaphatunk az európai és a nem-európai ipari digitalizációs folyamatok mindenhol intenzív mértékéről. India lehet a jövő legjelentősebb piaca, Kanada az erőforrás-gazdálkodásával lehet világbajnok, Olaszország a termékekhez integrált

szolgáltatásokban mutatott kimagasló eredményeket. Az Egyesült Királyságban az ipar digitalizációs folyamatára a CATAPULT szót használják, kifejezve a feszítetten gyorsuló újraparosodást.

*„CALL for DIGITAL INNOVATION HUBS” - 2017 nyár*

Az EU döntött arról, hogy 13, az EU-hoz később csatlakozott tagállamban legalább 30 Digitális Innovációs HUB-ot segít létrehozni. A DIH feladata, hogy egy átfogó felkészítő tanfolyami oktatást követően segítse elő az adott térség iparának digitalizációs folyamatát, leginkább azoknál a hagyományos KKV-knál, ahol lassan halad az új, korszerű IKT technológiák bevezetése, integrálása.

*Országokon belüli programok, akciók*

Több EU-s országban ősszel, az év vége felé is megszorozódnak a szakmai rendezvények. Magyarországon 2017 november elején került sor a H2020 EU-s Information Day-re, ahol a frissített Workprogramokhoz tartozó kiírásokat lehetett megismerni. Az Ipar digitalizációja iránti igény továbbra is nagyon nagy.

Bulgáriában is formálódik egy erősödő nemzeti platform-mag, de ott a kormányzat még nem elég aktív. Az egyetemi oldal igénye az ipari kapcsolatok révén egyre inkább összhangba kerül a valós felhasználói elvárásokkal.

*ManuFuture 2017 konferencia, Tallin*

A ManuFuture ERP kétévente, ősszel szokta megrendezni konferenciáját, a soros EU-s elnökség ideje alatt. [3] 2017-ben a BREXIT miatt Észtországhoz került az elnökség, és méltán érdemelték ki a rendezés jogát. Államelnök-asszonyuk olyan gondolatébresztő és követendő nyitóelőadást tartott kiberfizikai rendszerek térhódításáról és arról, hogy mit vár Észtország a ManuFuture által vizionált jövőtől már a közeljövőben, ami alapos megfontolást érdemel. A kétnapos, többszekciós előadások zárásával a gazdasági miniszter és a miniszterelnök is összefoglalták az általuk levont tanulságokat, hiszen többnyire jelen is voltak a rendezvény előadásain!

*A ManuFuture ETP HighLevelGroup beszámolója*

A HLG munkabizottság eredményeiről a ManuFuture elnöke számolt be. Az elmúlt 15 hónapban a VISION for EUROPEAN

MANUFACTURING 2030 munkaanyagot dolgoztuk ki. Azt 2017. decemberi dátummal tudja a ManuFuture közösség előterjeszteni a Bizottság több biztosa felé. A Vízio munkaanyagról a GTE 2018. nyári konferenciáján tudunk majd részleteiben beszámolni.

*2017. november –Brüsszel DEI –Platforms of National Initiatives*

A digitális gazdaság és társadalom témáért felelős Mariya Gabriel Biztosasszonytól meghívást kaptunk egy u.n. High-level governance munkaiülésre. Egyetértés született a Digitális Közös Piac stratégiájáról, és sokak egyetértettek a **Mesterséges Intelligencia** ambiciózus javaslatával. Nagy az elvárás a most indított Digitális Innovation Hub-ok irányában, amelyek segíteni hivatottak a KKV-k fejlesztésében, képzésében, képességeik növelésében és digitális átalakulásukban. A következő ilyen high-level munkaiülést 2018. március 27-28.-ra tűzték ki, akkor lesz egy nagyszabású SMART INDUSTRY kiállítás Párizs külvárosában. Minél több fiatal, ötleteli résztvevőt várnak a fórumra.

*Ország-szintű tanulmányok az ipar digitalizációjáról*

Az EU bekérte, összegyűjtötte az országok összefoglalóit, majd elkészítette az összevetésük, analízisük 17-oldalas első munkaváltozatát. A „digital-transformation-monitor” mutató terén Magyarország a 21. helyen áll az EU-ban. Ez a mutató 5 tényezőből tevődik össze:

- hálózati kiépítettség,
- emberi erőforrás,
- internet-használat,
- digitális technológiák integrációja,
- digitális köz-szolgáltatások.

Az élmezőnyben Dánia, Finnország, Svédország, Hollandia, Luxemburg és Belgium foglal helyet. Németország előtt van még az UK, Írország, Észtország és Ausztria is.

*Regionális Digitális Csúcstalálkozó*

2017 őszén Budapesten autóiipari kiállítás alkalmával már volt egy V4 nyilvános kerekasztal-találkozó a HUNGEXPO-n. 2018 január 25-26-án szintén Budapesten került megrendezésre a II. Regionális Digitális Csúcs, az Ipar4.0 és a SMART CITY témakörökre koncentráltan.

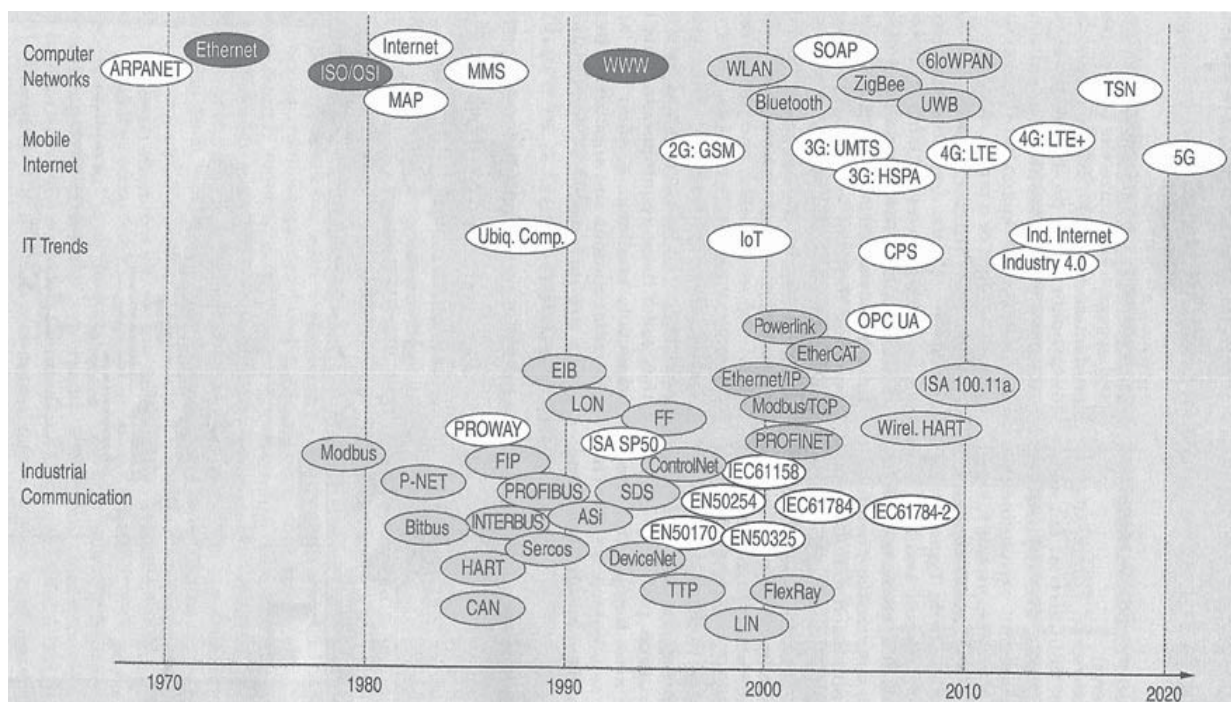
#### 4. A SZABVÁNYOK KIEMELKEDŐ FONTOSSÁGA

##### *A múlt hiányos öröksége*

Az 1960-as évek végére született meg a számítógépek közötti összekapcsolódás iránti jelentős igény. Hamar megalkották az Internet protokoll alapjait, és ez a mai napig is üzemel. Az elméleti alapot a 7-rétegű ISO-OSI szabványrendszerben már régen lefektették, de 25 év elteltével úgy tűnt, hogy a gyártók nem is igyekeznek kielégíteni azokat a követelményeket. Helyettük mindenki valami más utat próbál járni, és ez sajnos nem segíti elő a gyors, egységes megoldások elfogadását.

##### *A kommunikációs protokoll rendszerek sokszínűsége.*

Az 1. ábrán áttekinthetjük azokat az infokommunikációs protokoll megoldásokat, amelyek az eltelt 30 évben megpróbálták kielégíteni az iparágak között nem éppen egységes elvárásokat. A főbb igény-eltérések a sebességben, a megbízhatóságban, a hálózati kapcsolatok számosságában, a real-time igényében és költségvonzatában mutatkoztak. A kiberfizikai és IoT eszközök és rendszerek elvi felépítésükben már kiemelten függenek a gyors adat-kommunikációtól. A legnagyobb elvi probléma az IP hálózatok sztochasztikus működésében rejlik, azaz nem tudunk determinisztikus átviteli idővel számolni. Az elvi lehetősége fennáll, hogy végtelen, nagyon hosszú időn át nem jut szóhoz az üzeni kívánó hálózati eszköz.



1. ábra [7]  
Informatikai protokollok generációi

A valószínűségi paraméterekkel leírt kommunikáció ipari alkalmazhatóságát sok helyen elvi alapokra hivatkozva betiltják. A jelenlegi TimeSensitiveNetworking TSN technikával sokat lehet javítani, de teljes megoldást az sem jelent.

A 2. ábrán „a dolgok internete”, IoT és kiberfizikai eszközök terén kidolgozás alatt lévő szabvány-profilok főbb területeit láthatjuk: baloldalon a mobil-szolgáltatások terén, középen

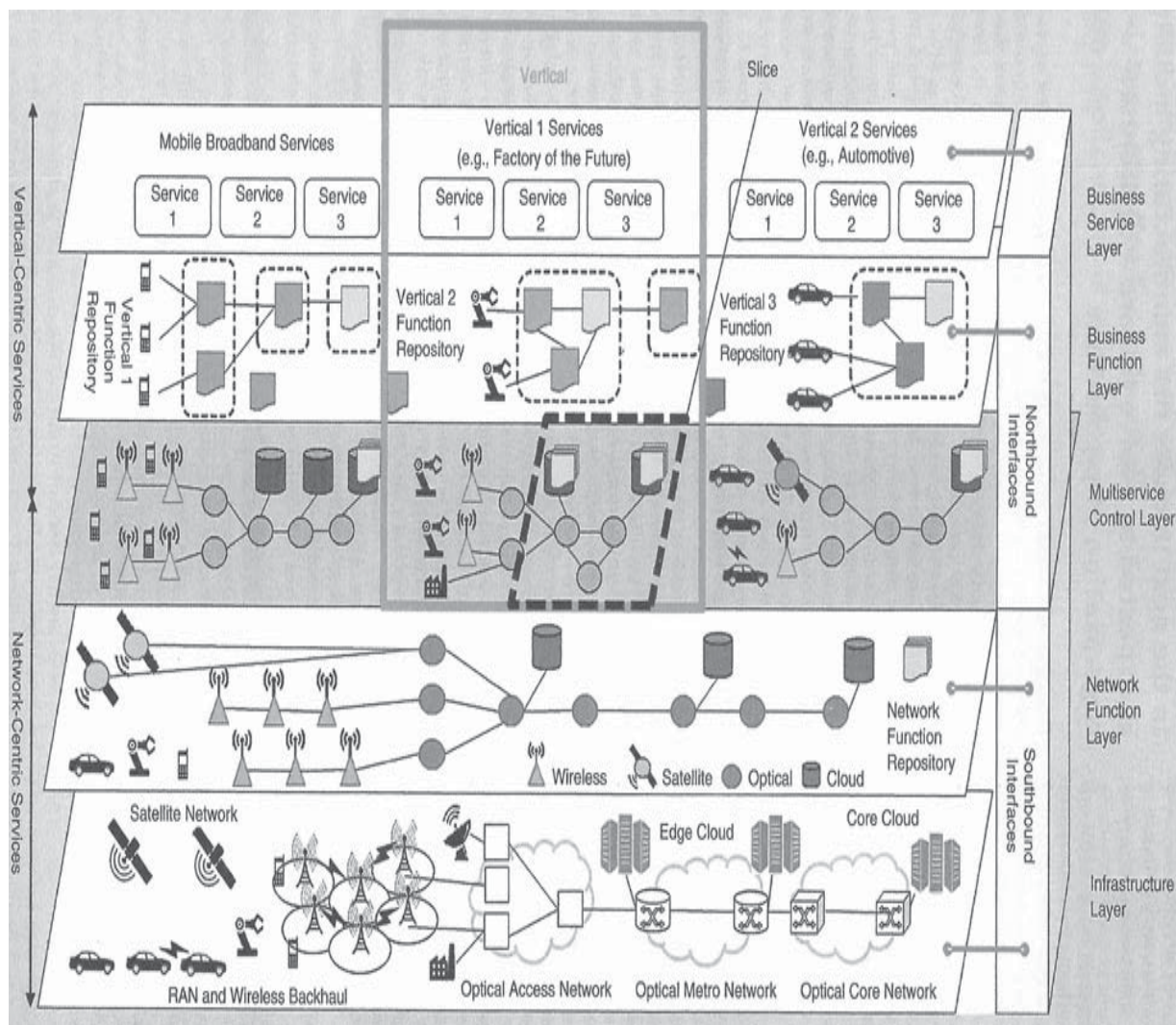
a FoF jövő gyárak környezetében, majd jobb oldalon az autonóm járművek technológiai esetére.

#### 5. ROBOTIKA

Az ipari digitalizációs folyamatokkal szinkronban kezelendő a robotika, azaz annak elterjedése, integrálódása az ipari termelő folyamatokba. Európa robotikai ipara jelentős, és minden jel, előrejelzés azt mutatja, hogy szerepe nőni is fog. Kiemelhető a szerviz-robotika

arányának térhódítása a hagyományos méretű és felépítésű változatok tekintetében. Európa robotikai Platformja az euRobotics a.s.-ból. A platform által kidolgozott Stratégiai Kutatási

Terv SRA 2020-ig előrevetíti a kulcs-K+F+I területeken végzendő feladatokat.



2. ábra [7]

Függőleges és vízszintes integráció mobil- FoF gyári- és autonóm jármű-alkalmazásokhoz

Az International Federation of Robotics rendezvényein sok információt gyűjthetünk be, főleg, amikor előadással is részt vehetünk konferenciájukon. A Münchener AUTOMATICA minden páros év júniusában Münchenben tartja a robotika és gyártás-automatika nagy-vásárát és kiállítását amelyen az IoT eszközök, a mobil platformok, a FoF és CPS eszközök, rendszerek és gyártási technológiák mutatkoznak be szerte a világból. Az INDUSTRY4.0 és a robotika a müncheni AUTOMATICA kiállítás két fő vonzerejét adja.

#### 6. HAZAI IPAR 4.0 NEMZETI TECHNOLOGIAI PLATFORM

A Platform nyílt célja, hogy a magyar ipar a lehető legjobb körülmények között tudja átvenni vagy kialakítani a SMART, kiber-fizikai

termékek és gyártási rendszerek (CPS, CPPS)[4] megjelenésével jellemzett termék- és gyártástechnológiai szerkezet-átalakítást, amellyel a KKV-ék is, de valamennyi más gazdasági egység is jelentősen nagyot léphet előre. A tagok a Platform ismertetéséről a honlapon [5] az alábbi információkat tették elérhetővé:

#### A Platform megalakulása

A Nemzetgazdasági Minisztérium erkölcsi támogatása lehetővé tette, hogy szakmai elismertségünkre építve a magyar iparvállalatok köréből megalakulhasson egy olyan szakmai szövetség, amely közös érdekként kész a magyar ipar fejlődését elősegíteni a kiber-fizikai termékek és rendszerek kifejlesztése, elterjedése által. 2016. május 6-án 38 jelentős magyar

iparvállalat és oktatási, kutatási intézmény aláírásával megalakult az IPAR 4.0 Nemzeti Technológiai Platform. [6]

#### *A Platform szerveződési formája*

A Platform kezdeti időszakában az elnöki posztot az MTA SZTAKI tölti be, míg az operatív irányításban állandó elnökségi tag az NGM és a tagsági csoportok rotációs képviselői. A munkacsoportok vezetői egy management bizottságban juttatják érvényre a közösségi érdekeket. A Platform második plenáris értekezletén a jelölések figyelembevételével megszavazásra kerültek a munkacsoportok és azok vezetői.

#### *A munkacsoportok struktúrája*

Az Ipar4.0 Nemzeti Technológiai Platform különböző munkacsoportokat működtet az alapszabályában megfogalmazott küldetése teljesítése érdekében. Ezek egy-egy I4.0-vel összefüggő specifikus terület sajátos kérdéseivel és a kihívásokra adandó, javaslatok formájában megfogalmazott válaszok kidolgozásával foglalkoznak. A munkacsoportokban a tagok adott szakterületet képviselő delegáltjai vesznek részt. Munkájukat a kormányzati szakpolitikai fórummal szoros együttműködésben végzik, így hozzájárulnak a kormányzati stratégiai célok megvalósításához is.

Jelenleg a Platformnak a következő 7 munkacsoportja létezik:

- Stratégiai tervezés Munkacsoport
- Foglalkoztatás, oktatás és tréning Munkacsoport
- Jogi keretek meghatározása Munkacsoport
- Infokommunikációs technológiák Munkacsoport (biztonság, referencia-architektúra, szabványok)
- Ipar4.0 (kiber-fizikai) kísérleti mintarendszerek Munkacsoport
- Gyártás és logisztika Munkacsoport
- Innováció és üzleti modell Munkacsoport.

A munkacsoportok tagjainak munkáját segíteni hivatott a SZTAKI által kidolgozott, mobil felületről is használható platform-applikáció.

#### **7. USE-CASE -EK KIDOLGOZÁSA AZ EUREKA EGYÜTTMŰKÖDÉSSEN**

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal és a nemzetközi EUREKA együttműködési szervezet támogatta a HEPENIX Műszaki Szolgáltató Kft. és a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet közösen beadott

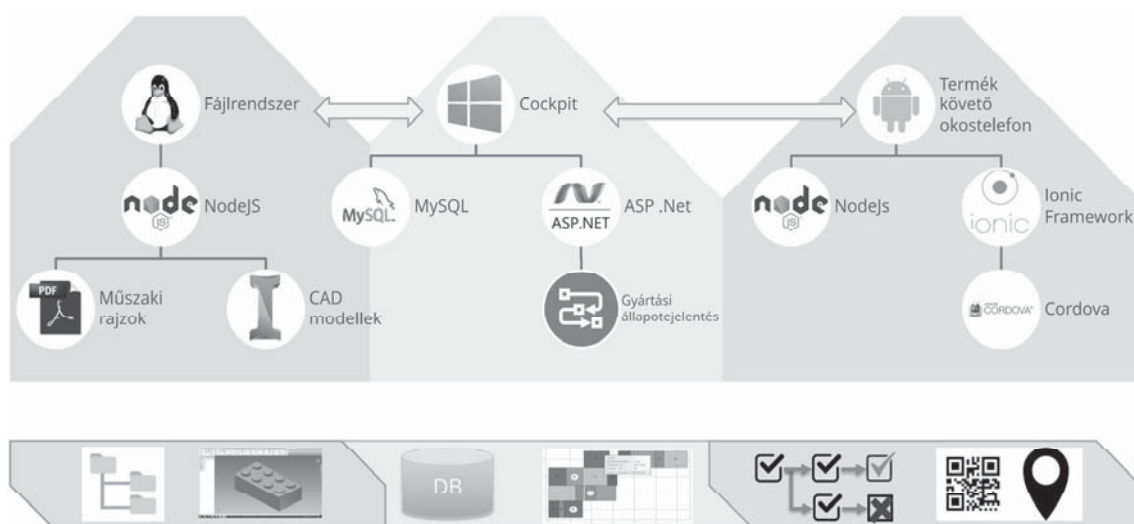
pályázatát. Ennek köszönhetően 2016. áprilisától egy 24 hónapos projekt vette kezdetét INTRO4.0 néven. Az IPAR 4.0-val jelzett gyártási környezet egy olyan új ipari technológiai korszakot vetít elénk, amelyben a kiber-fizikai rendszerek az élet valamennyi területét áthatják. A projekt tartalmában az IPAR4.0 technológiák bevezetésének elősegítésére keres megoldásokat az ipari vállalatok számára. Elsősorban a KKV-k felkészülését segíti majd elő, hiszen még csak most fogalmazódnak meg azok a technikai, erkölcsi, gazdasági elvárások és konformancia-kritériumok, amelyek keretet jelenthetnek az ún. „smart” kiber-fizikai termékek és szolgáltatások kifejlesztéséhez és kialakításához.

Megismerve a német technológia-transzfer és technológia-bevezetés serkentésére kidolgozott megoldásokat, feladataink között szerepel a magyarországi sajátosságok és tapasztalatok beágyazása. Kidolgozásra kerülnek olyan alkalmazási környezetek, ún. „USE-CASE” megoldások, amelyeket más KKV-nek is érdemes lehet megvalósítani.

Az INTRO 4.0 ezeknek a technológiáknak a tudományos alapokon történő bevezethetőségét készíti elő, megteremtve a felkészítési és felkészülési metodikát, valamint ezeket letesztelve felgyorsítja a bevezetéshez szükséges időt, ezzel a mihamarabbi hasznosulást készítve elő. A továbbiakban két innovatív use-case fejlesztést ismertetünk.

Az egyik fejlesztés alatt álló use-case egy gyártási és szerelési folyamatkövető rendszer prototípusa, amely a hazai kis- és középvállalkozások számára is használható megoldásokat kíván nyújtani. A rendszer jelenleg egy jellegzetes gyártócellát készítő vállalat igényeit kívánja kielégíteni, többek között a tervezési feladatokkal járó műszaki fájlok és rajzok sokaságának kezelését, a kiterjedt beszállítói és bér munka hálózat monitorozását, valamint a saját belső összeszerelési és gyártási folyamataik nyomon követését.

Mindezen funkcionalitást egy központi webalapú felületen áttekinthetően és jól vizualizálva kívánja a projekt megjeleníteni, melynek kiegészítő, de nem elhanyagolható eleme egy okostelefon alapú állapotjelentő applikáció. Az ilyen módon kialakított rendszer a tervek szerint földrajzi helyzettől függetlenül, közel valós időben az eddig nehezen követhető folyamatokat is képes lesz kiértékelhetővé tenni, ami elsődlegesen a határidők hatékonyabb becslését és monitorozását kívánja javítani. Az előzetes rendszertervet szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra

Folyamatkövető USE-CASE rendszer előzetes architektúrája

A másik, előremutató use-case a távjelenlét és távdiagnosztika gyakorlati hasznosságára ad jó példát. A leszállított, és beüzemelésre került, próbaüzem alatti, telepített megmunkáló cellák folyamatos megfigyelése és dokumentálása sok felesleges szerviz-költséget tud megtakarítani, akár a szervizelést végző szakember utaztatásának kiiktatásával, akár a hibajelenségek gyors beazonosíthatóságával. A gépek környezetébe elhelyezett kamerákkal és videó rögzítésével minden múltbeli esemény időben skálázhatóan is elemezhető.

A KIT projektpartnerrel kapott értékes német tapasztalatokat készséggel osztjuk meg az érdeklődő magyarországi KKV-k szakembereivel. [8,9]

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az MTA SZTAKI CPS kutatását és platform-alakítási kezdeményezését az "Ipar4.0 kutatási és innovációs kiválósági központ" című GINOP-2.3.2-15-2016-00002 pályázat támogatása, valamint a VKSZ\_14-1-2015-0125 és az EPIC grant 739592 (<http://www.centre-epic.eu>) tették lehetővé. A magyar vállalatok IPAR4.0 felkészültségének elősegítését szorgalmazza az EUREKA-NKFIH 15-1-2016-0024 INTRO\_4.0 projektje, amelyben köszönet illeti a HEPENIX konzorciumvezető céget és annak munkatársait. A Nemzetgazdasági Minisztérium támogatta a Nemzeti Platform megalakulását a kezdetektől, és aktívan részt vesz annak irányításában.

## 9. IRODALMI HIVATKOZÁS

- [1] EFFRA (2017. nov.): <http://www.effra.eu/>
- [2] WMF2017 (2017. nov.): <https://www.worldmanufacturingforum.org/>
- [3] www.MANUFUTURE2017.eu 2017. nov.
- [4] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. S. Schuh, W. Sihn, K. Ueda: Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology 65:(2) pp. 621-641. (2016)
- [5] IPAR4.0 Nemzeti Technológiai Platform megalakulása (2017. nov.): <https://www.sztaki.hu/innovacio/hirek/ipar-40-nemzeti-technologiai-platform-alakult-sajtokozlomeny>
- [6] Ipar 4.0 Technológiai Platform (2017. nov.): [www.I40Platform.hu](http://www.I40Platform.hu)
- [7] Martin Wollschlaeger, Thilo Sauter, Jürgen Jasperneite: The future of industrial communication IEEE Industrial Electronics Magazin, March 2017 pp. 17-27. ISSN 1932-4529; Ábrák a szerzők hozzájárulásával.
- [8] C. Liebrecht, A. Jacob, A. Kuhnle, G. Lanza: Multi-Criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty. Procedia CIRP 63 pp. 224-229 (2017)
- [9] M. Hübner, C. Liebrecht, N. Malessa, A. Kuhnle, P. Nyhuis, G. Lanza: Industrie 4.0, Management, Strategie; Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0. Vorstellung eines Vorgehensmodells zur bedarfsgerechten Einführung von Industrie 4.0-Methoden. Titelthema Aufsatz. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 107 H. 4 pp. 266-272. (2017)

# SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT MŰANYAG (CFRP) FÚRÁSI VIZSGÁLATAI

## THE DRILLING INVESTIGATION OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC

*Horváth Richárd, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag-és Gyártástudományi Intézet, e-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A szénszál erősítésű műanyagok felhasználása napjainkban nagymértékben növekszik. Köszönhető ez a számos kedvező mechanikai tulajdonságának valamint a szélesen elterjedt felhasználási területeinek. Ebben a publikációban egy forgácsolási kísérletre létrehozott (10 mm vastag) szénszál-erősítésű műanyag fúrás vizsgálatának eredménye kerül bemutatásra. A forgácsolási kísérleteket követően kiértékelés alá kerül a forgácsolási paraméterek ( $f$ , mm – előtolás;  $v_c$ , m/min – forgácsolási sebesség) hatása az  $F_z$ , N (axiális irányú) erőre és a furatok hengerességére. Olyan empirikus modell kerül bemutatásra mellyel az előtolás irányú erő ( $F_z$ ) becsülhető a vizsgált forgácsolási paraméter tartományon belül. Valamint a delamináció és a sorjaképződés vizsgálatának eredményei is elemzésre kerülnek.

### ABSTRACT

Nowadays using of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) is greatly increasing. It can be explained by the several good mechanical properties of it and the widespread uses (e.g.: aerospace industry, vehicle industry, sport equipment...). This article shows the results of the drilling investigation in case of CFRP. After the drilling experiments, there was investigated the effect of cutting parameters (such as  $f$ , mm – feed;  $v_c$ , m/min – cutting speed) on  $F_z$  (axial force) and cylindricity. An empirical model was constructed with which the axial force can be estimated in the range of investigated cutting parameters. Furthermore there were mentioned the results of the examination of the delamination and the burr too.

### 1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített műanyagok felhasználása napjainkban növekvő tendenciát mutat. Köszönhető ez a kiváló mechanikai tulajdonságainak. Ma az ipar számos területén megtalálhatóak ezek az anyagok (pl.: gépjárműgyártás, repülőgépipar, sport

eszközök...). Az ilyen anyagok befejező-, vagy készremunkálása, esetleg egy-egy felületük megmunkálása történhet forgácsolással. Számos tanulmány foglalkozik az ilyen anyagok forgácsolással történő megmunkálhatóságának vizsgálatával.

Voss és társai [1] munkájukban a hagyományos és az ún. orbitális fúrást hasonlították össze CFRP anyagok fúrásánál. Kísérleteikben gyémántbevonatos szerszámokat alkalmaztak. Vizsgálataikból megállapították, hogy a hagyományos fúrás technológia 3,3-szor nagyobb exiális erőt igényelt, mint az orbitális fúrás. Az orbitális fúrás erő igényei viszont a kezdeti kopás után állandó értéken maradtak. Kisebb delmainációt és kevesebb kiszakított szálakat okozott az orbitális fúrás technológiája.

Geier és Szalay [2] szintén hagyományos és ún. orbitális fúrás vizsgálatát végezték el CFRP anyagon. Válaszfüggvények módszerével empirikus modelleket konstruáltak az előtoló erő a felületi érdesség becslésére. Részletesen vizsgálták a forgácsolási paraméterek hatását, valamint a delamináció jelenségét. A fellépő erőhatások és a felületi érdesség minimalizálásával forgácsolási optimum pontot állapítottak meg.

Li és társai [3] szintén CFRP anyagok fúrását vizsgálta a szerszámkopás valamint a felületi érdesség vonalmenti és topográfia tekintetében. Az anyag anizotróp jellege miatt javasolják a 3D felületi érdességi vizsgálatokat.

Szintén szerszámkopással, forgácsolási hőmérséklettel és a felületi érdesség elemzésével foglalkozott Ramirez és társai [4] CFRP-s anyagok fúrásánál keményfém fúrók esetén. Vizsgálataikban megfigyelték, hogy a domináns kopásforma CFRP-s anyagoknál az abráziós kopás.

Gaugel és társai [5] részletesen vizsgálták kétféle CFRP anyag fúrásakor (bevonatoltan keményfém szerszámmal) a delamináció és a szerszámkopás jelenségét. Korszerű képfeldolgozási technikákkal elemzik a delmainációt. (Furatok pontosságának, a delamináció vizsgálatának képi feldolgozását és

annak megközelítését mutatja be Caggiano és társai [6].) Azt a megállapítást teszik, hogy a furat méret pontosságát és körköröségét nem befolyásolja jelentősen a fúró kopottsági állapota. A szerszám kopás és az éllekerkedés változása között közel lineáris kapcsolatot találtak, viszont azt is megállapítják, hogy az éllekerkedés mérés (mint kopási jellemző) csak bevonatolatlan szerszámnál használható, bevonatos szerszámoknál nem. A delamináció és a szerszámkopás között szoros kapcsolatot találtak.

Merino-Pérez és társai [7] a forgácsoló sebesség hatását vizsgálták CFRP anyagok fúrásánál bevonatolatlan keményfém szerszámmal. Vizsgálataikban mérték és elemezték a forgácsolási erőt, nyomatékot és a hőmérsékletet különböző CFRP összetételeknél. Vizsgálataikból kiderült, hogy a hőre keményedő mátrix fajtája jelentős hatást gyakorolt mind a maximális erőre mind a nyomatékra.

Háromféle kúpszögű bevonatolatlan keményfém fúróval végeztek forgácsolási vizsgálatokat Feito és társai [8]. Válaszfüggvények módszerével kapcsolatot kerestek az előtolási erő és a forgácsolási paraméterek között új, hónolt, valamint kopott szerszám esetében. Kis előtolási erő eléréséhez a kisebb vágókúpszögű szerszámokat ajánlják.

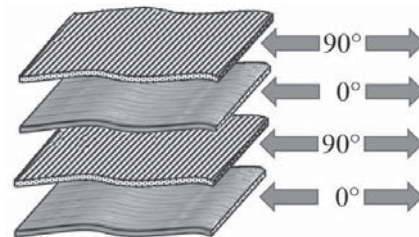
Repülőgépipar által felhasznált CFRP anyagok megmunkálását és annak vizsgálatát végezték el Çelik és társai [9] három féle összetételű SiAlON kerámia fúrókkal. Elektronmikroszkóp segítségével elemezték a szerszámok kopását, részletesen vizsgálták a delamináció és a szélkiszakadás jelenségét. Ők is megállapították, hogy a bekopási (néhány furat) után a fő kopási forma az abrázációs kopás. Egy másik tanulmányukban [10] négy féle SiAlON fúroszerszámot vizsgáltak. Ebben a munkájukban elemezték az előtoló erőt és a fúrás nyomatékigényét, valamint a szerszámok kopását, a delaminációt és a szélkiszakadásokat. Munkájukban megállapítják, hogy CFRP anyagok fúrása során a SiAlON fúrók viszonylag gyorsan kopnak. Már az első három furat alatt 80%-al nőtt az előtoló erő.

Ebben a tanulmányban 10 mm vastag CFRP fúrési vizsgálata kerül bemutatásra. Részletesen ismertetve forgácsolási paraméterek hatását az előtolási erő és a furatok hengerességére. Valamint a delamináció és a sorjaképződés (kiszakított szálak) vizsgálata is bemutatásra kerül.

## 2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 2.1 Kísérletben használt alapanyag

A kísérletben használt szénszál típusa Zoltek Panex 35, négyzetméter tömege: 400 g/m<sup>2</sup>. Rétegszám: 26. Mátrixanyagok: gyanta – Araltide LY1564, térhálósító – Aradur 3487. Gyártási technológia: vákuuminfüzió; fűtési sebesség 30 °C/óra; hőmérséklet: 55 °C; hőkezelés időtartama: 20 óra. A rétegek szálerendezése egymásra merőleges (1. ábra).



1. ábra. Rétegek szálerendezése a munkadarabban

### 2.2 Kísérletben használt szerszám

A kísérlethez felhasznált szerszám a DreamDrills termékcsalád Ø 10 mm-es karbonszállal erősített műanyagok (CFRP) forgácsolásához kifejlesztett gyémánt bevonatos fúrója (DI473100) [11]. A kísérletben használt szerszám, illetve a mért erő komponens irányát az 2. ábra tartalmazza.



2. ábra. Ø 10 mm fúró CFRP anyagokhoz (DreamDrills – DI473100)

### 2.3 Felhasznált szerszámgep, mérőeszközök

A fúrési kísérletek MAZAK VCN 410A-II típusú szerszámgépen lettek elvégezve (n = 40 – 12000 1/perc).

A fúrési kísérleteknél vizsgált  $F_z$  irányú erők mérésére egy piezoelektromos elven



működő KISTLER erőmérő rendszer lett használva. A Kistler 9257b típusú erőmérő platformot a munkadarab satu alatt rögzítve mérhetőek az előtolás ( $F_z$ ) irányú erők. Az erőmérő cellának a mérési tartománya  $F_x=F_y=-5\dots5$  kN, valamint  $F_z=-5\dots10$  kN [12]. Az erőmérő platformból jövő töltésmennyiség mely arányos az erővel (pC/N) Kistler 5019 erősítővel valamint DynoWare programmal lett kiértékelve. A furatok hengerességének mérése Mitutoyo, Crysta-Plus M 544 koordináta mérőgéppel történt.

#### 2.4 Mérési pontok meghatározása

A forgácsolási kísérleteknél használt forgácsolási paraméterek úgy lettek meghatározva, hogy azok lefedjék a katalógusban ajánlott adattartományt (ajánlott forgácsolási sebesség,  $v_c = 100\dots150$  m/min; valamint ajánlott előtolás,  $f = 0,03\dots0,07$  mm).

A fentiek tekintetében a forgácsolási paramétereket ( $v_c$ ,  $f$ ) négy szinten ekvidisztáns értékkel változtatva adódik a 16 mérési pont, melyeket az 1. táblázat tartalmaz.

1. táblázat. Forgácsolási paraméterek valamint az  $F_z$ ,  $N$  axiális erő és a hengeresség,  $t$ , mm értékek a kísérleti pontokban

Mérési pontok	$v_c$ , m/min	$f$ , mm	$F_z$ , N
1	80	0,02	48
2	80	0,04	58
3	80	0,06	64
4	80	0,08	69
5	120	0,02	48
6	120	0,04	60
7	120	0,06	64
8	120	0,08	69
9	160	0,02	48
10	160	0,04	60
11	160	0,06	67
12	160	0,08	76
13	200	0,02	50
14	200	0,04	64
15	200	0,06	70
16	200	0,08	76

#### 2.5 Empirikus modell

Kereshető az összefüggés a független (bemenő,  $x_1, x_2$ ) változók és függő (kimenő,  $Y$ ) változó között:

$$Y = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

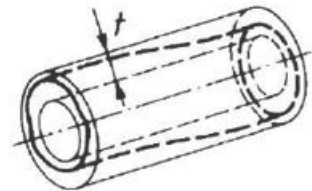
A válasz függvény az alábbi alakban kereshető:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_1^2 + a_4 \cdot x_2^2 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (2)$$

ahol  $Y$  – kimenő függő változó,  $x_1, x_2$  – bemenő paraméter,  $a_0, a_1, \dots, a_5$  – számított koefficiensek,  $\varepsilon$  – egyenlet hibája.

#### 2.6 Hengeresség mérésének módszere

A furatok geometriai pontossága igen fontos paraméter. Minden egyes kísérleti pontban kiértékelésre került a furatok hengerességi vizsgálata. A hengeresség nagysága az két egymástól  $t$  távolságra lévő, közös tengelyű hengerfelület, amelyek között a valóságos felület elhelyezkedik (3. ábra).



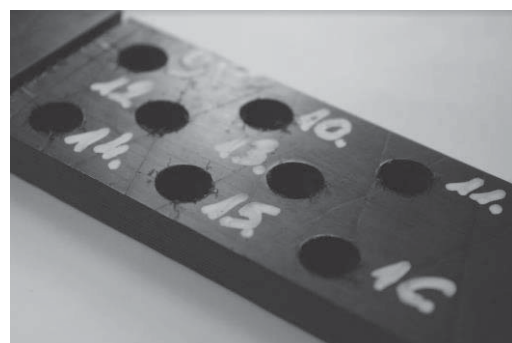
3. ábra. Hengeresség értelmezése

A hengeresség mérése a köralakvizsgálatra vezethető vissza. A hengerességet több, meghatározott sűrűséggel végzett köralakméréssel lehet meghatározni. A körök a legkisebb négyzetek (ún. Gauss módszer) módszerével lettek meghatározva nyolc mérési pontból.

### 3. EREDMÉNYEK

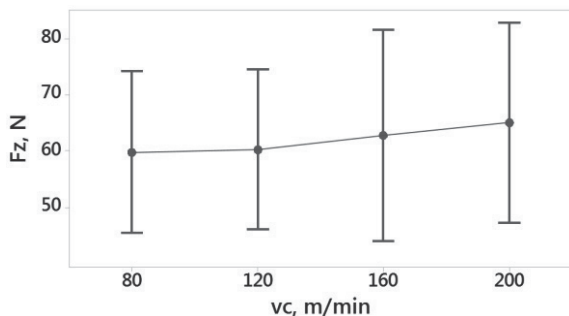
#### 3.1 Axiális erő ( $F_z$ ) értékeinek és forgácsolási paraméterek hatásának vizsgálata

A forgácsolási kísérletek egyik munkadarabját mutatja az (4. ábra).



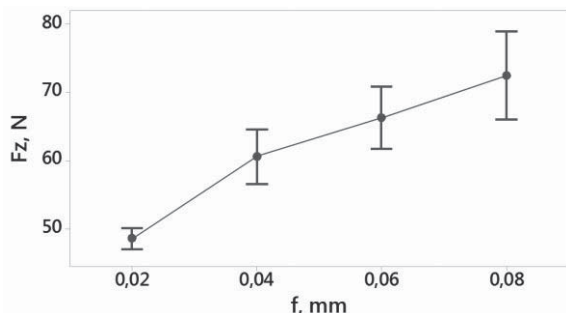
4. ábra. CFRP munkadarab fúrasi kísérletek után

A fúrás közben mért  $F_z$  erőértékek (1. táblázat) változását mutatja 5. és 6. ábra. Az 5. ábrán az azonos forgácsoló sebességhez tartozó  $F_z$  erő értékek átlaga szerepel. Az ábrán látszik, hogy a forgácsoló sebességnek nincs hatása az axiális,  $F_z$  irányú erő komponensre.



5. ábra. Forgácsolási sebesség hatása az axiális erőre

A 6. ábra az azonos előtolásokhoz tartozó  $F_z$  értékek átlagát mutatja. Jól látszik, hogy az előtolásnak nagy hatása van az axiális erőre. Az előtolás növelésével növekszik az előtolási irányú erők értéke.



6. ábra. Az előtolás hatása az axiális erőre

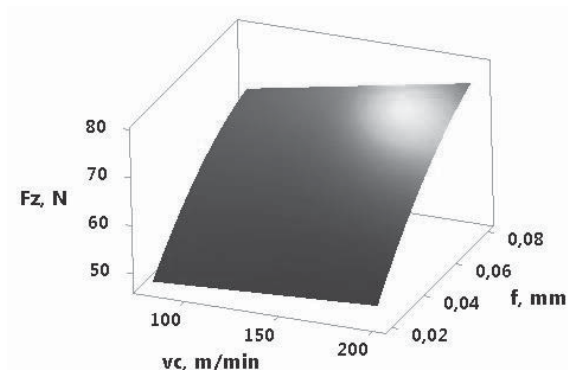
### 3.2 Empirikus modell létrehozása

Célszerű keresni a 2.5 fejezetben bemutatott válaszfüggvényt a bemenő forgácsolási paraméterek ( $v_c$ ,  $f$ ) és a kimenő  $F_z$  erőértékek között, amely megfelelő pontossággal leírja a vizsgált paraméter tartományt. (Erre pl.: akkor lehet szükség, ha fennál a delamináció veszélye, ami csökkenthető az  $F_z$  értékek csökkentésével.)

Az empirikus modellben szignifikancia vizsgálat után csak a fúrási folyamatra szignifikáns tényezők szerepelnek. Az empirikus modell a (2) alapján az alábbi:

$$F_z = 34,96 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 627 \cdot f - 3594 \cdot f^2 + 0,862 \cdot v_c \cdot f \quad (3)$$

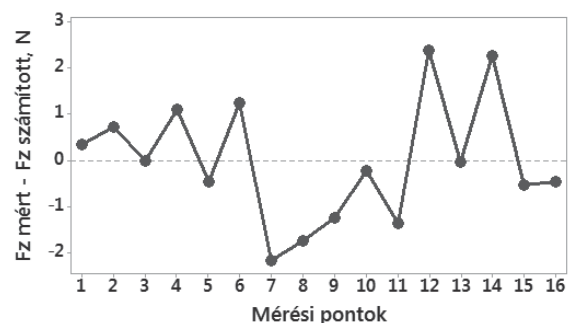
A forgácsolási paraméterek hatása a CFRP anyag fúrási technológiájánál még szemléletesebb a (3) egyenlet grafikus ábrázolásával (7. ábra).



7. ábra. A (3) egyenlet grafikus ábrázolása

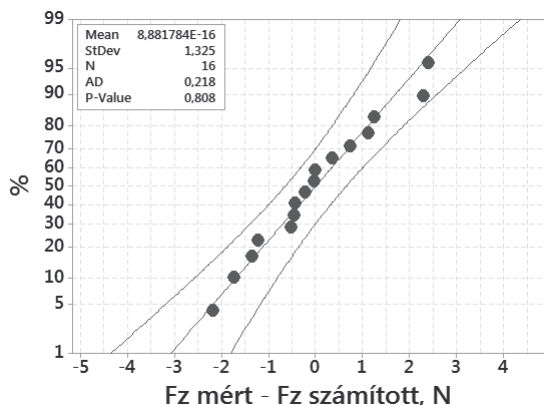
A keresett empirikus modell megfelelőségét azzal lehet bizonyítani, ha a mért értékek és a számított értékek közötti különbségek (reziduumok) eloszlása normális, várható értéke nulla körüli, nagyságuk nem változik a vizsgált tartományon belül a szórásuk pedig minél kisebb.

A 8. ábra az előtolási irányú erő mért és számított értékei közötti különbséget mutatja a mérési pontokban. Az ábrából leolvasható, hogy a keresett modell legnagyobb eltérései a mért értéktől  $-2,17$  N (7. mérési pont), illetve  $2,4$  N (12. mérési pont).



8. ábra. Reziduumok értéke a mérési pontokban

A 9. ábrán a reziduumok értékei láthatóak normalitás hálón ábrázolva. A normalitás háló egy olyan diagram, melynek vízszintes tengelye lineáris (a mért érték van ezen a tengelyen felvéve) a függőleges tengely pedig olyan skálázású, hogy a normál eloszlás képe egyenesnek adódjon. Az ábrából jól kivehető, hogy a reziduumok (prediktív modell hibái) illeszkedése közel egyenesre esik. A hibák várható értéke (átlaguk) gyakorlatilag nulla a szórás pedig  $1,325$  N.

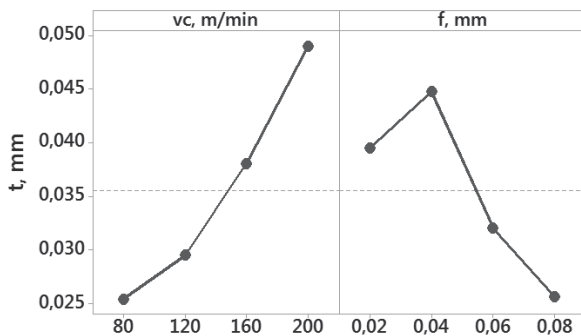


9. ábra. Reziduumok értékei normalitás hálón ábrázolva

### 3.2 Hengerességi vizsgálatok eredményei

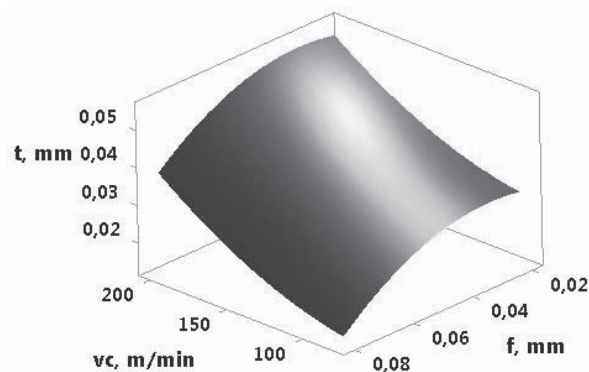
A furatok esetében a hengeresség két egyenként nyolc pontból a munkadarab alsó és felső peremétől 2 mm-re lévő körből lett meghatározva. Ennek eredményeit az 1. táblázat ( $t$  – hengerességi értékek mm) tartalmazza.

Megvizsgálva a hengeresség értékeit a forgácsolási paraméterek függvényében (10. ábra) az a következtetés vonható le, hogy a forgácsoló sebesség növelésével a hengeresség értéke exponenciálisan növekszik. Ezzel szemben az előtolás növelésével a hengeresség értéke csökkenő tendenciát mutat.



10. ábra. Hengerességi értékek főhatás ábrája

A forgácsolási paraméterek együttes hatását szemlélteti a 11. ábra a hengeresség értékére.

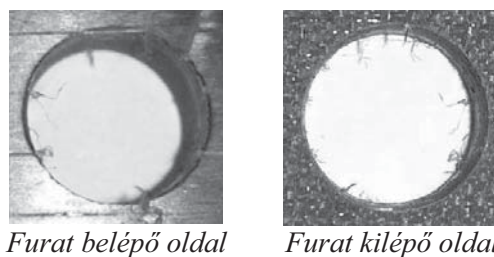


11. ábra. Az előtolás és a forgácsolási sebesség hatása a hengerességre

### 3.3 Delamináció és sorja vizsgálata

A sorjaképződés (szálkiszakadás) jelensége komoly kutatási téma napjainkban is a forgácsolási folyamatokban. A rétegekből felépült ún. szendvics szerkezetű anyagoknál ebben az esetben CFRP-nél a delamináció jelensége is létrejöhet. A delamináció jelensége nem más mint az anyag rétegeinek egymástól való elválása, eltávolodása forgácsolás közben annak hatására. A delamináció jelensége csökkenti az anyag élettartamát, így komoly problémát jelenthet.

Megvizsgálva a sorja jelenséget mind a belépő mind a kilépő oldalon apró szálkitépődések láthatóak (12. ábra) a felső illetve alsó rétegből. Ezeknek a nagyságára és mennyiségére a forgácsolási paramétereknek ebben a vizsgált tartományban nem volt hatása, a jelenség csekély módon, de minden furatnál megfigyelhető.



12. ábra. Sorja és delamináció jelenségének vizsgálata

Klasszikus delamináció jelensége nem volt megfigyelhető egyik kísérleti pontban sem.

### Konklúzió

Ez a tanulmány szénszálerősítésű műanyag fúrási vizsgálatát tárgyalta, a vizsgálatokból az alábbi eredmények vonhatóak le:

- $F_z$  (előtolás irányú) erőre az előtolás van hatással míg a forgácsolási sebesség hatása elhanyagolható;
- empirikus modellt hoztunk létre mellyel a vizsgált forgácsolási paramétertartományon belül becsülhető az előtolási erő értéke. A modell hibái -2,17 N és 2,4 N közöttiek. A mért és a számított erőérték, reziduumok eloszlása normális, várható értékük gyakorlatilag nulla;
- a furatok hengerességének értékét a forgácsoló sebesség növelése exponenciálisan rontja, míg az előtolás növelése a hengeresség javulását vonja maga után;
- hengeresség minimalizálása szempontjából kis forgácsoló sebesség és nagy előtolás javasolt. A vizsgált forgácsolási paraméter tartományon a legkisebb hengerességhez tartozó forgácsolási paraméterek:  $v_c = 80$  m/min,  $f = 0,08$  mm;
- a furatok minkét (szeszám belépő és kilépő) oldalán a felső és az alsó rétegből kismértékű szálkiszakadások figyelhetők meg. A szálkiszakadások mennyisége és nagysága közel állandó minden kísérleti pontban, a szálkiszakadás mértéke nem függ a forgácsolási paramétereiktől;
- delamináció jelensége nem volt megfigyelhető.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I-OE-779/60 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”

Köszönet illeti a GranTOOL Kft.-t, hogy biztosította a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges szerszámokat, valamint az KANDSi Kft.-t (AKOBEZ), hogy biztosította forgácsolási kísérletekhez szükséges egyedileg gyártott munkadarabokat.

## IRODALOM

- [1] Voss, R., Henerichs, M., & Kuster, F. (2016). Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP). *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65(1), 137-140.
- [2] Geier, N., & Szalay, T. (2017). Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP). *Measurement*, 110, 319-334.

- [3] Li, M. J., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Pearson, D., & Leahy, W. (2014). Influence of lay-up configuration and feed rate on surface integrity when drilling carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites. *Procedia CIRP*, 13, 399-404.
- [4] Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F., & M'Saoubi, R. (2014). Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 13, 163-168.
- [5] Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., ... & Schneider, G. (2016). A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP). *Composite Structures*, 155, 173-183.
- [6] Caggiano, A., Angelone, R., & Teti, R. (2017). Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment. *Procedia CIRP*, 62, 440-445.
- [7] Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Merson, E., Lockwood, A., Ayvar-Soberanis, S., & Marshall, M. B. (2016). Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites. *Composite Structures*, 140, 621-629.
- [8] Feito, N., Milani, A. S., & Muñoz-Sánchez, A. (2016). Drilling optimization of woven CFRP laminates under different tool wear conditions: a multi-objective design of experiments approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(2), 239-251.
- [9] Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A., & Kara, F. (2015). Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites. *Wear*, 338, 11-21.
- [10] Celik, A., Lazoglu, I., Kara, A., & Kara, F. (2015). Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 39-47.
- [11] [http://www.toolontool.hu/DNNGranTool/PDF/YG-1\\_Drill\\_DI473.pdf](http://www.toolontool.hu/DNNGranTool/PDF/YG-1_Drill_DI473.pdf)
- [12] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group

# BELSŐ TARTÓSZERKEZETEK OPTIMALIZÁLÁSA TÉRBELI VORONÓJ-CELLÁK SEGÍTSÉGÉVEL

## OPTIMISING INTERNAL SUPPORT STRUCTURES WITH 3D VORONOI LATTICES

*Piros Attila, Dr. – Solti Márton*

**ÖSSZEFOGLALÁS.** Az additív gyártás lehetővé teszi tetszőleges tulajdonságú tartószerkezetek előállítását. Az alkalmazott rácsoptimalizációs eljárások matematikai és konstrukciós aggályokat is felvetnek. Kutatásunk analitikus módszerek helyett nem-hagyományos optimalizációs eljárások alkalmazását vizsgálja. Összehasonlítással igazoltuk, hogy a Voronoi-diagrammal képzett hálógeometria hatékonyabb lehet az eddigieknél.

**ABSTRACT.** Additive Manufacturing enables us to make support structures with custom properties. Analytic lattice optimization methods used so far raise mathematical and design concerns as well. Our research approaches this subject with unconventional optimisation techniques instead. By comparison, we proved that our Voronoi diagram based support structure perform better than the ones used until now.

### 1. BEVEZETÉS

Életünk minden területére bejutott már a számítógép. Legyen szó ipari vagy fogyasztói felhasználásról – az egyre olcsóbb technológiának köszönhetően – napról napra újabb helyzetekben találkozhatunk okos eszközökkel, automatizált megoldásokkal. Néhányan hajlamosak az informatika térnyerését szakmánk elhalványulásának értelmezni, ám a számítógép nem több mint egy eszköz, amellyel újabb lehetőségek nyílnak meg előttünk.

Az additív gyártás sem jöhetett volna létre számítógépek nélkül: segítségével gyorsan, olcsón, szerszámköltségek nélkül próbálhatunk ki érdekes új formákat. A technológia eleinte csak a nagy ipari szereplők privilégiuma volt – ám az egyre olcsóbb számítógépeknek és elektronikai komponenseknek hála – mára már sokkal szélesebb körben elterjedt. Szabadúszó

tervezők, művészek és hobbisták körében nagyon népszerű lett az elmúlt években. [1]

Tervezéskor – az eljárás nagy geometriai szabadságának köszönhetően – sokkal kevesebb technológiai korláttal kell számolnunk, ez azonban még bonyolultabbá teszi a számításokat, ha a technológia teljes körű kihasználására törekszünk. Vannak módszerek az additív gyártástechnológiához való optimalizálásra, ám a lehetőségek még nincsenek teljes körűen feltárva.

Előadásunkban additív gyártással készülő alkatrészek belső tartószerkezetei optimalizálásának egy szakirodalomban még nem tárgyalt, újszerű megközelítését mutatom be.

### 2. ADDITÍV GYÁRTÁSSAL KÉSZÜLŐ TARTÓSZERKEZETEK

A 3D nyomtatás egyik nagy előnye, hogy az alkatrészek külső héja alatt nem feltétlenül kell homogén anyagnak lennie. Használhatunk olyan *rácsos vagy cellás belső tartószerkezetet*, amely sokkal kisebb tömeg mellett nyújt közel ugyanolyan jó teljesítményt, mintha az eredeti tömör anyagot használnánk.

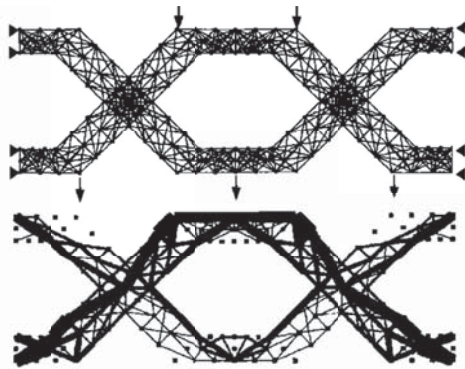
Belső tartószerkezeteket már a 3D nyomtatás megjelenése előtt is használtak az iparban. Méhsejtrácsos szendvicsszerkezeteket és fémhabokat is előszeretettel alkalmaznak olyan területeken, ahol az alkatrészeknek a lehető legkisebb tömeg mellett nagy terheléseknek kell megfelelniük. Az ilyen szerkezetek egyik fontos jellemzője a *relatív sűrűség*. Ez a tartószerkezet térfogatának és a szerkezetet befoglaló térfogatnak a hányadosa [2].

Additív gyártással egyszerűen hozhatunk létre pontosan megszabott mechanikai, optikai, hőtani vagy épp akusztikai tulajdonságokkal rendelkező térbeli rácsos és cellás tartószerkezeteket. Az ilyen struktúrák rudakból vagy lapokból álló *egységcellákból* épülnek fel. Ahhoz, hogy megtaláljuk azt a tartószerkezet elrendezést, amely az általunk meghatározott

jellemzőkkel fog bírni, valamilyen optimalizálási módszerhez kell folyamodnunk.

### 3. RÁCSOS ÉS CELLÁS TARTÓSZERKEZETEK OPTIMALIZÁLÁSA

A leghatékonyabb anyagkihasználást eredményező geometria keresésével a szerkezetoptimalizálás foglalkozik. A belső tartószervezetek optimalizálása szinte kivétel nélkül a rácsos tartószervezetek optimalizálásán alapszik (1. ábra). Ez olyan paraméter-optimalizálási módszer, mellyel meghatározott terhelések, követelmények mellett elemi cellákból felépített szerkezet alkotóelemei méretének az optimumát keressük [3]. Ezt az eljárást főként építőmérnökök használták eddig pl. hidak és egyéb teherviselő szerkezetek méretezésére.



1. ábra - Rácsos tartószervezetek optimalizációja

#### 3.1 Az elterjedt többváltozós optimalizálási eljárások korlátai

Sok mai optimalizálási feladathoz hasonlóan itt is a változók igen magas száma okozza a legtöbb fejtörést. A módszer legfőbb problémája, hogy minden egyes rúdelem átmérőjét külön optimalizálandó változóként kezeli. Ez nagyobb teherviselő elem esetén többesres nagyságrendű is lehet.

A legtöbbször használt többváltozós optimalizálási módszerek számítási ideje gyakran exponenciálisan nő a keresett értékek számával. Egy ilyen bonyolult függvénynek igen sok megoldása lehet, amely tovább nehezíti a keresést. Ha az eredmény egyáltalán konvergál valamilyen numerikus értékhez, még akkor sem biztos, hogy a globális szélsőértékét találtuk meg. [4]

Léteznek viszont olyan nem-hagyományos keresési és optimalizációs eljárások, amelyek éppen az ilyen – analitikus

módszerekkel nem vagy csak részben megoldható – problémákra adnak választ.

#### 3.2 Optimalizáció nem-hagyományos módszerekkel

Az információ korát éljük, felfoghatatlan méretű adathalmazok irányítják mindennapjainkat. Az elmúlt években az ilyen méretű adatállományok feldolgozása ok-okozati összefüggéseik feltérképezése vált az egyik legfontosabb szakmává. Ez az ún. adatbányászat, amely nagy mértékben járult hozzá a nem-hagyományos optimalizálási módszerek fejlődéséhez.

Az adattudósok által is alkalmazott optimalizációs algoritmusok a konkrét, analitikus megoldás helyett véletlenszerű mintavételezéssel és a korábban megszerzett tapasztalatok felhasználásával jutnak általában kielégítően pontos, közelítő eredményre.

Kutatásunk ezzel a szemlélettel közelíti meg a belső tartószervezetek optimalizálását.

#### 3.3 Konstruktív aggályok

Konstruktív szempontból is vannak bizonytalan részei az eddig alkalmazott rács optimalizálási módszernek. Az alkalmazott egységcellák általában valamilyen szimmetrikus terhelési esetre lettek optimalizálva, amellyel valóságban ritkán találkozhatunk. Az elemi cellatípust és a rácszat sűrűségét még a számítás megkezdése előtt definiálni kell, ezért könnyen lehet, hogy nem is abban a halmazban keressük a megoldást, ahol az optimális opció van.

Az üreges alkatrész külső héja a terhelést a rudakkal való kapcsolódási pontjain adja át a belső tartószervezetnek, így ezeknek a kapcsolódási pontoknak a minősége is kulcsfontosságú. Mivel a rács minden esetben szabályos alakú elemi cellákból épül fel, nagy a valószínűsége – különösképpen szabadformájú felületek esetén – hogy ezek a kapcsolódási pontok nem a lehető leghatékonyabban helyezkednek el.

#### 3.4 Inspiráció a természetből

A természetben fellelhető szerkezeti kialakítások mindig is remek inspirációt nyújtottak az ember alkotta struktúrák tervezésekor. A természet minden nagyságrendben „törekszik” olyan rugalmas, adaptív szerkezetek létrehozására, amelyek az anyagi erőforrásokat és az energiafelhasználást minimalizálják [5].

Környezetünkben sok helyen találkozhatunk üreges anyagokkal. Ezek különböző méretű és alakú cellákat tartalmaznak, amelyek biztosítják az optimális anyageloszlást, hogy szerkezetünk adott terhelésnek ellenálljon. A természetben található üreges anyagok jellegzetes geometriájának matematikai leírása legtöbbször Voronoi-diagrammal történik.

Térbeli Voronoi-diagram alatt egy metrikus tér konvex, térbeli alakzatokká való egyenletes felosztását értjük – a lehető legkevesebb geometriai elemet alkalmazva – véges, diszkrét mennyiségű pont segítségével. Minden térbeli alakzatnak – ezeket nevezzük Voronoi-celláknak – van egy „generáló” pontja, és az adott alakzat minden pontja közelebb áll a „generáló” pontjához, mint bármelyik másikhoz [6].

#### 4. SZABADFORMÁJÚ GEOMETRIÁK BELSŐ TARTÓSZERKEZETÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA VORONOI-DIAGRAMM SEGÍTSÉGÉVEL

Tetszőleges, szabadformájú geometria és komplex terhelések esetén az eddig használt tartószerkezet optimalizálási módszerek nagyon bonyolultnak, időigényesnek bizonyultak, és a lehetséges megoldások halmazának csak egy részét vizsgálták.

A Voronoi-diagram ezzel szemben tetszőleges számú dimenzióban bármilyen eloszlású pontfelhővel elkészíthető: a térben véletlenszerűen elszórt pontok körül kialakuló Voronoi-cellák a pontok számának növelésével hatszögletű alakzathoz tartanak, így egyszerűen készíthetők vele méhsejtrács jellegű tartószerkezetek. Az ilyen jellegű struktúrák kiváló szilárdság-tömeg viszonyokról ismertek [7].

*Azt feltételezzük, hogy az eddig használt analitikus rácoptimalizálási eljárásoknál hatékonyabb lehet a Voronoi-diagrammal készített adaptív hálógeometria alkalmazása.*

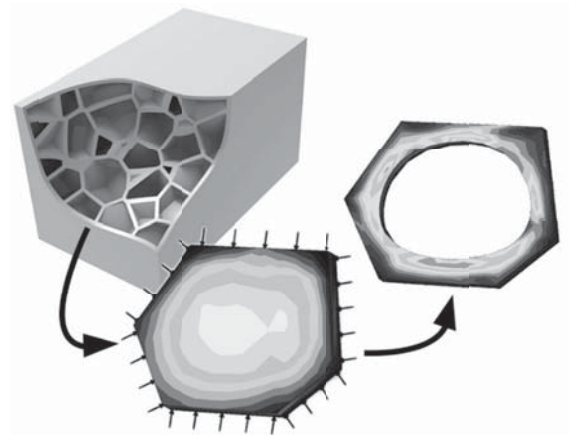
##### 4.1 Dobojszerkezetű felépítés

A belső teherviselő elemek elrendezése mellett a cellák geometriáját is máshogy közelítjük meg. Ahelyett, hogy a Voronoi-hálót felépítő térbeli egyeneseket rudakként értelmeznénk, a cellák falai fogják felvenni a terhelést, így kvázi dobojszerkezetként tekinthetünk rá. A dobojszerkezetek az élek mentén is fel tudják venni a feszültséget, ami jobb terheléeloszlást eredményez [8]. Ez különösen a külső héjhoz való kapcsolódás tekintetében előnyös, hiszen

az erőbevezetés mindenképpen azon keresztül történik.

##### 4.2 A „kikönnnyítések”

A szerkezetből az egyik cella falát kiemelve felületi nyomással szimulálhatjuk a kapcsolódó élek mentén áthatódó terhelést. (2. ábra)



2. ábra – Voronoi-diagrammal képzett dobojszerkezet és a kikönnnyítésének szemléltetése

Jól megfigyelhető, hogy a keletkező feszültség elhal a keresztmetszet mentén. A falak középső részének feszültségelvezető hatása elhanyagolható, ezért azok eltávolításra kerülhetnek.

Vannak olyan rétegenkénti felépítési módszerek (pl. SLS), amelyek működésükből fakadóan nem alkalmasak teljesen zárt üregek nyomtatására. Az alkalmazott „kikönnnyítések” – még jobb szilárdság-tömeg arány mellett – technológiai szempontból is kedvezőbb tartószerkezetet eredményeznek.

#### 5. ALGORITMIKUS MODELLEZÉS A GRASSHOPPERREL

A nem-hagyományos optimalizálási eljárások alkalmazásához egy olyan algoritmust kell kidolgoznunk, amely egy adott pontfelhő köré generál tartószerkezetet. A probléma megoldásához ki kell lépni a jól ismert CAD rendszereink komfortzónájából, és számítógépes grafikai problémaként kell tekinteniük rá.

Az ilyen feladatok megoldásához biztosítanak megfelelő eszközt az algoritmikus modellezési keretrendszerek. Ilyen például az általunk is használt Rhino NURBS-modellező program Grasshopper beépülő modulja.

##### 5.1 Grasshopper bemutatása

A Grasshopper vizuális programnyelvével módosíthatjuk a geometriát vagy kipróbálhatunk új, izgalmas formákat. A legtöbb ilyen jellegű nyelvhez hasonlóan itt is „dobozokat” kell összekötnünk „kábelekkel”: a dobozok jelképezik az entitásokat, a kábelek pedig a köztük lévő kapcsolatokat.

A program felépítése folyamatábrára emlékeztethet, ezért jól átláthatóak az elkészült algoritmusok, még programozási alapismeretekre sincs szükség a használatához. A Grasshopper mindazt tudja, amit a „hagyományos” programozási nyelvek: végezhetünk matematikai, logikai vagy vektoralgebrai műveleteket, mátrix transzformációkat, listákat és adatfákat kezelhetünk vele, sőt, beépített genetikus algoritmust is tartalmaz. Minden Rhinoval elvégezhető feladathoz (pl. geometriai analízisek) tartozik egy entitás, a műveleteket kombinálva a lehetőségeink száma szinte végtelen. Még szabadabbá teszi az alkotást, hogy az ingyenesen elérhető plug-inok mellett C# és Python nyelvekkel is szkriptelhető a program.

A Rhino remekül kezeli az importált geometriákat, a Grasshopperrel emiatt sok hasznos adatot tudunk kinyerni a modellekből. Elemeire bonthatjuk azokat, majd az élek, csomópontok, felületek felhasználásával hozhatunk létre újabb formákat. Ez adja a legnagyobb szabadságot, mivel így a kész algoritmust tetszőleges geometriával lefuttathatjuk.

## 6. AZ ÖTLET MEGVALÓSÍTHATÓSÁGÁNAK BIZONYÍTÁSA

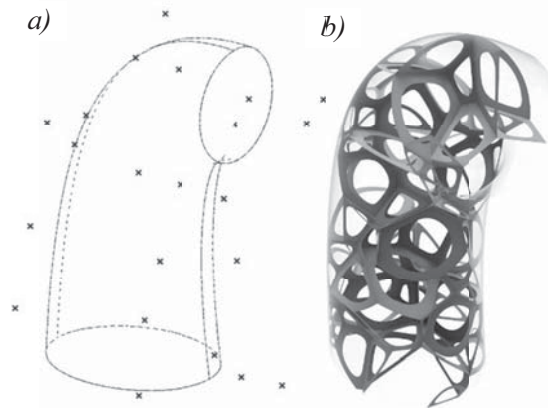
A Grasshopper tehát adaptív véletlen geometriák automatikus generálására kiválóan alkalmas. Az elkészült algoritmust egy néhány soros Python szkripttel automatizálhatjuk, amely egy adott pontfelhő köré generál tartószerkezetet.

### 6.1 Véletlenszerű mintavételezés

Első lépésben az ötlet megvalósíthatóságának bizonyítása volt a célunk. A pontfelhők meghatározására az egyszerű Monte-Carlo-módszer elve szerint véletlenszerű mintavételezéssel kerül sor. [9] A vizsgálathoz normál eloszlású véletlen pontthalmazokkal generáltunk lehetséges tartószerkezet geometriákat (3. ábra), a kész megoldásokat pedig egy szintén automatizált végeselemes számítással ellenőriztük.

### 6.2 Automatizált végeselemes vizsgálat

A számítási idő csökkentése érdekében kihasználtuk, hogy a szerkezet azonos falvastagságú tartószerkezet elemekből és egy külső héjből áll. Az ilyen alkatrészeket – a hálózaskor héjelemeket alkalmazva – a falaik



3. ábra – Bemelő pontfelhő (a) és az azzal generált tartószerkezet (b)

középfelületével modellezhetjük. A héjelemek ugyan valamelyest csökkentik a modell pontosságát, ugyanakkor nagyságrendekkel csökken a számítási igény is. [10]

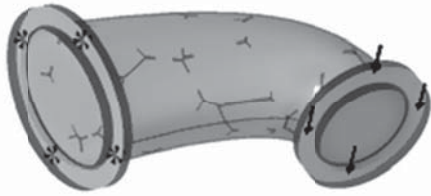
Ahhoz, hogy minél több szimulációt el tudjunk végezni, vizsgálati paraméterként könnyen kiolvasható és összehasonlítható értéket kell megválasztanunk. A potenciális szingularitási, hálózási problémák és egyéb elhanyagolások miatt a maximális deformáció alapján hasonlítottuk össze a modelleket.

A vizsgálatokhoz Creo Simulate-et használtunk, melynek működése is kedvező feltételeket biztosít ehhez. A beépített szimulációs modul alacsony elemszámmal dolgozik, a háló sűrítése helyett az interpolációs függvény fokszámát növelve (P módszer) automatikusan iterál a megadott konvergencia vagy fokszám eléréséig. A fokszám növelésével a csomópontok száma is növekszik, így a másod- vagy magasabb rendű elemek konkáv alakot is felvehetnek, és sokkal egyenletesebben kapcsolódnak a görbült geometriákhoz.

### 6.3 A vizsgálat menete

A szimulációhoz a 4. ábrán látható mintafeladatot definiáltuk.





4. ábra – Mintafeladat definiálása

Számításaink utólagos ellenőrzését később szakítógéppel kívánjuk végezni. Ezt inzertek segítségével tudjuk megtenni: a minta két (terhelés felvételére kialakított) felülete köré karimákat helyeztünk a modellben. Az egyik karimának az összes szabadságfokát elvettük, a másikra pedig függőleges irányú, 1000 [N]-os terhelést helyeztünk.

A szimulációkkal célunk annak a – lehető legkönnyebb – tartószerkezet elrendezésnek a megtalálása, aminél a deformáció mértéke nem haladja meg a 0,09 [mm]-t. A vizsgálatok eredményeit egy táblázatba gyűjti a szkript, innen választhatjuk ki a céljainknak legmegfelelőbbet.

## 7. ÖSSZEHAJONLÍTÁS EGYSÉGCELLÁS ELJÁRÁSSAL

Sokan szeretnék kihasználni az additív gyártás lehetőségeit, és ezt az igényt a szoftverfejlesztők sem hagyják figyelmen kívül: több opciónk is van belső tartószerkezetek optimalizálására. A Creo 4.0-s verziójában is található beépített rácoptimalizálási funkció (Creo Lattice feature), segítségével néhány kattintással elláthatjuk modellünket egységcellákból felépített belső tartószerkezettel.

### 7.1 Rácoptimalás Creo-val

Összehasonlításképpen elkészítettük a Simulate paramétero optimalizáló funkciójával egy ugyanakkora maximális deformációt megengedő tartószerkezetet. Az egységcella kiválasztása után az élhosszok lesznek az optimalizált paraméterek.

A cellák méretoptimalizálása még ilyen viszonylag egyszerű esetben is (amikor az algoritmus csak egy értéket változtat) igen nagy számítási kapacitást igényel. A cellák rúdelemeit gerenda-, határoló felületet pedig héjelemekkel helyettesítve végezhetjük el az optimalizálást. A két egyszerűsített modell így már jó közelítéssel összehasonlítható.

### 7.2 Numerikus eredmények összehasonlítása

A végső összehasonlítás a modellek solid-elemes verziójával történt, az eredmények az 1. táblázatban láthatóak. A vizsgálatot szintén Creo Simulate-ben végeztük.

Mindkét eljárás teljesítette a megszabott maximális deformáció követelményét. A Creo-s verzió az iteráció működésének köszönhetően nem tudott olyan közel kerülni a megcélzott legnagyobb megengedett deformációhoz, mint a véletlen mintavételezéssel készített. Ennek köszönhető, hogy az egységcellás változat legnagyobb elmozdulása kisebb volt, a Voronoi-diagrammal készített verzió viszont 21,4%-kal kisebb térfogattal rendelkezik.

1. táblázat.

Eredmények összehasonlítása

Értékelési szempontok	Creo Lattice	Voronoi algoritmus
Megengedett max. deformáció [mm]	$7,5 \cdot 10^{-2}$	
Max. deformáció az egyszerűsített modellnél [mm]	$7,47 \cdot 10^{-2}$	$7,41 \cdot 10^{-2}$
Max. deformáció a solid-elemes verzióánál [mm]	$6,88 \cdot 10^{-2}$	$6,98 \cdot 10^{-2}$
Térfogat [cm <sup>3</sup> ]	14,810	18,837
Térfogat különbség	100%	78,6%

### 7.2 Feszültségképek összehasonlítása

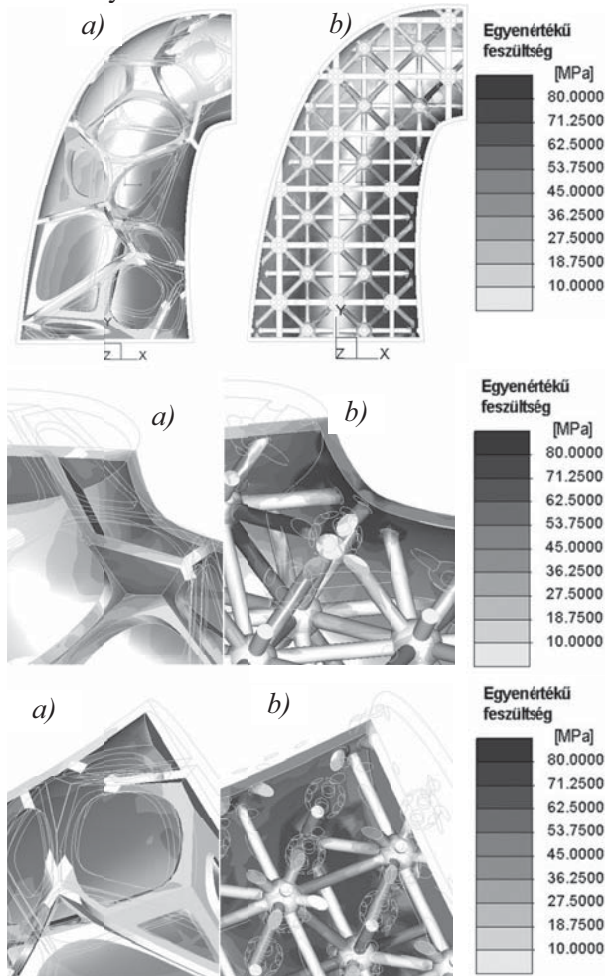
A feszültségképek összehasonlítása a von Mises-féle egyenértékű feszültség alapján történt

(5. ábra), ezeknek a vizsgálatokor látszanak igazán az adaptív hálógeometria előnyei. Jól látható, hogy Voronoi-cellával készített tartószerkezet egészen sokkal egyenletesebb a feszültségeloszlás, kevesebb kihasználatlan elem található rajta.

A dobozszerkezetű tartók előnyeit a rácsszerkezetekkel szemben a külső palásthöz való kapcsolódás vizsgálatokor figyelhetjük meg. Az általunk generált verzió az élükben kapcsolódó dobozelemeknek köszönhetően kedvezőbb terhelésátadást biztosít a Creo-ban optimalizálnál.

## 10. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakítógépes validálás még várat magára, ám végeleges vizsgálatokkal igazolni tudtuk feltevéseinket: véletlen mintavételezéssel készíthető olyan tetszőleges szabadformájú külső héjhoz adaptívan illeszkedő hálógeometria, amely jobban teljesít komplex terhelés esetén, mint az egységcellás verzió. Az is igazolódott, hogy a dobozszerkezetű cellastruktúra kedvezőbb feszültségeloszlást eredményezhet.



5. ábra – A Voronoi-diagrammal készített tartószerkezet (a) és a Creo-s verzió (b) feszültségképei egyes részeinek összehasonlítása.

### 10.1 Kitekintés a módszer továbbfejlesztési lehetőségeire

Primitívebb véletlen mintavételezésen alapuló optimalizálási eljárást aligha választhattunk volna, ennek ellenére a kiválasztott geometria jobban teljesített a paramétoptimalizáláson átesett egységcellánál.

Az itt bemutatott keretrendszer jó alapot nyújthat szofisztikáltabb algoritmusokkal való

kísérletezésre. Elsőként a cellák falvastagságának és a kivágások mértékének optimalizálásával lenne érdemes kiegészíteni az algoritmust. Hosszab távon elképzelhető genetikusan algoritmusok és különböző mélytanulási módszerek alkalmazási lehetőségeinek feltérképezése is.

## 11. IRODALOM

- [1] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Irvani, P., Olliver, V., Palmer, C., and Bowyer, A.: RepRap - The Replicating Rapid Prototyper. In: Robotica. 29. köt. (2011), 177–191 p.
- [2] Chopra, P.: Effective Mechanical Properties of Lattice Materials (2009)
- [3] Bendsøe, M. P., Sigmund, O.: Topology Optimization. Berlin: Springer (2002)
- [4] Dr. Aradi, P., Gräff, J., Dr. Lipovszki, Gy.: Számítógépes szimuláció. Bp.: BME MOGI (2014)
- [5] Pearce, P.: Structure in Nature Is a strategy for Design. Cambridge: MIT Press (1978)
- [6] Bronstein, A., Bronstein, M., Kimmel, R.: Numerical geometry of non-rigid shapes. New York: Springer (2008)
- [7] Gibson, L. J., Ashby, M. F.: Cellular solids. Cambridge: Cambridge Univ. Press (1997)
- [8] Harth, P., Fülöp, T.: Klasszikus járműfelépítmény-tervezési módszerek. In: A jövő járműve. 2. köt. (2012), 119-125 p.
- [9] Graham C., Talay D.: Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods. Palaiseau: Springer (2013)
- [10] Moharos, I., Oldal, I., Szekrényes, A.: Végelelem-módszer. Bp.: Typotex (2011)

# OKTATÁSI CÉLÚ GÉPÉSZETI ESZKÖZ FEJLESZTÉSE

## ENTWICKLUNG EINES MASCHINENDIAGNOSTIK-LEHRMITTELS

*Eric Rahne, okl. villamosmérnök, igazságügyi szakértő (PIM Kft.)*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A rezgésdiagnosztika sikeres alkalmazásához alapos szaktudás kell. A hatékony oktatáshoz hordozható, a gépészeti hibák minden típusának bemutatásra alkalmas VibDemo nevű próbapadot fejlesztett a PIM Kft. már 1999 és 2004 között. Ma már világszerte közel 70 eladással büszkélkedő és CE-minősítéssel is rendelkező sikertermék. A VibDemo fejlesztési lépésein és nehézségein túl magát a terméket és annak továbbfejlesztési lehetőségeit is bemutatjuk.

### INHALT

Die erfolgreiche Anwendung der Schwingungsdiagnostik erfordert gründliche Fachkenntnisse. Die PIM GmbH hat zwischen 1999 und 2004 einen VibDemo-Prüfstand entwickelt, der alle mechanischen Fehlerarten demonstrieren kann. Mit weltweit fast 70 verkauften Einheiten und CE-Zertifizierung ist dieser ein Erfolgsprodukt. Neben den Phasen und Schwierigkeiten der Entwicklung von VibDemo stellen wir das Produkt und sein Entwicklungspotential vor.

### 1. ELŐZMÉNY

A rezgésdiagnosztika sikeres alkalmazásához nemcsak megfelelő műszerek és szoftverek kellene, hanem alapos szaktudás is. Ez elsősorban a spektrumelemzésen alapuló gépállapot-felmérő eszközök esetében elengedhetetlen.

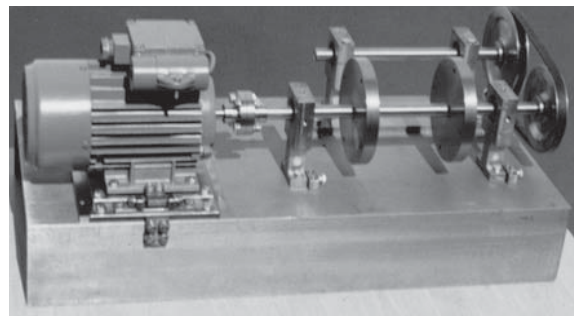
Természetesen nem szervezhető meg, hogy minden szakmai kezdőnek biztosítva legyen egy egyetemi vagy főiskolai gépészeti laboratóriumi gyakorlata vagy valamelyik ipari vállalatnál végezhető gyakorlati betanítása. Az utóbbival kapcsolatosan problémás az is, hogy a hibajelenségek felismeréséhez hibás gépek kellenének, lehetőleg mindenféle konstrukcióból és még többféle hibákkal.

Cégünk már 1999-es évben ismerte föl, hogy a saját ügyfeleinknek nyújtott helyszíni (tehát az ügyfél gépein végzett) gyakorlati oktatás sem oldja meg a fenti képzés szükségleteit. Ugyanis nem mindig akadt éppen elég hibás gép, vagy csak nagyon kevés hibatípus volt jelen. Szándékosan pedig senki sem rontja el a gépeit...

Ipari gépeket szállítható oktatási eszköznek alkalmazni - azok mérete és súlya miatt - szintén nem bizonyult megoldásnak. Mindezekből kiindulva egy kifejezetten hordozható oktatási eszköz kifejlesztésébe kezdtünk bele.

### 2. AZ ELSŐ VÁLTOZAT (1999)

A fejlesztés szó szerint kezdeti nehézségekkel járt. Ugyanis az első, 1999-ben elkészült (lenti képen látható) VibDemo próbapadunk tömege messze túlhaladta az 50 kg-ot. Alapkitelben, plexiburkolat és kiegészítő tartozékok nélkül!



1. ábra: a VibDemo első változata (1999)

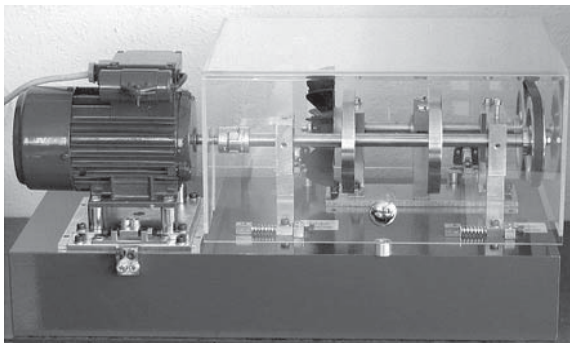
A tömegén túl más szempontok alapján sem voltunk még elégedettek vele:

- szíjlesztés/fogaskerék-beállítás előnytelen
- ferde csapágy "behúzza" magát (leállásig!)
- villamos hiba bemutatásához kell állítható fék
- túl kevés furat a tárcsákon (egyensúlyozáshoz)
- hiányzik a védőburkolat (munkavédelem)

Mivel cégünk 2000 óta rendszeres (a FAT és az MMK által is akkreditált) rezgésdiagnosztikai oktatást végzett, a megfelelő oktatási eszköz rendelkezésre állása égető fontosságúvá vált. Tehát a fent felsorolt hiányosságok megszűntetése érdekében fejleszteni kellett az eszközt.

### 3. A MÁSODIK VÁLTOZAT (2001)

A VibDemo próbapadunk tömege ugyan nem változott (inkább csak nőtt), de néhány "apró" változtatás révén javult a használhatósága, teljessége. Plexiburkolatot is kapott, ami az oktatás során szükséges munkavédelem szempontjából igen fontos.



2. ábra: a VibDemo második változata (2001)

Most már megoldottak tekinthetjük a szij- és foghajtás-beállítással kapcsolatos kényelmi problémákat, a ferde csapágy "önbehúzási" gondot, lett fék, több tárcsafurat és védőburkolat.

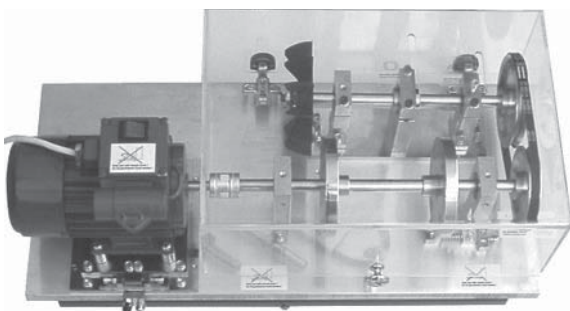
Viszont a tömeg igen zavaró tényezőnek mutatkozott (lift nélküli 3. emeleti szállodai oktatóterem tanulsága), és néhány további apróság is elégedetlenségre adott okot:

- rezonanciajelenségek oktatásához kell
  - fordulatszám változtatási lehetőség
  - eltérő merevség vagy alátámasztás
- kiegészítő tartozékként kell
  - görbe tengely (jó csapágyakkal)
  - jó tengely "valódi" rossz csapágyakkal
- fogaskerekek csak ipari kivitelűek lehetnek (pontos megmunkálású köszörült fogakkal)
- a tengelyek köszörült pontosságúak legyenek

Megjegyzés: Az első - tesztcélokra Németországba eladott VibDemo egységet - fenti okok miatti "használhatatlanságra" hivatkozva vissza is kaptuk a vevőtől.

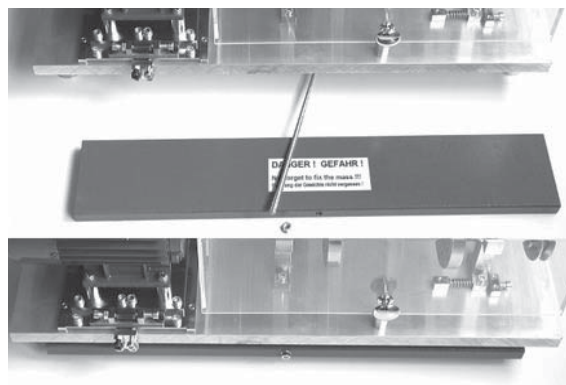
#### 4. SZINTE TELJESEN ÚJ VERZIÓ (2002)

Ez a szinte teljesen új kivitel egyben a VibDemo első kereskedelmi változatává is vált. A fejlesztés minden eddigi tapasztalatot igyekezett figyelembe venni: alumíniumalap került a nehéz vas U-profil helyére (könnyebb és egyben jobb rezgéscsillapító), megszülettek a fent említett tartozékok, valamint javult az alkotóelemek pontossága.



3. ábra: a VibDemo harmadik változata (2002)

A VibDemo alaphoz való rögzítetlenségének kompenzálására az alumíniumlap alá felszerelhető vaslapokat alkalmaztunk. Nyilván ezekkel együtt még mindig nagy volt az eszközünk tömege, de a "kezdeti" > 50 kg-ból lefaragtunk 15 kg-t!



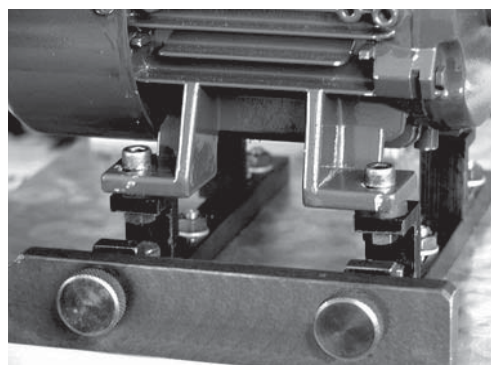
4. ábra: rezgéscsillapító vaslapok (2002)

Az eladott készülékekkel kapcsolatban nem győztük a fenti vaslapok megfelelő rögzítésének fontosságát hangsúlyozni. Másodsorban sem ügyfeleink, sem mi nem voltunk elégedettek a 35 kg cipelendő össztömeggel. Ezeken kívül felmerültek további gondok és elvárások:

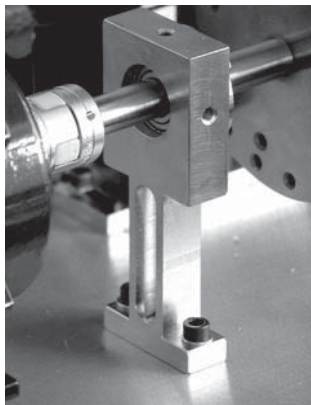
- további súlycsökkenéshez "rugalmas" csapágyházak kellene
- a tengelyvonal-beállítás mechanikája nem felel meg a "valós" beállítási körülményeknek
- a hibaszimulációk könnyedén, műszer nélkül "kinullázhatóak" legyenek
- az egyfázisú motorok rezgései ne kerüljenek a próbapad többi elemeihez

#### 5. SIKERES MÓDOSÍTÁSOK (2003)

Ez a kivitel még megtartotta a vaslapokat, de megoldotta a fent felsorolt problémákat egy teljesen új tengelyvonal-beállítás (villanymotor-rögzítés) alkalmazása révén, valamint a marással kikönnnyített (változtatlanul teljes egészében vasból készült) csapágyházakkal.



5. ábra: új motorrögzítés és tengelyvonal-beállítási szerkezet "0"-helyzettel (2003)



6. ábra: marással kikönytyített csapágház

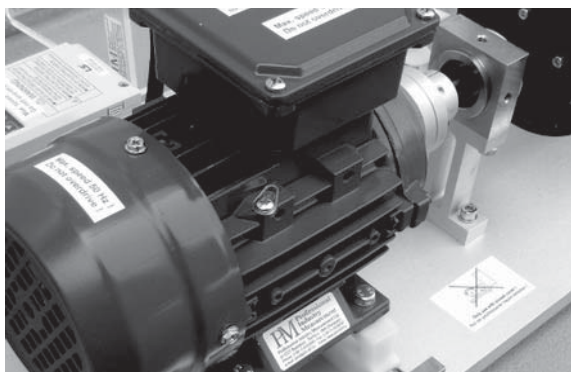
Bevált az egyfázisú betáplálású frekvenciaváltó, mellyel háromfázisú villanymotorokat lehet üzemeltetni. Azon túl, hogy mód nyílt a fordulatszám tetszőleges változtatására (és stabil megtartására), nem kellett kínlódni az egyfázisú motorokra jellemző (meg nem szüntethető) 50 Hz-es és 100 Hz-es rezgésekkel sem.

Viszont továbbra sem tetszett a 35 kg-os össztömeg, valamint felmerültek újabb elvárások is:

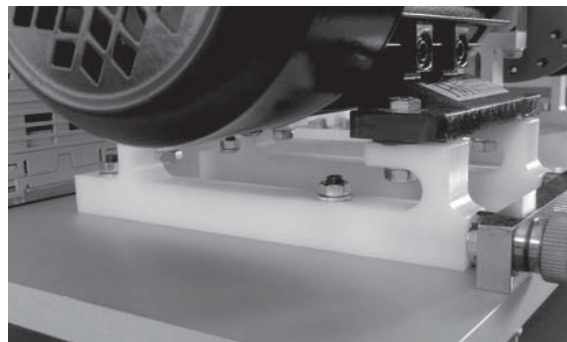
- a súlycsökkenéshez (a vaslapok elhagyásához) még rugalmasabb csapágházak kellene
- alumínium-tárcsákkal csökkentjük a tömeget
- kétféle "láb" legyen (alumínium és gumi)
- a motortartó műanyag túl könnyen törik
- tengelyvonal-beállítási gyakorlatokhoz kell egy gyűrű a tengelyre (e nélkül túl kicsi a tengelyátmérő a mérőfejek felszereléséhez)

## 6. A "VÉGLEGES" VÁLTOZAT (2004 óta)

Ez a kivitel végre elérte a megcélzott - 25 kg alatti - össztömeget. Minden tartozékkal együtt! A megoldást a kikísérletezett geometriai alakú - alumíniumból készített, marással kikönytyített - csapágházalábok adták. Sőt, a két részből álló szerkezet gyártása (és annak költsége) is némileg kedvezőbbé vált. A vaslapok pedig véglegesen eltűntek, ezen túl azóta a tárcsákat is a könnyebb alumíniumból készítjük.



7. ábra: kétrészes "hangolt" csapágház

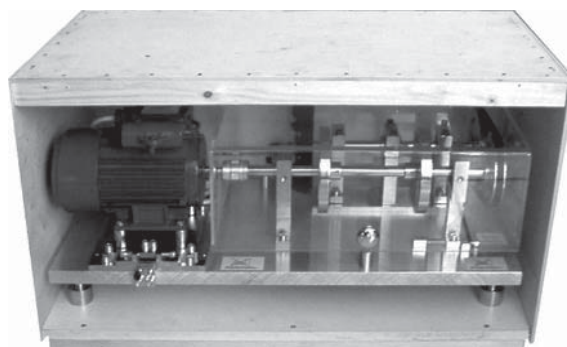


8. ábra: íves marással készített motortartó

Néhány kisebb változtatás a plexiburkolaton a legtöbb hiba zárt burkolat mellett történő bemutatását tette lehetővé, a teljes rendszer szállítására (saját kezűleg) gyártott fadoboz is könnyítésem és több használhatósági javításon esett át. Tömege 7,3 kg-ról 4,8 kg-ra csökkent.



9. ábra: hibaszimuláció zárt burkolat mellett



10. és 11. ábra: régi és új szállítódoboz

## 7. CE-MEGFELELŐSÉG, MŰSZAKI ADATOK

A CE-megfelelőség első hallásra nem tűnik izgalmas témának, de mégis munkát adott nekünk. Ugyanis rejtetté kellett tenni a védőburkolat nyitási érzékelőjét. (Ennek megoldását természetesen itt nem áruljuk el.)

Ezen felül végtelen sok felirattal (inkább piktogrammal) kellett ellátnunk a VibDemo próbapadunkat, hogy még a legóvatlanabb (és akár olvasás-tudatlan) felhasználó se tudjon kárt tenni magában. Ennek eredményeként büszkélkedhetünk azzal, hogy a mi eszközünk nem csak CE-nyilatkozattal rendelkezik, hanem valódi bevizsgálással igazolt biztonságos kivitelben kerül a felhasználókhoz.

A VibDemo jelenleg is gyártott és forgalmazott változata a következő képességekkel bír:

### Bemutatható hibák

- egyensúlyozatlanság
- statikus egyensúlyozatlanság
- dinamikus kiegyensúlyozatlanság
  - 2 vagy 3 síkban
  - 2 eltérő fordulatszámú tengelyen
- tengelyvonál-beállítási hiba
  - oldalirányú eltolódás
  - szöghiba
  - mindkettő kombinációja
- ferde csapágyfészek
- mechanikus játék, laza szerelés
- szíjhajtás hiba
  - tárcsabeállítási hiba
  - szíjhiba
  - szíjrezonancia
- görbe tengely
- gördülőcsapágy hibabeállítások
  - használat révén elkopott csapágyak
  - külső gyűrű hiba (ideiglenes)
- fogaskerék-hajtás hibái
  - szoros vagy laza foghézag
  - ferde illesztés
  - többféle foghiba (két fogaskerék kombinálása)
  - fogismétlődési frekvencia
- villanymotor-frekvenciák

A VibDemo moduláris felépítésű, csupán egy 10-es villáskulccsal és egy 4-es imbuszkulccsal szerelhető. Műszaki adatai a következők:

### Hajtás:

3x230VAC háromfázisú motor, 2985 f/p, 180W, egyfázisú frekvenciaváltóról táplálva

### Külső méretek:

600 mm (h) x 315 mm (sz) x 265 mm (m)

### Tömeg:

kb. 22 kg (az összes tartozékkal)

kb. 4,5 ... 5 kg szállítódoboz

## 8. A VIBDEMO ALKALMAZÁSA ÉS SIKERE

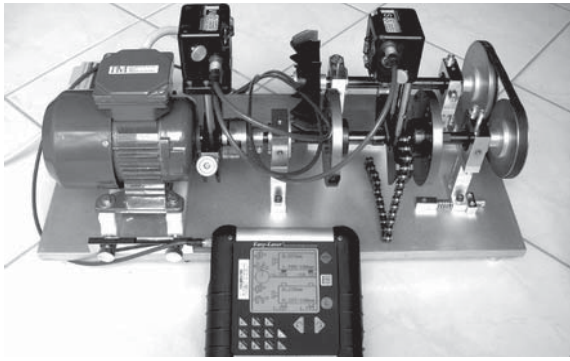
Korábban már említésre került, hogy közel 70 egységet értékesítettünk az évek során. Mindezt úgy, hogy soha sehol reklámot nem tettünk közé a VibDemo próbapadnak, hiszen egyedileg készített eszközökről van szó és gyártási lehetőségünk (illetve a beszállítóink kapacitása) igen korlátozott. Ennek ellenére szállítottunk már Belgiumba, Dél-Koreába, Dubaiba, az Egyesült Arab Emírátságokba, Finnországba, Hollandiába, Kínába, Kuvaitba, Magyarországra, Nagy-Britanniába, Németországba, Nigériába, Norvégiába, Olaszországba, Oroszországba, Portugáliába, Romániába, Spanyolországba és Svédországba (szigorúan ABC-sorrendben).

Cégünk mérnöki filozófiájának megfelelően minden lehetőséget megragadunk a felnövekvő új műszaki szakemberek és mérnökök nemzedékének képzési támogatásához. Így örvendetes, ha termékeinkkel és műszereinkkel, valamint tudásunkkal és több évtizedes tapasztalatunkkal segítséget nyújthatunk a bennünket megkereső főiskolai és egyetemi hallgatóknak is.

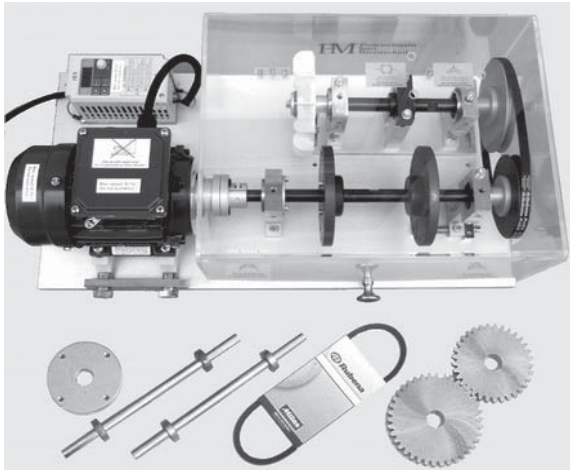
Szinte rendszeresen tartunk szakmai előadásokat (természetesen a VibDemo alkalmazásával) több magyar főiskolán és egyetemen, de szakdolgozatokhoz és diplomamunkákhoz is biztosítjuk a rezgésdiagnosztikai és gépbeállító műszereinken túl a próbapadunkat is. Így készült már több rezgésdiagnosztikával, gépbeállítással vagy akár tengelykapcsoló tulajdonságaival foglalkozó munka a VibDemo alkalmazásával.



12. ábra: VibDemo a rezgésdiagnosztikában



13. ábra: VibDemo alkalmazása tengelyvonal-beállítási gyakorlathoz



14. ábra: VibDemo és néhány tartozéka (2004)

## 9. A VIBDEMO TOVÁBBFEJLESZTÉSE

Az eddigiek alapján talán az a benyomás támadhatna, hogy itt megállt a VibDemo fejlesztése. Ez azonban nem így van, egyrészt ugyanis keresünk megoldásokat a gyártás-közbéli könnyebb szerelhetőségre és a gyártási költségek csökkentésére. Másrészt vannak ötleteink a bemutatható gépészeti hibák tárházának bővítésére, például szivattyúk és ventilátorok áramlási hibáinak, valamint sikló-csapágyak diagnosztikai módszereinek bemutatására.

Fényképek és műszaki adatok forrása:

PIM Profesziónális Ipari Méréstechnika Kft.  
H-1221 Budapest, Tanító u. 19/A  
Tel.: (1) 424-00-99  
Fax: (1) 424-00-97  
e-mail: pim@pim-kft.hu  
web: www.pim-kft.hu  
www.termokamera.hu  
www.gepszakerto.hu

## TERMOGRÁFIA - elmélet és gyakorlati mérés-technika

- Több mint 20 év szakmai tapasztalat
- Közel 65 ezer egyedi termográfiai felvétel
- Több mint 350 termográfiai szakértés
- 3-as szintű termográfiai bizonyítvány 2008 óta
- Igazságügyi szakértő 2010 óta

Mindent tömörítve egy 651 oldalas könyvbe, melynek szerzője Magyarország egyetlen, 3-as szintű vizsgával rendelkező termográfiai szakértője.

A könyv 379 irodalmi forrás és 76 saját publikáció feldolgozása, több mint kétezer internetes forrás tanulmányozása, valamint a szerző szinte megszámlálhatatlan saját méréseinek és kísérleteinek tanulságai alapján készült.

Eredményként 303 színes ábra, 452 kép, 754 részletes hőkép, 50 táblázat és 180 képlet segítségével táruul az olvasó elé a termográfia szakmai világa - részletesen, de mégis könnyen érthetően.

**Megrendelhető:**

**15.500 Ft + ÁFA áron**

PIM Profesziónális Ipari Méréstechnika Kft.  
1221 Budapest, Tanító u. 19/A  
web: www.pim-kft.hu  
e-mail: pim@pim-kft.hu  
telefon: (1) 424-00-99



# RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLAT AKTÍV TERMOGRAFIÁVAL

## ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALPRÜFUNG MITTELS AKTIVER THERMOGRAFIE

*Eric Rahne, okl. villamosmérnök, igazságügyi szakértő (PIM Kft.)*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A termográfia az egyik leguniverzálisabb, legelterjedtebb vizsgálati eljárás. Ezen belül növekvő gyakorisággal találkozunk az aktív termográfival, mely pl. roncsolásmentes anyagvizsgálatot is lehetővé teszi. Az aktív termográfia esetében a mérési eredményének eléréséért céltan közlünk energiát a tárgyal. Lehetőségei pedig a mérések matematikai értékelésében rejlenek a megnövelt termikus felbontás és az emisszió-tényezőtől való függetlenség révén.

### INHALT

Die Thermografie ist eines der universellsten und verbreitetsten Prüfverfahren. Hierbei kann man zunehmend oft der aktiven Thermografie begegnen, welche auch zerstörungsfreie Materialprüfung ermöglicht. Bei der aktiven Thermografie wird dem Objekt gezielt Energie zugeführt, um das Messergebnis zu erhalten. Herausragend sind hierbei die mathematisch erzielbare hohe thermische Auflösung und die Emissionsgrad-Unabhängigkeit.

### 1. BEVEZETŐ

A termográfia mára az egyik legsokoldalúbb, legelterjedtebb vizsgálati eljárás - nemcsak az iparban, hanem a kutatás-fejlesztésben is. Az alkalmazások zöme a passzív termográfiahoz sorolható. Egyre növekvőbb gyakorisággal találkozunk aktív termográfival is, ami roncsolásmentes anyagvizsgálatra is lehetőséget ad.

Azokat a termográfiai méréseket/eljárásokat soroljuk az aktív termográfiahoz, melyek esetén a mérési eredményének elérése érdekében céltan közlünk energiát a mérendő tárggyal. E közben teljesen mintegy, hogy ezt milyen energiaátadás formájában, elektromágneses hullámokkal (fény illetve hősugárzással) vagy konvekció révén, esetleg mechanikus módon (például ultrahanggal) tesszük.

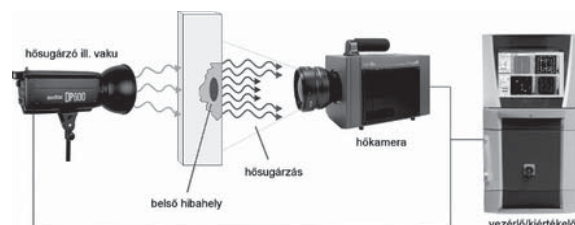
Az aktív termográfia lehetőségei pedig a mérési eredmények matematikai feldolgozásában rejlenek. A matematika alkalmazásával egyrészt akár egy nagyságrenddel kisebb hőmérsékletkülönbségek is kimutathatók, mint amire az alkalmazott hőkamera képessége (NETD értéke) lehetőséget adna.

Másrészt minden (az előadásban bemutatásra kerülő) matematikai kiértékelő eljárás eredménye független a tárgyfelület emissziós tényezőjétől. Ez főleg különböző emissziós tényezőjű tárgyfelületek egyidejű jelenléte esetében jelent felbecsülhetetlen előnyt.

### 2. AKTÍV TERMOGRAFIA ELJÁRÁSOK

#### 2.1. Átvilágítási módszer (transzmissziós hő)

Vékony, jó hővezető anyagok esetében jó eredményekre számíthatunk e módszer alkalmazásával. Mivel a tárgy hátoldaláról történik az energiabevitel, majd az elülső, a megfigyelési oldal felületén regisztráljuk az energiabevitel hatására bekövetkező hőmérsékleteket illetve hőmérséklet-változásokat, az anyagon belüli inhomogenitások okozta hővezetési képesség-eltérések a megfigyelési oldalon eltérő hőmérsékletekhez vezetnek. Nem csak a hőmérséklet csúcértékekben várható különbség, hanem a hőmérsékletváltás megjelenésének időpontja szerint is.



1. ábra: az átvilágítási módszer elrendezése

#### 2.2. Rávilágításos eljárás (hőelvezetés)

Ezeknél az eljárásoknál az energiabevitel a megfigyelési oldalról történik. Alkalmazása tehát akkor javasolt, ha felület-közeli hibákat akarunk felfedezni gyengén hővezető vagy éppen kifejezetten vastag anyagokban. Az eljárástól függően vagy az energiabevitel hatására bekövetkező felületi hőmérsékleteket illetve hőmérséklet-változásokat érzékeljük az emittált sugárzás alapján, vagy a felületen reflektált sugárzás érzékelésére fektetjük a hangsúlyt.

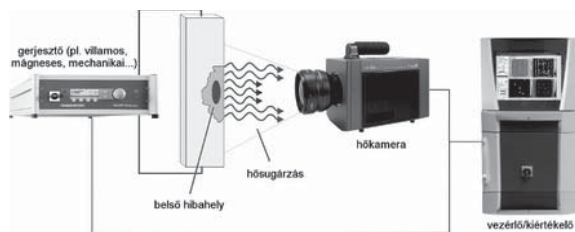




2. ábra: a rávilágításos eljárás elrendezése

### 2.3. „Belső gerjesztésű” hőhatás mérése

Mivel az energiát a tárgy belsejébe juttatjuk, a mérési elrendezés a szükséges hőhatást kiváltó energiaforrás kialakításától függően leginkább az átvilágításos eljárás mérési elrendezéséhez hasonlítható. A gerjesztés lehet bármilyen elektromos vagy mechanikai folyamat, mely a tárgy belsejében hőt képes gerjeszteni. A hibahely fizikai sajátosságától függően a hozzá közeli felületen mérhető hőmérséklet akár alacsonyabb, akár magasabb is lehet.



3. ábra: belső hőgerjesztésű eljárás elrendezése

## 3. ENERGIABEVITELI LEHETŐSÉGEK

Ahhoz, hogy az aktív termográfiahoz szükséges hőmérséklet-változásokat előidézzük, megfelelő időpontban kellő mértékű, de nem túl nagy energiát kell közölnünk a bevizsgálandó tárggyal. A mérendő tárgy tulajdonságaira és a szükséges energiamennyiségre való tekintettel ehhez különféle eszközöket szokás alkalmazni. Az energiaközlés külső vagy belső gerjesztést jelent. A külső gerjesztés besugárzás (hő ill. fény) vagy konvekció, a belső pedig közvetlen villamos, indukciós, vagy mechanikai lehet.

A leginkább megfelelő energiaforrás kiválasztásának elsődleges szempontja, hogy minél kisebb, de célzott energiabevittel lehessen elérni azt az energiaszintet, mely az aktív termográfiai megfigyeléshez szükséges hőmérséklet-változásokat idézi elő.

## 4. AZ AKTÍV TERMOGRÁFIA ELMÉLETE

Kezdjük azzal a kérdéssel, hogy mitől más az aktív termográfia, mint a passzív termográfia?

A passzív termográfia sok esetben állandósult, statikus vagy kvázi-állandósult termikus állapotokból indul ki, mint ahogy például az épületek hőszigetelésének felmérése esetében látjuk. A méréseknél kihasználjuk a tárgy saját hőmérsékletét, hőtermelését vagy hőkapacitását. A folyamatokat figyelése közben viszont könnyen észrevehetjük, hogy nagyon sok termikus folyamat inkább dinamikusnak mondható. Mechanikus vagy elektromos jelenségekhez képest legfeljebb nagyon hosszú az idő-állandója. Hogy milyen hosszú? Egy jó borospincének például olyan vastag a földrétege, hogy a nyári meleg éppen a hideg tél idején jut le a boltozatig.

Mivel a teljes elméleti háttér tárgyalása egy húszperces előadás során lehetetlen, csak a két leggyakoribb gerjesztési móddal és annak matematikai kiértékelésével foglalkozunk a következőkben.

### 4.1. Gerjesztés hőmérséklet-színusz hullámmal

A tárgyra ható szinuszos hőmérséklet-változásos gerjesztés esetében a hővezetési egyenlet egy extrém erősen csillapított - távolság mentén terjedő, időben változó - hőmérséklet-hullám választ ad.

A hőmérséklet-hullám terjedési egyenlete szinuszos gerjesztés esetében:

$$\vartheta(s,t) = \vartheta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\lambda}} \cdot s} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega \rho c}{2\lambda}} \cdot s\right)$$

képlet (1)

Jelmagyarázat:

$\vartheta$  ... hőmérséklet (idő- és helyhez kötött) [°C]

$c$  ... fajhő [J/kg · K]

$\rho$  ... fajsúly [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda$  ... hővezetési tényező [W/m · K]

$s$  ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]

$\omega$  ... az energiabevitel körfrekvenciája

A szinuszos gerjesztés feltételezése mellett a termikus behatolási mélység ( $\mu$ ) egyenlete pedig:

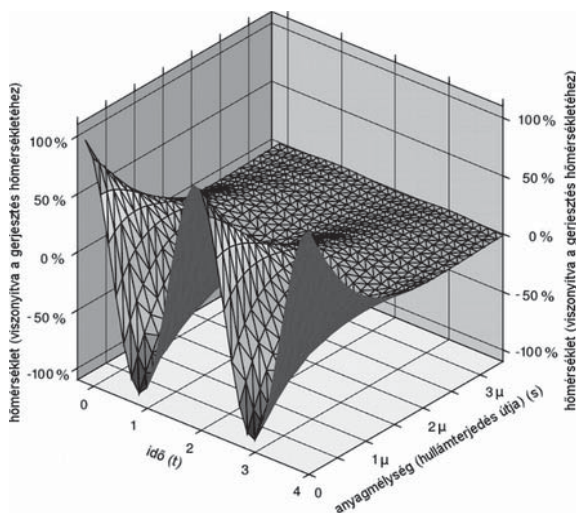
$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda}{\omega \cdot \rho \cdot c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad \text{képlet (2)}$$

Mivel az (1)-es egyenletben szereplő csillapítás (második szorzó) messze nagyobb, mint maga a hullámformára utaló tényező, a hőmérséklet-hullám térben és időben elkenődik / eltűnik. Matematikai szakmai elnevezéssel élve: a jelenség aperiodikus.

Az előzőek alapján pedig értelmezhető a hőmérséklet-gerjesztés révén még számottevően befolyásolható maximális mélység. Egy egységnyi  $\mu$  (behatolási mélység) értékű anyagmélységben (s) már csupán a gerjesztési hőmérséklet egyharmada (pontosan: 37%-a) keletkezik.

Ha a felületi hőmérséklet 10%-os értékét vesszük küszöbértékek, akkor kapjuk az ehhez tartozó, termikus behatolási mélység gyakorlati „határértékét” ( $\mu_{10\%}$ ):

$$\mu_{10\%} \approx 3 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\omega \cdot \rho \cdot c}} \quad \text{képlet (3)}$$



4. ábra: hőmérséklet hullám terjedése szinuszos gerjesztés esetében

#### 4.2. Gerjesztés hőmérséklet-impulzussal

Ha a szinuszos hőmérséklet-ingadozás helyett egy hőmérséklet-impulzus jelformájú gerjesztést választunk, akkor a hőmérséklet-hullám szinusz-gerjesztésre kifejtett matematikai modellje a következőképpen módosul:

$$\vartheta(s,t) = \frac{\Theta}{\sqrt{\pi \cdot t \cdot b}} \cdot e^{-\frac{s^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad \text{képlet (4)}$$

Jelmagyarázat:

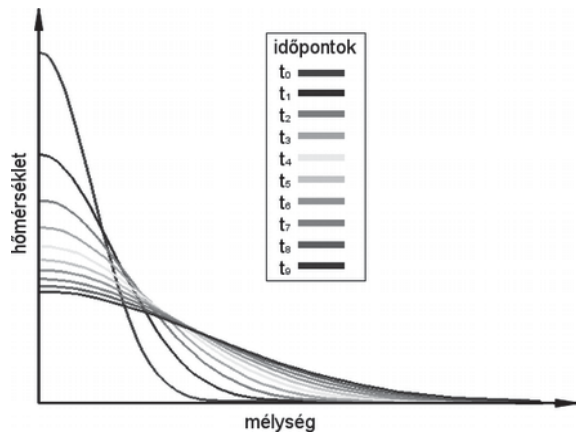
- $\vartheta$  ... hőmérséklet (idő- és helyhez kötött) [°C]
- $\Theta$  ... bevitt energiamentiség [J]
- $b$  ... hőabszorpciós anyagjellemző [ $\text{W}\sqrt{\text{s}}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
- $\alpha$  ... hőmérséklet-terjedési tényező [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $s$  ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]
- $t$  ... impulzus óta eltelt idő [s]

Mivel jelen esetben is a csillapítás messze túlhaladja a hőmérséklet-hullám értékét, a szinuszos gerjesztéshez hasonlóan most is becsülhető a maximális behatolási mélység.

A korábbi gerjesztéshez hasonlóan feltételezett 10%-os felületi hőmérséklet-küszöbvel kapjuk most a következő becslést:

$$\mu_{10\%} \approx \frac{s^2}{2 \cdot \alpha \cdot t} \quad \text{képlet (5)}$$

A következő ábra magyarázattal szolgál a behatolással kapcsolatban.



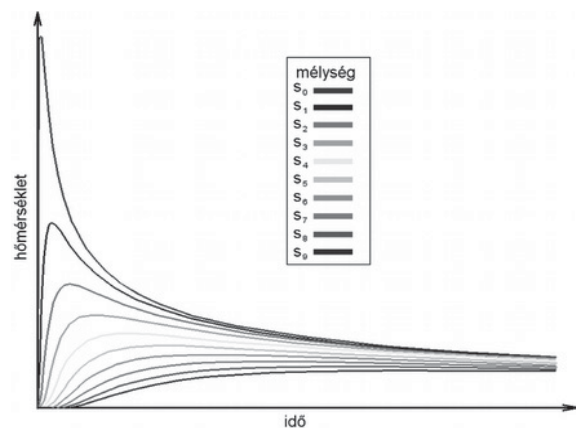
5. ábra: hőmérséklet mélység-függvénye impulzusos hőenergia-bevitel után (metszet egymást követő időpontokról)

Az előző ábrákból felismerhető, hogy a hőmérséklet-csúcsértéke egy-egy adott mélységben csak egy (anyagtulajdonságoktól függő) idő után keletkezik. Az időpont a következő egyenlettel számolható ki:

$$t_{max} = \frac{s^2}{2 \cdot \alpha} \quad \text{képlet (6)}$$

Jelmagyarázat:

- $\alpha$  ... hőmérséklet-terjedési tényező [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $s$  ... hőmérséklet-hullám mélysége [m]
- $t$  ... impulzus óta eltelt idő [s]



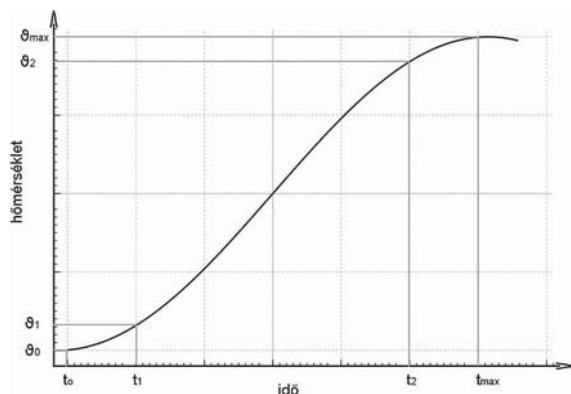
6. ábra: hőmérséklet időfüggvénye impulzusos hőenergia-bevitel után (különböző mélységi rétegekben)

## 5. MATEMATIKAI KIÉRTÉKELÉS

Az aktív termográfia mérési eredmények matematikai feldolgozása és értékelése többféleképpen történhet. A legegyszerűbb módszer az abszolút hőmérsékletértékek értékelése mindenféle matematikai elemzés nélkül. Ez azonban se nem hatékony, se nem használja ki az aktív termográfiaiban rejlő lehetőségeket. Helyette a következő három módszert szokás alkalmazni:

### 5.1. Hányadosképzés alapú eljárás

Ez a módszer a matematikailag legegyszerűbb. Csupán két hőképet kell rögzítenünk: egyet a melegítési folyamat elején, egyet pedig a végén. Annak érdekében, hogy a környezeti hőmérsékletek, valamint a kiinduló állapot egyetlen hőmérséklet-eloszlása minél kevésbé befolyásolja a mérési eredményünket, a két értéket a folyamat teljes idejének első 1/10-e után, majd 9/10-e időpontjában célszerű rögzítenünk. A két adatot pedig csupán osztani kell egymással. Mivel mindkét adat esetében a tárgyfelület emissziós értéke azonos, emissziós-érték független eredményt kapunk!



7. ábra: hányadosképzés alapú kiértékelés mintavételezésének időzítése

A számítás módja pedig hihetetlen egyszerű:

$$\Theta = \frac{\vartheta_{t_2} - \vartheta_{t_0}}{\vartheta_{t_1} - \vartheta_{t_0}} \quad \text{képlet (7)}$$

### 5.2. Impulzusgerjesztéses termográfia

A tárgyunk egyetlen egy hőimpulzussal való gerjesztésre adott hőhatás-válaszát diszkrét Fourier-transzformációval vizsgálhatjuk meg a különböző frekvenciájú amplitúdókra és fázisokra. Ehhez N darab hőképet kell rögzítenünk, mely az n-edik (max. N/2 [Hz]) frekvenciára megvizsgálható a következő matematikai lépések szerint.

Diszkrét Fourier-transzformáció az n-edik frekvenciára (pixelenként!):

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k\Delta t) e^{-j2\pi k t / N} = \text{Re}_n + \text{Im}_n \quad \text{képlet (8)}$$

Jelmagyarázat:

$F_n$  ... n-edik frekvencia [Hz]  
 $N$  ... rögzített időjelminták száma  
 $\Delta t$  ... mintavételezési időköz  
 $T$  ... hőmérséklet  
 $\text{Re}_n$  ... valós számérték n-edik frekvencián  
 $\text{Im}_n$  ... képzetes számérték n-edik frekvencián

Az n-edik frekvenciájú amplitúdó-hőképek pixeli:

$$A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2} \quad \text{képlet (9)}$$

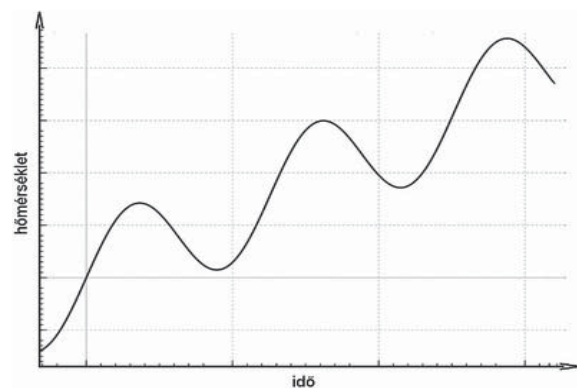
Az n-edik frekvenciájú fáziskép pixeli:

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n} \right) \quad \text{képlet (10)}$$

Fentiek alapján kiszámolt pixelenkénti adatok ismételten ábrázolhatóak a termográfiaiban szokásos színskálákkal. Gyakran a fáziskép jobban jeleníti meg az anyagok inhomogenitásait.

### 5.3. Szinuszerjesztéses (Lock-In) termográfia

A szinuszos gerjesztés esetén kézenfekvő, hogy az erre a periodikus gerjesztésre adott hőmérsékletválaszt a Fourier-transzformációval az amplitúdó- és fázis komponenseire elemezzük.



8. ábra: szinuszos gerjesztés hőhatásának időfüggvénye

Amennyiben a referenciajel egy harmonikus jel (pl. szinusz), akkor kétsatornás korrelációról beszélhetünk. Ilyenkor az amplitúdó és a fáziszög korrelációja is kiszámolható. Az egyenlet:

$$F(t) = \vartheta_{\text{mert}} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{\text{ref}} \cdot t + \varphi) \quad \text{képlet (11)}$$

Jelmagyarázat:

$\vartheta_{\text{mert}}$  ... mért hőmérséklet amplitúdója [°C]  
 $f_{\text{ref}}$  ... gerjesztés frekvenciája [Hz]  
 $\varphi$  ... fáziszög

A hőkamerák diszkrét mintavételezésű adat-rögzítése miatt lép a fenti egyenlet helyébe a diszkrét Fourier-transzformáció, ami alapján kifejezhető a következő korreláció-összefüggés:

$$\vartheta_{korr} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \vartheta_{mert}(k) \cdot \vartheta_{ref}(k) \quad \text{képlet (12)}$$

Jelmagyarázat:

$\vartheta_{korr}$  ... keresztkorrelációs hőmérsékletérték [°C]  
 $\vartheta_{mert}(k)$  ... k-adik mintájú mért hőmérséklet [°C]  
 $\vartheta_{ref}(k)$  ... k-adik mintájú gerjesztés-hőmérséklet [°C]  
 $n$  ... rögzített minták száma

Ha  $k \rightarrow \infty$  érvényesül, és a jelsorozat mintavételezése pont a referenciajel frekvenciájára és fázisszögére kerül szinkronizálásra, akkor megfelelő mintaszámmal nemcsak a gerjesztéssel való egyezőséget állapítható meg, hanem még egy igen zajos jelből is kiszűrhető a hasznos jel.

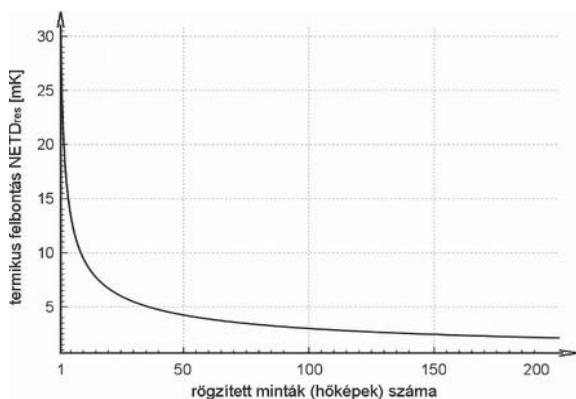
A zajszűrés egyenlete:

$$NETD_{res} = \frac{2}{\sqrt{n_p \cdot p}} \cdot NETD \quad \text{képlet (13)}$$

ahol:  $n_p = \{1/a \text{ vagy } a, a = \text{pozitív egész szám}\}$   
 $p = \text{pozitív egész szám}$

Jelmagyarázat:

$n_p$  ... periódusonként rögzített minták száma  
 $p$  ... periódusok száma

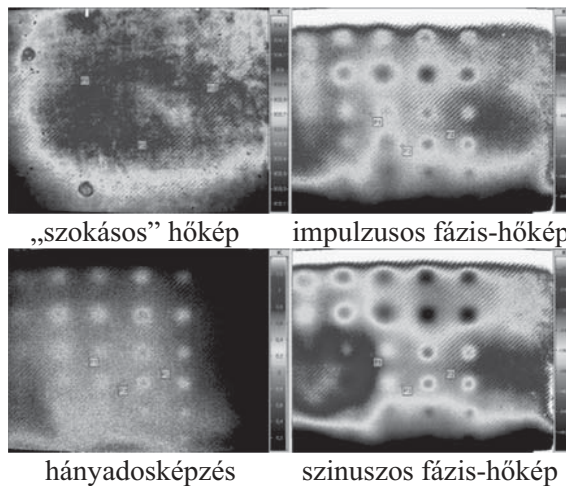


9. ábra: a mintaszám függvényében elérhető termikus felbontás (kiindulás: 30 mK)

## 6. ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

### 6.1. Réteges szerkezetű műanyagok vizsgálata

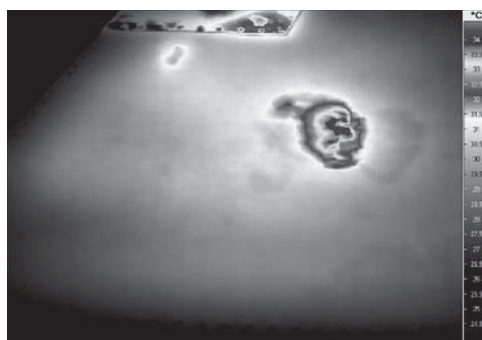
A réteges vagy szálerősítésű műanyagok minőségének, törésmentességének, homogenitásának roncsolásmentes ellenőrzése egyre fontosabb a repülő- és autóiparban. A hagyományos ultrahang-, vagy röntgenvizsgálatok nem mindenre tudnak kellőképpen pontos választ adni, illetve alkalmazhatóságuk korlátozott. Az aktív termográfia új lehetőségeket nyújt.



10. ábra: műanyagtábla bevizsgálása [1]

### 6.2. Repülőgép fékszárnyai bevizsgálása

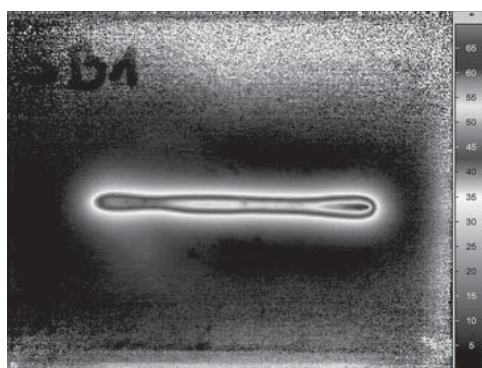
Az aktív termográfia egyik, mérőeszköz követelmény és matematikai kiértékelés szempontjából legegyszerűbb, alkalmazása a nagy utasszállító gépek fékszárnyainak ellenőrzése.



11. ábra: repülőgép-fékszárny hőképe

### 6.3. Hegesztések bevizsgálása, minősítése

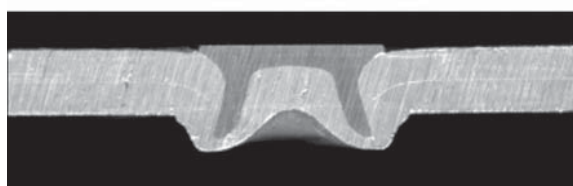
Akár hagyományos ponthegesztés vagy lézeres hegesztésről van szó, az ellenőrzés céljából a hegesztés helyére bejuttatott rövid energia-bevitel nyomán az ellenkező oldalon megjelenő növekvő hőmérséklet gyakorlatilag lerajzolja a hegesztés helyét és az összeolvasztott fémfelület alakját.



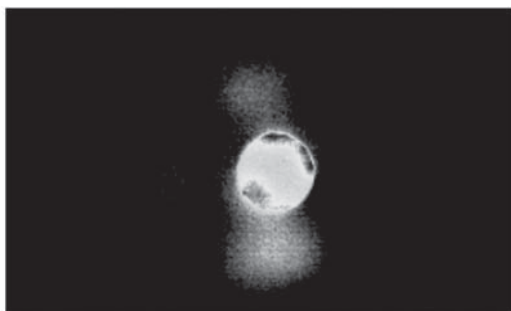
12. ábra: lézerverhegesztés fázis-hőképe [2]

#### 6.4. Szegecselések bevizsgálása, minősítése

A következő példa az ultrahang-gerjesztésű aktív termográfia egy repülőgépkarbantartási alkalmazását mutatja be.



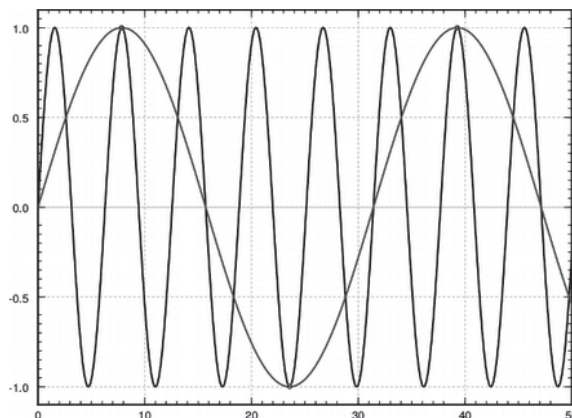
13. ábra: jó szegecs ultrahang-gerjesztés után [3]



14. ábra: rossz szegecs ultrahang-gerjesztés után [3]

#### 6.5. Gyors periodikus folyamatok mérése

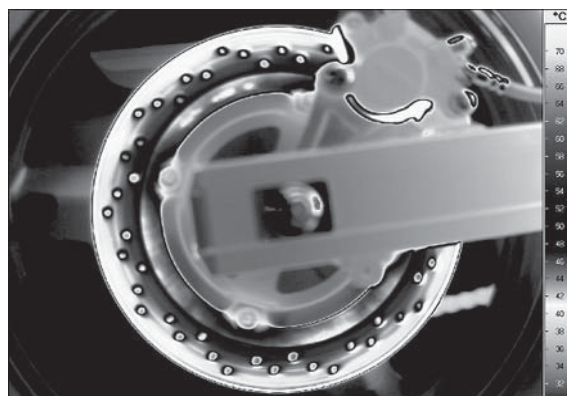
Amennyiben olyan termikus folyamatot kell rögzíteni, mely periodikus jellegű, viszont frekvenciája meghaladja a termográfiai rendszer képfrissítéséből adódó lehetőségeket, akkor is segítségre lehet az aktív termográfia. Ehhez csupán ki kell használni a Lock-In termográfia keresztkorrelációs értékeléséből adódó szűrőhatást! A módszer életképességének bizonyítékát a következő képek szolgálják.



15. ábra: keresztkorrelációs szinkronizálás



16. ábra: szinkronizálás nélküli hőkép



17. ábra: szinkronizált "Lock-In" hőkép

#### IRODALOM

- [1] Dr. Guido Mahler: Wärmefluss-Thermographie mit Strahlungsanregung im VIS/IR-Bereich, InfraTec GmbH, Dresden, 2010
- [2] Active Thermography - How to boost thermal accuracy... InfraTec GmbH, Dresden, 2014
- [3] G. Busse: Lock-in Thermografie: Prinzip und technische Anwendungen, Uni Stuttgart (IKT-ZfP), VDI Expertenforum, 2010.04.13.
- [4] Rahne Eric: Termográfia - elmélet és gyakorlati méréstechnika, Invest-Marketing Bt., Budapest, 2018, ISBN 978-963-87401-6-8

# AZ ERGONÓMIAI FUNKCIÓK SZEREPE A DIGITALIZÁLT TERMELÉSI FOLYAMATOKBAN, A DIGITALIZÁLT IPARBAN

## ERGONOMICS FUNCTIONS IN THE DIGITALISED PROCESSES AND DIGITALISED INDUSTRY

*Eur. Erg. Dr. Szabó Gyula, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépszerkezettani és Biztonságtechnikai Intézet*

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az ipar 4.0 a gyártás és a terméktervezés összekapcsolásával, illetve mindkét oldalon az informatikai eszközök intenzív alkalmazásával alapvetően bővíti ki az ergonómiai szemlélet alkalmazásának lehetőségét.

Az előadásban áttekintjük az ergonómiai funkciókat a digitalizált termelési folyamatokban, a digitalizált iparban. A fizikai megfelelést, a fiziológiai megfelelést, és a pszichés megfelelést mint funkciókat bemutatva, közös szemléleti keretbe helyezzük a régóta ismert és elfogadott ergonómiai részterületek, az értékelemzési módszereket és a napjainkban divatos használhatósági vagy termékélmény.

### ABSTRACT

By linking production and product design and by intensive application of IT tools on both sides Industry 4.0 basically extends the potential use of ergonomic approaches.

In the paper the ergonomic functions in digitised production processes in digitised industry are reviewed. Applying Physical Compliance, Physiological Compliance, and Psychological Compliance as Functions, we put common perspectives on long-known and accepted ergonomic areas, value analysis methods, and today's fashionable usability or product experience approaches.

### 1. BEVEZETÉS

A digitalizáció az élet különböző területein, így a termék- és gyártástervezésben, fejlesztésben, optimalásban olyan gyorsan, olyan jelentős változásokkal járt, hogy sokszor az informatika játszotta a húzó szerepet, és kényszerítette ki a szakmai megoldásokat.

A versenyképesség meghatározó tényezője a felhasználói igények megfelelő

költségek mellett történő kielégítése. Az ergonómiai kritériumok nem tartalmazzák, így a vizsgálatok során nem is cél a költségek alacsony szinten tartása, tehát egy kiegészítő módszerre van szükség az optimális megoldás érdekében. Valójában ilyen, az ergonómiai tevékenységgel jól összeillő módszer önállóan is létezik a gyakorlatban, hiszen az érték menedzsment, mint vezetési stílus nagyon sok vállalatnál mindennapos gyakorlat.

Az ergonómia és az értékelemzés megfogható összekapcsolását a funkciósema teszi lehetővé, amely közvetíti az ergonómiai tevékenységgel meghatározott felhasználói igényeket, elégedettségeket, vagyis a megvalósítja az értékelemzés számára a felhasználói igények pontos dokumentálását.

Az informatikai fejlődéssel egyre bővül a gépészetben használható eszközök köre, a terméktervezés eszköztára, és ezzel párhuzamosan bővül az emberre vonatkozó ismeretek megszerzésének lehetősége, összességében az emberi tulajdonságokra vonatkozó ismeret. Ez azt jelenti, hogy egyre jobb eszközökkel egyre pontosabb megoldásokat használhatunk arra, hogy az egyre pontosabban behatárolt és megismert felhasználók számára a nekik legjobban megfelelő terméket hozzuk létre. [1]

A digitalizáció a funkciók és az erőforrás felhasználások újraértelmezésére ösztönzi az értékelemzést. Informatikai termékek gyártási költsége elhanyagolható, így már a fejlesztési és értékesítési költség a meghatározó. Újraértelmezésre szorul az értékelemzésnél általánosan követett lineáris termékfejlesztési modell, az innovatív termékfejlesztés iteratívává vált. A többciklusú termékfejlesztés intenzív felhasználói bevonást tesz lehetővé a teljes fejlesztési illetve termék életciklus, sőt a termékvonat során.

### 2. AZ ERGONÓMIAI MEGKÖZELÍTÉS

Az ergonómia az emberközpontú tervezést valósítja meg. Szervezet szinten ennek jellemzőit például az ISO 27500: 2016 Az emberközpontú szervezet - Érvek és általános elvek szabvány is megfogalmazza, ezek [2]:

- a használati környezet megértése és meghatározása;
- a felhasználói követelmények meghatározása;
- megoldások kidolgozása;
- megoldások értékelése.

Felhasználói irányultság vezetői értéként kezelése csak a költségkihatások értelmezésével lehet életszerű, mert e nélkül károk jelentkeznek, pl. azért mert

- a rendszereket darabokban és nem hatékony módon fejlesztették ki, ami visszaüt a termékek áramlásában és minőségében, valamint a szolgáltatásokban;
- hatalmas az erőforrás-pazarlás „tűzoltás”-ra;
- az újratelepítések növelik a költségeket és a piacra kerülési időt.

Az ergonómia alapelve, hogy az embert állítja a középpontba az ergonómiai szemléletű tervezés során (ember központú), figyelembe véve az emberi populáció sokszínűségét (célcsoport) és a feladat emberre gyakorolt hatását (feladat orientált), csak úgy, mint a környezetet, amelyben a tervezés eredményét használják (környezeti adottságok). Végül hangsúlyozza azokat az ergonómiai alapkritériumokat, amelyeket alkalmazni kell a tervezés értékelése során (kritérium alapú értékelés). [3]

Az emberközpontú tervezést az alábbiak megfontolásával kell elvégezni:

- a tervezett célcsoport,
- a feladat, cél vagy a rendszer, termék vagy környezet elvárt eredménye, és
- a környezet, amelyben a tervezetnek működnie kell.

Az ergonómiai tervezésben meghatározó, hogy az eredményét

- emberi teljesítmény;
- egészség, biztonság és jóllét;
- elégedettség

kategóriákba sorolható kritériumok alapján kell értékelni.

### 3. ERGONÓMIA ÉS ÉRTÉKELEMZÉS

Az ergonómiai módszerek és az értékelemzés együttes alkalmazására számos példát találunk: előfordul, hogy az értékelemzést hívják az

ergonómiai programban az igényfeltárás skálázására, fontossági és sürgősségi sorrend meghatározására, de az is előfordul hogy értékelemzésben ergonómiai módszert alkalmaznak a felhasználó igény meghatározására.

Madanhire és munkatársai nemrég a termelékenység növelésére és a költségek egyidejű csökkentésére olyan technikák alkalmazását alkalmazták, mint az értékelemzés, az időmérés, a munka mérése, újratelepítés és elrendezésének tervezése és elemzése. [4]

Barrosék összeszerelő és karbantartó munka ergonómiai értékelése után az ergonómiai problémákat fontosságát és sürgősségét értékelemzéssel priorizálták [5].

Goernerék a termelési költségek csökkentése és a minőség javítása mellett a munkahelyi körülmények javítását tűzték célul, és bemutatták az értékelemzésben rejlő lehetőségeket az ergonómiai munkahely fejlesztés támogatására. [6]

Da Silva munkatársaival egy egyénre szabott versenykerékpárnál alkalmazott vizsgálatot értékelemzést és QFD. [7]

Egglestonék rámutattak, hogy sokszor az ergonómiai kérdésekkel csak a részletes tervezés során, mint részkérdéssel foglalkoznak. Egy olyan megközelítést javasolnak, amelyben a rendszer hasznosság, a műszaki teljesítmény és az emberi tényező egyaránt, már a koncepciótervezés fázisban kellő szerepet kap. Módszerükkel a technológiákat mennyiségileg lehet értékelni a műszaki teljesítmény, a rendszer hasznosság és az operátori igénybevétel alapján. [8]

Darses és Wolff az ergonómiai módszerek terméktervezésben történő alkalmazását elemezték. Rámutattak, hogy annak ellenére, hogy alapvetőnek tartják, a fejlesztők sokszor nehéznek találják és mellőzik a felhasználói bevonásra épülő, felhasználóközpontú módszerek alkalmazását. A felhasználói bevonás helyettesítésére (1) az ergonómiai elvek – adatok általános alkalmazását, (2) az operátorok viselkedését elképzelt helyzetekben és (3) az operátorokat, mint a teljes rendszer alrendszerét értékelték. [9]

### 4. FUNKCIÓK AZ ÉRTÉKELEMZÉSBEN

Ahogy számos ergonómiai szabvány használható a tervezés, kialakítás, működtetés során [10], úgy az értékelemzés is rendelkezik szabványosítási környezettel. A hazai

értékelemzést ismeri el, hogy a magyar értékelemzési fogalomtárat [11] is felhasználták az Európai Bizottság által kidolgozott kézikönyv [12], majd ezt pontosító európai szabványok kidolgozására. Az értékelemzés mai európai formáját az értékelemzés és érték menedzsment fogalmait [13], és az érték menedzsmentet, mint irányítási rendszert [14] bemutató szabvány határozza meg

A szabvány szerint termék valamely tevékenység vagy folyamat eredménye, egy termék, szolgáltatás, rendszer, stratégia vagy szervezet, így a termék szolgáltatást, hardvert, szoftvert, folyamatot vagy ezek kombinációit is tartalmazhatja, és tetszőleges szinten lehet megfogható vagy nem megfogható.

Az értékmenedzsment egy olyan menedzsment stílus, amely elsősorban az emberek motivációját és készségfejlesztését, az együttműködés és innováció kifejezését a szervezet összteljesítményének maximalizálása érdekében folytatja.

A szabvány az értéket annak mértékéért tekint, ahogy az érdekelték igényét egy szervezet, projekt, termék a felhasznált erőforrásokra vonatkoztatva kielégíti.

A szabvány szerint az érték elemzési folyamat részei az igények feltárása (piackutatás), a felhasználóhoz kapcsolódó funkciók meghatározása, kreatív innovatív fejlesztés során a termék által megvalósítandó funkciók meghatározása, majd végül a megvalósítás és validálás.

A funkciók itt követelmények, meghatározva az elvárt teljesítési szintet és ennek az elvárásnak rugalmasságát is. Ezek alapján a fontosabb funkciók a következők: [15]

- Alapfunkciók: A legmagasabb rendű funkció.
- Főfunkciók: Azok a funkciók, amelyekért a fogyasztó a terméket megvásárolja.
- Mellékfunkciók: A fogyasztó a főfunkció mellett fontosnak tartja.
- Alfunkciók: Ezek a funkciók azok, melyek segítik a fő- ill. mellékfunkció teljesítését.

A funkcióelemzés teljes körűen leírja funkciókat, a funkciók kapcsolatrendszerét. A funkcióelemzés lehet funkcionális igényelemzés (külső funkcióelemzés) és műszaki funkcióelemzés (belső funkcióelemzés), míg a kettő a probléma

megfogalmazást és a műszaki megoldást kapcsolja össze. A felhasználói funkciók egy meghatározott felhasználó igényeinek egy részét teljesítik. A fogyasztói igény és specifikáció a felhasználói funkciókkal fejezhető ki, melyek lehetnek szükségesek a szükségtelenek, kívánatosak vagy nem. Összességében az ergonómiai módszerek alkalmasak az igények, szokások és elégedettség meghatározására, majd a funkció igényelemzés a szükségtelen és nem kívánatos funkciók, kiküszöbölését szolgálja.

## 5. ERGONÓMIAI FUNKCIÓK

Az értékelemzéshez az ergonómiai funkciókat az ergonómiai kritériumok alapján az adott termékre konkrétan kell meghatározni. Ennek megfelelően lesznek a felhasználói teljesítménnyel, a felhasználó használatával összefüggő ráfordításával (kényelmével), és az elégedettséggel összefüggő felhasználói funkciók.

Az ergonómiai termékkülfunkciók a termék jellegét követik, a rendszer-megközelítés szerint a bevittel, működéssel és megjelenítéssel kapcsolatosak.

Az ergonómiai alapadatok, útmutatók, módszerek teszik lehetővé az (ergonómiai) felhasználói és termékkülfunkciók illesztését.

A digitalizált világ már kezelői felületet tervez, és együttes jelentőséget tulajdonít a feladat-megfelelésnek és az elégedettségnek. Ebben a kontextusban a hagyományos antropometriai – fiziológiai – szenzo-motoros megfelelést összetettebb, és nehezebben azonosítható viszonyok jellemzik. Ennek megfelelően – bár a hagyományos ergonómiai funkciók alfunkcióként továbbra is megjelennek - ergonómiai funkciók meghatározáskor a használhatóságból, hozzáférhetőségből, termék-élményből kell kiindulni.

Használhatóság annak mértéke, hogy egy rendszer, termék vagy szolgáltatás mennyire használható bizonyos felhasználók által annak érdekében, hogy hatékonyan, hatásosan és kielégítően elérjenek speciális célokat, meghatározott felhasználási adottságok között. [16]

Hozzáférhetőség annak a mértéke, hogy adott termékeket, rendszereket, szolgáltatásokat, környezeteket, létesítményeket milyen mértékben használhat az emberek egy, minél szélesebb jellemzőkkel és képességekkel leírható populációja annak érdekében, hogy egy



konkrét célt elérhessenek, vagy egy konkrét felhasználási adottságnak megfeleljenek. [17]

Termékélmény az adott terméknek a vele való interakcióban történő szubjektív megtapasztalása, egyedi, pszichés megélését és sajátos tudatosulását, mindezen kiváltott pszichés hatások összessége [18]

## 6. MÓDSZERTANI LEHETŐSÉGEK

Jastrzębowski már az ergonómia kifejezés megalkotásakor is [19] a legtágabban értelmezte a munkát, figyelembe vette a fizikai (motoros), érzékelési, szellemi és lelki munkasajátosságokat is. Ennek megfelelően az ergonómiai tevékenység nem szorítkozik a munkahelyekre és a mozgásszervi megbetegedések megelőzésére, hanem kiterjed a termékek, szolgáltatások, rendszerek, szervezetek megfelelő kialakítására is. Ezzel minden alkalmazási területen kiegészítheti a hasonlóan tág felhasználási területű értékmenedzsmentet.

Az értékelemzésben az ergonómiához hasonlóan különül el az alkalmazás célja alapján. Az értékjavítás (Value Analysis), a már meglévő termékek értékelemzése, ami az ergonómia javító jellegű, korrektív felhasználását igényli. Az értéktervezés (Value Engineering), az újonnan kialakítandó termékek értékelemzése az új dolog tervezésére irányuló, konceptív ergonómiai tevékenységet igényli. A két terület módszertana eltér, hiszen az utóbbiban nincs elérhető információ már meglévő termékváltozatok használatával kapcsolatban.

Az értékalapú menedzsment stílus egyik fő eleme a felhasználó-központúság, ami szervezet belső és külső felhasználói igényeinek azonosítását és pontos leírását jelenti.

A munkatervben számos olyan elemet találunk amely ergonómiai ismeretek módszerek alkalmazását jelenti.

Az értékmenedzsment teljes körű információgyűjtése kiterjed a külső és belső információk összegyűjtésére, a részletes piacelemzésre és minden további információ begyűjtésére. Ebben a szakaszban az ergonómia használhatósági vizsgálati módszerei alkalmasak.

A generálási szakaszban szintén helye lenne a felhasználó központú módszereknek, és nem kellene megelégedni a szervezet normál működésével összefüggésében képződő tanulmányokkal és tesztekkel.

A megvalósítandó változatok kiválasztásában is a felhasználói bevonáson alapuló módszereket kellene alkalmazni. Végül az implementációs szakasz már munkahely ergonómiai módszerek alkalmazását jelenti.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az ergonómia az a tudomány és gyakorlat, amely az emberi tulajdonságokat veszi figyelembe termékek teljes életciklusa során. A versenyképesség érdekében elengedhetetlen az ergonómia ismeretek alkalmazása a termékek tervezése és a munkahelyek kialakítása területén egyaránt. Az ergonómia terméktervezésben történő alkalmazásában a gépészeti szakmának jelentős szerepe van, hisz meghatározó szerepet játszik a termékek fizikai és funkcionális megoldásának meghatározásában és a termékek gyártási feltételeinek megteremtésében.

Az ergonómiai ismeretek az értékelemzésen keresztül is jól becsatolhatók a korszerű termékfejlesztésbe, és lehetővé teszik a felhasználói tulajdonságok, igények költséghelyes megvalósítását. Digitalizált környezetben, számítástechnikai alkalmazások és szolgáltatások létrehozásakor elérhetőek informatikailag támogatott ergonómiai módszerek, és illeszkednek a digitális világ termékfejlesztési módszertanához.

Az értékelemzésben az ergonómia funkciók az ergonómia hármas kritérium rendszerének megfelelően a magas funkcionális teljesítményhez, az alacsony felhasználói ráfordításhoz - azaz a kényelemhez és egészségmegőrzéshez -, illetve a felhasználói elégedettséghez kapcsolódnak. A funkciók és a teljesítés pontos meghatározása az ergonómiai tevékenység végrehajtását jelenti, sokszor részletes vizsgálatot az iteratív termékfejlesztés során.

## IRODALOM

- 1 Szabó Gyula: Az ergonómia szerepe a hazai gépiparban, GÉP 3-4: pp. 42-43. (2015)
- 2 ISO 27500: 2016 Az emberközpontú szervezet - Érvék és általános elvek
- 3 ISO 26800:2011 Általános megközelítés, alapelvek és fogalmak
- 4 Madanhire, I., Mbohwa, C.: From traditional to modern manufacturing system: Case study (2016) Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 8-10 March 2016, pp. 2261-2271.

5 Barros, R.Q., Marçal, M.A., Soares, M.M. Ergonomic Analysis of the Job of Assembly and Maintenance in an Electronic Equipment Company, (2015) *Procedia Manufacturing*, 3, pp. 6542-6549. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.953

6 Goerner, T., Broum, T., Simon, M., Kleinova, J.: Use of value analysis to increasing the value of ergonomic design of workplace, (2010) *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, pp. 1119-1120.

7 da Silva, F.L.R., Cavalca, K.L., Dedini, F.G. Combined application of QFD and VA tools in the product design process (2004) *International Journal of Quality and Reliability Management*, 21 (2), pp. 231-252. DOI: 10.1108/02656710410517005

8 Eggleston, Robert G., Kulwicki, Philip V.: TECHNOLOGY FORECASTING AND ASSESSMENT METHOD FOR EVALUATING SYSTEM UTILITY AND OPERATOR WORKLOAD. (1984) *Proceedings of the Human Factors Society*, 1, pp. 31-35.

9 Françoise Darses, Marion Wolff: How do designers represent to themselves the users' needs?, *Applied Ergonomics* 37 (2006) 757–764

10 Szabó Gyula: ERGONOMIA A GÉPEK BIZTONSÁGA SZABVÁNYOKBAN, GÉP 7-8: pp. 97-102. (2016)

11 MI 8871-77 Az értékelemzés alapfogalma i és eljárása. Magyar Szabványügyi i Hivatal. 1977

12 European Commission: Value Management Handbook. Published: European Commission.1995

13 MSZ EN 1325:2014 Értékközpontú irányítás. Szakszótár. Szakkifejezések és meghatározások

14 MSZ EN 12973:2001 Értékközpontú irányítás

15 Körmendi Lajos (2010): Értékelemzés, Budapest: Saldo Kiadó. 16-19 p

16 MSZ EN ISO 9241-210:2011 Az ember-rendszer kölcsönhatás ergonómiája. 210. rész: Interaktív rendszerek emberközpontú kialakítása (ISO 9241:2010)

17 ISO/TR 22411:2008 Ergonomics data and guidelines for the application of ISO/IEC Guide 71 to products and services to address the needs of older persons and persons with disabilities

18 PAUL HEKKERT and HENDRIK N.J. SCHIFFERSTEIN, INTRODUCING

PRODUCT EXPERIENCE, In *Product Experience*, Elsevier, San Diego, 2008, Pages 1-8, ISBN 9780080450896, <https://doi.org/10.1016/B978-008045089-6.50003-4>.

19 Wojciech Jastrzębowski (1857), “Rys ergonomji czyli nauki o pracy opartej na prawdach poczerpniętych z nauki przyrody [Outline of Ergonomics, or the Science of Work Based upon the Truths Drawn from the Science of Nature]”, in *Przyroda i Przemysł: Tygodnik poświęcony przystępnemu wykładowi wszystkich gałęzi nauk przyrodzonych, praktycznemu ich zastosowaniu do potrzeb życia, tudzież najnowszym odkryciom i wynalazkom [Nature and Industry]*, issue 29–32, Poznań

# CONTENTS

1. <i>Agócs Mihály, Kocsó Endre, Molnár János, Páger Béla, Dr. Pór Gábor:</i> <i>INTRODUCTION OF SCANNING ULTRASONIC AND EDDY CURRENT TEST IN NONDESTRUCTIVE DIAGNOSTICS</i> .....	5	8. <i>Dr. Haidegger Géza, Beregi Richárd:</i> <i>HOW EUROPE CHANGES THE INDUSTRY BY DIGITIZATION</i> .....	46
2. <i>Bakosné Diószegi Mónika:</i> <i>MECHANICAL DEVELOPMENTS OF THE BIOGAS LABORATORY</i> .....	12	9. <i>Horváth Richárd:</i> <i>THE DRILLING INVESTIGATION OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC</i> .....	55
3. <i>Bolyki Zsolt, Dr. Farkas Zsolt:</i> <i>DECREASE OF PNEUMATIC CYLINDER'S CHARGING AND DISCHARGING TIME</i> .....	17	10. <i>Piros Attila, Dr. Solti Márton:</i> <i>OPTIMISING INTERNAL SUPPORT STRUCTURES WITH 3D VORONOI LATTICES</i> .....	61
4. <i>Czifra Árpád:</i> <i>APPLICATION OF MICROTOPOGRAPHIC FEATURES FOR CHARACTERISATION OF ENGINEERING SURFACES</i> .....	21	11. <i>Eric Rahne:</i> <i>ENTWICKLUNG EINES MASCHINENDIAGNOSTIK- LEHRMITTELS</i> .....	67
5. <i>Dr. Czifra György:</i> <i>INTERACTION OF INDUSTRY 4.0 AND UNIVERSITY EDUCATION</i> .....	25	12. <i>Eric Rahne:</i> <i>ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALPRÜFUNG MITTELS AKTIVIER THERMOGRAFIE</i> .....	72
6. <i>Drégelyi-Kiss Ágota:</i> <i>ANALYSIS OF DIMENSIONAL INDUSTRIAL CT MEASUREMENT PROCESS</i> .....	30	13. <i>Dr. Szabó Gyula:</i> <i>ERGONOMICS FUNCTIONS IN THE DIGITALISED PROCESSES AND DIGITALISED INDUSTRY</i> .....	78
7. <i>Fekete Tamás:</i> <i>STRUCTURAL INTEGRITY CALCULATIONS OF LARGE SCALE PRESSURE VESSELS</i> .....	36		

# GÉP

## INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

**President of Editorial Board**

Vesza József

**General Editor**

Dr. Jáрмаi Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**Deputy**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercesy Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Dr. Zobory István

### DEAR READER!

The Construction Section of the GTE organized on the 1st of February this year the 3rd Mechanical Professionals Conference with the following subtitle "Development in Mechanical Engineering: from Idea to Utilization".

In 2015 we held the 1<sup>st</sup>, in 2017 the 2<sup>nd</sup> and this year the 3<sup>rd</sup> conference. We have invested a lot of energy in sending the invitation and information leaflets more persons than before. We visited all the Hungarian higher education institutions which have technical faculty. Thus, we could invite experts, lecturers and students from more fields than on our two previous conferences. There were 3 plenary and 22 section lectures. The 55 registered participants were more than last year. 5 exhibitors also supported the participation of the conference. From the lectures, 13 were asked to appear in the form of a journal article.

Mechanical engineering includes all the methods, procedures and techniques used by the participants in the mechanical innovation process.

Accordingly, the Mechanical Professionals Conference covers all the traditions, methods, experiences and procedures that are used in market research, research + development + innovation, design, manufacturing and operation and maintenance, in the life cycle of mechanical products.

The lectures in the plenary session concerned the theme of the new Industrial Revolution, Industry 4.0.

Section lectures were divided into 3 sections:

- "Professional culture in measurement technology and material testing" was our top priority. To achieve this, we could attract some exhibitors.

- "Mechanical development from the idea ...". The birth of the products. Value Creation. The product market.

- "Mechanical development ... to exploitation". In this section we report numerous engineering developments. Here also has received some high-quality TDK (scientific student work) theses, which include scientifically many novelties. Several lectures dealt with biomechanical topics.

Based on the success of our conference, we plan to organize the 4<sup>th</sup> Mechanical Engineering Professional Conference on Technological Culture in 2019.

*István Weszely*  
*the secretary of the Conference*

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: <http://www.gepujsag.hu> \* Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Igaz Jenő, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: [www.posta.hu](http://www.posta.hu) WEBSHOP

(<https://eshop.posta.hu/storefront/>), via e-mail: [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu), by phone: 06-1-767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Magyar Posta Zrt. Visit: [www.posta.hu](http://www.posta.hu) WEBSHOP (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), mail to: 1900 Budapest, 06-1-767-8262, or [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu)

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**The published articles have been reviewed.**

The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

