

ANYAGTUDOMÁNYI TEREK

Nagy András–Németh István Péter–Czifra Sándor (Szerk.)

BERECZKI PÉTER

Ultrafinom- és nanoszemcsés alumíniumötvözetek laboratóriumi és ipari fejlesztése

SZABÓ ATTILA–BERECZKI PÉTER

Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek kisciklusú fárasztása

SZABÓ PÉTER–FEHÉR JÁNOSNÉ–SZABÓ SZEBASZTIÁN–MOJNÁR JÁNOS–KOCSÓ ENDRE–PÁGER BÉLA–AGÓCS MIHÁLY
–CSINCSI ZSUZSANNA–SZIKSZAI KRISTÓF–PÁMER ADÁM–BAKI ROLAND

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése

KOVÁCS-BOKOR ÉVA–KISS ENDRE

Vízparti növények nehézfém-akkumulációjának meghatározása a dunai üledékekben

LADÁNYI GÁBOR–GONDA VIKTOR

Nagy alakváltozású rugalmas problémák magasabb-rendű peridinamikusan modellezése

PÁZMÁN JUDIT–KOVÁCS-BOKOR ÉVA

Biológiai lebomló polimerek

PÁZMÁN JUDIT

Gumikeverékek és különböző adalékanyagok hatása a természetes és mesterséges alapanyagokra

KÖVÁRI ATTILA–KATONA JÓZSEF–WIZNER KRISZTIÁN–UJBÁNYI TIBOR–NAGY BÁLINT–BERKI BORBÁLA–SUDÁR ANNA
Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek alkalmazási lehetőségei

KIRÁLY ZOLTÁN–KIRÁLY VENCEL–DOMONKÓSZ LEVENTE LÁSZLÓ

Kézi gesztusvezérlés-alapú ember-számítógép-interfész

BURKUS ERVIN–KECSKÉS ISTVÁN–ODRY ÁKOS–TADITY MLÁDIMIT–ODRY PÉTER

Innovatív képfeldolgozási eljárások kutatása, tomográfiai mérési eljárások fejlesztése



Duna-kavics
KÖNYVEK 21.

DUE PRESS

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Nagy András–Németh István Péter–Czifra Sándor (Szerk.)

ANYAGTUDOMÁNYI

TEREK

© Nagy András–Németh István Péter–Czifra Sándor (Szerk.) 2021

© Agócs Mihály; Baki Roland; Bereczki Péter; Berki Borbála; Burkus Ervin; Csincsi Zsuzsanna; Domonkos Levente László; Gonda Viktor; Fehér Jánosné; Katona József; Kecskés István; Király Zoltán; Király Vencel; Kiss Endre; Kocsó Endre; Kovács-Bokor Éva; Kővári Attila; Ladányi Gábor; Molnár János; Nagy Bálint; Odry Ákos; Odry Péter; Páger Béla; Pámer Ádám; Pázmán Judit; Sudár Anna; Szabó Attila; Szabó Péter; Szabó Szabaszián; Szikszai Kristóf; Tadity Vladimir; Ujbányi Tibor; Wizner Krisztián 2021

A kötet megjelenését a EFOP-3.6.1-16-2016-00003 K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen projekt támogatta.

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM
www.uniduna.hu

D=U=E PRESS

Kiadóvezető Németh István

Felelős kiadó Dr. habil András István
Felelős szerkesztő Nemeskéry Artúr

Tördelés Duma Attila
Készült a HTSART nyomdában
Felelős vezető Halász Iván

ISBN 978-615-6142-15-3

ANYAGTUDOMÁNYI TEREK

Nagy András–Németh István Péter–Czifra Sándor (Szerk.)

BERECZKI PÉTER

Ultrafinom- és nanoszemcsés alumíniumotvözelek laboratóriumi és ipari fejlesztése

SZABÓ ATTILA–BERECZKI PÉTER

Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek kisciklusú fárasztása

SZABÓ PÉTER–FEHÉR JÁNOSNÉ–SZABÓ SZEBASZTIÁN–MOJNÁR JÁNOS–KOCsó ENDRE–PÁGER BÉLA–AGóCS MIHÁLY

–CSINCSi ZSUZSANNA–SZIKSZAI KRISTóF–PÁMER ADÁM–BAKI ROLAND

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése

KOVÁCS-BOKOR ÉVA–KISS ENDRE

Vízparti növények neheztém-akkumulációjának meghatározása a dunai üledékekben

LADÁNYI GÁBOR–GONDA VIKTOR

Nagy alakváltozású rugalmas problémák magasabb-rendű peridinamikus modellezése

PÁZMÁN JUDIT–KOVÁCS-BOKOR ÉVA

Biológiai lebomló polimerok

PÁZMÁN JUDIT

Gumikeverékek és különböző adalekanyagok hatása a természetes és mesterséges alapanyagokra

KóVÁRI ATTILA–KATONA JÓZSEF–WIZNER KRISZTIÁN–UJBÁNYI TIBOR–NAGY BALINT–BERKI BORBÁLA–SUDÁR ANNA

Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek alkalmazási lehetőségei

KIRÁLY ZOLTÁN–KIRÁLY VENCEL–DOMONKóS LEVENTÉ LÁSZLó

Kézi gesztusvezérlés-alapú ember-számítógép-interfész

BURKUS ERVIN–KECSKÉS ISTVÁN–ODRY ÁKOS–TADITS ALÁDMIR–ODRY PÉTER

Innovatív képfeldolgozási eljárások kutatása, tomográfiai mérési eljárások fejlesztése



Dunakavics
Könyvek 21

DUE PRESS

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



Tartalom

1. KUTATÓCSOPORT

BERECZKI PÉTER

Ultrafinom- és nanoszemcsés alumíniumötvözetek laboratóriumi és ipari fejlesztése

7

2. KUTATÓCSOPORT

SZABÓ ATTILA-BERECZKI PÉTER

Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek kisciklusú fárasztása

33

3. KUTATÓCSOPORT

SZABÓ PÉTER-FEHÉR JÁNOSNÉ-SZABÓ SZEBA SZTIÁN-MOLNÁR JÁNOS-

KOCSÓ ENDRE-PÁGER BÉLA-AGÓCS MIHÁLY-CSINCSI ZSUZSANNA-

SZIKSZAI KRISTÓF-PÁMER ÁDÁM-BAKI ROLAND

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése

59

4. KUTATÓCSOPORT

KOVÁCS-BOKOR ÉVA-KISS ENDRE

Vízparti növények nehézfém-akkumulációjának meghatározása a dunai üledékekben

85

5. KUTATÓCSOPORT

LADÁNYI GÁBOR-GONDA VIKTOR

Nagy alakváltozású rugalmas problémák magasabb rendű peridinamikus modellezése

103

6. KUTATÓCSOPORT

PÁZMÁN JUDIT-KOVÁCS-BOKOR ÉVA

Biológiaileg lebomló polimerek

129

7. KUTATÓCSOPORT

PÁZMÁN JUDIT

Gumikeverékek és különböző adalékanyagok hatása a természetes és mesterséges alapanyagokra

169

8. KUTATÓCSOPORT

KÖVÁRI ATTILA-KATONA JÓZSEF-WIZNER KRISZTIÁN-UJBÁNYI TIBOR-

NAGY BÁLINT-BERKI BORBÁLA-SUDÁR ANNA

Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek alkalmazási lehetőségei

195

9. KUTATÓCSOPORT

KIRÁLY ZOLTÁN-KIRÁLY VENCEL-DOMONKOS LEVENTE LÁSZLÓ

Kézi gesztusvezérlés-alapú ember-számítógép-interfész

211

10. KUTATÓCSOPORT

BURKUS ERVIN-KECSKÉS ISTVÁN-ODRY ÁKOS-TADITY VLADIMIR-ODRY PÉTER

Innovatív képfeldolgozási eljárások kutatása, tomográfiai mérési eljárások fejlesztése

227

ultra-finom- és nanoszemcsés alumíniumötvözetek laboratóriumi ipari fejlesztése

Összefoglalás: A Dunaújvárosi Egyetemen az utóbbi tíz évben végrehajtott, anyagtudományi témájú K+F+I projektek keretében az ultra-finom- és nanoszemcsés fémötvözetek előállításával és vizsgálatával kapcsolatosan kiterjedt és sikeres kutatási tevékenység került megvalósításra. Az EFOP-3.6.1-16-2016-00003 számú pályázat 1-es kutatócsoportjának programja ezen eredmények bázisán kívánta tovább gyarapítani a műszaki anyagtudomány e területének ismeretanyagát.

Az utóbbi 40 évben az intenzív képlékeny alakítás (SPD – Severe Plastic Deformation) technikai megvalósítására számos megoldás született. Ezek között kitüntetett helyet foglal el az ún. többirányú kovácsolás, amely ultra-finomszemcsés tömbi anyagok előállítását teszi lehetővé. Bebizonyosodott, hogy az intenzív képlékeny alakító műveletekkel újszerű tulajdonságegyüttest mutató fémes anyagok állíthatók elő. Kutatómunkánk egyik meghatározó berendezése a Gleeble 3800 termo-mechanikus szimulátor, amellyel a többtengelyű kovácsolás jól szabályozható mechanikai és hőmérsékleti paraméterek mentén hajtható végre. Emellett, a laboratóriumi alakítási kísérletek eredményeit felhasználva, nagyobb méretű darabok kovácsolására alkalmas szerszámot is terveztünk és gyártattunk, amellyel már ún. félüzemi kovácsolási kísérleteket tudtunk végrehajtani. Kovácsolási kísérleteink alapanyagául extrudált, EN AW-6082-es és EN AW-7075-ös, illetve melegen előhengerelt EN AW-5182-es alumíniumötvözeteket használtunk.

Az eddigi eredményekre alapozott kutatási program célja kettős. Egyfelől a többtengelyű kovácsolás laboratóriumi kísérleteinek folytatásával, az intenzív képlékenyalakítás különböző paramétereinek szemcsefinomító hatását, illetve a mikroszerkezet átalakulása közben lejátszódó deformációs mikro- és makró-mechanizmusokat fogjuk vizsgálni. Másrészt, a laboratóriumi mérések során optimalizált technológiai paraméterekkel olyan ipari kísérleteket hajtunk végre, amelyekkel nagyobb méretű ultra-finom-, illetve

** Dunaújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet
E-mail: bereczkip@uniduna.hu*

nanoszemcsés fémes szerkezeti anyagok állíthatóak elő. A laboratóriumi vizsgálatokból származó eredmények lehetővé tették a félüzemi minták mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonságainak tudatos módosítását, elősegítve az ultra-finomszemcsés anyagok előállításához szükséges, hatékony alakítástechnológiák tervezését.

Kulcsszavak: Gleeble 3800 termo-mechanikus szimulátor, extrudált, EN AW-6082-es és EN AW-7075-ös, illetve melegen előhengerelt EN AW-5182-es alumíniumötvözetek, ultra-finom-, illetve nanoszemcsés fémes szerkezeti anyagok.

Abstract: In the framework of R & D & I material science projects, extensive and successful research activities related to the producing and investigation of ultrafine-grained and nanostructured metallic alloys have been carried out in the last ten years, at the University of Dunaújváros. Based on these results, the scientific program of the 1st Research Group from EFOP-3.6.1-16-2016-00003 subsidy aimed to further increase the knowledgebase of this research area from materials science.

In the last 40 years, several experimental techniques have been developed to realize the Severe Plastic Deformation (SPD) process. Among them, an emphasized technique is the multiaxial forging which allows to produce bulk ultrafine-grained materials. It was proved that combinations of novel and unique material properties can be achieved using SPD techniques. One of the most important devices of our research work is the Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator, with which the multiaxial forging process can be performed along well-controlled mechanical and temperature parameters. In addition, based on the results of laboratory experiments, we designed and manufactured a tool, which was suitable for forging larger samples and allows to perform semi-industrial forging experiments. Extruded EN AW-6082 and EN AW-7075 and hot pre-rolled EN AW-5182 aluminum alloys were used as raw materials for our forging experiments. Based on the previous results, the aim of this research program is twofold. On the one hand, by continuing the laboratory experiments of multiaxial forging, we studied the effect of different SPD's parameters on the grain refinement and the deformation micro- and macro-mechanisms occurring during the evolution of microstructure. On the other hand, we carried out semi-industrial experiments to produce ultrafine-grained and nanostructured metallic materials in larger scale, using the optimized technology parameters, derived from the laboratory measurements. The results of laboratory studies have made it possible to consciously modify the microstructural and mechanical properties of the semi-industrial samples, facilitating the design of efficient forming technologies to produce ultrafine-grained materials.

Keywords: Gleeble 3800 thermo-mechanical simulator, extruded EN AW-6082 and EN AW-7075 and hot pre-rolled EN AW-5182 aluminum alloys, grained and nanostructured metallic materials.

Bevezetés

A következő néhány fejezetben bemutatjuk az 1-es kutatócsoport által megvalósított, az előzőekben részletezett célkitűzések mentén felépülő kutatási tevékenységünk alapjai és legfontosabb eredményeit. Ebben a tanulmányban sokrétű kutatómunkánk főbb állomásait és eredményeit foglaljuk össze, a mérések, számítások, modellezési tevékenységek és anyagvizsgálatok részletei megtalálhatóak az összefoglaló fejezet végén felsorolt publikációkban. A következőkben vázlatosan ismertetjük a kutatómunka háttérét biztosító, vonatkozó szakirodalom fontosabb megállapításait. A fémekből és ötvözetekből, így az alumíniumötvözetekből készült mérnöki szerkezetek alapanyagaival szemben az egyik alapvető követelmény a mechanikai tulajdonságok olyan összessége, amely adott mechanikai igénybevétel-együtteshez megfelelő. A fémtechnológiában számos módszer ismert, amelyekkel fémes szerkezeti anyagaink legfontosabb szilárdsági és alakíthatósági tulajdonságai az adott alkalmazásnak megfelelő módon, kedvező irányba módosíthatóak.

Az egyik ilyen lehetőség a polikristályos anyagok szemcseméretének csökkentése. Ha a tömbi fémekben a szemcseméret $1\ \mu\text{m}$ alá csökkenthető, akkor úgynevezett ultra-finom-szemcsés (UFG – Ultra Fine Grained) vagy nanoszemcsés (NG – Nanograined) anyagokat kapunk. Ugyanazon kémiai összetételű anyag durvaszemcsés, valamint NG és UFG állapota között számos tulajdonságra nézve, köztük – éppen a Hall és Petch által feltárt összefüggés következtében – a mechanikai tulajdonságok tekintetében is jelentős különbség mutatkozik. Az elmúlt évtizedekben az ultrafinom- és nanoszemcsés tömbi szerkezeti anyagok kísérleti úton történő előállítására új eljárások jelentek meg az alakítástechnikában. Ezeket az angol-szász irodalom összefoglaló néven SPD-technikáknak nevezi (Severe Plastic Deformation = intenzív képlékeny alakítás). Az intenzív képlékenyalakító eljárásoknál az alakváltozási mérték a hagyományos alakító technológiáknál szokásos érték többszöröse. Az alakváltozás jellege általában nyíró, amely legtöbbször nagy hidrosztatikus nyomás alatt valósul meg.

Az ilyen körülmények között, megfelelően végrehajtott alakítás hatására alakul ki a nanoszemcsés anyagállapot, amely jellemzően nem-egyensúlyi határokkal elválasztott, jellemzően 10-től néhány száz nanométeres méretű, ún. diszlokációs cellákból áll. A fémek ultra-finom-szemcsés állapota pedig – többek között – úgy érhető el, hogy az előzőekben bemutatott nanoszemcsés struktúrájú anyagot további intenzív képlékenyalakításnak vetjük alá. Az ilyen anyagokat jellemzően néhány 100 nm-től $1\ \mu\text{m}$ -ig terjedő szemcsék építik fel, amelyeket többnyire egyensúlyi vagy közel egyensúlyi, nagyszögű szemcsehatárok választanak el. [1], [2]

[1] Valiev, R. Z.–Islamgaliev, R. K.–Alexandrov, I. V. (2000): Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Prog. Mater. Sci.* Vol. 45. Pp. 103–189.

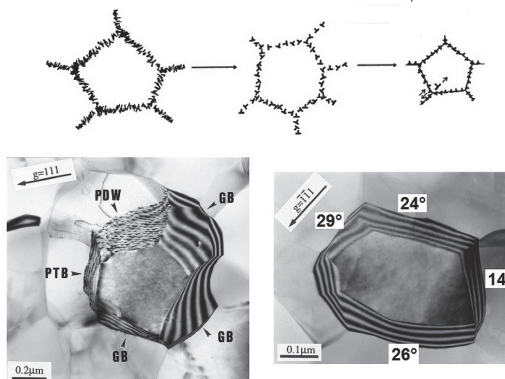
[2] Chang, C. P.–Sun, P. L.–Kao, P. W. (2000): Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminium. *Acta Mater.* Vol. 48. Pp. 3377–3385.

[1] Valiev, R. Z.–Islamgaliev, R. K.–Alexandrov, I. V. (2000): Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Prog. Mater. Sci.* Vol. 45. Pp. 103–189.

[2] Chang, C. P.–Sun, P. L.–Kao, P. W. (2000): Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminium. *Acta Mater.* Vol. 48. Pp. 3377–3385.

Az UFG-struktúra kialakulásának folyamatát szemléleti az 1. ábra.

1. ábra. Az ultra-finomszemcsés mikroszerkezet kialakulásának mechanizmusa [1] és egy UFG-struktúrájú, könyöksajtolt alumíniumötvözet TEM-es felvételei [2]

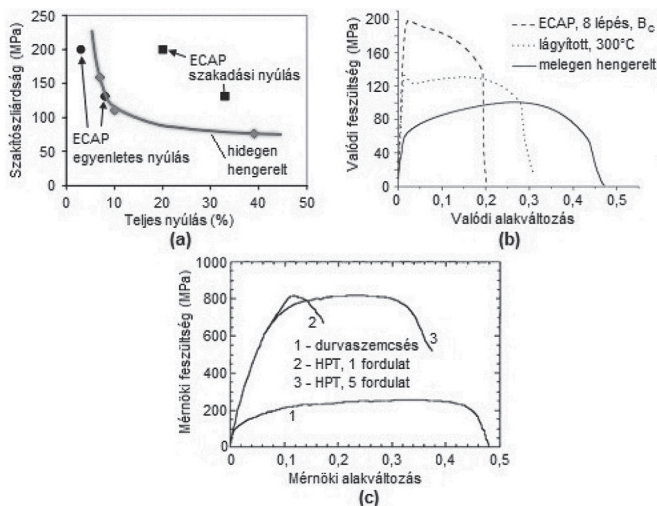


Az intenzív képlékenyalakító eljárásokkal létrehozható ultra-finom- és nanoszemcsés anyagok egyik legjelentősebb mechanikai tulajdonsága a megnövekedett szilárdság. A szilárdságnövekedés mellett, a durvaszemcsés állapothoz viszonyítva változik az anyagok keménysége, szívóssági és alakíthatósági tulajdonságai, az ismétlődő mechanikai igénybevétel okozta fáradási és törési viselkedése, és még számos egyéb mechanikai tulajdonsága. A szilárdságnövekedés mellett – amely tehát erősen függ a szemcsemérettől és a deformációs mikro-mechanizmusoktól – az UFG- és NG-anyagokkal kapcsolatos kutatások egyik meghatározó hajtóereje az, hogy ezen anyagok alakíthatósági és szívóssági tulajdonságai nem, vagy nem olyan mértékben csökkennek, mint a hagyományos alakító technológiákkal előállított anyagoké. Erre mutat példát a 2. ábra, amelyen két elterjedt SPD-eljárással, a könyöksajtolással és a nagy nyomás alatti csavarással alakított alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságait hasonlíthatjuk össze a hagyományos alakító technológiákkal elérhető értékekkel.

Szakadási nyúlásukat tekintve a könyöksajtolt próbatestek alakíthatósága nagyobb, mint a hasonló nagyságrendű szakítószilárdságot elérő hideghengerelt daraboké (2/a. ábra). A 2/b. ábrán látható szakítódíagramokból

azonban az is megfigyelhető, hogy az ECAP-al alakított anyagok egyenletes nyúlása még 8 átsajtolás után is kicsi, ellenben a befűződést követő nagymértékű lokális képlékeny alakváltozás révén a szakadási nyúlás már jelentős mértékben növekszik [3], [4]. Az alakíthatóság tovább javítható egy jelentős szemcsedurvulást még nem okozó, kis hőmérsékletű lágyító hőkezeléssel (2/b. ábra).

2. ábra. Hidegen hengerelt és könyöksajtolt AA1050-es alumínium próbatestek mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása (a) [3]. Ipari tisztaságú alumínium különböző alakíthatósági állapotának szakítódiagramjai (b) [4]. Durvaszemcsés és HPT-vel alakított titán minták szakítódiagramjai (c) [1]



[3] Verlinden, B. (2005): Severe plastic deformation of metals. *MJoM*. Vol. 11. Pp. 165–182.

[4] Poortmans, S.–Verlinden, B. (2005): Mechanical properties of fine-grained AA1050 after ECAP. *Proc. Nano-SPD-3*. Fukuoka, Japan.

Fémek intenzív képlékenyalakításának megvalósítására számos különböző eljárást és kísérleti elrendezést fejlesztettek ki, amelyek sorában a '90-es évek elején megjelent a többtengelyű, vagy más néven többirányú kovácsolás is. Az alakítási folyamathoz használt szerszámok alakját és kialakítását tekintve, jellemzően sík szerszámfelek közötti szabadalakító, vagy zárt üregben végrehajtott zömítések sorozatából álló változatokat különböztetünk meg. Az egyes lépések között – hasonlóan a könyöksajtoláshoz – különböző alakítási utak szerint forgatják a próbatesteket, amelyek jellemzően hasáb vagy hengeres alakúak. Az alakítási utak

[5] Naser, T. S. B.–Krallics, G. (2014): Mechanical Behavior of Multiple-forged Al 7075 Aluminum Alloy. *Acta Polytechnica Hungarica*, 11. (7.) Pp. 103–117.

[6] Naser, T. S. B.–Bobor, K.–Krallics, G. (2014): Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy. *Periodica Polytechnica – Mechanical Engineering*, 58. (2.) Pp. 113–117.

[7] Noda, M.–Hirohashi, M.–Funami, K. (2003): Low Temperature Superplasticity and Its Deformation Mechanism in Grain Refinement of Al-Mg Alloy by Multi-Axial Alternative Forging. *Materials Transactions*, 44. (11.) Pp. 2288–2297.

[8] Montazeri-Pour, M.–Parsa, M. H.–Jafarian, H. R.–Taieban, S. (2015): Microstructural and mechanical properties of AA1100 aluminum processed by multi-axial incremental forging and shearing. *Mat. Sci. Eng.*, 639. Pp. 705–716.

tekintetében, a három („abc” út), illetve a két („ab” út) egymásra merőleges irányból végrehajtott kovácsolás a legelterjedtebb. A terhelési menetrendet mindkét esetben úgy alakítják ki, hogy a darabok 90°-os elfordításával, az alakítási irányok periodikus váltogatásával két, illetve három lépésenként ismétlődő, ciklikus terheléstörténetet valósítsanak meg.

Számos kutatás foglalkozott alumíniumötvözetek többtengelyű kovácsolásával. A vizsgált anyagokat és a többtengelyű kovácsolás folyamatát tekintve, végeztek kísérleteket például EN AW-7075-ös ötvözzel, 250°C-on, abc” alakítási út szerinti szabadalakító kovácsolással [5]. Egy másik tanulmányban EN AW-6082-es anyagban „ab” terheléstörténettel megvalósított, zárt szerszámban végzett szobahőmérsékletű alakítási lépések sorozatával állították elő a kovácsolt darabokat [6]. Al-Mg-ötvözeteken is hajtottak végre kísérleteket 270 és 470°C-on, háromirányú szabadalakító kovácsolással [7]. EN AW-1100-as alumíniumon egy ígéretes komplex eljárást, a zárt üregben történő, nyírással kombinált sajtolást alkalmaztak [8]. Ezen kísérletek egyik közös jellemzője, hogy a hengeres vagy hasábalakú munkadarabok méretei az intenzív képlékenyalakító eljárásoknál szokásoshoz képest nagyobbak, az 50–100 mm-es, esetenként a 100 mm feletti tartományba esnek.

Az EN AW-6082-es ötvözetnél öt kovácsolási lépést követően, az alapanyag kiindulási állapotához viszonyítva jelentős szilárdságnövekedést és az alakíthatóság csupán kisebb mértékű csökkenését tapasztalták [6]. A kísérletek során alakított hengeres munkadarabok hossztengetelyére merőleges középkeresztmetszetének átlagos keménysége az első kovácsolási lépést követően jelentősen növekedett, majd egy telítési értékre állt be, illetve ekörül ingadozott. Ehhez hasonló tulajdonságokat mutattak ki a több irányból, járulékos nyírással kovácsolt EN AW-1100-as alumíniumötvözetből készült próbatesteknél is [8]. Nyolc kovácsolási lépést követően, az 1,5 µm-es átlagos szemcseméretre közel négyszeres szilárdságnövekedés és az alakíthatóság alig 30%-os csökkenése társult. A különböző magnéziumtartalmú alumíniumötvözetek 270°C-on történő, többlepéses kovácsolása során [7] az akkumulálódott egyenértékű képlékeny alakváltozás elérte a $\phi=6$ -os értéket, mialatt az átlagos szemcseméret 0,8 µm-re csökkent, valamint a nagyszögű szemcsehatárok aránya folyamatosan növekedett. Az így előállított UFG-minták már igen alacsony, 270°C-os hőmérsékleten végzett szakítóvizsgálat alatt szuperképlékeny alakváltozást produkáltak, elérve a 340%-os szakadási nyúlást.

A többtengelyű kovácsolás tehát egy viszonylag egyszerű eljárás, amellyel ultra-finomszemcsés tömbi anyag állítható elő, az egyéb intenzív képlékenyalakító eljárásokhoz viszonyítva, akár nagyobb méretű darabok formájában is. Emellett, egyéb SPD-eljárásokhoz hasonlóan, a többtengelyű kovácsolás technikájával alakított fémek és ötvözetek szilárdsági tulajdonságai jelentős mértékben javulnak. Az alakítandó anyag kiindulási állapotától függően a folyáshatár növekedése akár 4–5-szörös is lehet [9], míg a szakítószilárdság 2–3-szoros értéket is elérhet [10]. A félmeleg-, illetve a melegalakítás hőmérséklet tartományában végrehajtott többtengelyű kovácsolásnál pedig a megújulási és újrakristályosodási folyamatok csökkentik a kristályrács hibasűrűségét, amely jobb alakíthatóságot eredményez [9], [10].

A többtengelyű kovácsolásra kifejlesztett különböző technikai megoldások közül az alakítási folyamat paramétereinek szabályozhatósága szempontjából az egyik legsokoldalúbb lehetőséget kínálja a MaxStrain műveleti egységgel felszerelt Gleeble fizikai szimulátor. A MaxStrain-rendszer és a Gleeble-berendezés technikai adottságait, a gyártói szimulációs program továbbfejlesztésének lépéseit, valamint a többtengelyű kovácsolás folyamatát jellemző folyásgörbék számítására szolgáló mechanikai modell részleteit korábbi publikációinkban már bemutattuk [11], [12], itt csak az alapvető megértéshez szükséges információkat ismertetjük.

A következőkben bemutatásra kerülő alakítási kísérletek egy olyan kiterjedt kísérletsorozat részei, amelyben EN AW-6082-es, EN AW-5182-es és EN AW-7075-ös alumíniumötvözetek laboratóriumi és félüzemi többtengelyű kovácsolásának folyamatával, illetve az így előállított speciális tulajdonságú anyagok teljes körű anyagvizsgálatával foglalkoztunk.

A Kísérleti anyagok kiindulási állapotának jellemzése

Az EN AW-6082-es és az EN AW-7075-ös próbatestek kiinduló alapanyaga 25×25 mm-es, négyzet keresztmetszetű, T6-os állapotra öregített, extrudált rúd volt. Az alakíthatóság növelése céljából úgynevezett oldó lágyítást végeztünk az alapanyagon. A hőkezelés során a 380°C-on, két órán keresztül

[9] Rezaee-Bazzaz, A.–Ahmadian, S. (2012): Modeling of mechanical behavior of ultra fine grained aluminum produced by multiple compressions in a channel die. *Mater. Des.*, 34. Pp. 230–234.

[10] Padap, A. K.–Chaudhari, G. P.–Pancholi, V.–Nath, S. K. (2010): Warm multi-axial forging of AISI 1016 steel. *Mater. Des.*, 31. Pp. 3816–3824.

[11] Bereczki, P.–Szombat-helyi, V.–Krállics, G. (2014): Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multi-axial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*. 84. Pp. 182–188.

[12] Bereczki, P.–Szombat-helyi, P.–Krallics, G. (2014): Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 63. (012140.)

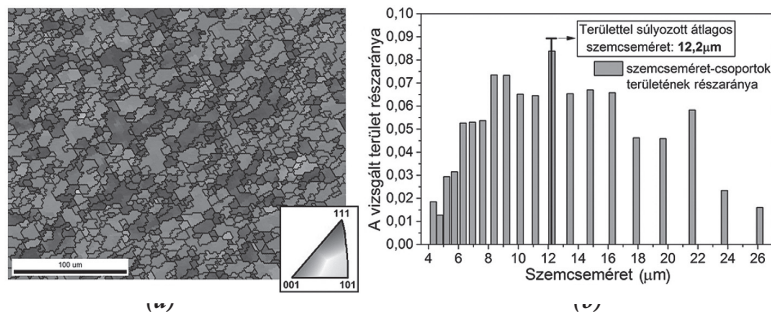
hőntartott darabokat a programozható kemencében 1°C/perc sebességgel 80°C-ig hűtöttük, majd ezen a hőmérsékleten további egy órát pihentettük. Az EN AW-5182-es próbatestek alapanyaga melegen, 46 mm-es vastagságra előhengerelt lemez volt. Az alapanyagok kémiai összetételét egy OBLF QSG750 típusú optikai emissziós spektrofotométerrel mértük meg. Az egyes elemek szerinti tömegszázalékos kémiai összetételt a kereskedelmi forgalomban vásárolt alapanyagokra az 1. táblázatban adjuk meg. A harmadik kísérleti anyag egyes ötvözőinek mennyisége az EN AW-5182-es alumíniumötvözet szabványos összetételi határértékein belül van, de konkrét értékeket nem közlünk, ugyanis a felhasznált anyag az ipari partnerünk saját fejlesztésű ötvözete.

1. táblázat. A kísérleti anyag kémiai összetétele

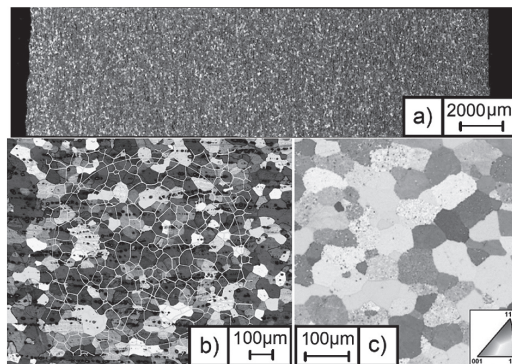
m/m%	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Cr	Zn	Ti	Al
EN AW-6082	0,98	0,25	0,51	0,78	0,089	0,002	0,055	0,045	bal.
EN AW-7075	0,12	0,37	0,06	2,66	1,76	0,23	5,66	0,020	bal.

A többtengelyű kovácsolással elérhető szemcsefinomodás mértékének megállapításához ismerni kell az alakítatlan alapanyag mikroszerkezetét is. A lágyított és melegen hengerelt alapanyagok szemcseszerkezetét elektrolitikusan maratott mintákon, optikai fémmikroszkópban és pásztázó elektronmikroszkópban, visszaszórt elektrondiffrakciós technikával vizsgáltuk meg. Példaként – a teljesség igénye nélkül – a 3. ábrán az EN AW-6082-es, míg a 4. ábrán az EN AW-5182-es ötvözet kiinduló szemcseszerkezetét jellemző felvételeket láthatunk.

3. ábra. Az alakítatlan EN AW-6082-es alapanyag inverz pólusábra térképe és egységsháromszögének színekódolása (a). A szemcseméret területre normált, relatív gyakoriság hisztogramja (b)



4. ábra. A 46 mm-es vastagságú melegen hengerelt minta negyedének mikroszerkezete a teljes vastagság mentén (a), továbbá a vastagság közepéről készült felvételre illesztett, ASTM E112 szerinti 5.0-ös fokozatnak megfelelő háló (b), valamint az ugyanezen pozícióban készült inverz pólusábra (c)

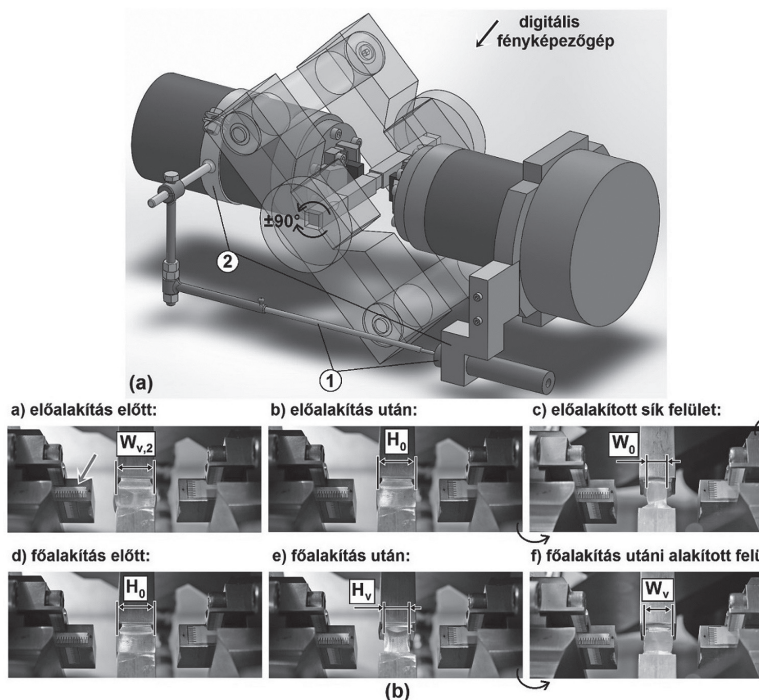


A lágyított EN AW-6082-es alapanyagban található szemcsék mérete 4 és 26 μm közé esik, amely egy extrudált alumíniumprofil esetében viszonylag homogén szemcseszerkezetnek tekinthető. Kiértékelve a hisztogram adatait, az alapanyag területtel súlyozott átlagos szemcsemérete 12,2 μm -re adódott. A lágyítást követően az EN AW 7075-ös ötvözet mikroszerkezete hasonlóan homogén szemcseméret-eloszlást mutatott, 14,5 μm -es átlagérték mellett. Az előhengerelt EN AW-5182-es ötvözet szemcseszerkezete azonban jóval durvább, átlagos szemcsemérete 65–70 μm volt.

A kutatáshoz használt berendezések, eszközök

A többtengelyű kovácslás folyamatának fizikai szimulációját a Gleeble-szimulátorhoz csatlakoztatott MaxStrain-egységgel hajtottuk végre. A szimulációk során a négyzet keresztmetszetű hasáb próbatestet a munkahengerekre merőlegesen, egy manipulátorban, két leszorító bilincssel rögzítjük. A próbatest közép-ső, 12×12×12 mm-es anyagtérfogatának alakítását a munkahengerekre rögzített, 10 mm széles, síkfelületű keményfém szerszámok végzik. A manipulátor segítségével a próbatestet annak hossz tengelye mentén 90°-kal lehet programozottan oda-vissza forgatni az egyes alakítási lépések között, amellyel megvalósítható a kétirányú, ciklikus képlékenyalakítás. A MaxStrain-berendezés vázlatát, valamint a többtengelyű kovácslás egyes lépéseit az 5. ábra foglalja össze.

5. ábra. A MaxStrain berendezés funkcionális elemeinek 3D-s modellje (a). Egy kovácsolási lépés jellegzetes elemei (b)



Előző kutatásaink során továbbfejlesztett szimulációs program a szerszámmozgás és az alakító erő mérése mellett, az alakított anyagrész magasságának és vastagságának főalakítások előtti és utáni folyamatos regisztrációját is megvalósítja. Továbbá, a próbatest alakított térfogatáról készített fotók segítségével, a szerszám által nyomott felület méreteit is meghatározhatjuk, amely szintén szükséges a folyásgörbéket számító mechanikai modellhez.

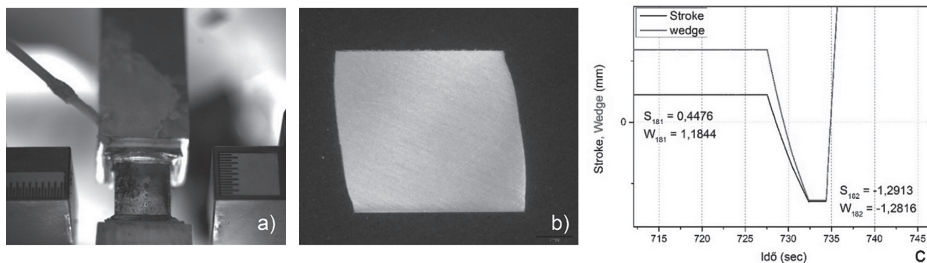
A MaxStrain-el megvalósított többirányú képlékenyalakító eljárás modellezésekor az alakított anyag-térfogatra jellemző alakváltozási- és feszültségállapotot egy analitikus mechanikai modellel közelítettük. A modell a virtuális sebességek elvét alkalmazza a képlékenységtan energetikai alapegyenletére (1), amelyből a szimuláció során mért adatok segítségével, az alakítás minden egyes erő–szerszámelmozdulás adatpárjához kiszámítható a H–M–H-elmélet szerinti egyenértékű képlékeny alakváltozás és az alakítási szilárdság értéke.

$$J = \iiint_{V_p} IdV + \iint_{A_\tau} \tau_i^* \Delta v_{\tau_i} dA + \iint_{A_\Delta} \tau_{\Delta_i} \Delta v_{\Delta_i} dA - \iint_{A_\sigma} t_i^* v_i dA - Q_i^* v_{k_i}^* \quad (1)$$

A mechanikai modell és a hozzá tartozó számítás módszertana részletesen megtalálható publikációinkban [11], [12]. Az EN AW-6082-es ötvözzel végzett kovácsolási kísérletek során – mint azt a későbbiekben látni fogjuk – az alakváltozási sebesség alakítási szilárdságra, keménységre és mikroszerkezeti jellemzőkre gyakorolt hatását vizsgáltuk meg. Az alakváltozási sebesség növelése során az alakított térfogat olyan mértékű torzulását tapasztaltuk, amely szükségessé tette mind a szimulációs program, mind pedig a mechanikai modell továbbfejlesztését. Az alakított anyag-rész – modellezés szempontjából – nehezen kezelhető torzulását a lágy és erősen anizotróp EN AW-5182-es ötvözet kovácsolása során is megfigyeltük.

A probléma kiküszöböléséhez egy olyan szimulációs programot fejlesztettünk ki, amely képes az előző alakítási lépésben aszimmetrikusan kitolódott alakított anyag-térfogat szabályozott mértékű és sebességű, aszimmetrikus alakítására, visszatolva azt a próbatest középvonalába. A 6. ábrán láthatjuk az aszimmetrikus szerszámmozgással megvalósított kovácsolási szimuláció eredményeképpen kapott, szimmetrikus és repedésektől mentes alakított próbatestet.

6. ábra. Az aszimmetrikusan alakított próbatest (a), valamint annak repedésmentes keresztmetszete (b), illetve a szerszámok (Stroke és Wedge) alakítás közbeni mozgásának út-idő grafikonja (c)



Az alakváltozási sebesség növelése miatt bekövetkezett alaktorzulás azonban továbbra is helytelen folyásgörbék számítását eredményezte. Ennek kiküszöböléséhez a mechanikai modellt kellett továbbfejleszteni.

[11] Bereczki, P.–Szombathelyi, V.–Krállics, G. (2014): Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*. 84. Pp. 182–188.

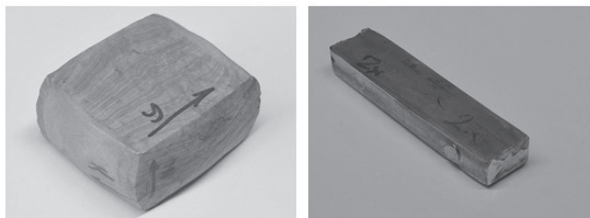
[12] Bereczki, P.–Szombathelyi, V.–Krállics, G. (2014): Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 63. (012140.)

[11] Bereczki, P.–Szombathelyi, V.–Krállics, G. (2014): Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*. 84. Pp. 182–188.

A megoldást az a_0 geometriai paraméter [11] korrekciója jelentette. A számítást – terjedelmi korlátok miatt – nem részletezzük.

A félüzemi alakítási kísérleteket kétféle szerszámmal végeztük. Az EN AW-6082-es anyagon zárt szerszámmal, míg az EN AW-7075-ös ötvözetben nyitott kovácszserszámmal, ún. szabadalakító eljárással végeztünk többirányú kovácsolási kísérleteket. A zárt szerszámban 20 mm átmérőjű, 100 mm hosszú hengeres próbatesteket kovácsoltunk 1, 2, 3, 4 és 5 lépésben, az alakítások között hossztengetyűk mentén 90°-kal oda-vissza forgatva azokat. A szabadalakító kovácsolás során a 40 mm átmérőjű darabokat egy háromlépéses forgatási szekvencia ismétlésével, a terhelési irányt minden egyes lépés után 90°-kal megváltoztatva alakítottuk. A kovácsolás során megvalósított névleges lépésenkénti egyenértékű képlékeny alakváltozás a nyitott szerszám esetében 0,6 míg a zárt üregben 0,7 volt. A 7. ábrán a kétféle szerszámban alakított darabokat láthatjuk.

7. ábra. A nyitott szerszámban, 3 lépésben (a), valamint a zárt üregben, 5 lépésben (b) kovácsolt darabokról készült felvételek

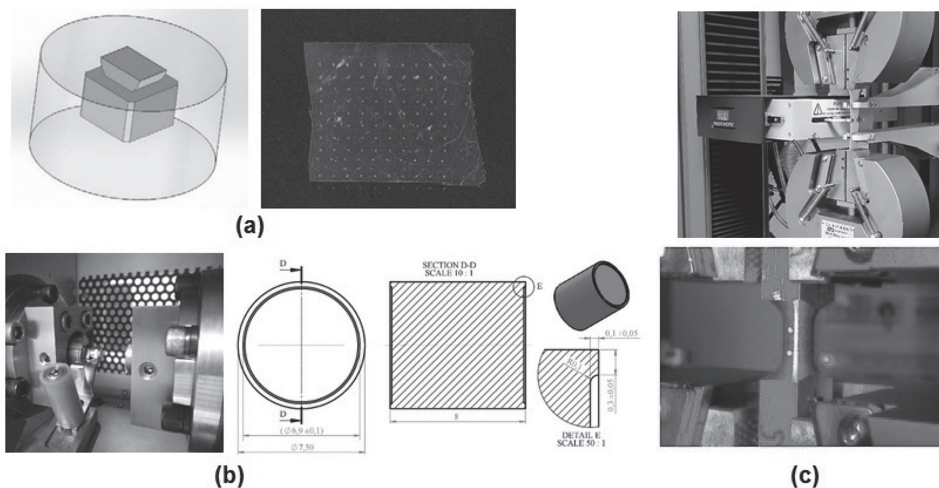


A különböző többtengelyű kovácsolási kísérletek során bekövetkezett mikroszerkezeti változásokat a már említett SEM+EBSD mikroszkópi technikával vizsgáltuk. Az anyagszerkezeti változások a mechanikai tulajdonságok erőteljes módosulását eredményezték. Ennek kvantitatív jellemzésére különböző anyagvizsgálati módszereket alkalmaztunk: Vickers-típusú mikrókeménység-mérést, szakítóvizsgálatokat és egytengelyű zömítővizsgálatokat.

A keménységméréseket egy CSM Micro Combi Tester típusú automata keménységmérő berendezésen hajtottuk végre 10 N-os terhelő erővel és 10 sec-os terhelési időtartammal. A szakítóvizsgálatokat egy INSTRON 5969 típusú univerzális szakítógépen végeztük. A különböző eljárással kovácsolt darabok méretei jelentősen

eltértek egymástól, ezért különböző geometriájú próbatesteket kellett belőlük kimunkálnunk. A nagyobbak esetében hagyományos finomnyúlásmérővel, míg a kisebbeknél video extenzométerrel mértük az alakváltozást. A mechanikai anizotrópia meghatározásához szükséges egytengelyű zömítő vizsgálatokat a Gleeble 3800-as termomechanikus szimulátor Hydrowedge-egységével végeztük. A zömítések a szakítóvizsgálatokkal megegyező szerszámmozgási sebességgel hajtottuk végre, 0,8 mértékű logaritmikus alakváltozási mértékig. Egyes alapanyagok nagy képlékeny alakváltozási tartományú, kvázi-statisztikus, monoton folyásgörbéit pedig egy MTS 810 típusú univerzális anyagvizsgáló berendezésen, Watts-Ford-eljárással vettük fel. Az előbbieken felsorolt mechanikai anyagvizsgálatok megvalósításáról mutatunk be néhány képet a 8. ábrán.

8. ábra. A keménységméréshez előkészített, MaxStrain-berendezésen kovácsolt próbatest (a). Zárt üregben alakított darabból kimunkált próbatest egytengelyű zömítővizsgálata a Hydrowedge-egységen (b) Különböző geometriájú próbatestek szakítása az INSTRON-berendezésen (c)



[11] Bereczki, P.–Szombathelyi, V.–Krállics, G. (2014): Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*. 84. Pp. 182–188.

A kutatómunka válogatott eredményei – az alakváltozási sebesség hatása az alakítási szilárdságra

A projekt során megvalósított kutatómunkánkban számos jelentős, a tudományterületet gazdagító eredményt értünk el. Tekintettel a kiadvány terjedelmi korlátjaira, a soron következő fejezetekben az egyes kutatási feladatok legjelentősebb eredményeit mutatjuk be.

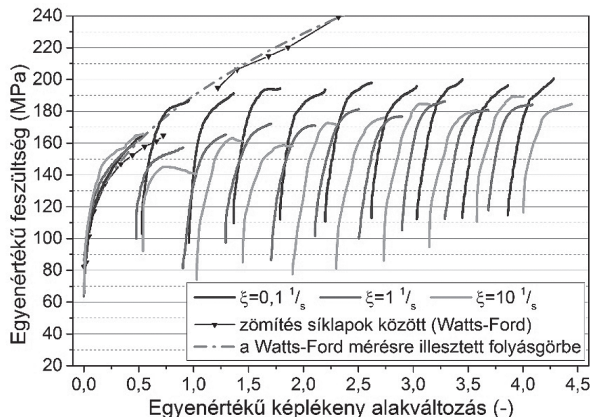
A következőkben a többtengelyű kovácsolási folyamat során alkalmazott alakváltozási sebesség alakítási szilárdságra, keménységre és mikroszerkezeti jellemzőkre gyakorolt hatását fogjuk bemutatni. Az alakváltozási sebesség hatását vizsgáló többtengelyű kovácsolási kísérletek során 10 egymást követő, egyenként (0,1+0,4) mértékű, szerszámmozgás-irányú egyenértékű logaritmikus alakváltozást megvalósító alakítási lépést hajtottunk végre a lágyított állapotú EN AW-6082-es ötvözetből kimunkált próbatesteken.

A kovácsolási kísérleteket a Gleeble-szimulátor MaxStrain-egységén, szobahőmérsékleten, $\xi=0,1 - 1,0 - 10 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebességekkel hajtottuk végre.

Az alakítási kísérletek végrehajtását, valamint a mechanikai modell bemeneti adatainak [11] meghatározását követően, meghatároztuk a folyásgörbét. A 9. ábrán egy összefoglaló grafikonon ábrázoltuk a három különböző alakváltozási sebességgel végrehajtott kovácsolási szimulációra számított folyásgörbéket a halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás függvényében.

Az alakváltozási sebesség növekedésével az első alakítási lépések egymáshoz viszonyított folyásgörbéi – az alakítástechnikában jól ismert módon – egyre inkább növekvő alakítási szilárdságot mutatnak ugyan, de a szilárdságnövekedés elmarad az elvárttól. Ennek hátterében az alakítási melegeedés állt, melynek hatására csökkent az alakítási keményedés mértéke.

9. ábra. A $\xi=0,1$; 1 és 10 s^{-1} alakváltozási sebességgel végrehajtott kovácsolási szimulációkra számított folyásgörbék a halmozott egyenértékű képlékeny alakváltozás függvényében ábrázolva



[3] Verlinden, B. (2005): Severe plastic deformation of metals. *MJoM*. Vol. 11. Pp. 165–182.

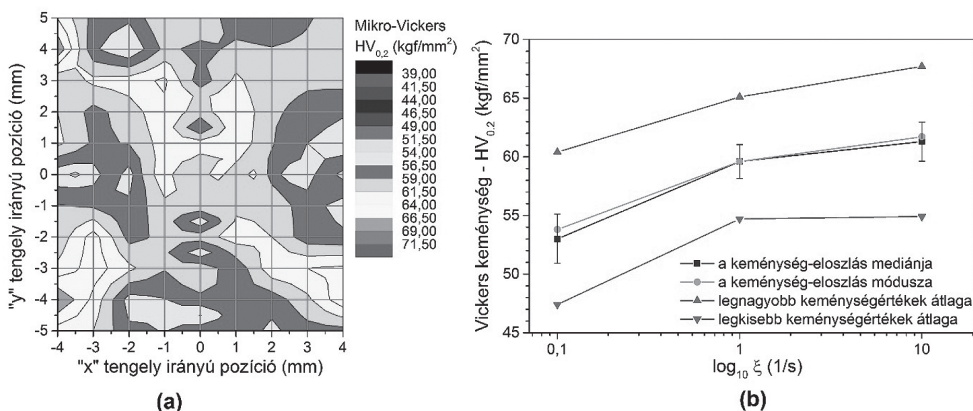
Összehasonlítva a ciklikus, többirányú kovácsolást kísérő, és az egy irányból végrehajtott nyomóvizsgálatra jellemző folyásgörbéket, megállapítható, hogy a monoton alakításra jellemző folyásgörbe a nem monoton alakításra számított alakítászilárdság-értékek felett halad az egyenértékű képlékeny alakváltozás közös tartományán. Ehhez hasonló tendenciát állapítottak meg kutatók más SPD eljárásoknál is [3]. Az egyes kovácsolási lépések folyásgörbéit egymáshoz viszonyítva látható, hogy a monoton képlékeny alakváltozásnál tapasztaltakkal ellentétben, az alakítási szilárdság változása nem monoton jellegű, az alakítás irányának megváltozásakor szignifikáns csökkenést mutat. Ez a jelenség – amely hasonló a Baushinger-effektushoz – azzal magyarázható, hogy az adott alakítási lépés végére kialakuló diszlokáció-struktúrát a következő kovácsolási lépésben az előzőre merőleges irányból nyomva kényszerítjük képlékeny alakváltozásra.

Az egyes kovácsolási szimulációhoz tartozó teljes folyásgörbe-sorozatokat összehasonlítva, látható, hogy a legkisebb alakváltozási sebességnél az alakítási szilárdság a harmadik alakítási lépés végére megközelítőleg eléri a telítési értékét. Ezzel ellentétben a $\xi=1$ és $\xi=10 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebességgel végrehajtott szimulációknál az első alakítási lépések végére elért kisebb folyási feszültség a további kovácsolási lépések során nem telítődik, hanem jelentős keményedést mutatva, a 10. alakítás

végére megközelítőleg eléri a $\xi=0,1 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebességre jellemző maximális alakítási szilárdságot. Ennek hátterében a mikroszerkezeti változások alakváltozási sebességtől való függése, valamint a nagyobb mértékű alakítási keményedést kísérő keménységnövekedés együttese állhat. Teóriánk igazolására először mikrókeménység-méréseket végeztünk az alakított anyagterfogatok középkeresztmetszetén, a 8/a. ábrán látható elrendezésnek megfelelően.

A keménységméréseket a 8/a. ábrán látható, 1 mm-es osztásközü négyzetháló mentén elvégezve, az alapanyagon és valamennyi alakított próbatesten 110–120 db mérést végeztünk. A kapott adatok felhasználásával elkészítettük a keresztmetszeti keménységtérképeket, melyre a 10/a. ábrán láthatunk példát. Az egyes alakváltozási sebességekhez tartozó keménységértékek statisztikai kiértékelését a Weibull-eloszlást használva végeztük el. A 10/b. ábrán láthatjuk az alapanyag és a különböző alakváltozási sebességű többtengelyű kovácsoláson átesett próbatestek keménységét jellemző statisztikai mérőszámokat.

10. ábra. A $\xi=1$ alakváltozási sebességgel kovácsolt próbatest alakított anyagterfogatának középkeresztmetszeti keménységtérképe (a). A különböző alakváltozási sebességgel kovácsolt próbatestek keménységi adathalmazának statisztikai mérőszámai (b)



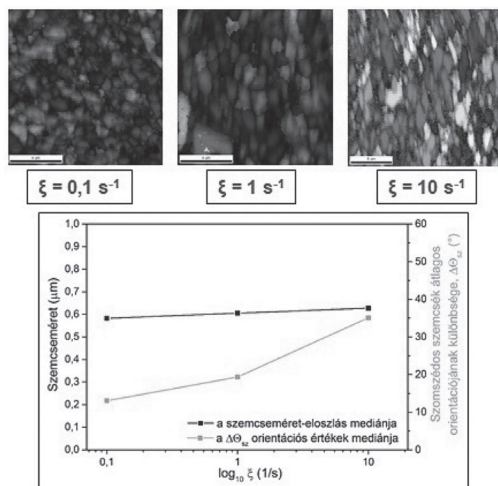
A grafikonból megállapítható, hogy a mért keménységi adathalmazok statisztikai középértékei, azaz a medián és a módusz is egyaránt monoton növekednek a többtengelyű kovácsolás során alkalmazott alakváltozási sebesség növekedésével. Az ábrán feltüntetett továbbá az egyes próbatesteken mért legkisebb és legnagyobb keménységértékek átlagát leíró görbék is. Az alakváltozási sebesség növekedésével ezek a mérőszámok is a keménység monoton emelkedését mutatják.

Miután kimutattuk, hogy az alakváltozási sebesség növekedése a nagyobb mértékű alakítási keményedés mellett jelentős keménységnövekedéssel is együtt jár, részletesen megvizsgáltuk az alakított darabok szemcseszerkezetét is. Első lépésben kvantitatív fáziselemzést végeztünk a keménységmérésre használt felületeken. Az optikai fémmikroszkópos vizsgálatok kimutatták, hogy a $0,5\ \mu\text{m}$ -nél kisebb, illetve a $0,5$ és $1,0\ \mu\text{m}$ közötti fázisok (diszperzoidok) és az előzőekben részletezett keménységi mérőszámok között erős korreláció mutatkozik. Ez azt jelenti, hogy az alakváltozási sebesség növekedésével a képlékeny alakváltozás indukálta kiválási folyamatok is beindulnak. Az intenzív képlékenyalakítás hatására tehát akár már szobahőmérsékleten beindulhatnak ezek a kiválási folyamatok, ahogy azt Zhang és társai [13] is kimutatták.

Ezután SEM+EBSD-technikával vizsgáltuk tovább az alakváltozási sebesség változtatásának hatását. Mindhárom mintán a középkeresztmetszet geometriai középpontjának környezetében végeztük a méréseket. A kapott kristályorientációs adatok szoftveres és statisztikai feldolgozását követően megkaptuk a 11. ábrán látható inverz pólusábra-térképeket, illetve a szemcseméret-eloszlás és az átlagos szemcseorientációk különbségének ($\Delta\theta_{sz}$) mediánjait. Az EN AW-6082-es alumíniumötvözetnél a többtengelyű kovácsolás alakváltozási sebességének növelése elősegíti az egyensúlyi vagy közel egyensúlyi, nagyszögű szemcsehatárokkal jellemezhető, $1\ \mu\text{m}$ alatti átlagos szemcseméretű ultra-finomszemcsés mikroszerkezet létrehozását. Ezt alátámasztja, hogy az alakváltozási sebesség $0,1\ \text{s}^{-1}$ -ről $10\ \text{s}^{-1}$ -re történő emelésével a szomszédos szemcsék átlagos orientációs különbségének mediánja 13° -ról 35° -ra emelkedett, miközben a szemcseméret középértéke $0,6\ \mu\text{m}$ körül maradt. Mindezek mellett az alakváltozási sebesség növelése elősegíti a képlékeny alakváltozás indukálta kiválási folyamatok lefolyását, amelynek eredményeképpen növekszik a keménység. Ez azonban nem jár együtt az alakítási szilárdság, ezáltal a szükséges alakító erő nagymértékű növekedésével.

[13] Zhang, Z. Z.–Xu, X. C.–Liu, Z.–Xia, Q. K.–Zeng, S. M. (2009): Re-precipitate behavior of supersaturated solid solution of Al-Cu alloy caused by severe plastic deformation during subsequent deformation. *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao / Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 19. Pp. 1962–1968.

11. ábra. A különböző alakváltozási sebességgel kovácsolt próbatestek alakított anyagterfogatának középkeresztmetszeti szemcseszerkezete inverz pólusábra térképeken, valamint a szemcseméret-eloszlás, illetve az átlagos szemcseorientációk különbségének ($\Delta\theta_{sz}$) mediánját ábrázoló grafikon



Kísérleteink eredményeiből egyértelműen kimutatható tehát, hogy az ultra-finomszemcsés mikroszerkezet kialakulásának elősegítéséhez a kiválóan keményedő EN AW-6082-es alumíniumötvözet intenzív képlékenyalakítását növelt alakváltozási sebességgel célszerű végrehajtani.

A kutatómunka válogatott eredményei – melegen hengerelt alumíniumötvözet többtengelyű kovácsolása

Az előhengerelt EN AW-5182-es ötvözetű alapanyag bevizsgálását követően megterveztük a Gleeble-szimulátor MaxStrain-egységén végrehajtandó kovácsolási kísérleteket. A paraméterek definiálása során azt az alapgondolatot követtük, hogy a kovácsolással megvalósított képlékeny alakváltozási mértékek és sebességek lehetőleg legyenek összhangban a 46 mm-es melegen hengerelt szalag további feldolgozása során, azaz a maradék meleghengerlési szakaszban, illetve a hideghengerlési lépéssor alatt megvalósuló alakváltozási mértékekkel és sebességekkel. Ezzel modellezve a hagyományos gyártástechnológia egyfajta

alternatíváját, amely során feltehetően egyfajta határállapot, azaz ultrafinom- vagy nanoszemcsés mikroszerkezet és az ebből eredő különleges mechanikai tulajdonságok érhetők el. Az eredeti technológiánál a meleghengerlési végvastagság 6 mm volt, ami a 46 mm-ről történő tovább hengerlés esetében $\varphi_{mh}=2,4$ mértékű egyenértékű képlékeny alakváltozást jelent. Az 1,5 mm-es hideghengerlési végvastagság pedig további $\varphi_{hh}=1,6$ mértékű egyenértékű képlékeny alakváltozással érhető el. A gyártás fennmaradó részében tehát összesen körülbelül $\varphi_{(heng.)}=4$ mértékű egyenértékű képlékeny alakváltozás valósulna meg.

Ezek alapján 18 alakítási lépést tervezetük a többtengelyű kovácsolás során úgy megvalósítani, hogy a lépésenkénti egyenértékű képlékeny alakváltozás mértéke 0,22 legyen. Ebben az esetben 10 kovácsolási lépés reprezentálná a meleghengerlés fennmaradó részét, míg 8 alakítás a hideghengerlést. A kísérletsorozatban a mechanikai és mikroszerkezeti tulajdonságok változásának nyomon követéséhez közbenso alakítottasági állapotú minták előállítását is megvalósítottuk, azaz 2, 6, 10 és 14 kovácsolási lépést is végrehajtottunk 1–1 próbatestenen. Habár a már bemutatott, aszimmetrikus szerszámmozgással megvalósított kovácsolási szimulációval kezelhetővé vált az alapanyag anizotrópiája miatt bekövetkezett alaktorzulás, az alakváltozási sebességet már nem lehetett annyira megnövelni, hogy elérjük az üzemi hengerlésnek megfelelő értékeket. Így a $0,1 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebesség egységes alkalmazása mellett döntöttünk.

A mechanikai modellel számított folyásgörbék az EN AW-6082-es ötvözetnél tapasztaltakkal összhangban, erősen ciklikus jelleget mutattak – azaz az adott alakítási lépésben lezajló intenzív keményedést követően, a fordítás utáni alakítás elején a folyási feszültség jelentősen alacsonyabb szintről kezd el ismét növekedni. Tovább lépve az eddigi kiértékelésekkel, ebben a kísérletsorozatban a folyásgörbék felhasználásával kvantitatívan jellemeztük a többtengelyű kovácsolást kísérő alakítási keményedési kinetikáját. A folyásgörbék numerikus analízise alapján az alakítási szilárdság – egyenértékű képlékeny alakváltozás értékpárok egy olyan illesztőfüggvényét definiáltunk, amelynél a hatványkitevőben lévő keményedési kitevő ($n_k^{(n)}(\bar{\varepsilon})$) az alakváltozástól függ, annak növekedésével exponenciálisan csökken:

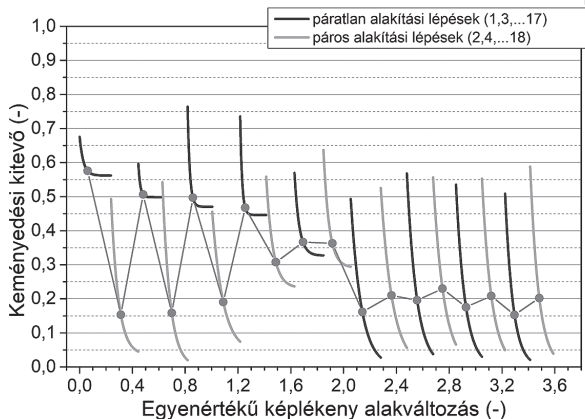
$$k_f^{(n)}(\bar{\varepsilon}) = \sigma_0^{(n)} + \sigma_1^{(n)} \left(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{max}^{(n-1)} \right)^{[c_0^{(n)} + c_1^{(n)} \exp(-(\bar{\varepsilon} - (\bar{\varepsilon}_c^{(n)} + \bar{\varepsilon}_{max}^{(n-1)})) / c_2^{(n)})]} \quad (2)$$

A fenti illesztőfüggvénnyel meghatározott pillanatnyi keményedési kitevők tendenciózus változásának kimutatására minden egyes kovácsolási lépéshez kiszámítottunk egy-egy, úgynevezett egyenértékű keményedési kitevőt, melyeknek az függvények integrálközepeit feleltettük meg. Ezzel szemléletesen jellemezhető az anyag keményedési viselkedése a kovácsolás előrehaladása során. A 12. ábrán foglaltuk össze a pillanatnyi és az egyenértékű keményedési kitevők kovácsolási folyamat alatti változását.

Láthatjuk, hogy előzetes várakozásainknak megfelelően a keményedési kitevő minden alakítási lépésben exponenciális jelleggel csökken. Az egyes terhelési ciklusok határán, az alakítási szilárdságnál tapasztaltakhoz hasonlóan, jelentős mértékben változik a keményedési kitevő értéke. Ez a jelenség szoros összefüggésben van a terhelés irányának megváltozását kísérő Baushinger jellegű effektussal.

[14] Hill, R. (1948):
*Theory of the yielding
and plastic flow of anisotropic metals.* Pro-
ceedings of the Royal
Society, London. Vol.
193. Pp. 281–297.

12. ábra. A keményedési kitevők és azok integrálközepeinek változása a 18 lépéses többtengelyű kovácsolási szimuláció során a halmozott egyenértékű alakváltozás függvényében



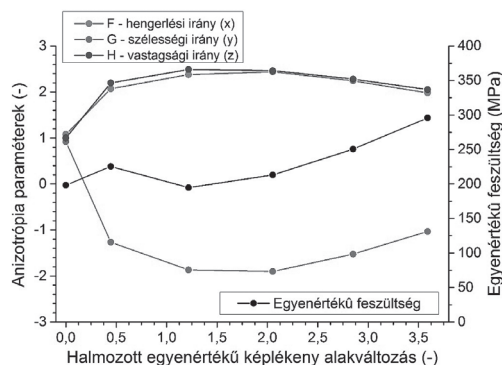
Megfigyelhető továbbá, hogy a 10. alakítási lépésig jelentős különbségek vannak a páros és a páratlan kovácsolási lépések n -kitevőinek nagysága között. A kovácsolási folyamat előrehaladásával fokozatosan csökken az említett különbség mértéke, melynek eredményeképpen, a 10. alakítási lépést követően az egyes kovácsolási ciklusok egyenértékű keményedési kitevői között már szinte nincs különbség. A keményedési kitevők ilyen mértékű kezdeti eltérése, illetve ingadozása az alapanyag szignifikáns anizotrópiájára enged következtetni, míg a különbségek 10. alakítási lépést követő megszűnése a mikroszerkezet valamilyen átalakulására utalhat.

A kísérleti anyag mechanikai anizotrópiájának további elemzéséhez egytengelyű zömítővizsgálatokat végeztünk a Gleeble-szimulátor Hydrawedge-egységen az alapanyagból és a különböző lépésszámmal kovácsolt próbatestekből kimunkált hengeres darabokon. Ehhez a 8/b. ábrán látható geometriájú hengeres zömítő próbatesteket forgácsoltunk ki a kovácsolt próbatestekből, azoknak hossztengetelyével és az aktuális alakítási lépés szerszámmozgási irányával párhuzamosan. A harmadik irányú folyásgörbét – természetesen – a mindenkor következő kovácsolási lépésre, a mechanikai modellel számított folyási feszültségek szolgáltatták. Az így kapott három-irányú folyásgörbéket felhasználva, az egyszerűbb Hill-féle modellt [14] alkalmaztuk a többtengelyű kovácsolással alakított darabok, illetve az alapanyag anizotrópiájának

meghatározásához. A Hill-modell anizotrópia paramétereit – hasonlóan a folyásgörbékhez – a halmozódó képlékeny alakváltozás függvényében a 13. ábrán ábrázoltuk. Az alapanyaghoz tartozó értékeket ebben az esetben is a nulla alakváltozáshoz társítottuk.

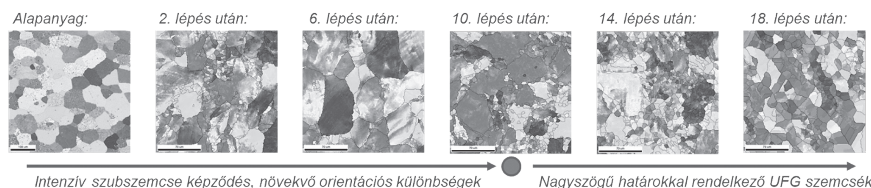
Az F, G és H anizotrópia-paraméterek és különbségük is növekszik a többtengelyű kovácsolás első szakaszában, majd eléri maximumukat a 10. kovácsolási lépést követő anyagállapotban. Ezután fokozatosan csökkennek, ami az anizotrópia mértékének csökkenését mutatja.

13. ábra. Az alapanyag és a különböző mértékben kovácsolt próbatetek Hill-féle anizotrópia paramétereit



Az anizotrópia mértékének folyamatközi megváltozása egyértelműen a mikroszerkezet és a deformációs mikrómechanizmusok megváltozását jelzi. Ennek igazolására, és az említett kapcsolatok feltárásához SEM-vizsgálatokat végeztünk, visszaszórt elektrondiffrakciós eljárással elemezve a szemcseszerkezet és az orientációs viszonyok kovácsolási folyamat alatti alakulását. A 14. ábrán láthatjuk az egyes próbatetekről készült inverz pólusábra térképeket, feketével jelölve a nagyszögű szemcsehatárokat.

14. ábra. Az alapanyag és a különböző mértékben kovácsolt próbatetek alakított anyagterfogatainak középkeresztmetszeti szemcseszerkezete inverz pólusábra-térképeken



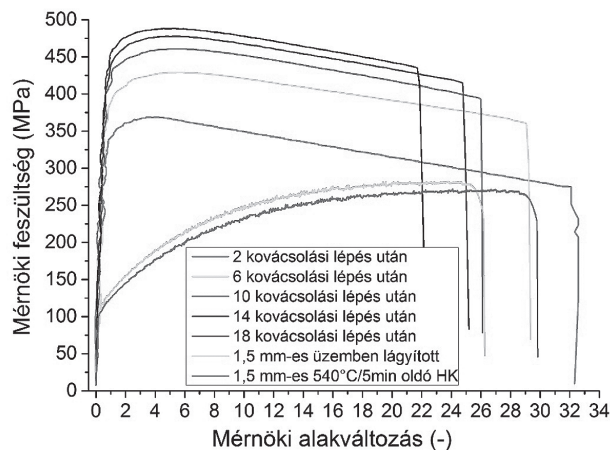
Intenzív szubszemcse képződés, növekvő orientációs különbségek

Nagyszögű határokkal rendelkező UFG szemcsék

A felvételekből jól kivehető, hogy amint a kovácsolási folyamat előrehalad, az alakváltozás halmozódásával az alapanyag egyenletes szemcseszerkezete egyre inkább felaprózódik. A folyamat kezdetén a kristallitok méret szerinti megoszlása meglehetősen inhomogén: egyszerre vannak jelen a 60–70 μm -es, illetve a 10 μm körüli és az alatti szemcsék is. Ezzel párhuzamosan a nagyobb szemcsék belsejében fokozatosan nő az egyes területek közötti orientációkülönbség, amely diszlokációs cellák jelenlétére utal. A 10. alakítási lépés után, amint az a mechanikai tulajdonságokon is észlelhető volt, megváltozik a mikroszerkezet, megnövekszik a nagyszögű szemcsehatárok aránya, és folyamatos szemcsefinomodás mellett beindul az UFG-szerkezet kialakulása.

Miután a mikroszerkezeti vizsgálatokból bebizonyosodott, hogy különleges szemcseszerkezetű anyagot sikerült előállítanunk, szerettük volna megvizsgálni az anyag komplex mechanikai teljesítőképességét – összehasonlítva azt az ipari körülmények között hengerelt változat tulajdonságaival. A szakítóvizsgálatokat egy INSTRON 5969 típusú univerzális szakítógépen hajtottuk végre, a 8/c. ábra alsó felvételén látható, speciális geometriájú próbatesteken. A kovácsolási folyamat valamennyi közbenső állapotában, azaz a 2., 6., 10., 14. és 18. lépés után is végeztünk szakítóvizsgálatot. A kiértékeléseket követően összevetettük a többtengelyű kovácsolással alakított darabok, valamint az ipari körülmények között gyártott lemez, illetve annak oldó hőkezeléssel lágyított változatának szilárdsági és alakíthatósági tulajdonságait. A 15. ábrán közös grafikonban ábrázoltuk valamennyi szakítógörbét.

15. ábra. A többtengelyű kovácsolással alakított daraboknak, valamint az ipari körülmények között gyártott lemeznek, illetve annak oldó hőkezeléssel lágyított változatának szakítógörbéi



A 15. ábrán jól látszik, hogy a többtengelyű kovácsolással alakított darabok mérnökfeszültség–mérnökialakváltozás-görbéi a szilárdsági értékek tekintetében messze meghaladják az ipari körülmények között gyártott lemez mérőszámait, amellet, hogy az alakíthatóság vonatkozásában sem maradnak el jelentős mértékben.

A szakítógörbék összehasonlíthatóságát azonban részben gátolja, hogy míg az ipari körülmények között gyártott lemez szakítópróbáin 50 mm-es jeltávon mértük a nyúlást, addig a többtengelyű kovácsoláson átesett próbatestekből csak olyan szakítópróba volt kimunkálható, melynek eredeti jeltávja csupán 4–5 mm. A különböző mérőhosszú szakítóvizsgálatok összehasonlításához az erő–megnyúlás görbéket integrálva, majd a kapott értékeket normálva, előállítottuk a térfogategységre vonatkoztatott fajlagos alakváltozási munka értékeit is.

Az alábbi táblázatban a kísérleti anyag valamennyi, a kiértékelésbe bevont anyagállapotára megadtuk a szilárdsági és alakíthatósági mérőszámokat, a szakítást jellemző fajlagos alakváltozási munkát, valamint a teljesítményindex értékét. Utóbbit számításánál az adott anyagállapothoz tartozó aktuális folyáshatárt, szakítószilárdságot, illetve szakadási nyúlásértéket normáljuk az adott jellemző populáción belüli maximális értékével, majd ezen hányadosok szorzatát képezve adódik a teljesítményindex.

2. táblázat. Az EN AW-5182-es kísérleti ötvözet különböző állapotaiban mért szilárdsági és alakíthatósági mérőszámok, a fajlagos alakváltozási munka, valamint a teljesítményindex értékei

	Többtengelyű kovácsolás					Ipari hengerlés	
	2. ciklus	6. ciklus	10. ciklus	14. ciklus	18. ciklus	1,5 mm: üzemes lágyított	1,5 mm: oldó HK – 540°C/5min
$R_{p0,2}$ (MPa)	339	387	411	425	447	115	107
R_m (MPa)	369	429	461	478	488	280	272
A_g (%)	3,3	4,6	4,6	4,3	4,1	21,3	25,0
A (%)	31,6	28,3	25,1	24	21,1	25,6	29,4
W_ϕ (mJ/mm ³)	103,6	115,6	112,3	111,1	100,4	63,1	69,4
Telj. index (%)	61,6	73,3	74,2	76,0	71,8	12,9	13,3

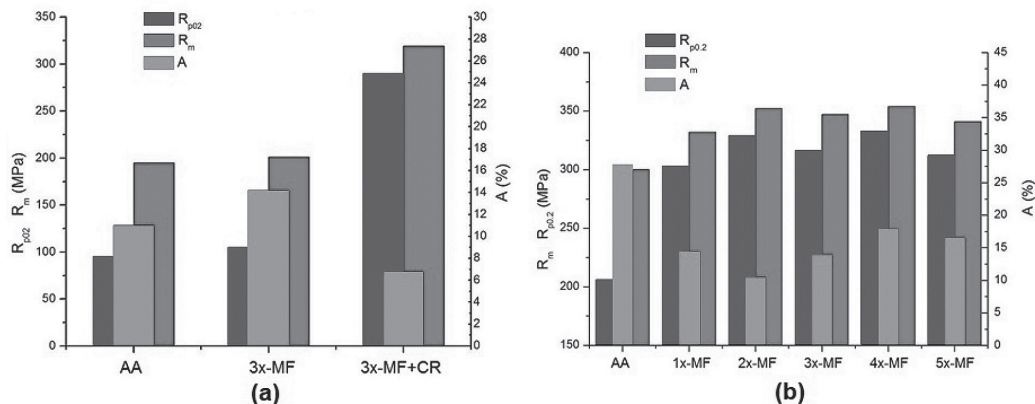
Jól látható, hogy a kísérleti anyag többtengelyű kovácsolással előállított állapotainak teljesítőképessége messze felülmúlja az ipari körülmények között, de ugyanakkora halmozott képlékeny alakváltozással gyártott anyagállapotok képességeit. A legnagyobb szilárdsági értékek a 18 kovácsolási lépést elszenvedett darabokhoz tartoznak, amellett, hogy a szakadási nyúlás még ennél az alakíthatósági szintnél sem csökken 21% alá. A legnagyobb teljesítőképességi indexet azonban a 14 kovácsolási lépés utáni anyagállapot szolgáltatta, amelynél a szilárdsági értékek alig maradnak el a mindenkori maximumoktól, azonban a szakadási nyúlás még 24%, valamint a fajlagos alakváltozási munka is meghaladja a 110 mJ/mm^3 -t.

A kutatómunka válogatott eredményei – megnövelt méretű alumínium próbatestek félüzemi többtengelyű kovácsolása

Amint már említettük, az EN AW-6082-es anyagon zárt szerszámmal, míg az EN AW-7075-ös ötvözetben nyitott kovácsszerszámmal, ún. szabadalaktó eljárással végeztünk félüzemi, többirányú kovácsolási kísérleteket szobahőmérsékleten (zárt szerszám), illetve 250°C -on (nyitott szerszám). A nyitott szerszámban történő kovácsolásokat követően, egy próbatest-szériát – azaz 1–1 db 1, 2, illetve 3 lépésben alakított próbatestet – hidegen hengereltünk laboratóriumi hengerállványon. A hengerlés előtt mindhárom próbatestből kimartunk egy-egy 8,7 mm vastagságú lemezt. Ezeket 10 lépésben, lépésenként 0,5 mm fogyással és 30 l/min sebességgel, 3,7 mm végvastagságú lemezzé hengereltük. Ez összességében 57,5%-os teljes redukciót jelentett.

A megnövelt méretű, különböző lépésszámmal kovácsolt – majd néhány esetben továbbhengerelt – próbatesteken számos mikroszerkezeti és mechanikai tulajdonságot vizsgáltunk. Ezek közül most a szakítóvizsgálatokat emelnénk ki. A 16. ábrán összegeztük a szakítóvizsgálatból meghatározott szilárdsági és alakíthatósági mérőszámok, a 0,2%-os maradó alakváltozáshoz tartozó egyezményes folyáshatár ($R_{p0,2}$), a szakítószilárdság (R_m) és a szakadási nyúlás (A) egyes anyagállapotokhoz tartozó értékeit.

16. ábra. A 0,2%-os maradó alakváltozáshoz tartozó egyezményes folyáshatár ($R_{p0,2}$), a szakítószilárdság (R_m) és a szakadási nyúlás (A) egyes anyagállapotokhoz tartozó értékei a nyitott szerszámban kovácsolt EN AW-7075-ös (a), és a zárt üregben alakított EN AW-6082-es (b) ötvözet esetében



Látható, hogy a 250°C-on végzett 3 lépéses, nyitott szerszámban történő többtengelyű kovácsolás hatására az EN AW-7075-ös ötvözet folyáshatára és szakítószilárdsága csak kis mértékben emelkedett. Ez azzal magyarázható, hogy a többirányú terhelési menetrend és a növelt hőmérséklet együttes hatására az alakítás során keletkező diszlokációk jelentős része feltehetően megszűnt. Az alakíthatóság ellenben javult, ugyanis a szakadási nyúlás 11%-ról 14%-ra növekedett. A kovácsolt darab továbbhengerlése (MF+CR) a tulajdonságváltozás jól ismert irányát mutatta: a szakítószilárdság 2,5-szeresére növekedett, míg a szakadási nyúlás felére csökkent a kovácsolt állapothoz viszonyítva.

Az EN AW-6082-es ötvözet esetében a zárt üregben történő többtengelyű kovácsolás már az első lépés után másfélszeres folyáshatár-növekedést eredményezett, így az $R_{p0,2}$ értéke meghaladta a 300 MPa-t. Azonban ez a szilárdságnövekedés több, mint 40%-os relatív csökkenést eredményezett az alakíthatóságban, ugyanis a szakadási nyúlás 15%-ra esett. A további alakítási lépések a folyáshatár és a szakítószilárdság hullámzó változását, de tendenciáját tekintve enyhe növekedését eredményezték. Emellett az alakíthatóság is javulást mutatott, így a 4. kovácsolási lépést követően a szakadási nyúlás már meghaladta a 17%-ot. A 4. alakítási lépés után a szakítószilárdság és a folyáshatár is elérte a maximumát, előbbi 355 MPa, míg utóbbi 330 MPa lett. Az 5. kovácsolási lépés hatására valamennyi mérőszám csökkenést mutatott, ami feltehetően a próbatesten belüli valamilyen mértékű anyagkárosodás bekövetkeztére utal. Összességében megállapítható, hogy a zárt szerszámban végzett többtengelyű kovácsolás nagyobb mértékben javítja a mechanikai tulajdonságokat, mint a szabadalakítást megvalósító változat.

A kutatómunka összefoglalása

Kutatásunk során részletesen megismertük kísérleti anyagaink, a különböző ipari alumíniumötvözetek viselkedését és tulajdonságait a többirányú, nagymértékű képlékeny deformációt megvalósító többtengelyű kovácsolási folyamat alatt. Egyértelmű kapcsolatokat sikerült kimutatnunk a makroszkopikus mechanikai (többirányú folyásgörbék, keménység eloszlások, szakítóvizsgálati mérőszámok) és a mikroszerkezeti jellemzők (szemcseméret, orientációs viszonyok) között az alakítási folyamat különböző fázisaiban. Ezen jellemzők együttes figyelembevételével pedig azonosítani tudtuk az ultra-finomszemcsés szerkezet kialakulásának kezdetét, illetve nyomon követtük a szemcsefinomodási folyamat előrehaladását, valamint az azt kísérő tulajdonságváltozásokat. A laboratóriumi kísérletek eredményei alapján meghatározott – az ultra-finomszemcsés szerkezet kialakulása szempontjából kedvező – technológia paramétereit felhasználva, sikerrel gyártottunk és alkalmaztunk egy félüzemi kovácsszerszámot. Végül ezzel a megoldással sikerült nagyobb méretű ultra-finomszemcsés alumíniumötvözeteket előállítani.

Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett csatlakozásainak kisciklusú fárasztása

Összefoglalás: A nyomottvízes reaktorok reaktortartálya az atomerőmű biztonságos üzemeltetése szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson (12–15 MPa) és nagy hőmérsékleten (250–325 °C) üzemel és magába foglalja a reaktor aktív zónáját. A tartály és a hozzá kapcsolódó nyomástartó berendezések szerkezeti integritásának biztosítása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt, mivel ezek épsége szavatolja azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, és nem veszélyezteteti az erőmű dolgozóit, a lakosságot és a környezetet. Emiatt a reaktortartálynak a reaktor normál üzemállapotaiból és a lehetséges üzemzavari állapotokból eredő valamennyi terhelést el kell tudnia viselni, sérülés nélkül. Annak ellenére, hogy léteznek elemzések, melyek a reaktortartály cseréjének műszaki megoldhatóságát igazolják, az élettartam-gazdálkodás szemszögéből nézve nem cserélhető berendezésnek tekintik. A fentiek szerint a reaktortartály az atomerőmű azon berendezése, amelyik az üzemeltetési élettartam kereteit kijelöli.

Az atomerőmű berendezései nagyszámú hegesztési varratot, illetve hegesztéssel készült korrózióvédő plattírozást tartalmaznak, ezért az alapfém tulajdonságainak megismerésén túl legalább ugyanilyen fontos az alapfém általában alakított szerkezetétől jelentősen különböző, öntött struktúrájú hegesztett kötések fáradási viselkedésének ismerete.

Az energiaiparban még a statikus üzeműnek tekintett szerkezetek igénybevétele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg közeg betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást. A szakirodalomban található legtöbb kutatás atomerőműi berendezések körében állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult. Ezekben a berendezésekben az indítások és leállások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt nem csak a belső nyo-

* *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: szaboattila@uniduna.hu

** *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: bereczkip@uniduna.hu

másból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-gradiensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős intenzitást érhetnek el, továbbá a szerkezeti anyag hőfizikai tulajdonságai is jelentősen változnak hőmérsékletváltozás hatására. Az irodalomból megismerhető állandó hőmérsékleten végzett kisciklusú fárasztóvizsgálat során ezeket a hatásokat figyelmen kívül hagyták. Kutatómunkánkban a valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusokkal párhuzamosan hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető, ezáltal a reaktortartály és hegesztett kötéseinek várható élettartama pontosabban közelíthető.

Kulcsszavak: Reaktortartály; hegesztési varrat; statikus üzem; fárasztóvizsgálat.

Abstract: The reactor vessel of Pressurized Water Reactors is a key equipment for the safe operation of a nuclear power plant. It operates at high pressure (12–15 MPa) and high temperature (250–325 °C) and includes the reactor core. Ensuring the structural integrity of the tank and associated pressure equipment and its welded joints is paramount throughout the life of the plant, as their integrity ensures that radioactive media do not escape uncontrolled outside the process and do not endanger plant workers, the public and the environment. Therefore, the reactor vessel must be able to withstand all loads resulting from the normal operating conditions of the reactor and possible malfunctions without damage. Although there are analyzes that demonstrate the technical feasibility of replacing the reactor vessel, it is considered a non-replaceable equipment from a management perspective. As mentioned above, the reactor vessel is the equipment of the nuclear power plant that designates the framework of the operating life.

The equipment of a nuclear power plant includes a large number of welds and corrosion protection cladding made by welding, so in addition to understanding the properties of the base metal, it is at least as important to know the fatigue behavior of welded joints with significantly different structure than the base metal. In the energy industry, even the use of structures considered to be static varies greatly during start-up and shut-down, heating and cooling, and feeding hot or cold media. These additional mechanical stresses are often much higher than the design operating stress and often cause short-cycle fatigue.

Most of the research in the literature has focused on fatigue at constant temperatures among nuclear power plant equipment. In these devices, not only stresses from internal pressure but also thermal stresses due to temperature gradients can reach significant intensities due to starts and stops and temperature fluctuations during operation, and the thermophysical properties of the structural material change significantly with temperature change. In a low-temperature fatigue test at constant temperature known from the literature, these effects were ignored. In our research, thermomechanical fatigue tests that better approximate real operating conditions make it possible to operate temperature cycles on the specimen in parallel

with the mechanical cycles, so the actual load of the equipment can be more accurately modeled, thus the life expectancy of the reactor vessel and welded joints can be approximated more accurately.

Keywords: Reactor vessel; welding seam; static plant; fatigue test.

Bevezető

A nyomottvizes reaktorok reaktortartálya az atomerőmű biztonságos üzemeltetése szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson (12–15 MPa) és nagy hőmérsékleten (250–325 °C) üzemel és magába foglalja a reaktor aktív zónáját. A tartály és a hozzá kapcsolódó nyomástartó berendezések szerkezeti integritásának biztosítása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt, mivel ezek épsége szavatolja azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, és nem veszélyezteti az erőmű dolgozóit, a lakosságot és a környezetet. Emiatt reaktortartálynak a reaktor normál üzemállapotaiból és a lehetséges üzemzavari állapotokból eredő valamennyi terhelést el kell tudnia viselni, sérülés nélkül. Annak ellenére, hogy léteznek elemzések, melyek a reaktortartály cseréjének műszaki megoldhatóságát igazolják, az élettartam-gazdálkodás szemszögéből nézve nem cserélhető berendezésnek tekintik. A fentiek szerint a reaktortartály az atomerőmű azon berendezése, amelyik az üzemeltetési élettartam kereteit kijelöli.

A REAKTORTARTÁLY FELÉPÍTÉSE

A paksi atomerőmű négy, könnyűvíz hűtésű, könnyűvíz-moderálású, nyomottvizes reaktorblokkból áll. A reaktortartályok típusa VVER-440/V-213Cs/1. A tartályokat a Škoda Gépgyár gyártotta, Plzenben, az egykori Csehszlovákiában. A reaktortartály egy álló hengeres nyomástartó edény, elliptikus fenékkal és karimás kötéssel csatlakozó fedéllel. A tartály hét részből áll: perem, két csonkzóna gyűrű (felső és alsó), két zóna körüli gyűrű (felső és alsó), támasztógyűrű és elliptikus fenék. E részeket hat körvarrattal hegesztették egymáshoz, fedettívű hegesztési eljárással. A tartály hosszmetSZete az 1. ábrán látható. Valamennyi gyűrű Cr-Mo-V ötvöZésű, ferrites szerkezetű (térben középpontos szabályos rácsú) acélból készült, amelyet kovácsolást követően a kiválasztott keményedés állapotára hőkezelnek. Ez az anyagszerkezeti állapot a tartós mechanikai és hőigénybevétel szempontjából stabil. Ugyanilyen acélból készült lemezt használtak fel az elliptikus fenék sajtolásához. A reaktortartályok belső falát titánnal stabilizált króm-nikkel ötvöZésű korrózióálló plattírozással látták el. A csonkzóna gyűrűin hat meleg- és hat hidegági csonk található, ezekhez csatlakoznak átmeneti hegesztési varrattal az 500 mm átmérőjű, 70 mm falvastagságú csonktoldatok,

[2] Fekete B. (2016): *VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása*. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.

1. táblázat. A reaktortartály tervezési adatai [3]

Termikus teljesítmény (MWt)	1375
Villamos teljesítmény (MWe)	440
Hurkok száma	6
Fűtőelemek száma	312 (hexagonális)
Szabályozórúdák száma	37
Külső átmérő (mm)	3840
Falvastagság (mm)	140
Plattírozás vastagsága (mm)	9
Zóna átmérője (mm)	3010
Zóna aktív hossza (mm)	2420
Üzemanyag tömege (t)	44
Hűtőközegáram (m ³ /h)	45000
Kilépő hőmérséklet (°C)	297
Kilépő/belépő hőmérséklet különbsége (°C)	30
Üzemi nyomás (MPa)	12,26
Tervezési nyomás (MPa)	13,7
Próbanyomás (MPa)	19,12
Gyorsneutron-fluxus (n/cm ² s)	1,5x10 ¹¹ (E>0,5 MeV)
Tervezett üzemidő (év)	40
EOL fluencia (n/cm ²)	2,6x10 ²⁰ (E>0,5 MeV)

A KISCIKLUSÚ FÁRADÁS

A legtöbb gépészeti szerkezetünket úgy méretezzük, hogy annak anyagában a folyáshatár biztonsági tényezővel csökkentett értékénél nagyobb igénybevétel ne jöhessen létre. Ennek ellenére elkerülhetetlen olyan lokális feszültséggyűjtő helyek kialakulása, melyekben az előre nem ismert járulékos terhelések hatására bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás lép fel. Ilyen helyek lehetnek például a hirtelen létrejött keresztmetszet-változások, hegesztési varratok környezete, furatok, vagy a berendezés olyan részei, melyben bizonyos időtartamra olyan inhomogén hőmérsékletmező alakul ki, amely jelentős feszültséget okoz a szerkezet anyagában, és amellyel a méretezésnél nem számoltunk. Ha a kritikus helyeken a képlékeny alakváltozás csak egyszer jön létre, akkor annak mértékétől függően a feszültségmező átrendeződésével és a kritikus hely környezetében lévő nagyfeszültség-gradiens leépülésével az anyag teherbíró képessége növekedhet a képlékeny keményedés által [4]. Ha ezek a méretezés során elhanyagolt folyáshatár feletti igénybevételek többször megismétlődnek, az anyag mikroszerkezete az ismétlődő képlékeny alakváltozás hatására megváltozik, benne repedések keletkezhetnek. Ez a folyamat végül a szerkezeti integritás megszűnéséhez, azaz repedés terjedéshez, majd töréshez vezet. A fent leírt jelenséget nevezi a szakirodalom kisciklusú fáradásnak. [2]

[3] Trampus, P. A. (2013): Reaktortartály üzemi kérdései. In: Csom Gyula (Szerk.): *Atomerőművek üzemtana II.4: Az energetikai atomreaktorok üzemtana*. Budapest: Pauker Holding.

[4] Lee, Y. L.–Pan, J.–Hathaway, R.–Barkey, M. (2005): *Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice*. Elsevier Butterworth–Heinemann. USA, MA.

[4] Lee, Y. L.–Pan, J.–Hathaway, R.–Barkey, M. (2005): *Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice. Elsevier Butterworth–Heinemann.* USA, MA.

[5] Coffin, L. F. (1974): *Fatigue at high temperature – Prediction and interpretation. Proc. Instn. Mech. Engrs.* 188. 9/74.

[6] Murakami, Y.–Miller, K. J. (2005): What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. *International Journal of Fatigue.* Vol. 27. P. 991.

[7] Maurel, V.–Rémy, L.–Dahmen, F.–Haddar, N. (2009): An engineering model for low cycle fatigue life based on a partition of energy and micro-crack growth. *International Journal of Fatigue.* Vol. 31. P. 952.

[8] Nagy Gy. (1999): *Anyagok károsodása és vizsgálata különböző üzemi körülmények között. Kisciklusú fárasztás.* Miskolci Egyetem, TEM-PUS S_JEP_11271 projekt támogatásával készült jegyzet, Miskolc.

Fontos megemlíteni, hogy a kisciklusú és a nagyciklusú fáradás tönkremeneteli ciklusszáma között általánosan nem húzódik éles határvonal és a kétféle károsodási mód valódi fizikai tartalmát nem az elnevezésükben kell keresni. Míg a nagyciklusú fáradás főként arányossági határon belüli feszültség szinten jelentkezik, addig kisciklusú fáradásról csak akkor beszélhetünk, ha az anyagban – ciklusonként – jelentős mértékű képlékeny alakváltozás is fellép. Coffin bevezette az átmeneti kifáradási élettartam fogalmát [5]. Ez alatt az adott anyagminőség fárasztóvizsgálata során mért ciklusszámot érti, amely egyenlő mértékű rugalmas és képlékeny alakváltozás mellett okoz tönkremenetelt. A kisciklusú fáradás során keletkező jelentős képlékeny alakváltozások miatt, már a kifáradás korai szakaszában – feszültség szinttől függően akár az első pár ciklusban – keletkeznek mikrorepedések, így a kisciklusú fáradás során a repedés terjedés a meghatározó károsodási folyamat. [6], [7]

Az energiaiparban még a statikus üzeműnek tekintett szerkezetek igénybevétele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg közeg betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást.

Az energetikai berendezéseknél a kisciklusú fáradás előfordulása az alábbiak szerint összegezhető [8]:

- Indításkor, leálláskor fellépő nyomás- és hőmérsékletváltozások okozta igénybevétel.
- Hideg vagy meleg közeg gyors betáplálása okozta hőfeszültség.
- Rezgésből származó feszültségek.

Kapcsolódó alkatrészek különböző hőtágulási együtthatói okozta hőfeszültségek (pl. plattírozott nyomástartó edények, armatúrák).

A kisciklusú fáradás során a feszültség és az alakváltozás közötti kapcsolat erősen nemlineáris, nagy alakváltozások jönnek létre, ezért a feszültség állandóértéken-tartása sok körülményt és bonyolult vizsgálattechnikát igényelne. Emiatt a kisciklusú fáradás vizsgálatát állandó alakváltozás-amplitúdó mellett végzik, mely során az egyes ciklusokban, a feszültség értéke változik – növekszik vagy csökken –, annak megfelelően, hogy a vizsgálati anyag keményedik vagy lágyul az ismételt igénybevétel hatására [4]. További fontos vizsgálattechnikai kérdés a hőmérséklet és a mechanikai terhelések kapcsolata.

A szakirodalomban található legtöbb kutatás az atomerőműi berendezések körében állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult.

Ezekben a berendezésekben az indítások és leállítások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt, nem csak a belső nyomásból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-tranziensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős intenzitást érhetnek el, továbbá a szerkezeti anyag hőfizikai tulajdonságai is jelentősen változnak hőmérsékletváltozás hatására. Az állandó hőmérsékleten végzett kisciklusú fárasztóvizsgálat során ezeket a hatásokat figyelmen kívül hagyjuk.

A valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusokkal párhuzamosan hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető. Ez történhet olyan ütemben, hogy a hőterhelés és a mechanikai terhelés „fázisban” van (IP – In Phase Test), vagy a hőmérséklet- és a nyúlás-amplitúdó a ciklus során ellentétes előjelű (OP – Out of Phase Test). [9] A fenti három vizsgálati módra a továbbiakban alkalmazzuk az alábbi terminológiákat:

- Izotermikus fárasztóvizsgálat (IZOT).
- Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat (Szinkron TMF).
- Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat (Aszinkron TMF).

A kisciklusú fárasztóvizsgálatokhoz merev, nagy rugóállandójú berendezéseket használnak, amelyen a keresztfej elmozdulása megfordítható, és a húzó-nyomó igénybevételhez szükséges alternáló mozgás a próbatest hossz- illetve keresztirányú mérete szerint vezérelhető. Általában elektronikus vagy elektrohidraulikus mozgató berendezést alkalmaznak, mellyel a vezérlés könnyen megvalósítható. A nyúlást mérhetjük hossz- és keresztirányú extenzométerek alkalmazásával. [4] Termomechanikus fárasztás során és növelt hőmérsékleten történő mérésekhez optikai elven működő érzékelőket, vagy megfelelő hőálló anyagú tapintóval ellátott elmozdulás-mérőket használnak.

A próbatest előírt hőmérsékletre történő felfűtését konvektív úton klímakamrában [10], [11] indukciós tekercsekkel [9], [12], vagy ellen-

[9] Ramesh, M.–Hans J. L.–Diener, M.–Spolenak, R. (2011): Conducting thermomechanical fatigue test in air at light water reactor relevant temperature intervals. *Journal of Nuclear Materials*. 415. Pp. 23–30.

[10] Colombo, F.–Mazza, E.–Holdsworth, S. R.–Skelton, R. P. (2008): Thermo-mechanical fatigue tests on uniaxial and component-like 1CrMoV rotor steel specimens. *International Journal of Fatigue*. 30. Pp. 241–248.

[11] Kerezsi, B. B.–Kotousov, A. G.–Price J. W. H. (2000): Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 77. P. 425.

[12] Shankar, V.–Bauer, V.–Sandhya R.–Mathew M. D.–Christ, H. J. (2012): Low cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue behavior of modified 9Cr–1Mo ferritic steel at elevated temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 420. Pp. 23–30.

[11] Kerezsi, B. B.–Kotousov, A. G.–Price J. W. H. (2000): Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 77. P. 425.

[13] Petersen, C.–Rodrian, D. (2008): Thermo-mechanical fatigue behavior of reduced activation ferrite/martensite stainless steels. *International Journal of Fatigue*. 30. P. 339.

[14] Constantinescu, A.–Charkaluk, E.–Lederer, G.–Verger, L. (2004): A computational approach to thermomechanical fatigue. *International Journal of Fatigue*. 26. Pp. 805–818.

[15] Haddar, N.–Köster, A.–Kchaou, Y.–Remy, L. (2012): Thermal–mechanical and isothermal fatigue of 304L stainless steel under middle range temperatures. *C. R. Mecanique*. 340. Pp. 444–452.

[16] Kudo, Y.–Kikuchi, K.–Saito, M. (2002): Thermal fatigue crack propagation behaviour of F82H ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*. 307. P. 471.

állás fűtéssel (Joule-hővel) [13], [14], [15] végzik. A hőmérsékleti ciklusok maximális elérhető frekvenciája az előbbi felsorolás szerint növekszik. A hűtés a befogópofákon keresztül vízhűtéssel, a próbatestre szórt vízpermettel, valamint a próbatestre fűjt sűrített levegővel lehetséges [11], [16].

A tönkremeneteli kritérium meghatározásában nem egységes a szakirodalom. A legelterjedtebb és mérnöki szempontból a legmegalapozottabb, amikor a terjedőképes repedés megjelenését tekintik a tönkremenetelnek. Mivel ennek vizsgálattechnikai megvalósítása bonyolult, ezért több kritérium létezik [16], [MSZ 4363: 1992]:

- a próbatest kettéválása,
- a hiszterézis-görbe nyomó periódusában inflexiós pont megjelenése (két repedt próbatestrész felfekvése),
- a stabil szakasz maximális feszültségéhez viszonyított csökkenés,
- az előző ciklushoz képest meghatározott mértékű feszültségese.

A kisciklusú fárasztóvizsgálatok alapvető célja, a külső igénybevételek (mechanikai- és hőterhelések, környezeti hatások) és az adott berendezés szerkezeti anyagának válasza (élettartama) közötti összefüggések meghatározása laboratóriumi körülmények között. A vizsgálatok értékelése, azaz a károsodásra vonatkozó kritériumok a használt alap paraméter szempontjából két fő csoportba oszthatók:

- Alakváltozás vagy feszültség-alapú modellek.
- Képlékeny alakváltozási energia-alapú modellek.

A károsodást jelző paramétert vizsgálva megállapítható, hogy az első csoport tenzor, míg a második skaláris mennyiség. Mivel az anyag károsodását kisciklusú fáradás során a folyáshatár értékét jelentősen meghaladó igénybevétel ciklikus változása okozza, ezért a fárasztóvizsgálatok adatainak értékelését a leggyakrabban képlékenyalakváltozás-amplitúdón alapuló mérnöki modellekkel végzik.

Az alakváltozás vagy feszültség-amplitúdóra épülő modellek tekinthetők a klasszikus módszereknek. Ezek általános egyenlete:

$$\Phi(\varepsilon_a, \varepsilon_{a,p}, \sigma_a) = f(N_f, \sigma_f, \varepsilon_f, \kappa, \vartheta, \dots), \quad (1)$$

melyben a baloldalon a terhelési paraméterek szerepelnek, az egyenlet jobb oldalán a tönkremeneteli ciklusszám, és σ_f , ε_f , κ és ϑ anyagi állandók (illesztési paraméterek). A Coffin–Manson-egyenlet még ma is a legismertebb összefüggés annak ellenére, hogy 1954-ben publikálták. Lineáris kapcsolatot ad a képlékenyalakváltozás-amplitúdó és a tönkremeneteli ciklusszám között logaritmikus koordináta-rendszerben:

$$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon_f' \cdot N_f^{\vartheta}, \quad (2)$$

ahol ε_f és ϑ a modell illesztési paraméterei.

Az összefüggés jó közelítést eredményez bemetszés nélküli, hengeres próbatestek állandó amplitúdójú és frekvenciájú terhelésénél. A növelt hőmérsékleten bekövetkező kúszás, oxidáció és korrózió okozta károsodás hatásának figyelembevételéhez a frekvenciát figyelembe vevő tényezővel módosították a Coffin–Manson-modellt.

A teljes alakváltozás és a tönkremeneteli ciklusszám kapcsolatára Morrow javasolt összefüggést, melyet a szakirodalom teljes alakváltozás–élettartam egyenletnek nevez. Ez összegzetten ír le két különálló görbét, a rugalmas alakváltozás amplitúdó-ciklusszám, valamint a képlékeny alakváltozás amplitúdó-ciklusszám-kapcsolatát. Az egyenlet első tagja a Basquin-összefüggés, a második a korábban ismertetett Coffin–Manson-egyenlet.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a fázastótvizsgálat során a közép feszültség (σ_m) értéke jelentős hatással van a kifáradási élettartamra, ezért ennek a tényezőnek a figyelembevételére számos összefüggés született. A közép feszültség-korrektív modellek leggyakrabban alkalmazott összefüggése Morrow egyenlete, mely a közép feszültség élettartamra gyakorolt hatását az alakváltozás–élettartam összefüggés rugalmas tagjának módosításával vette figyelembe. A formulát széles körben alkalmazták és validálták acélok kis képlékenyalakváltozás-amplitúdón végzett fázastótvizsgálatára. Smith, Watson és Topper a $\sigma_a \varepsilon_a$ paramétert javasolták a cikluson belüli fáradás mértékének meghatározására, melyben σ_a a ciklus feszültség amplitúdója, ε_a a teljes alakváltozás amplitúdó (a szerzők neveiből: SWT-modell). Az SWT-modellt sikeresen alkalmazták öntöttvasak, mikroötvözt acélok és ötvözt acélok kisciklusú fáradásának leírására. Fontos megemlíteni, hogy a legtöbb korszerű végelemez-szoftver fáradási modulja tartalmazza ezt a modellt. A klasszikus fáradási modelleket az alábbi táblázatban foglaltuk össze. [2]

[2] Fekete B. (2016): *VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása*. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.

[17] Lagoda, T. (2001): Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I.: The model elaboration. *International Journal of Fatigue*. 23. Pp. 467–480.

[18] Korsunsky, M. A.–Dini, D.–Dunne, P. E. F.–Walsh, J. M. (2007): Comparative assessment of dissipated energy and other fatigue criteria. *International Journal of Fatigue*. 29. Pp. 1990–1995.

2. táblázat. klasszikus fáradási modellek

Modell	Φ	f	Hivatkozás
Coffin-Manson	$\varepsilon'_{a,p}$	$\varepsilon'_{f,p} \cdot N_f^{\beta_f}$	[Coffin, 1954]
Módosított Coffin-Manson	$\varepsilon'_{a,p}$	$\varepsilon'_{f,p} \cdot (N_f \nu^k)^{\beta_f}$	[Coffin, 1974]
Teljes alakváltozás	ε_a	$\frac{\sigma'_f}{E} (N_f)^{\kappa} + \varepsilon'_{f,p} (N_f)^{\beta_f}$	[Morrow, 1965]
Morrow	σ_m, ε_a	$\frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (N_f)^{\kappa} + \varepsilon'_{f,p} (N_f)^{\beta_f}$	[Morrow, 1968]
SWT	σ_a, ε_a	$\frac{(\sigma'_f)^2}{E} (N_f)^{2\beta_f} + \sigma'_f \varepsilon'_{f,p} (N_f)^{\beta_f + \kappa}$	[Smith et al., 1970]

Az előzőekben ismertetett klasszikus modellekhez képest a képlékeny alakváltozási energiára épülő összefüggéseknek több előnyük van. Az egyik ilyen előny, hogy a vezérelt változótól (alakváltozásra vagy feszültségre vezérelt vizsgálat) független a mérés eredménye, a másik, hogy a meghatározott mérőszám fizikailag megalapozottabb, mint a korábban bemutatottak. Skáláris jellegéből adódóan az energiaalapú kritériumok a számítások során a valós szerkezetre könnyebben átvihetők, és alkalmazásukkal a halmozódó károsodás számítása is egyszerűbb. [17] Felhasználásuknak hosszú ideig határt szabott, hogy a gépészeti berendezések kritikus helyein nehéz volt meghatározni a szerkezettel közölt képlékeny alakváltozási munka mennyiségét. A numerikus módszerek és a számítástechnika fejlődésével az energiaalapú méretezés e korlátja megszűnt. [18]

Az energia típusú modellek alapfeltevése, hogy a ciklusonként közölt és összegzett képlékeny alakváltozási munka arányos a károsodási folyamat által felemésztett munkával. Az energiaalapú modellek leggyakrabban alkalmazott formája szerint a tönkremeneteli kritériumnak megfelelő összegzett alakváltozási energia (W_f), valamint a ciklusszám között (N_f) az alábbi összefüggés áll fenn:

$$W_f = C \cdot N_f^{\gamma_f}, \quad (3)$$

ahol C és γ_f anyagi konstansok. Az alábbi táblázatban a fenti modell illesztési paramétereire mutatok példákat acélokon végzett fárasztóvizsgálatok mérési adataira vonatkozóan.

3. táblázat. Az energiaalapú (3) modell szakirodalomban megtalálható paraméterei

Anyagminőség	Vizsgálati Hőmérséklet [°C]	Fáradási szívósság együttható, C [mJ/mm³]	Fáradási szívósság kitevő, γ_f [-]	Referencia
gyengén ötvözött acél, A516Gr70	20	603	0.389	[Lefebvre and Ellyin, 1984]
betonacél, BS 460B	20	226	0.414	[Abdalla et al., 2009]
betonacél, BS B500B	20	205	0.449	[Abdalla et al., 2009]
2.25Cr-1Mo	540	391	0.312	[Callaghan et al., 2010]
2.25Cr-1Mo (miniatűr próbatest)	540	242	0.298	[Callaghan et al., 2011]
gyengén ötvözött acél	20	612	0.344	[Luo et al., 2012]

[2] Fekete B. (2016):
VVER-440 reaktor
szerkezeti anyagok
kisciklusú termo-
mechanikai fáradása.
Doktori Értekezés,
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem, Műszaki
Mechanika Tanszék.

Az (3) egyenlettel megegyező szerkezetű összefüggéssel írható le a ciklusonként közölt alakváltozási energia (W^{stab}), valamint a ciklusszám kapcsolata:

$$W^{stab} = B \cdot N_f^{\beta_f}, \quad (4)$$

ahol B és β_f a modell illesztési paraméterei.

A fenti klasszikusnak tekinthető energiaalapú modellek számos módosított változatát publikálták a közép feszültség, a hőmérséklet és a próbatestek méretének figyelembevételére. Lee és munkatársai a tönkremenetelig szükséges alakváltozási energia törési munkával dimenziómentessé tett mennyiségét javasolta a károsodási paraméternek a hőmérséklet hatásának figyelembevételére. A modell alapgon-dolata a törési munka hőmérsékletfüggésének kihasználása volt. Az összefüggést ausztenites szövetszerkezetű korrózióálló acélok emelt hőmérsékletű fárasztóviz-s-gálatainak eredményei alapján validálták. Gocmez és munkatársai belsőégésű mo-torokban alkalmazott öntöttvasak termomechanikus kisciklusú fáradási viselke-désének leírására módosították a (3) szerinti modellt, melynek alap-paramétere a ciklusonként elnyelt alakváltozási energia. A model további korrekciós tényezőket tartalmaz a közép feszültségnek és a hőmérséklet hatásának figyelembevételére. [2]

Az energiaalapú kritériumok tárgyalásánál fontos megemlíteni, hogy kisciklu-sú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka csak egy része okozza az anyag mikroszerkezetének megváltozását (károsodását), a munka másik része a fá-rasztás során hővé alakul és átadódik a környezetnek. Kutatások bizonyítják, hogy a hőfejlődés mértéke erősen függ az alakváltozás körülményeitől (alakváltozás mérté-ke és sebessége) és az anyag mikroszerkezetétől.

[2] Fekete B. (2016):
*VVER-440 reaktor
szerkezeti anyagok
kisciklusú termo-
mechanikai fátása.*
Doktori Értekezés,
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem, Műszaki
Mechanika Tanszék.

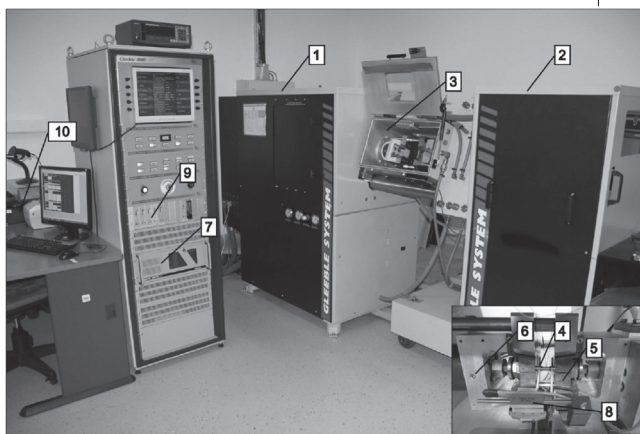
[19] Bereczki,
P.–Szombathelyi V.–
Kralics, Gy. (2014):
Determination of
flow curve at large
cyclic plastic strain by
multiaxial forging on
MaxStrain System. *In-
ternational Journal of
Mechanical Sciences.*
84. P. 182.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a kisciklusú fátási folyamat energetikai értékelése során a vizsgálattechnikai körülmények a modellekben nem kezelt hőenergián keresztül igen nagy bizonytalanságot jelentenek, és kérdéses, hogy az így adódó mérőszámok a valós szerkezet viselkedését mennyire modellezik megfelelően. [2]

A kísérleti környezet

A méréseket egy Gleeble 3800 típusú fizikai szimulátoron hajtottuk végre, amely a 2. ábrán látható. A berendezés egy többfunkciós szimulátor, amely különböző fémtechnológiai és fémteni folyamatok fizikai szimulációjára, fémes szerkezeti anyagok termomechanikus kezeléseire és anyagvizsgálatára egyaránt alkalmas. [19] Fontos hangsúlyozni, hogy a szimulátor nem célberendezés, tehát minden kísérletet egyedileg kell műszerezni, installálni és hozzá mérési programot írni.

2. ábra. A Gleeble 3800 termomechanikus fizikai szimulátor a fátástólvizsgálatokhoz alkalmazott átalakító egységgel



A berendezés két jól elhatárolható része a termikus és a mechanikai rendszer, amelyeket a főegység (1) és az ahhoz csatlakoztatott, az aktuális vizsgálathoz használható Mobil Átalakító Egység (2) együttese alkotja. A fémtani folyamatok fizikai szimulációja a vizsgálókamrában (3) valósul meg, ahol a próbatesteket (4) a megfelelően választott befogópofák (5) közé helyezve végrehajtható a felhasználó által előírt termikus és mechanikai terhelési program. A termikus és a mechanikai rendszer az alábbiak szerint működik.

A kísérleti anyag

A kutatómunkánkhoz felhasznált hegesztési varratot a 3. ábra szemlélteti. A darabot a reaktortartály gyártóművében, a plzeni Škoda Energetikai Gépgyárban készítették a paksi reaktortartályok gyártásával egyidőben.

3. ábra. Kutatómunkához felhasznált próbatestek alapanyaga



Az ábrán látható alapanyag 140 mm vastag Cr-Mo-V ötvöztű, ferrites szerkezetű acél, amelyet kovácsolást követően a kiválósos keményedés állapotára hőkezelték. Ez az anyagszerkezeti állapot a tartós mechanikai és hőigénybevétel szempontjából stabil. A nyíllal jelölt oldalát titánnal stabilizált króm-nikkel ötvöztű korrózióálló plattírozással látták el.

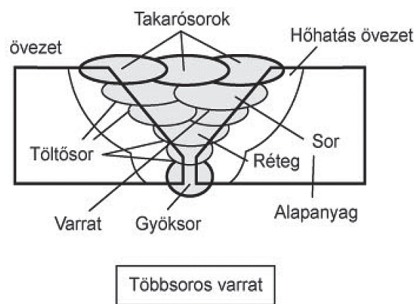
A mintadarab jellegzetessége, hogy középen teljes keresztmetszetében hegesztési varrat húzódik, melynek vizsgálata jelen kutatómunkánk célkitűzése. A próbatestek elkészítését megelőzően elvégezzük a mintadarab hegesztési varratának makro-metallográfiai vizsgálatát.

Az alábbi (4. ábrán) a metallográfiai maratás eredményét láthatjuk. Az ábrán kirajzolódik a többrétegű, fedőhegesztéssel lezárt varrat szerkezete, valamint a hőhatásövezete, ahogy azt az 5. ábrán látható tankönyvi példa is illusztrálja.

4. ábra. A hegesztett kötésről készített makro-metallográfiai felvétel

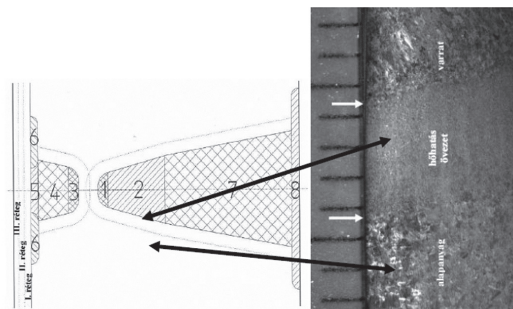


5. ábra. Többsoros varrat felépítése



A hegesztett kötés sematikus ábráját láthatjuk a 6. ábrán.

6. ábra. A reaktortartály hegesztési varratának sematikus ábrája



A szerkezeti integritásvizsgálatokhoz szükséges próbatest-darabszám meghatározásához elengedhetetlen a varrat szövetszerkezeti homogenitásának ismeretén felül a varrat összetételének homogenitása is. Annak érdekében, hogy meghatározzuk az ötvözőtartalom-eloszlást a varrat keresztmetszete mentén, a 6. ábrán számokkal jelölt helyeken összetételvizsgálat céljából mintavételezést végeztünk.

Az összetételvizsgálatot ICP–OES vizsgálóberendezéssel végeztük el. A vizsgálathoz mintaként 5g forgácsot használtunk fel, amiket csigafúróval, a varrat felületére merőleges, 12–15mm mély fúrással nyertünk ki az alapanyagból. A mintavételek módját és helyét láthatjuk az 7. ábrán.

7. ábra. ICP-OES összetételvizsgálathoz végzett mintavételek pozíciója



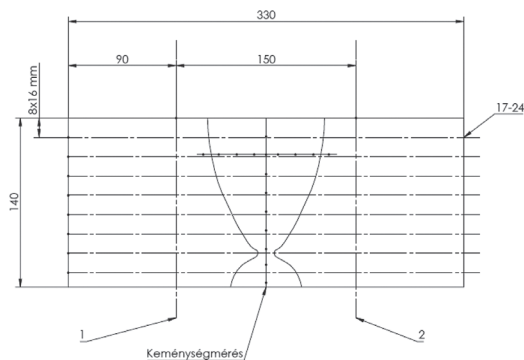
A mérési eredmények ismeretében kijelenthetjük, hogy a hegesztési varrat az első töltősor kivételével teljes keresztmetszetében egyenletes összetételeloszlást mutat.

A próbatestek gyártása

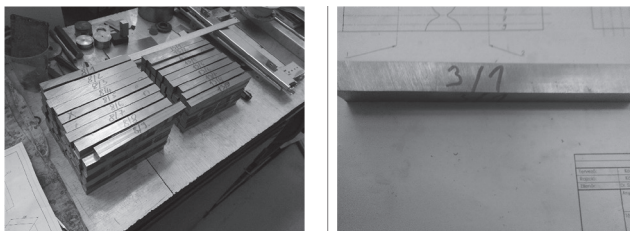
A próbatestek befoglaló méreteinek, illetve a hegesztett tömb méreteinek ismeretében meghatároztuk a hegesztési varrat darabolási tervét, amit a 8. ábra szemléltet. Az elkészült darabolási terv (8. ábra) illetve a varrat szövetképének (4. ábra) ismeretében megtörtént a varratot tartalmazó tömb darabolása és a próbatest-előgyártmányok elkészítése.

Az elkészült próbatest-előgyártmányokat a 9. ábra szemlélteti.

8. ábra. Darabolási terv



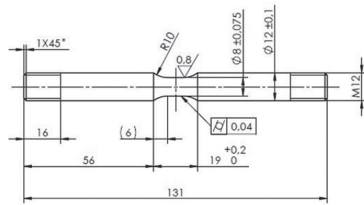
9. ábra. Az esztergáláshoz előkészített előgyártmányok



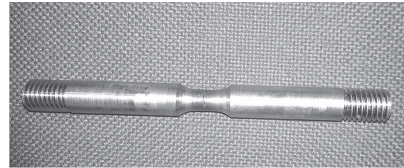
A kísérletekhez mintegy 80 db próbatest-előgyártmányt készítettünk elő úgy, hogy azok pontos helyét egy (X,Y) koordinátával megjelöltük, ezáltal a varratban elfoglalt helyük pontosan beazonosíthatóvá vált.

A darabolás első fázisában egy, a varratkeresztmetszettel párhuzamos szelet levágása történt, amelyen ismételt metallográfiai vizsgálatot végeztünk. Ennek célja a varratkontúr, illetve a hőhatás-övezet láthatóvá tétele, valamint a keménységmérés elvégzésének megkönnyítése (lásd: 10. ábra).

10. ábra. Az esztergált próbatest



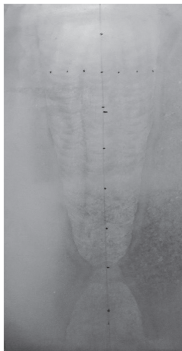
(a)



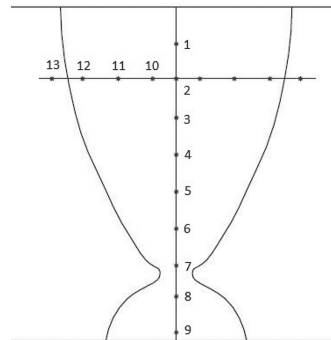
(b)

Az előkészített varratszelvényen, a varrat keménységeloszlásának feltérképezése érdekében a 11. ábrán jelölt helyeken keménységmérést végeztünk, elkészítve ezzel a varrat keménységtérképét. A kísérlethez Vickers-eljárást alkalmaztunk, 10 kp terhelőerő alkalmazása mellett.

11. ábra. A keménységmérés mérési pontjai

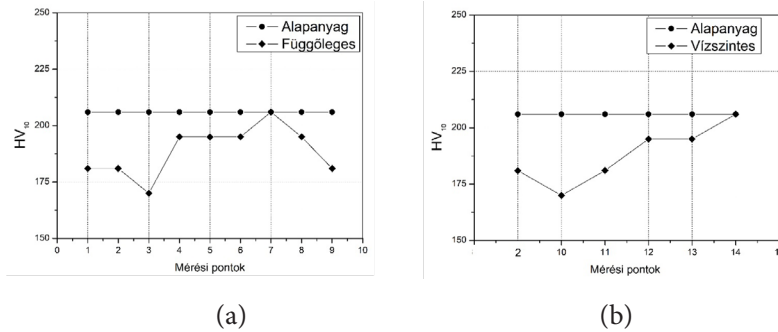


(a)



(b)

12. ábra. A keménységmérés eredményei

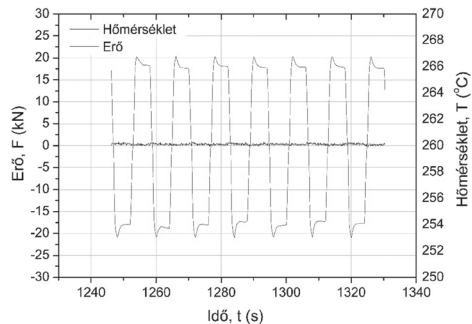


A mérési eredményeket a 12. ábra tartalmazza. A mért értékekből látható, hogy a keménységeloszlás egyenletes, annak ingadozása hibahatáron belül van. A varrat lágy állapotú, annak keménysége közel azonos az alapanyag keménységével.

Izotermikus és termomechanikus fárasztókísérletek végrehajtása, mérési eredmények

IZOTERMIKUS FÁRASZTÓVIZSGÁLATOK

13. ábra. Példa a fárasztóvizsgálatok során rögzített adatokra. (15H2MFA, IZOT)



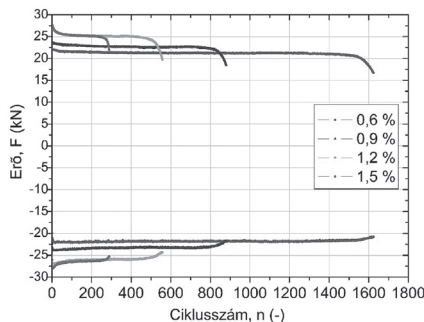
Az izotermikus és termomechanikus fárasztóvizsgálatokat négy különböző terhelési szinten, három ismétléssel hajtottuk végre a kísérleti anyagokon, amely összesen 48 mintát eredményezett. Az alakváltozás, az erő- és a hőmérséklet-adatokat 100 Hz-cel mintavételeztük. A 13. ábra a regisztrált adatokra mutat példát 0,6% teljes alakváltozás-terhelésre vonatkozóan.

A bemutatott adatok a fárasztóvizsgálatok ciklikus mechanikai viselkedés szempontjából stabil szakaszból származnak. A mérési adatokat elemezve megállapítható volt, hogy a fizikai mennyiségek előírt időfüggvénye és a mért értékek igen jó egyezést mutattak az összes beállításra vonatkozóan.

Kísérleti anyagok ciklikus mechanikai viselkedése

Az anyag ciklikus mechanikai viselkedése az alakváltozás vezérelt kisciklusú fárasztóvizsgálatok egyik fontos tényezője. A vizsgálatok kezdeti szakaszán tapasztalható lágyulás vagy keményedés, valamint ezek intenzitásának függése a különböző paraméterektől (alakváltozás-amplitúdó; alakváltozási sebesség) határozzák meg, hogy a fárasztóvizsgálat stabil szakaszába lépve milyen feszültség-szinten megy végbe a vizsgálat. A feszültségek szélsőértékeit ábrázoltuk a halmozódó károsodás függvényében a 14. ábrán.

14. ábra. A ciklusonként regisztrált feszültségek szélsőértékei 15H2MFA IZOT



A 15H2MFA anyag ciklikus mechanikai viselkedése a hasonló szilárdságú térben középpontos, szabályos rácsú acélokéval megegyező jelleget mutat. A vizsgálatok kezdeti szakaszán intenzív ciklikus lágyulást matatott, majd a további terhelés hatására a stabil ciklusok alatt másodlagos lágyulási szakasz következett, amely egészen a makroszkopikus méretű repedés megjelenéséig tartott. A repedés megjelenése és terjedése a 14. ábra feszültség-diagramjaiban látható határozott csökkenés kezdőpontjához köthető.

Mérések értékelése Coffin–Manson szerint

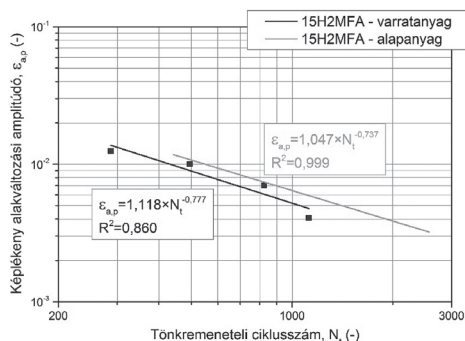
A kísérleti adatok Coffin–Manson-moddal történő értékeléséhez terhelési szintenként meghatároztuk a képlékenyalakváltozás-amplitúdó értékét majd regressziószámítással felvettük az egyes fásztási munkarendekhez tartozó görbéket.

Ehhez valamennyi terhelési szinten minden próbatest esetében kiválasztottuk az átlagos törési ciklusszám feléhez tartozó fásztási ciklus valódi feszültség–valódi alakváltozás hiszterézis görbét. A rugalmas szakasz illesztését követően meghatároztuk a képlékenyalakváltozási-amplitúdó mértékét a húzó, illetve a nyomó periódusra is. Adott terhelési szinten az összes így meghatározott ϵ_p érték átlagát tekintettük a mértékadó képlékenyalakváltozási-amplitúdónak.

A korábbi szakirodalmi áttekintésben leírtak szerint az energetikai berendezések nagy igénybevételi szintje és az üzemállapotok közötti nagy eltérések komplikálttá tehetik a halmazódó károsodás alakváltozási amplitúdó alapján történő számítását. A különböző energetikai modellek szerinti klasszikus kiértékeléshez meg kellett határozni a ciklusonként közölt, valamint a tönkremenetelig összegzett alakváltozási energiát az összes próbatest mérési adatai alapján. A ciklusonkénti energiát (W^{stab}) a fenti ábrákon látható valódi alakváltozás–valódi feszültség adatvektorokból (hiszterézis hurkok) numerikus integrálással határoztuk meg. Ebből az összegzett alakváltozási energiát úgy kaptuk meg, hogy az aktuális alakváltozási amplitúdóhoz tartozó W^{stab} értéket összeszoroztuk a vonatkozó átlagos törési ciklusszámmal. Az egyes alakváltozási amplitúdókhoz így kapott energiaértékeket szintén a fenti ábrákon láthatjuk.

Az izotermikus fásztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási-amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartály anyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-moddal szerint. Ehhez a modell hatványfüggvénnyel leírt összefüggését linearizáltuk, majd a képlékenyalakváltozási-amplitúdó–törési ciklusszám ilyen módon átszámított értékpárjaira regressziószámítással egyenest illesztettünk. Az illesztéssel kapott A és B együtthatókat visszahelyettesítve a Coffin–Manson-moddal eredeti összefüggésébe, a 15. ábrán, logaritmusos skálán láthatjuk a varratanyag, illetve egy előző kutatásból származó eredmények alapján az alapanyag kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbéket.

15. ábra. A képlékenyalakváltozási-amplitúdó a tönkremeneteli ciklusszám függvényében az alapanyagra és a hegesztési varratra vonatkoztatva



A 15. ábrán látható, hogy a varratanyag érzékenyebb az izotermikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója kisebb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak nagyobb a szórása. Az 4. táblázatban összegeztük a Coffin–Manson-modell szerinti anyag-egyenletek együtthatóit és kitevőit.

4. táblázat. A Coffin–Manson-modell szerinti anyagegyenletek együtthatói és kitevői

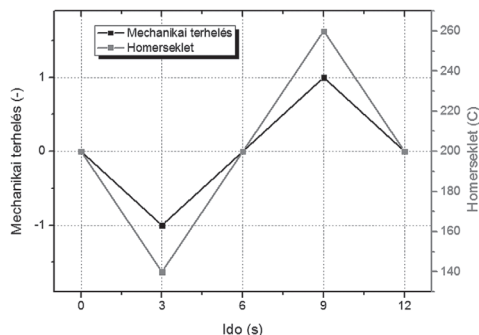
Anyag	Modell	Fáradási szívósság együttható, (ε'_f)	Fáradási szívósság kitevő, (θ)	Determinációs együttható (R^2)
Alapanyag	$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon'_f \cdot N_f^\theta$	1,047	-0,737	0,999
Varratanyag		1,118	-0,777	0,860

Termomechanikus fárasztóvizsgálatok

A termomechanikus fárasztóvizsgálatok során a GLEEBLE 3800 termikus rendszere segítségével időben változó hőmérsékletmezőt működtettünk a mérés során. A szabályozás a próbatestre a befogópofáktól szimmetrikusan, középen felhegesztett K-típusú termoelem segítségével történt. E pont hőmérsékletét a befogó rézpofákon keresztül történő ellenállás-fűtéssel továbbá a beszúrási szakaszra fúvott levegővel, a

rézpofák hűtése mellett ciklikusan változtattuk – a mechanikai terhelésekkel szinkronban. Az így adódó termikus peremfeltételekből és terhelésekből a próbatesten az alábbi mechanikai- és hőmérséklet-terhelést valósítottuk meg (16. ábra).

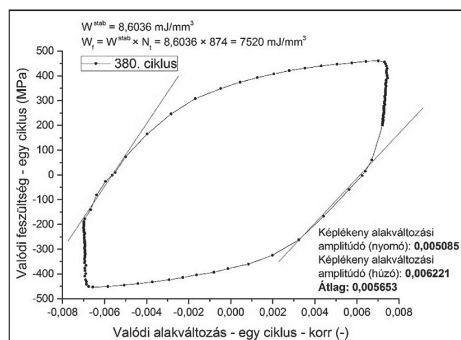
16. ábra. A fárasztóvizsgálat idő-mechanikai terhelés, idő-hőmérséklet diagramja



A MÉRÉSEK ÉRTÉKELÉSE A COFFIN–MANSON SZERINT

A termomechanikus fárasztóvizsgálatok során mért adatok kiértékelését kezdtük meg a 15H2MFA minőségű varratanyag kisciklusú fáradási tulajdonságainak kvantitatív jellemzéséhez. A kísérleti adatok Coffin–Manson-moddal történő értékeléséhez terhelési szintenként meghatároztuk a képlékenyalakváltozás-amplitúdó értékét. Ehhez valamennyi terhelési szinten minden próbatest esetében kiválasztottuk az átlagos törési ciklusszám feléhez tartozó fárasztási ciklus valódi feszültség–valódi alakváltozás histerézis görbéjét. A rugalmas szakasz illesztését követően meghatároztuk a képlékenyalakváltozási-amplitúdó mértékét a húzó, illetve a nyomó periódusra is. Adott terhelési szinten az összes így meghatározott ϵ_a, p érték átlagát tekintettük a mértékadó képlékenyalakváltozási-amplitúdónak. A 17. ábrán láthatók – többek között – a különböző terhelési szintekre meghatározott átlagos képlékenyalakváltozási-amplitúdók.

17. ábra. 0,6%-os teljes alakváltozási amplitúdó

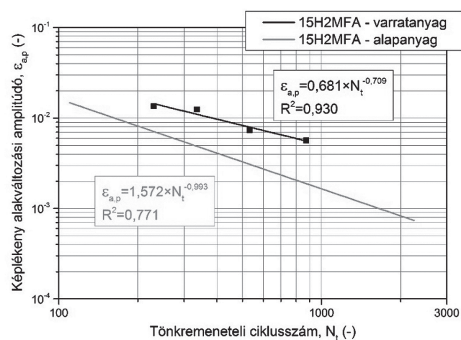


A korábbi szakirodalmi áttekintésben leírtak szerint az energetikai berendezések nagy igénybevételi szintje és az üzemállapotok közötti nagy eltérések komplikálttá tehetik a halmozódó károsodás alakváltozási amplitúdó alapján történő számítását. A különböző energetikai modellek szerinti klasszikus kiértékeléshez meg kellett határoznunk a ciklusonként közölt, valamint a tönkremenetelig összegzett alakváltozási energiát az összes próbatest mérési adatai alapján. A ciklusonkénti energiát (W^{stab}) a fenti ábrákon látható valódi alakváltozás–valódi feszültség adatvektorokból (hiszterézis hurkok) numerikus integrálással határoztuk meg. Ebből az összegzett alakváltozási energiát úgy kaptuk meg, hogy az aktuális alakváltozási amplitúdóhoz tartozó W^{stab} -értéket összeszoroztuk a vonatkozó átlagos törési ciklusszámmal. Az egyes alakváltozási amplitúdókhoz így kapott energiaértékeket szintén a fenti ábrákon láthatjuk.

Az előzőekben a termomechanikus fárasztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartályanyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-modell szerint. Ehhez a modell hatványfüggvénnyel leírt összefüggését linearizáltuk, majd a képlékenyalakváltozási-amplitúdó–törési ciklusszám ilyen módon átszámított értékpárjaira regressziószámítással egyenest illesztettünk.

Az illesztéssel kapott A és B együtthatókat visszahelyettesítve a Coffin–Manson-modell eredeti összefüggésébe, a 18. ábrán, logaritmikus skálán láthatjuk a varratanyag, illetve egy előző kutatásból származó eredmények alapján az alapanyag termomechanikus kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbéket.

18. ábra. A varratanyag, illetve az alapanyag termomechanikus kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbék



A 18. ábrán látható, hogy a varratanyag érdekes módon kevésbé érzékeny a termomechanikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója nagyobb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak kisebb a szórása. A 4. táblázatban összegeztük a Coffin–Manson-modell szerinti anyagegyenletek együtthatóit és kitevőit.

4. táblázat. Coffin–Manson-modell szerinti anyagegyenletek együtthatói és kitevői

Anyag	Modell	Fáradási szívósság együttható, (ε'_f)	Fáradási szívósság kitevő, (ϑ)	Determinációs együttható (R^2)
Alapanyag	$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon'_f \cdot N_f^{\vartheta}$	1,572	-0,993	0,771
Varratanyag		0,681	-0,709	0,930

Összefoglalás

A nyomottvizes reaktorok reaktortartálya az atomerőművek biztonsága szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson és hőmérsékleten üzemel, magában foglalja a reaktor aktív zónáját, ezen felül nem cserélhető berendezés, tehát meghatározza a reaktor műszakilag lehetséges üzemidejét. A reaktortartály egyik meghatározó károsodási folyamata az indítások és leállások, a terhelésváltozások valamint az esetleges üzemzavari állapotok okozta mechanikai és hőterhelések eredményeként bekövetkező kisciklusú fáradás. A károsodási folyamat előrehaladásával a fáradás hatására számolni kell repedések keletkezésével és terjedésével. Ez a berendezések biztonsági tartalékának folyamatos csökkenéséhez vezethet, ami veszélyezteti szerkezeti integritásukat. [2]

A kutatómunka során célunk volt a szerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek névleges élettartamának meghatározása a szerkezeteket ért valóságot minél jobban közelítő igénybevételek figyelembevétele mellett.

Az izotermikus fárasztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartály-anyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-modell szerint. Megállapítottuk, hogy a varratanyag érzékenyebb az izotermikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója kisebb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak nagyobb a szórása.

Termomechanikus fárasztóvizsgálatok eredményeit értékelve megállapítottuk, hogy a varratanyag kevésbé érzékeny a termomechanikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója nagyobb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak kisebb a szórása.

[2] Fekete B. (2016):
VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása.
Doktori Értekezés,
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem, Műszaki
Mechanika Tanszék.

csolásmentes vizsgálati módszerek szítése

Összefoglalás: A projekt során különböző altémákban végeztünk fejlesztéseket, melyeket sikeresen megvalósítottunk. A magnetoakusztikus vizsgálórendszerünkkel, a hozzá kifejlesztett egyedi mérő, adatgyűjtő és kiértékelő szoftverrel acéllemezekben anizotrópia mutatható ki, alumínium lemezek esetében pedig textúravizsgálat végezhető. Páztázó örvényáramos vizsgálórendszerünkkel acélmintákban különböző anyagfolytonossági hibák mutathatók ki. A páztázó ultrahangos vizsgálórendszereinkkel nemcsak forrasztások, hanem műanyag alkatrészek gyártási hibái, valamint NYÁK lemezekben delaminációs vizsgálatok is végezhetőek. Az általunk kifejlesztett vezérlőszoftverekkel végzett mérések eredményei reprodukálhatók és 3D-ben is megjeleníthetők.

Kulcsszavak: Magnetoakusztikus vizsgálat; akusztikus emisszió; textúra; alumíniumötvözet.

Abstract: During the project we carried out developments in various sub-themes which we successfully implemented. With our magnetoacoustic testing system and the unique measuring, data acquisition and evaluation software anisotropy can be detected in steel sheets and texture testing can be performed in the case of aluminium sheets. With our scanning eddy current testing system various material continuity defects can be detected. With our scanning ultrasonic testing systems not only solderings but also manufacturing defects in plastic parts and delamination tests in PCBs can be performed. The results of measurements performed with the control software developed by us can be reproduced and displayed in 3D.

Keywords: Magnetoacoustic method; acoustic emission; texture; wrought aluminium alloys.

**Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: szabo.peter@uniduna.hu
E-mail: feherjanosne@uniduna.hu
E-mail: molnar.janos@uniduna.hu
E-mail: csincsisz@uniduna.hu

Bevezetés

A projekt kezdetén irodalomkutatást végeztünk a magnetoakusztikus vizsgálati módszert alkalmazó publikációk között. Célunk az akkor számunkra új vizsgálati módszer megismerése, a gerjesztett mágneses tér által az anyagban lezajló folyamatok megértése, detektálása, az adatok gyűjtése, kiértékelése, az eredmények megjelenítése, a módszer alkalmazhatóságátárainak megismerése fémek vizsgálata során.

Szakirodalmi áttekintéseink közül néhányat kiemelve kutatást végeztünk a korszerű anyagok alkalmazhatóságát a magnetoakusztikus anyagvizsgálatok általi felhasználásukat illetően, mint például amorf- és mikrokristályos ötvözetek, valamint nanokristályos anyagok alkalmazhatóságának témaköreiben. Nem utolsó sorban a doménfal-mozgás hatására létrejövő Barkhausen-zaj témakörében is végeztünk kutatásokat, hiszen vizsgálataink célja ezen jelenség akusztikus emissziós szenzorokkal történő érzékelése. Pásztázó akusztikus mikroszkópia terén az ultrahangos vizsgálati módszer alkalmazhatóságát kutattuk az elektronikai hibaanalitika területén.

A magnetoakusztikus, a pásztázó ultrahangos és örvényáramos vizsgálatok mindegyikének alapja egy vizsgálórendszer felépítése, melyet olyan szoftver működtet, mely vezérli a mozgatórendszert, adatokat gyűjt és továbbít a PC felé, lehetővé teszi a begyűjtött adatok utófeldolgozását és megjelenítését.

Ebből kiindulva fogalmaztuk meg kezdeti céljainkat:

- A teljes rendszerre vonatkozó fő feladatunk egy teljes szoftveres programstruktúra kialakítása, mely vezérli a szoftvert és minden funkcionális feladatot.
- A mozgítás terén ki kell fejleszteni egy olyan vezérlőt, mely a vizsgálófej folyamatos mozgására képes a már meglévő ISEL-hardverelemek alkalmazásának meghagyása mellett.
- A mérés és adatgyűjtés esetében fontos a gyorsaság, ezért nagy átviteli sebességű mérőkártyát kell a rendszerbe integrálni. A nagy sebességű mérés mellett fontos az ultrahangos jelek nagyfrekvenciás digitális mintavételezése és a PC felé történő gyors adattovábbítása is. Ezek együttesen hatással vannak az elvégzendő vizsgálat időtartamára.
- Fontos az adatok utófeldolgozhatósága és megjelenítése. A mérőprogram által begyűjtött adatokat utólagosan be kell tudni tölteni, ki kell tudni értékelni, melynek eredményét akár diagramon, akár 3D-s modellben ábrázolhatjuk.
- Természetesen hiába jó egy mérés, ha a vizsgálati tárgyat nem sikerül stabilan rögzíteni. Ez főként a pásztázó vizsgálatoknál jelent problémát, ahol a vizsgálófej mozgásából eredő rezgések miatt az egyes képek (A, B, C és D) elmosódottá válnak, így nem értékelhetők. Fontos, hogy gépészeti vonalon stabil tárgymegfogókat fejlesszünk ki univerzális és egyedi változatokban.

A kifejlesztett vizsgálórendszerekhez egyedi vezérlő- és adatfeldolgozó szoftvereket készítettünk LabView környezetben.

Jelen dokumentumban a *Magnetoakusztikus roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése*, valamint a *Páztázó roncsolásmentes vizsgálati módszerek továbbfejlesztése LabView programozással* témában elért eredményeinket mutatjuk be összefoglaló jelleggel.

Szoftver- és berendezésfejlesztések

A *magnetoakusztikus vizsgálórendszer* kifejlesztése során a forgó mágneses mező létrehozása elengedhetetlen az anyagban, a mágneses tér pólusváltásainak hatására létrejövő doménfal-mozgások eredményeként létrejövő Barkhausen-zaj keletkezéséhez, melyet akusztikus emissziós szenzorokkal detektálunk.

Eleinte a forgó mágneses teret egy villanymotor átalakításával és a hozzá tartozó vezérlőszoftver megírásával hoztuk létre. A motor forgórészének eltávolítása után egy vasmagos állórészt tettünk a helyére, ami a motor állórészében levő tekercselés által keltett mágneses erővonalakat hivatott a közvetlenül fölé helyezett lemezmintába vezetni. Bár a vezérlőszoftver megfelelően működött, mégsem sikerült a kívánt effektust létrehozni. A villanymotor sajátos kialakítása miatt a kivezetett mágneses tér erőssége nem volt elegendő a Barkhausen-zaj keltéséhez, így detektálni sem lehetséges.

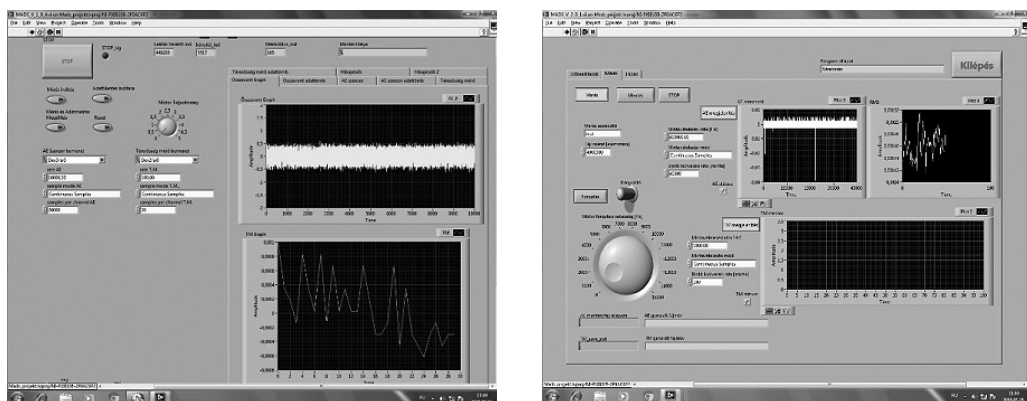
Megvizsgáltuk a lehetőségeket, így az átalakított villanymotor helyett a továbbiakban neodímium mágneset alkalmaztunk, melyről köztudott, hogy erős az állandó mágneses tere. Többféle méretű és erősségű mágnes közül kiválasztottuk a számunkra megfelelőt, melyet egy DC-motorral ellátott forgatómechanizmusra szereltünk. A vezérlőszoftvert átalakítottuk, így lehetővé vált a forgatás sebességének állítása is.

Kísérleteket végeztünk oly módon, hogy a forgatandó mágneset és a 0,5 mm vastagságú vizsgálati tárgyat 2–3 mm távolságban helyeztük el egymástól. Azzal a problémával szembesültünk, hogy a mágnes a vizsgálati tárgy közelsége miatt magához rántotta azt, így a forgatás azonnal megállt, mert a DC-motor nyomatéka nem elégséges ahhoz, hogy legyőzze a kontaktusból származó súrlódást. A mágnes tokozása sem megoldás, mert a súrlódás ebben az esetben is fellép és még ha sikerülne is Barkhausen-zajt detektálni, a felületek súrlódásából keletkező zaj miatt a spektrumokon észrevehetetlen lenne.

Megoldásként léptetőmotoros forgatásra tértünk át és a mágneset egy függőleges tengelyű szíjhajtásos mechanizmus hajtott oldalára szereltük. A lemez és vizsgálati tárgy közti távtartásra is találtunk megoldást, így többé már nem jött létre a fizikai kapcsolat a mágnes és vizsgált minta között. Az így létrejött vizsgálórendszerrel folytattuk kísérleti méréseinket, melyek során begyűjtött tapasztalatok alapján további fejlesztéseket hajtottunk végre a vezérlőszoftverben.

A kezelőfelületet átterveztuk és átláthatóbb formába rendeztük (1. ábra).

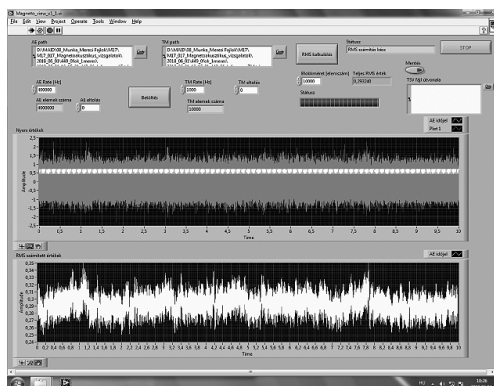
1. ábra. A kezelőfelület átrendezése (baloldalon a régi, jobboldalon az új)



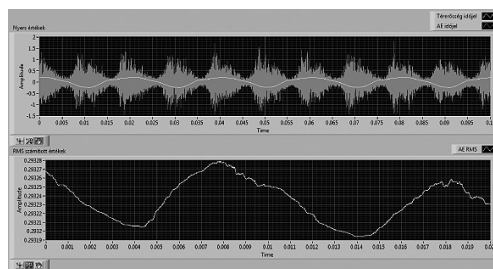
Léptetőmotor vezérlőmodult építettünk be a szoftverbe, így lehetővé vált LabVIEW-felületről többek között a forgásirány-váltás, teljesítményszabályozás, kapcsolókkal további funkciók váltak elérhetővé, folyamatjelző tájékoztat a fájlba írás pillanatnyi állapotáról, valamint előre megadható a fájl méret alapján a mentés automatikus leállítása és megjelent a valós idejű RMS kalkulációs modul is.

A mérőprogram mellett fontos a begyűjtött adatok utófeldolgozása és az eredmények megjelenítése, ezért kifejlesztettük és létrehoztuk a Magneto View elnevezésű utófeldolgozó és megjelenítő szoftvert, mely képes betekintést adni a begyűjtött időjelekbe nagyítási lehetőséggel (2. ábra).

2.a. ábra. A Magneto View szoftver kezelőfelülete

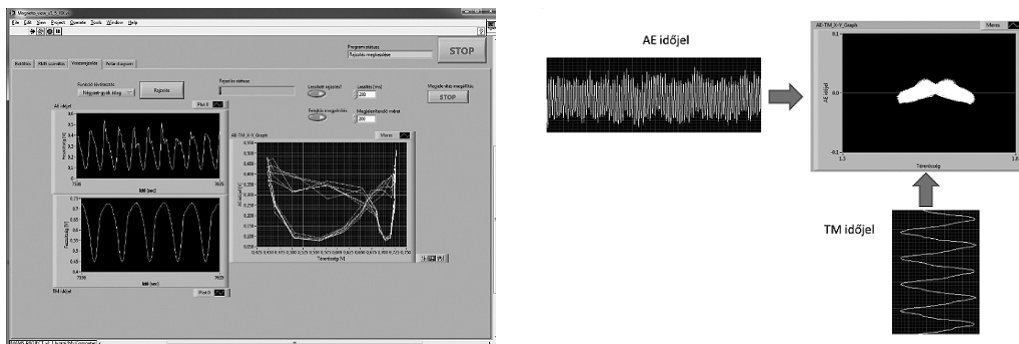


2.b. ábra. A kinagyított időjel



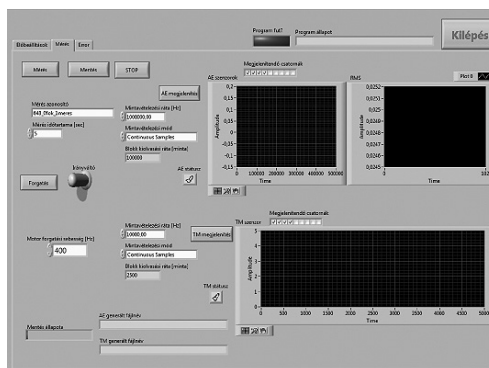
A mágnes pólusváltásakor keletkező akusztikus emissziós jelenségek megjelenítéséhez kifejlesztettünk egy új kiértékelési és megjelenítési eljárást a kiértékelő-alkalmazáshoz, mely egy X-Y gráfot hoz létre a térerősség jel (X) és akusztikus emissziós jel (Y) tengelyeken történő megjelenítésével (3. ábra).

3. ábra. Egy új megjelenítési eljárás



Tapasztalataink alapján átdolgoztuk a mérő- és kiértékelő szoftvereinket és létrehoztuk a MAMS elnevezésű mérőszoftvert, amely 4 csatornás mérési lehetőséget kínál a felhasználónak akár 1 MHz-es mintavételezési frekvenciával. Közös szinkronjellel javítottunk az akusztikus emissziós és mágneses-érzékelő csatornák aszinkron mentésén, státuskijelzéssel.

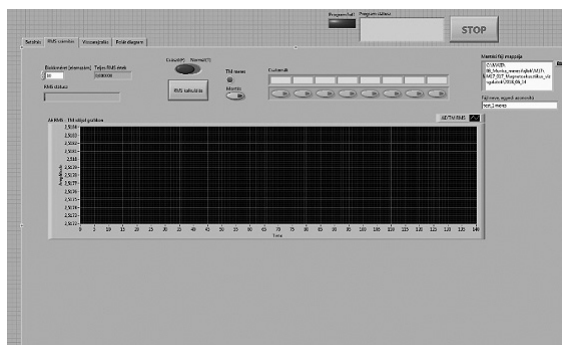
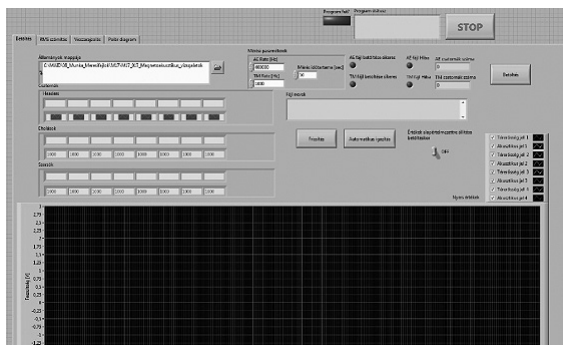
4. ábra. A MAMS mérőrendszer kezelőfelülete



A 4. ábrán a kezelőfelület vízszintes középvonalától felfelé, a jobboldali gráfokon az akusztikus emissziós (továbbiakban AE) szenzorok által adott jelek, valamint a valós idejű RMS-kalkuláció eredményei jelennek meg. Mellettük baloldalon a mérés- és adatmentés-indítás és leállítás gombok találhatóak. Alattuk az aktuális mérésre vonatkozó beállítások, úgymint mérési azonosító, a mérési időtartama, mintavételezési frekvencia és mód, valamint a blokkméret állíthatók be. A középvonaltól lefelé a mágneses tér érzékelésével kapcsolatos beállítások tehetők meg, úgymint mintavételezési frekvencia és mód, valamint a blokkméret állíthatók be. A mellette levő diagramban a mágnesestér-érzékelő szenzor (továbbiakban TM-szenzor) által adott jelek jeleníthetők meg. Az AE- és TM-szenzorokhoz státuszjelzők is találhatóak, melyek jelzik, ha valami probléma merül fel valamelyik csatornán, ugyanis ebben az esetben adatok nem kerülnek mentésre és a mérést meg kell ismételni. Mivel a rendszer többcsatornás, így lehetőség van az egyes csatornák adatait egyenként megjeleníteni, ehhez elegendő egy kis pipát tenni a megjelenítendő csatornához tartozó jelölő-négyzetek valamelyikébe. Legalul láthatjuk a státuszjelzőt a mentés állapotára vonatkozóan.

A mérési eredmények kiértékelésében szerzett tapasztalatainkat összegezve kifejlesztettük és létrehoztuk a *Magneto View* elnevezésű többcsatornás utófeldolgozó alkalmazást (5. ábra).

5. ábra. A *Magneto View*-alkalmazás kezelőfelülete



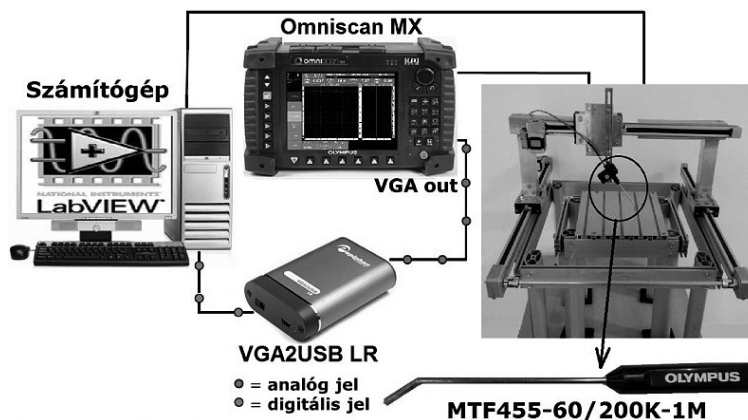
Ebben a szoftverben a felhasználó a mérési adatfájl könyvtárának megadását, valamint a mintavételezési frekvencia és mérési időtartam megadását követően betöltheti a mérési adatokat, információt kap a mentett adatblokkok hibamentességéről, külön kapcsolhatja az egyes csatornák eredményeinek megjelenítését az idő függvényében az alsó diagramban, valamint kiszámolhatja és megjelenítheti az egyes csatornák RMS-értékeit és azok spektrumát egyetlen gombnyomással.

Kifejlesztettünk és létrehoztunk egy *pásztázó örvényáramos vizsgálorendszert*, mely szoftver által vezérelve, az előbeállítások szerint, képes a vizsgálófej egy X-Y koordinátákkal meghatározott terület feletti mozgatására a meghatározott lépésközzel, képes az adatok begyűjtésére, feldolgozására és 2D/3D-ben történő megjelenítésére a beépített különböző képjavító módszerek segítségével.

Az X-Y irányú mozgatószerkezetet ISEL-elemekből építettük meg, a mozgatást léptetőmotorok végzik. A vezérlése ProNC-programmal történik, amelyben beállításra kerülnek főként a vizsgálati terület koordinátái és a lépésköz, ami a felbontást is meghatározza.

A vizsgálófejből érkező adatokat OmniScan MX berendezés fogadja, melynek analóg VGA kimenetéről digitalizáljuk és továbbítjuk a jeleket a számítógép által feldolgozható formában. A berendezés sematikus ábráját a 6. ábra szemlélteti.

6. ábra. A kifejlesztett pásztázó örvényáramos berendezés

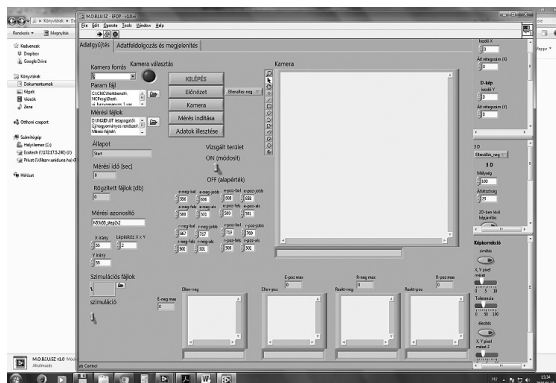


Az adatok gyűjtésére és feldolgozására létrehoztuk a M.O.B.I.U.S.Z nevű, saját fejlesztésű alkalmazásunkat, mely USB-n keresztül képes fogadni a vizsgálófejtől érkező digitalizált adatokat. Képes az adatok meghatározott mappába történő folyamatos mentésére, a mérés készütségi állapotának, a mérés idejének és a rögzített fájlok számának kijelzésére, megjeleníti a fő beállításokat (a vizsgálati terület nagyságát X-Y koordinátákkal, valamint a lépésközt) és a kamera képén az OmniScan MX műszer kijelzőjén látottak megjelenítésére. A szoftver adatgyűjtő alkalmazásának kezelőfelületét a 7. ábra, az adatfeldolgozó alkalmazásnak kezelőfelületét pedig a 8. ábra mutatja.

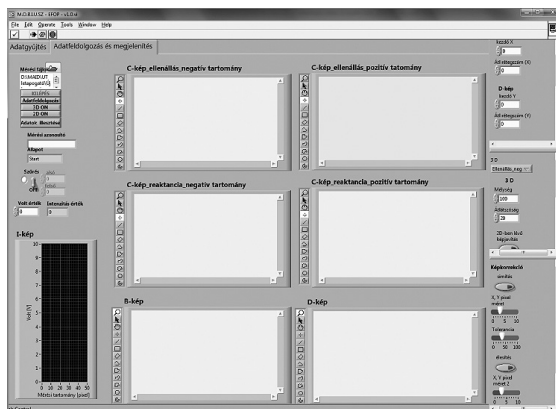
Az adatfeldolgozó alkalmazás képes az adatok utólagos feldolgozására a mérési fájl megnyitását követően. A jobb oldalon beállíthatjuk a különböző 2D-s képekhez tartozó kezdő koordinátákat, valamint a

rétegszámot, majd ezek után a megjelenő képeket kiértékelhetjük. A program képes 3D blokkokba rendezni a begyűjtött adatokat, így realisztikus 3D-s modell hozható létre, ami jól szemlélteti az indikációkat.

7. ábra. M.O.B.I.U.SZ adatgyűjtő alkalmazás

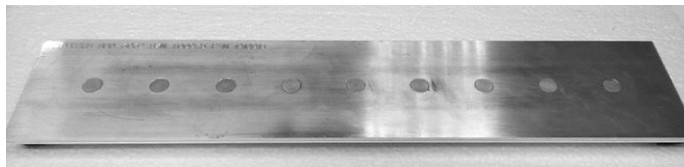


8. ábra. A M.O.B.I.U.SZ adatfeldolgozó alkalmazás

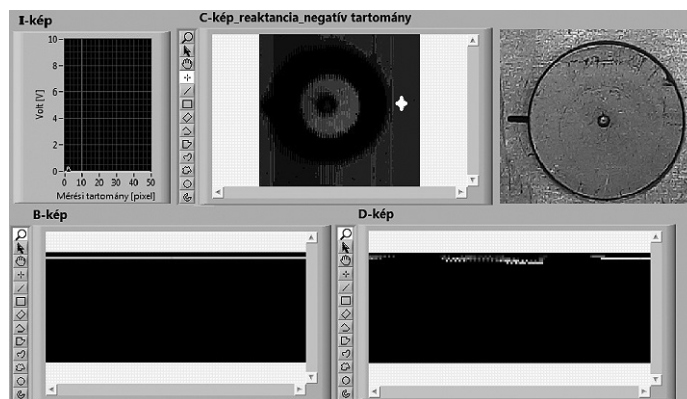


A 9. ábrán az Olympus SPO-3932 etalonon végzett pásztázó örvényáramos vizsgálati eredményt szemlélteti. A szegecskötésű etalon különböző jellegű és mértékű műhibákat tartalmaz, melyek közül egyet mutatunk be. A szegecsfej alatt üreg található, valamint egy folytonossági hiány.

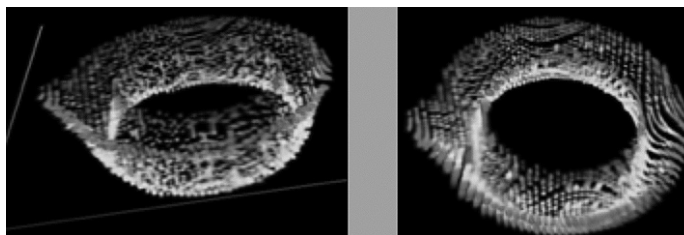
9.a. ábra. Olympus SPO-3932 etalon



9.b. ábra. Felső sorban jobbra: a szegecs nagyított képe, középen: a C-kép negatív reaktancia tartományban



9.c. ábra. A vizsgálati eredmény 3D-s modellje: a szegecsfej alatti üreg és kiterjedése a folytonossági hiánnyal

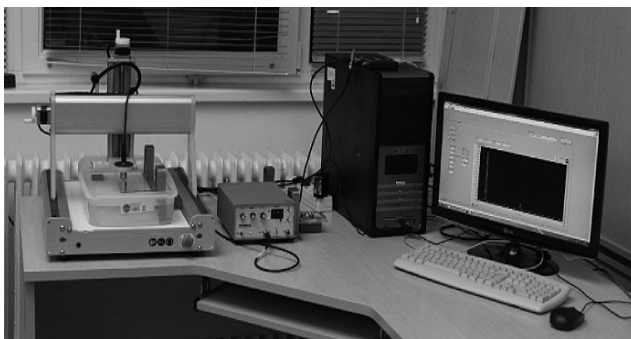


Az üreg a C-kép negatív tartományú reaktancia képen fekete körgyűrűként jelenik meg, a 3D-s modellen pedig a kiterjedése látható. A szegecs és lemez anyaga a C-képen látható, a 3D-s modellen ez nem jelenik meg. Míg a folytonossági hiány a C-képen baloldalon jelenik meg egy kis fekete kitüremkedés formájában, a 3D-s modellen is felfedezhető ugyancsak egy kitüremkedés formájában és látható a kiterjedése is. (E témában egy gépészmérnöki MSc diplomamunka is született: Agócs Mihály: *3D örvényáramos berendezés ipari felhasználásának előkészítése* címmel.)

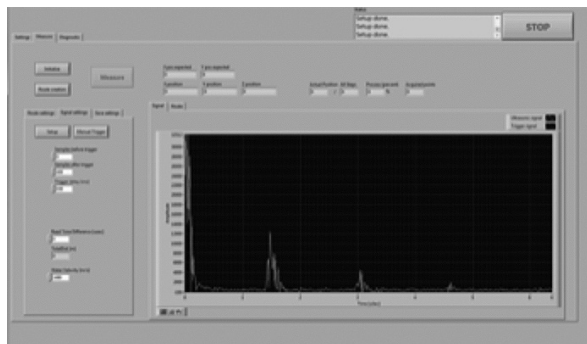
Kifejlesztettünk és megépítettünk egy *pásztázó ultrahangos vizsgálórendszert*, melynek vezérlőszoftverét LabView környezetben írtuk meg. A vizsgálórendszer fő részei: a háromtengelyű mozgató szerkezet léptetőmotorokkal, az ultrahang hullámokat gerjesztő pulzer, egy PicoScope, melyek az ultrahangos jelek nagysebességű mintavételezésére szolgálnak, egy számítógép, mely tartalmazza a Mach3-alkalmazást a mozgatószerkezet vezérléséhez, valamint a saját fejlesztésű adatgyűjtő-adatfeldolgozó szoftverünket, melyet MaidScan névre kereszteltünk. Az alkalmazás fejlesztése a kezelő személy által elvégzett kísérleti mérések visszajelzései alapján folyamatosan történik, ilyenek például a hibajavítások, a különböző funkciókkal történő bővítés, mely a kezelhetőséget, funkcionalitást és a megjelenítés minőségét javítja. Létrehoztuk a legújabb programváltozatot, mely moduláris felépítésű, így egyszerűbbé vált a későbbi igények szerinti egyes bővítmények integrálása. Megvalósult a LabView- és Mach3- vezérlőprogram összekapcsolása is, mely hatására LabView felületről képesek vagyunk a vizsgálófej mozgatását elvégezni és különböző egyéb utasításokat végrehajtani. Jelenleg fejlesztői tesztek vannak folyamatban.

A 10. ábra a vizsgálórendszert, a 11. ábra a MaidScan alkalmazás kezelőfelületét szemlélteti.

10. ábra. Az új pásztázó ultrahangos vizsgálórendszer

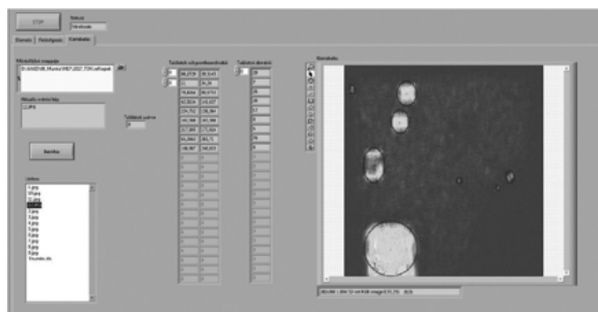


11. ábra. A MaidScan-alkalmazás kezelőfelülete



A korábbi pásztázó ultrahangos vizsgálórendszerünkhöz két újabb modul került kifejlesztésre. Az egyik az automatizált objektumdetektáló-modul (12. ábra), mely képes a begyűjtött adatok betöltése után az eredmények megjelenítésére és a talált objektumok súlykoordinátáinak, valamint a találatok méretének meghatározására.

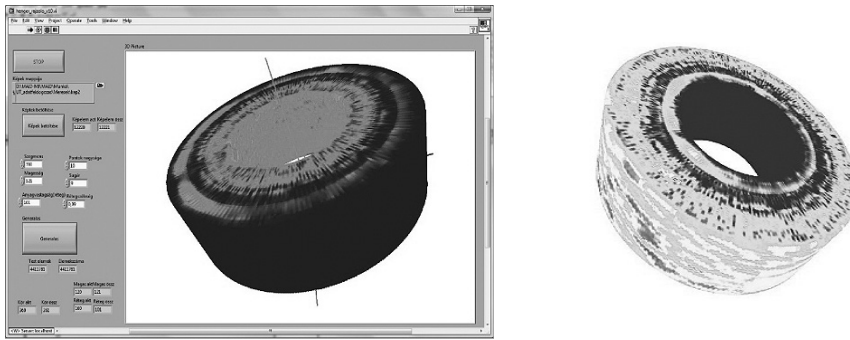
12. ábra. Objektumdetektáló modul kezelőfelülete



A modult egy korábbi hallgatónk Reményi Szilárd fejlesztette ki és írt belőle TDK-dolgozatot „Grafikus hibadetektáló és kiértékelő alkalmazás LabView fejlesztői környezetben” címmel.

A másik modul a pásztázóobjektum-megjelenítő rendszer (13. ábra), mely hengeres minták vizsgálatára készült. A program a begyűjtött adatokat egy 3D-mátrixba rendezi és objektumként megjeleníti azt. Az így létrejött realisztikus modell szemléletes formában mutatja meg a felhasználónak a talált indikációkat, ezzel a jelenségek könnyebb értelmezhetőségét segíti elő nemcsak az objektum felületén, hanem a belsejében is rétegről rétegre.

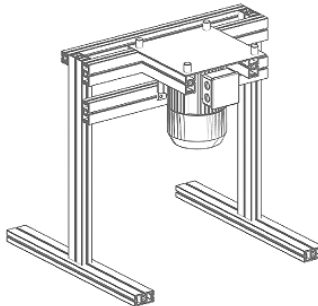
13. ábra. Pásztázóobjektum-megjelenítő rendszer kezelőfelülete



Gépészeti fejlesztések

A magnetoakusztikus vizsgálórendszerhez megtervezésre és megvalósításra került egy vizsgálóállvány, mely integrált mintatartóval rendelkezik, alkalmas az átalakított villanymotorral keltett forgó mágneses térrel végzendő vizsgálatokra, valamint forgató mechanizmusra szerelt neodímium mágnessel, illetve kézi járommágnessel gerjesztett mágneses mezővel végzendő vizsgálatokra egyaránt. Az állvány merev és stabil kivitelű, melynek 3D-modelljét a 14. ábra szemlélteti. A villanymotor felett egy 300x300 mm-es lemez-minta látható a négy sarkán elhelyezett akusztikus emissziós szenzorokkal.

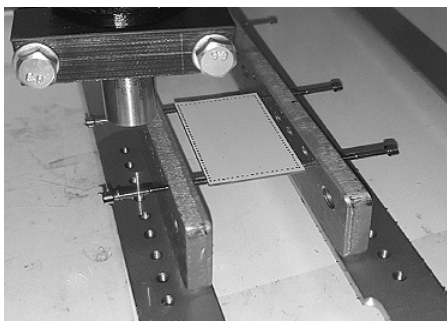
14. ábra. Vizsgálóállvány



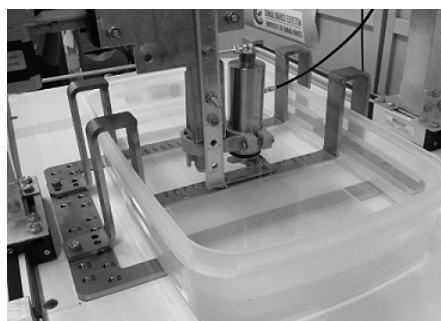
Az ultrahangos vizsgálatok eredményeinek megfelelőségéhez elengedhetetlen a vizsgált minta stabil megfogása, rögzítése. A minták általában szabálytalan alakúak, különböző geometriai méretekkel rendelkeznek, vastagságuk a 1,5 mm-től a több 10 mm-es méretig változhat, így nehéz pontosan és stabilan rögzíteni őket. További szempont, hogy az ultrahangos vizsgálatokat folyadék alatt kell elvégezni, hogy megfelelő csatolás jöjjön létre, melynek hatására az ultrahang az anyagba hatol, így a megfogó szerkezetnek korrózióállónak kell lennie, hogy ne szennyezze el a keletkezett korróziós termék a vizsgálófolyadékot.

E szempontok alapján kifejlesztettünk egy olyan univerzális befogószerkezetet, melyet alkalmas egyrészt a kisméretű, lemezszerű minták befogására a lemezvastagság felőli (oldalról) történő stabil megfogásra (15.a. ábra), másrészt alkalmas nagyobb méretű minták szintén oldalról történő megfogására, a különböző feltételeinek köszönhetően nagyobb méretű alkatrészek leszorításos módon történő rögzítésére, valamint az alaplemezt medencén kívül elhelyezve az „U” alakú feltéttel (15.b. ábra) alkalmas leszorítással rögzíteni a vizsgálati mintát.

15.a. ábra. Lemezszerű minták befogása



15.b. ábra. Alkatrész leszorításos rögzítése



A korábbi pásztázó ultrahangos vizsgálóberendezésünk a vizsgálófej X-Y irányú mozgatására volt képes. Mivel a vizsgálófej Z irányban nem állítható, így állandó probléma volt a vizsgált minta vízszintbe állítása és a vizsgálófej függőlegesbe állítása, hogy merőleges legyen a vizsgált felületre.

A probléma megoldására kifejlesztettünk egy olyan ultrahangos vizsgálófej-befogó, -mozgató szerkezetet, mely kézi működtetéssel képes a vizsgálófej Z irányú mozgatására, a pozíció rögzítésére, valamint képes a szögeltérések kompenzálására a merőlegestől számított $\pm 5^\circ$ -ban, ezzel biztosítva a fej merőleges helyzetének beállíthatóságát. A vizsgálófej-befogó eredetileg az 50 MHz-es vizsgálófejünkhöz készült, de adapterek megtervezésével és legyártásával alkalmassá tettük kisebb méretű ultrahangos fejek befogására is. A szerkezet a 16. ábrán látható.

16. ábra. Vizsgálófej befogó és Z irányú mozgató szerkezet szögeltérés kompenzációval



A berendezéseinkhez több vizsgálófej-befogót és adaptert terveztünk és készítettünk a munka hatékonyságának javítása érdekében. Megvalósítottuk az új pásztázó ultrahangos berendezésünk medencéjének automatikus töltését, ürítését, mely a vizsgálat megkezdése előtt automatikusan feltölti a medencét folyadékkal és a vizsgálat végén kiüríti azt egy tartályba. A funkció megvalósítása a vizsgálófej esetleges beázás elleni védelmét szolgálja.

Magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel elért vizsgálati eredmények

Anizotrópia kimutatására végzett vizsgálataink célja annak megállapítása, hogy magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel meghatározható-e az acéllemez anizotrópiája. Vizsgálatainkat 0,775 mm és 3 mm vastagságú acéllemez-mintákon végeztük el, kézi járommágneses gerjesztéssel. A mintaelőkészítésnél figyelni kellett arra, hogy a járommágnes által keltett rezonancia ne keltsen mechanikai zajokat. A lemez minta és a tartóállvány közé szilikongumi korongokat helyeztünk, valamint a járommágnes pólusait is elláttuk egy vékony gumiréteggel. Fontos az AE-szenzorok pozíciója az alátámasztásokhoz képest, mert utóbbi jelentős csillapító hatást fejt ki a doménmozgásból eredő hanghullámok terjedésére, csökkenti az intenzitásukat. A mágneses teret Hall-szenzorral (TM-szenzorral) érzékeltük.

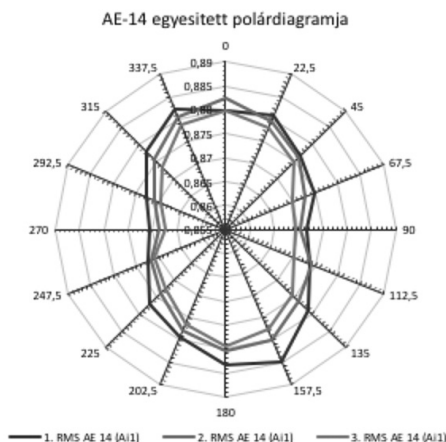
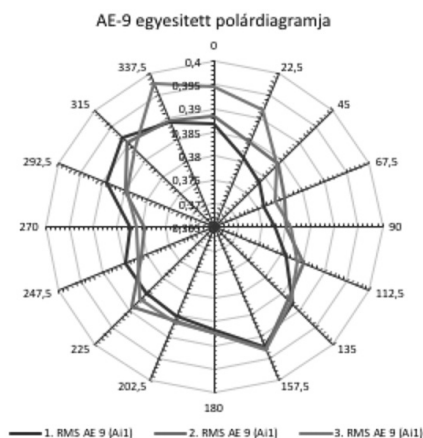
Mivel vizsgálatainkat hidegen hengerelt lemezmintán végezzük így tudjuk, hogy előállítása során jelentős mértékű mechanikai feszültségváltozáson ment keresztül, így tartalmaz maradó feszültséget. Ha a lemezt mágnesesen gerjesztjük, a 180°-os doménfalak mozgásából adódóan Barkhausen-zaj keletkezik. Mechanikai feszültséget Barkhausen-zajjal ferromágneses anyagokban lehet mérni, melyek magnetostrikciót

mutatnak. Vizsgálataink során a lemezre korábban felrajzolt mérési irányok megegyeznek a járommágnes irányított gerjesztő terével, így, ha a metszéspontban körbe forgatjuk, meghatározhatjuk a mágneses Barkhausen-zaj irány szerinti eloszlását. Abban az esetben, ha az alakításból származó feszültség iránya egybeesik a vizsgálati iránnyal, a zaj megnövekszik, így az alakítás iránya meghatározható.

Az AE szenzorok által adott adatokat kiértékeljük és polárdiagramban ábrázoltuk. A 17. ábrán a 9-es számú AE szenzor, míg a 18. ábrán a 14-es AE-szenzor egyesített polárdiagramja látható 0,775 mm és 3mm vastagságú lemezmintában, melyet három egymást követő mérésből állítottunk össze.

17. ábra. Anizotrópia a 0,775 mm vastag lemezmintában

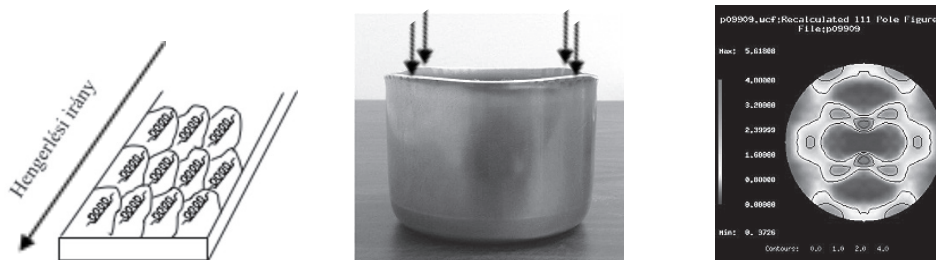
18. ábra. Anizotrópia a 3 mm vastag lemezmintában



Alumíniumlemezek textúravizsgálata magnetoakusztikus vizsgálati módszer alkalmazásával

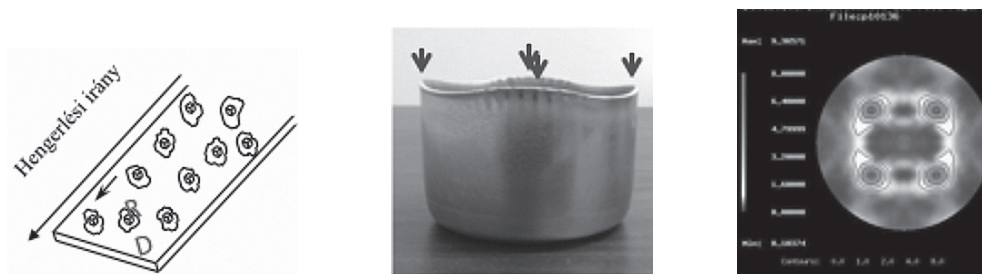
A vizsgálatok célja annak megállapítása, hogy magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel meghatározható-e az alumíniumlemez textúrája, azaz mérhető-e az izotróp-anizotróp anyagok közötti különbség. A textúrát a mélyhúzhatósági mutatók (fülesedés vizsgálatok alapján) és az anizotrópiai tulajdonságok jellemzik. Hengerelt alumíniumlemezre az erősen alakított textúra jellemző, ahol a szemcsék az alakítás irányában erősen orientáltak, amit a húzott csésze az alakítás irányára 45°-os szögben (45°–45°) megjelenő kismértékű fülesedése is mutat.

19. ábra. Erősen alakított textúra



A textúrák változnak a hőkezelés során. Ha a szemcsék elhelyezkedése random, azaz nincs kitüntetett irányultságuk, akkor az ilyen lemezek tulajdonsága és alakváltozó képessége közel azonos minden irányban. Hőkezelt lemez esetében a kockatextúra kialakulása a domináns, melyet többnyire a húzott csésze az alakítás irányában, illetve arra 90° -os szögben (0° – 90°) megjelenő fülesedése jellemző, aminek mértéke erősen függ a vizsgált alumíniumötvözet fajtájától.

20. ábra. Kockatextúra



A csészehúzó vizsgálatokkal megállapítható a különböző alakítási/kockatextúrák aránya, ami befolyásolja a fülek elhelyezkedését az alakítás irányával megegyező, vagy arra merőleges irányban, azaz 0 – 90° vagy 45 – 45° -ban. Így ezen mérések segítségével egy átfogó képet lehet kapni arra vonatkozóan, hogyan alakulnak a fülesedési-mutatószámok, azaz az izotróp-anizotróp átalakulások hogyan mennek végbe és mely textúrák az uralkodók az egyes technológiai lépések után. Ezek a változások nagymértékben függenek az ötvözetek fajtájától és az egyes ötvözőelemek mennyiségétől.

A magnetoakusztikus módszerrel történő vizsgálatok esetében, a fent leírt kristályszerkezeti változások az akusztikus emissziós szenzor által mért jel RMS-értékeinek megnövekedése és a polárdiagram megnyúlása várható a hőkezeletlen lemez minta esetében a 45° – 225° , illetve a 135° – 315° (azaz a 45° – 45°) irányokban, valamint hőkezelt lemez minta esetében a 0° – 180° , illetve a 90° – 270° (azaz a 0° – 90°) irányokban.

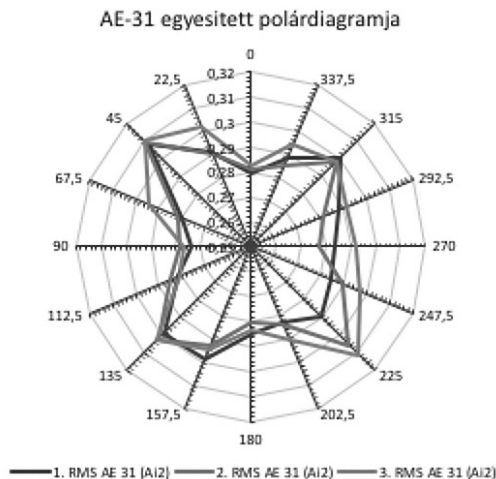
Az alumíniumlemezek textúravizsgálatához sikerült több mintát is beszereznünk. Vizsgáltunk ötvözetlen hőkezeletlen és hőkezelt, valamint ötvözött hőkezeletlen és hőkezelt lemezmintákat, majd megvizsgáltuk a mikroszerkezetüket és mindkét típusra (kemény és lágy) megmérítettük csészehúzó vizsgálattal a fülesedési-értékeket.

Az alakított mikroszerkezet lényegesen eltér a lágyított lemez mikroszerkezetétől, ezért feltételezhető, hogy a textúrákban is van különbség. Lágyítás hatására végbemegy az újrakristályosodás, azaz az erősen nyújtott szemcsékből egy gömbölyűhöz hasonló szemcsealakzat jön létre.

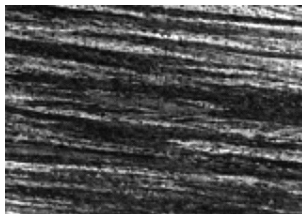
Minden lemeztípuson végeztünk ismétlő méréseket az eredmények reprodukálhatósága miatt és megállapításainkat, következtetéseinket ezek alapján vontuk le.

A 21. és 22. ábrákon bemutatjuk az ötvözetlen hőkezeletlen alumíniumlemez magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel kimutatott textúráját, valamint a minta szemcseszerkezetét. A 23. és 24. ábrákon az ötvözetlen hőkezelt alumíniumlemez textúrája és szemcseszerkezete kerül bemutatásra.

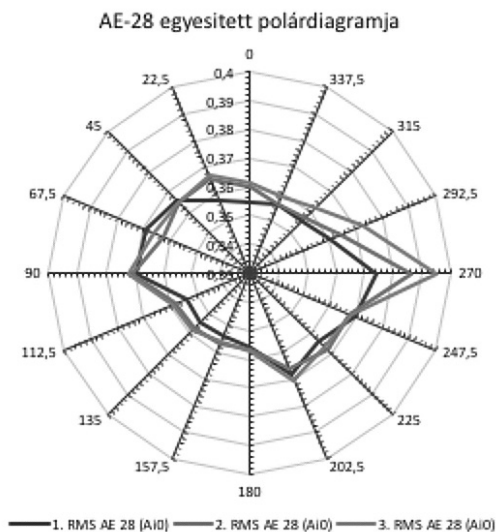
21. ábra. Az ötvözetlen, hőkezeletlen alumíniumlemez textúrája magnetoakusztikus módszerrel, a 31-es AE-szenzor eredményei alapján



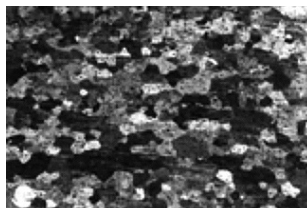
22. ábra. A hőkezeletlen minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban



23. ábra. Az ötvözetlen, hőkezelt alumíniumlemez textúrája magnetoakusztikus módszerrel, a 28-as AE-szenzor eredményei alapján



24. ábra. A lágított minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban



A magnetoakusztikus vizsgálati eredményeket Erichsen-típusú csészehúzó mélyhúzhatósági vizsgálat-
tal validáltuk. Elvégeztük a vizsgálatokat az ötvözetlen, lágyalumínium-lemezmintán az alábbi eredmén-
nyel:

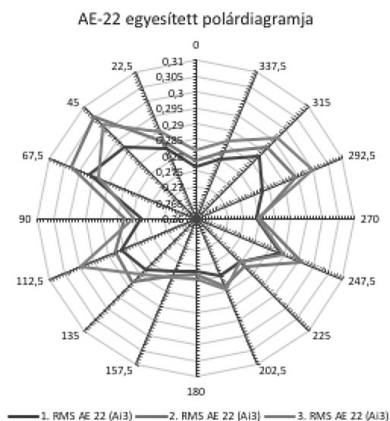
fül % = 2

25. ábra. Kihúzott csésze a lágyított mintából

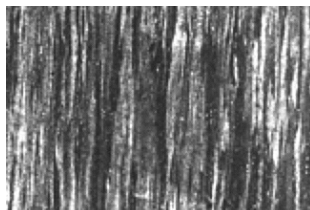


A 25. ábrán jól látható a fülek elhelyezkedése a hengerlési iránnyal párhuzamosan és arra merőlegesen, azaz 0° – 90° -ban. Ez azt mutatja, hogy ennél az ötvözetnél lágy állapotban a kockatextúra a domináns. A 26. és 27. ábrákon bemutatjuk az ötvözött hőkezeletlen alumíniumlemez textúráját, valamint a minta szemcseszerkezetét. A 28. és 29. ábrákon az ötvözött hőkezelt alumíniumlemez textúrája és szemcseszerkezte kerül bemutatásra.

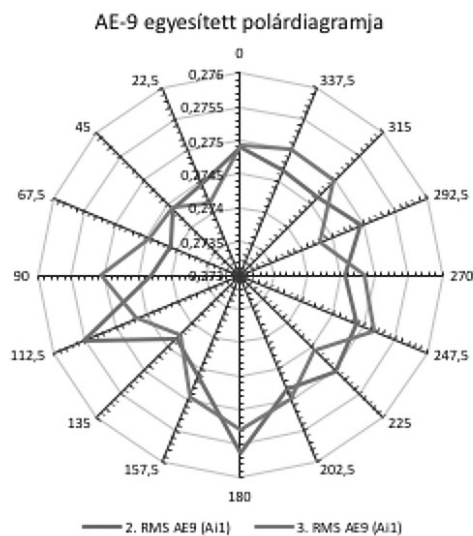
26. ábra. Az ötvözött hőkezeletlen alumíniumlemez textúrája



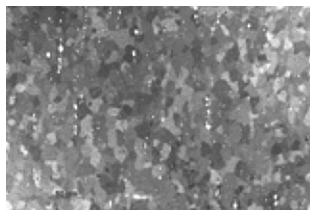
27. ábra. A hőkezeletlen minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban



28. ábra. Az ötvözött hőkezelt alumíniumlemez minta textúrája



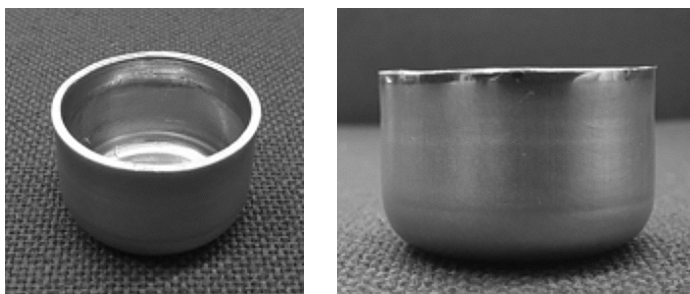
29. ábra. A hőkezelt minta szemcseszerkezete 200x-os nagyításban



Az alakítás irányában erősen nyújtott kristályszerkezet lágyítás után újra kristályosodott, s a szemcsék a nyújtott alakból átalakultak közel equiaxiális formába, egyenletes méretben és elrendezésben. A magas Mg-tartalom miatt az újrakristályosodott szemcsenagyság kicsi, sokkal kisebb, mint az ötvözetlen lágy alumíniumlemez esetében.

Elvégeztük a validáló méréseket is Erichsen csészehúzó-vizsgálattal. A fülérték 1,2%, a fülek iránya 45° – 45° ami a 30. ábrán látható.

30. ábra. A lágyított lemezmintából húzott csésze

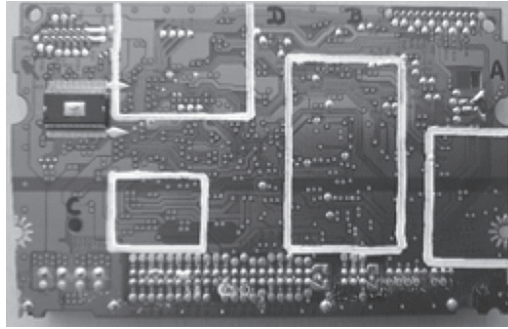


Ebből a mérésből az látszik, hogy ennek az ötvözetnek a textúrája lágyítás hatására kocka textúrába alakult át. Összességében megállapíthatjuk, hogy a magnetoakusztikus mérések alkalmasak az alumínium ötvözetekben lágyítás hatására végbemenő szerkezetváltozások és az ezzel járó textúrák kimutatására.

Egyrétegű NYÁKlemez delaminációs vizsgálata

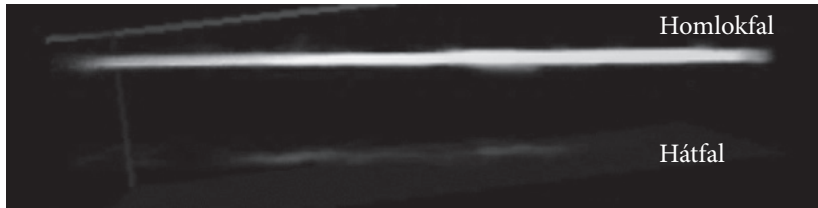
A pásztázó ultrahangos berendezésünket kipróbáltuk külső hőhatásnak kitett NYÁKlemezben kialakult delamináció kimutathatóságának vizsgálatára. Vizsgálatainkat az „A” területen végeztük el. Célunk annak megállapítása, hogy a hőkezelés során kialakul-e és ha igen, akkor mekkora területen alakul ki delamináció.

31. ábra. A NYÁKlemezen kijelölt vizsgálati területek

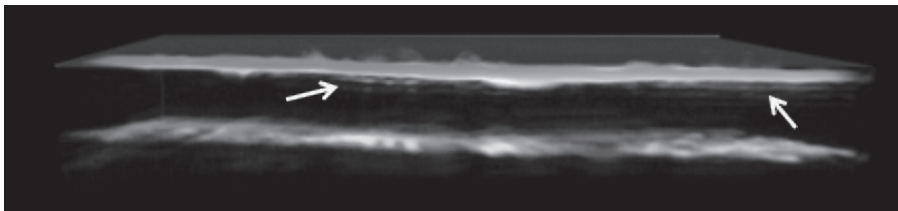


A NYÁKlemez mérete 140x88 mm, lemezvastagsága 1,5mm. Az „A” területet 0,1x0,1mm-es felbontással vizsgáltuk hőkezelés előtt, amikor is nem találtunk gyártási hibára utaló reflexiót. Ezt a 32. ábrán látható 3D-s képen jól megfigyelhetjük, ahol a homlokfal és hátfal között nincs indikáció. A 33. ábrán a hőkezelés utáni állapot látható.

32. ábra. Az „A” terület hőkezelés előtti állapota 0,1x0,1mm-es felbontásban

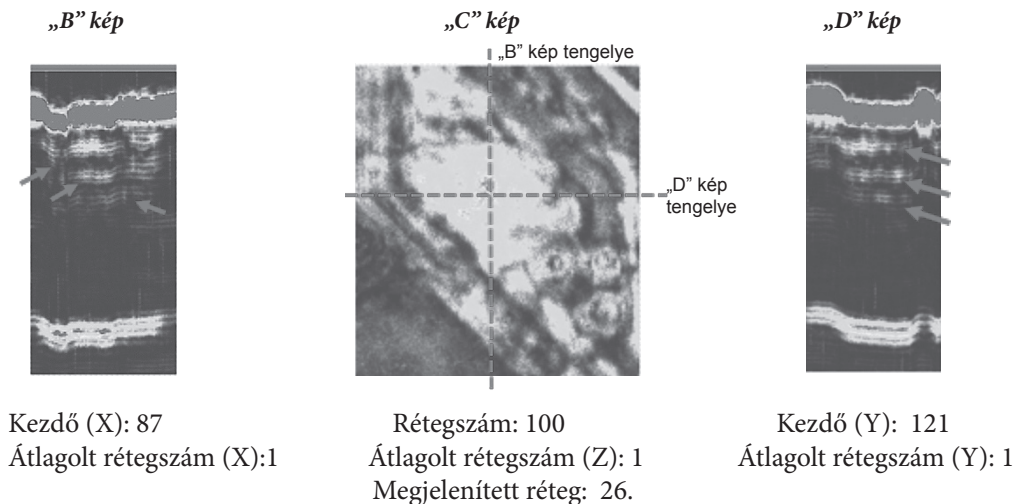


33. ábra. Indikációk megjelenése hőkezelés után az „A” terület alatt a lemez belsejében 0,1x0,1mm-es felbontásban

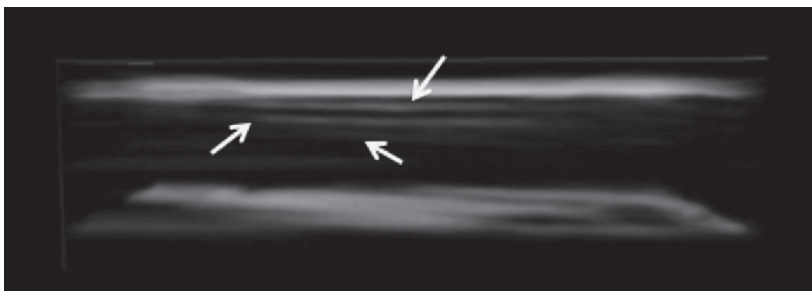


A felbontást 0,05x0,05mm-re megnövelve és a vizsgálati területet szűkítve további részletek mutat-
hatók ki az indikációk kiterjedéséről és mélységéről, ahogy azt a 34. ábra szemlélteti. A 35. ábrán a 3D-s
modell látható.

34. ábra. Az indikáció kiterjedése és mélysége



35. ábra. Indikációk a NYÁKlemez belsejében 0,05x0,05mm-es felbontásban



A vizsgálatok folyamatban vannak, de összességében megállapíthatjuk, hogy képesek vagyunk kimu-
tatni egyrétegű NYÁKlemez delaminációs hibáit.

Összefoglalás

3/A. MAGNETOAKUSZTIKUS RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

- Létrehoztuk a magnetoakusztikus vizsgálóberendezést, adatgyűjtő-, adatfeldolgozó szoftverét, mellyel képesek vagyunk forgó mágneses mezőben lemezmintákat vizsgálni és akusztikus emissziót detektálni.
- Képesek vagyunk anizotrópiát kimutatni hengerelt acéllemezekben.
- Vékony lemezek hegesztési varrataiban keletkező anyagfolytonossági hiányainak vizsgálata során sikerült különbségeket kimutatni „jó” és „rossz” minősítésű varratok között.
- A módszert a MAID Lab-ban, laboratóriumi vizsgálatok végzésére tervezzük bevezetni, amelyet anizotrópia kimutatására alkalmazott más elven működő vizsgálati módszer validálására is alkalmazhatunk.
- Új kutatási irány, alumíniumlemez textúravizsgálata: az eredmények alapján képesek vagyunk ötvözetlen és ötvözött alumíniumlemez textúráját kimutatni, de további vizsgálatokat végzünk, hogy melyek azok az ötvözetek, amelyeken a magnetoakusztikus módszer sikeresen alkalmazható.

3/B. PÁSZTÁZÓ RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK TOVÁBBFEJLESZTÉSE LABVIEW PROGRAMOZÁSSAL

Pásztázó örvényáramos vizsgálatok:

- Elkészült a pásztázó örvényáramos berendezés, melyet a vezérlőszoftver megfelelően működtet.
- A pásztázó próbák sikeresen lezajlottak, a vizsgálatok és az eredmények reprodukálhatók.
- Képesek vagyunk kimutatni hegesztési varratokban keletkezett repedéseket.
- Méréseket végzünk hegesztési varratok belső zárványainak kimutatására.

Pásztázó ultrahangos vizsgálatok:

- Elkészült a pásztázó ultrahangos vizsgálófejjel felszerelt akusztikus mikroszkóp prototípusa. Megtörtént a vezérlőszoftver kifejlesztése, tesztelése, hibáinak kijavítása és az első próbavizsgálatok.

Célunk, a berendezés kezelésének, a vizsgálatok végzésének, az eredmények kiértékelésének és a program felépítésének egyszerűsítése.

- Az új pásztázó akusztikus mikroszkóp képes fémfelületek közötti „légrés” kimutatására 50 MHz-es vizsgálófejjel, bevonattal ellátott fémlemez vizsgálatára (makrodelamináció), valamint mikrochip belső struktúrájának megjelenítésére.

LabView-család integrálása:

- A LabView-család sikeresen integrálódott a szoftverfejlesztésbe. Minden általunk kifejlesztett vezérlő-, adatfeldolgozó- és vizuális megjelenítő szoftver ebben a környezetben került programozásra.

parti növények nehézfém- akkumulációjának meghatározása a vízi üledékekben

Összefoglalást: A talajok, a folyóvízi és ipari iszapok toxikuselem-tartalmának csökkentésére, visszanyerésére, a területek remediálására napjainkban már többfajta kémiai, fizikai és biológiai módszer ismert. A biológiai módszerek egyike a fitoremediáció, amely során különféle növényfajokat/fajtákat alkalmazunk azért, hogy az elszennyeződött talajokban, folyóvízi üledékekben határérték alá csökkentsük a toxikus összetevők mennyiségét. Sokféle fitoremediációs folyamat ismert, úgymint a fito-extrakció, fito-volatilizáció, fito-filtráció, fito-stabilizáció, fito-degradáció. Kutatásaink során fő célunk az volt, hogy megállapítsuk a dunai iszapon gyökerező vízinnövények nehézfém-akkumulációs képességét, fitoextrakciós potenciálját. A folyóvízi környezetben élő növények közül feketéllő farkasfogat (*Bidens frondosa* L.), vízi mentát (*Mentha aquatica* L.), vízi hídört (*Alisma plantago-aquatica* L.), réti lósóskát (*Rumex obtusifolius* L.), baracklevelű keserűfűt (*Persicaria maculosa* L.), és parti sást (*Carex riparia* L.) választottunk ki tesztnövényként. Eredményeink alapján megállapítható, hogy a vizsgált növényfajok közül a réti lósóskában halmozódott fel a legtöbb króm, réz és cink, míg a vízi menta akkumulálta legjobb hatékonysággal az ólmot, és a nikkelt.

Kulcsszavak: Iszapos üledék; fitoextrakció; nehézfém; akkumuláció; bioremediáció.

Abstract: It is well known that several chemical, physical and biological methods are known for the reduction and recovery of the potential toxic elements of soils, river sediments and industrial sludges. One of the biological methods is phytoremediation, in which various plant species/varieties are used in order to reduce the concentration of toxic components in contaminated soils/sludges or river sediments. Many types of phytoremediation processes are used, such as phytoextraction, phytovolatilization, phytofiltration, phytosta-

* Dunaújvárosi Egyetem
E-mail: kovacsbe@uniduna.hu

** Dunaújvárosi Egyetem
E-mail: kisse@uniduna.hu

[1] Erdei László
(2015): Fito(bio)
remediáció. Szeged:
JATEPress.

bilization and phytodegradation. The main aim of our research was to determine the heavy metal accumulation capacity and phytoextraction potential of aquatic plants rooted in the Danube sediment. Among the plants devil's beggartick (*Bidens frondosa* L.), water mint (*Mentha aquatica* L.), European water-plantain (*Alisma plantago-aquatica* L.), parella (*Rumex obtusifolius* L.), bistort (*Persicaria maculos* L.) and riparian sedges (*Carex riparia* L.) were selected as test plants. Based on our results, it can be concluded that most of chromium, copper and zinc accumulated in parella, while water mint accumulated lead and nickel with the best efficiency.

Keywords: Muddy sediment; phytoextraction; heavy metals; accumulation; bioremediation.

Bevezetés

A Duna Európa és hazánk egyik legnagyobb folyója, amely fontos ipari, logisztikai és turisztikai értékkel bír, mindamelllett ártereivel és holtágaival jelentős ökológiai értéket is képvisel. Az elmúlt évtizedek intenzív ipari és kommunális szennyezése azonban a vízminőségére kedvezőtlen hatást gyakorolt. Ennek következtében a vizes területek üledékében mind szerves (pl. fehérjék, zsírok, növényvédő szerek, kőolaj származékok), mind szervetlen (pl. nehézfémek, oldott sók, nitrogén- és foszforvegyületek) szennyezőanyagok rakódtak le. Utóbbi szennyezők között a legnagyobb környezeti kockázattal a nehézfémek bírnak. Nehézfémeknek általában az 5 g/cm^3 -nél nagyobb sűrűségű fémeket és ötvözeiteket szokták nevezni. Ilyen fémek például a higany, a kadmium, az ólom, vagy a nikkel és a króm. Ezek erősen mérgezőek, sok enzimre gátló hatásúak. A nehézfémek között számos olyan ún. esszenciális elem is található (réz, cink), amelyek kis koncentrációban a növények fejlődésére jótékony hatást gyakorolnak, de feldúsulásuk esetén a növényekben toxikus tüneteket okozhatnak [1]. A nehézfémek legnagyobb veszélye abban rejlik, hogy képesek felhalmozódni a táplálékláncban. Az élő szervezetben ezután kifejtik mutagén, karcinogén, vagy toxikus hatásukat, különféle megbetegedéseket okozva.

A folyóvízi iszapok, vagy talajok szennyezettségének csökkentésére napjainkban többféle remediációs módszer ismert. A *remediálás* egy terület megjavítását, meggyógyítását, jelenti, a latin *remedium* = gyógyszer, orvosság, orvoslás kifejezés alapján. A remediáció az a tevékenység, amikor a talajt vagy az iszapokban találha-

tó szennyező anyagok mennyiségét határérték alá csökkentjük. Egy terület remediálását végezhetjük a helyszínen in-situ, és a helyszíntől eltérő helyen ex-situ módon [2].

A kémiai és fizikai módszerek nagy előnye, hogy gyorsak és hatékonyak, hátrányuk viszont, hogy többnyire nagyon költségesek. Főként a pontszerű vagy tudatos, ipari eredetű szennyeződések eltávolítására alkalmazzuk őket [1]. A legfontosabb kémiai-fizikai módszerek közé tartozik például a talajlevegőztetés, a talajmosás (extrakció), a stabilizálási/szilárdítási módszerek, az elszigetelés. Ezek kombinálhatók a termikus eljárásokkal [3, 4]

Ha a szennyezés diffúz, vagy nagyobb kiterjedésű, akkor inkább a bioremediációt alkalmazzák. A bioremediációnak két fajtája ismert.

Az egyik, amikor a talajban lévő, vagy oda bejuttatott mikroorganizmusokat alkalmazzák a szennyezők megkötésére, eltávolítására. A másikonál a nagy, hatékony potenciállal rendelkező növényfajok/fajták fitoremediációs képességét használják fel.

A fitoremediáció in-situ biológiai kezelési technológia. Ilyenkor a szerves vagy szervetlen szennyező anyagok eltávolítása, átalakítása vagy megkötése növények segítségével történik. A folyamat végén betakarított növényeket ellenőrzött körülmények között tovább kezelik. A fémekkel szennyezett biomassza tömeget komposztálással lehet csökkenteni, ilyenkor a szennyezett biomasszát visszajuttatják mikroelemekben szegény talajokba. Másik megoldás, hogy a biomasszát elégetik. A keletkezett hamut vagy veszélyeshulladéklerakókban deponálják, vagy – ha az egyes összetevő koncentrációja elég nagy – ez a hamuból visszanyerhető.

A fitoremediációs módszerek előnyei: környezetbarát, nem terheljük a környezetet veszélyes anyagokkal (pl. oldószerek), kisebb költségeket jelent, továbbá az eljárás végén a növényi anyag elégetése után visszamaradt hamuból egyes szennyező anyagok (pl. nikkel) visszanyerhetőek. Hátrányai, hogy időigényes folyamat, továbbá a növények nem vesznek fel, vagy nem bontanak le egyes összetevőket, valamint az eljárás során a növényeket gondozni kell (tápanyagokkal, vízzel kell őket ellátni) [1, 2, 5].

A fitoremediáció a szennyezőanyag és az elérendő cél szempontjából lehet: fitostabilizáció, fitodegradáció, fitoextrakció, rizofiltráció [3].

[2] Perei Katalin–Pernyeszi Tímea–Lakatos Gyula (2013): *Bioremediáció*. Szegedi Tudományegyetem–Debreceni Tudományegyetem–Pécsi Tudományegyetem. (https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0025_kor_4/ch01.html)

[3] Gruiz Katalin: *Talajremediáció. – A természetes szennyezőanyag-csökkenési folyamatok felhasználására és intenzifikálására alkalmas technológiák áttekintése*. (https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz_0.pdf)

[4] Papp Zoltán (1997): *A talaj és védelme*. Győr: Széchenyi István Főiskola. (http://www.sze.hu/~radicsa/TALAJVEDELEM/TALAJVEDELEM_1.pdf)

[5] Simon László (2004): *Fitoremediáció. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318*. Budapest: BMKE–OMIKK. Pp. 1–59.

[3] Gruiz Katalin:
*Talajremediáció.
– A természetes
szennyezőanyag-
csökkenési folyamatok
felhasználására és
intenzifikálására alkal-
mas technológiák át-
tekintése.* ([https://enfo.
hu/sites/default/files/
NA%C3%A9sremed
gruiz_0.pdf](https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz_0.pdf))

[5] Simon László
(2004): *Fítore-
mediáció. Környezet-
védelmi Füzetek.*
Azonosító: 2318.
Budapest: BMKE–
OMIKK. Pp. 1–59.

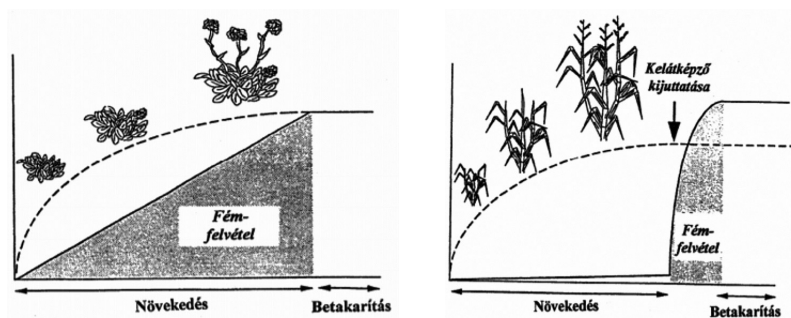
Fitostabilizáció során különböző adalékanyagokkal kezelik a szennyezett közeget, majd pl. toxikus fémeket tűrő növényekből álló takaróréteget hoznak rajta létre, amely a fizikai jelenlétével megakadályozza a szennyezőanyag talajba, levegőbe, felszíni, vagy felszín alatti vízbe jutását (csökkenti az eróziót és a kioldást). Ilyenkor nem a szennyező anyag kivonása, elszállítása, hanem annak megkötése, immobilizálása a cél [3], [5].

Fitodegradáció során a növény maga vagy gyökerének mikroflórája teljesen elbontja, mineralizálja, mobilizálja (illékonyá teszi, pl. higany) vagy csökkent kockázatú anyaggá alakítja a biodegradálható vegyi anyagokat. Szennyezett talaj vagy szennyezett víz (élőgép) kezelésére alkalmazható [3].

Fitoextrakció során magasabb rendű növényeket (pl. gyorsan növő, nagy biomasszát adó fajok, pl. nyárfa, fűzfa) alkalmaznak a toxikus elemekkel szennyezett talajok megtisztítására. Ebben az esetben speciális, a fémek hiperakkumulációjára képes növényekkel vonják ki a nehézfémeket a talajból. Hiperakkumulációról akkor beszélhetünk, ha a fémkoncentráció mértéke a növény adott szervében meghaladja az 1000 mg/kg szárazanyag-értéket. A hiperakkumulátor növényeknél a hajtás/gyökér fémkoncentrációjának aránya (transzlokációs faktor, TF) általában >1. Ilyen, hiperakkumulációra képes európai növényfajok például a ternye (*Alyssum*) és a tarsóka (*Thlaspi*) fajok. A kivonás történhet folyamatos *fitoextrakcióval* (1/a ábra), amely során főként hiperakkumulátor növényfajtákat telepítenek a szennyezett területre, amelyek növekedésük során folyamatosan vonják ki a szennyező anyagokat a talajból, iszapból.

Ezeket elsősorban felső-, hajtás-részeikben halmozzák fel. A fitoextrakció másik fajtája az indukált fitoextrakció, amely során kelátképzők talajba juttatásával teszik a fémeket könnyen felvehetővé nagy biomasszát képező növényfajok számára (1/b ábra). A szennyeződések a folyamat során a talajból, iszapokból a növények felső, föld feletti szerveibe (szárába, levelébe, termésébe), vagy a gyökérzetbe helyeződnek át. A szennyezett biomasszát, mint veszélyes hulladékot ezután ellenőrzött körülmények között feldolgozzák, vagy a szennyezőt égetés után a hamuból visszanyerik [5].

1. ábra. A fitoextrakció fajtái: a. folyamatos fitoextrakció, b. indukált fitoextrakció [5]



Rizofiltráció során a fémeket (pl. ólom), és radionuklidokat a szennyezett vízből növényi gyökerek segítségével távolítják el. Erre elsősorban azok a növényfajok alkalmasak, amelyek nagy gyökértömeggel, gyökérfelülettel rendelkeznek és viszonylag kevés fémet szállítanak át a gyökereik a hajtásba. A növényeknek ezen kívül akár napokig is el kell tudni viselni egyes fémek nagy koncentrációját a vízben. A fémeket, illetve a radionuklidokat a gyökerek megkötik, felhalmozzák vagy kicsapják. A hazai növényfajták közül ilyen eljárásra leginkább alkalmas a napraforgó, amelynek speciális rizofiltrációs rendszere akár 50 g szárazanyagot képez négyzetméterenként, ami 1,5 kg szárazanyag/m²-nek felel meg havonta. [6].

A fitovolatilizáció jelentése: fito = növény, volatizáció = illékonytétel. A folyamat során a növények illékonyt teszik a talajban, üledékben, vízben lévő szennyező anyagokat (pl. szelént, higanyt, arzént). A növényekben lezajló élettani, biokémiai folyamatoknak köszönhetően a higany (Hg) illékony elemi formájává, vagy illékony, kevésbé toxikus metil- vagy dimetil-vegyületté alakul át, hasonlóan, más, toxikus fémekhez (Se, As). A fenti illékony vegyületek a levegő közvetítésével távolabbra szállíthatók, így a szennyező koncentrációja az adott közegben csökken [5].

[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Duna-újváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Duna-újváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

Célkitűzések

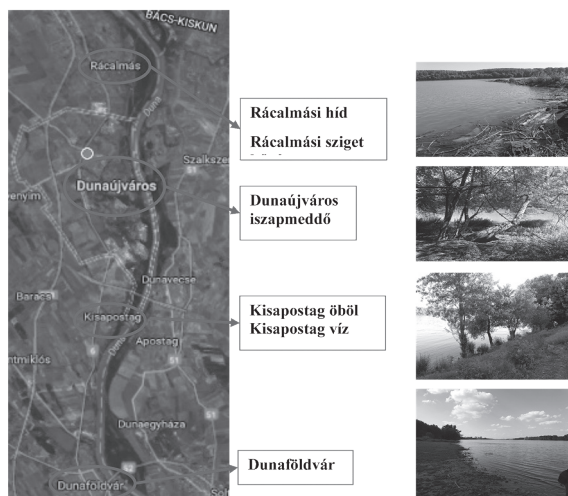
A kapcsolódó szakirodalmak áttanulmányozása után elsőként a célterületet jelöltük ki, ahonnan be tudtuk gyűjteni a kutatásunk fókuszát jelentő folyóvízi iszapokat és az azokban gyökerező növényfajokat.

Kutatásunk során egyik célunk volt a dunai iszapos üledékek toxikusságának és nehézfém-tartalmának meghatározása a folyó dunaújvárosi szakaszán, valamint a kapott fém-koncentrációk összehasonlítása a 6/2009 (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet a földtani közeg és a felszín alatti víz szennyezéssel szembeni védelméhez szükséges határértékekről és a szennyezések méréséről adott mellékletében található határértékekkel. További célunk volt a kijelölt mintavételi területeken olyan növényfajok keresése, amelyek fitoextrakciós potenciálja megfelelő az üledékben lévő fémszennyezések csökkentésére. Ezen kívül vizsgálataink kiterjedtek a nehézfémek növényen belüli akkumulációs helyének (gyökér, szár, levél, virág) meghatározására is. A kapott eredményekből kiszámítottuk a nehézfémek üledékből történő bioakkumulációs és transzlokációs faktorszámait is annak érdekében, hogy kiválaszthassuk, hogy az ilyen jellegű szennyezettséggel rendelkező iszapok esetén melyik tesztnövény a legalkalmasabb a fitoremediációra.

Mintavételi helyszínek bemutatása

Mintavételi helyszíneinket a Duna partvonalát követve több városban jelöltük ki Rácalmástól Dunaföldvárig (2. ábra). Rácalmásan két helyről, a Rácalmási híd lábánál és a 2. kőgátnál vettünk üledékmintákat. Dunaújvárosban a 2009-ben, a Szabadstrand iszapjából kialakított iszapmeddőről gyűjtöttük be mintáinkat. Kisapostagon a régi hajóállomás környékén jelöltünk ki négy helyszínt. Dunaföldváron, a Duna partján, a híd feletti, északi részről gyűjtöttük be az üledéket [7].

2. ábra. A mintavételi helyszínek bemutatása



[8] Milinki É. (2013): *Ökotoxikológia és környezetvédelem*. Retrieved from https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038_03_milinki_hu/ar01s06.html

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíránövény gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt*. http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nyek%20laborleirat_2014.pdf

Aanyag és módszer

a. Csíránövény-teszt bemutatása az iszapok toxikusságának meghatározására

A csíránövény-tesztek során a csírázó magvak érzékenységét használják fel szennyezett vizek, vagy veszélyes hulladékok elhelyezhetőségének megítélésénél. A teszt előnye, hogy a vizsgálathoz felhasználható magok könnyen tárolhatók és az év folyamán bármikor beszerezhetők [8]. Több szárazföldi növényfaj/fajta is alkalmas talaj, üledék és vízminták környezet toxikológiai vizsgálatára. A közös ezekben a növényekben, hogy csírázásuk és növekedésük gátolt, ha toxikus anyaggal kerülnek kapcsolatba. A toxikus hatás a csírázóképeség gátlása vagy a gyökér- és szárhosszak mérése alapján becsülhető meg. Erre alkalmazható tesztnövény például a kerti zsázza, a fehér mustár és a közönséges búza [9].

A csíránövény-teszt során leggyakrabban fehér mustármagot (*Sinapis alba*) alkalmaznak. Ez a növény a szennyezőanyagok széles skálájára érzékeny, ezért számos

[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Dunaújváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

[8] Milinki É. (2013): *Ökotoxikológia és környezetvédelem*. Retrieved from https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038_03_milinki_hu/ar01s06.html

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíránövény gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt*. http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6vény%C3%A9rtelmez%C3%A9s%20laborleirat_2014.pdf

ökotoxikológiai tesztnél alkalmazható [8]. A fehér mustár a káposztafélék vagy más néven keresztesvirágúak (Brassicaceae) családjába tartozik. Egynyári, elágazó szárú növény, lomblevelei 10 cm hosszúak, nyelesek és karélyosak, sárga virágai bogernyőben állnak. Toktermése 4 cm hosszú. A növény magjai aprók (kb. 1 mm-esek), gömbölyűek, sárgák vagy világosbarnák; az ízük enyhén csípős [9].

A csíránövény-teszt pontos leírását az MSZ 21 976-17: 1993 szabvány tartalmazza. A folyóvízi üledékeket a teszt előtt előkezeltük, azaz szárítottuk és porítottuk. A bennük található szerves részeket (gyökerek, vízi élőlények vázai) eltávolítottuk. A megfelelő nedvességtartalom beállítása és a magok bekerülése után a csíráztatás 20°C hőmérsékleten, sötétben történt meg 72 órán keresztül. A teszt végén a magok csíráztatását figyeljük meg, megszámoltuk a kicsírázott magok számát (db), illetve megmértük a hajtás és gyökérhosszakat (mm). A teszt lépéseit az 3. ábra mutatja be [7].

3. ábra. A csíránövény teszt lépései



Mintavételi módszer

A mintavételek során a folyóvízi üledékeket a Duna partjáról gyűjtöttük be, az iszapréteg felső 0–10 cm felső rétegből vettünk 5–5 db mintát, a kijelölt terület: 1 m² volt minden helyszínen. A tesztnövények esetén helyszínenként 5–5 mintát gyűjtöttük be 1 m² területről.

Vizsgált növényfajok

A négy mintavételi helyről az alábbi vízparti növényeket gyűjtöttük be, mint teszt-növényt:



Vízhi hídőr
(*Alisma plantago-aquatica*);



Vízhi menta
(*Mentha aquatica*);



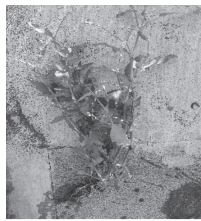
Feketéllő farkasfog
(*Bidens frondosa*)



Parti sás
(*Carex riparia L.*);



Réti lósóska
(*Rumex obtusifolius L.*),



Baracklevelű keserűfű
(*Persicaria maculosa L.*)

[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

Nehézfém-tartalom feltárása iszapokból

Az üledékek nehézfém-tartalmát MSZ 12739/4-78 szabvány szerinti, salétromsavas hidrogén-peroxidos feltárással határoztuk meg (4. ábra). Ennek során a tömegállandóságig szárított üledékmintákat rotációs bepárlóban (Heidolph Laborota 400) és mikrohullámú roncsolóban (CEM Mars 6) tártuk fel tömény salétromsavval (65%) és hidrogén-peroxiddal (35%), majd szűrés után a kapott szűrlet nehézfém-tartalmát atom-abszorpciós spektrométerrel (AAS, Perkin Elmer AAnalyst 400) és indukált plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES, Perkin Elmer Avio 500) mértük meg [6].

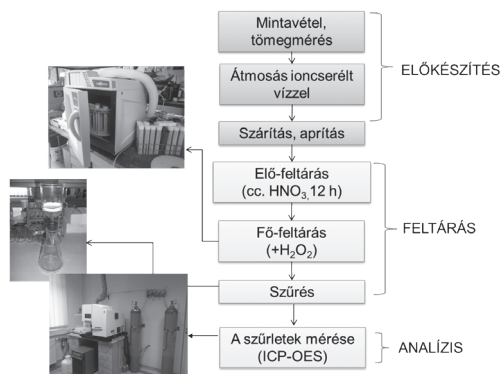
[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

4. ábra. A savas feltárás menete folyóvízi üledékek esetén



A növények nehézfém-tartalmának mérése előtt a begyűjtött növénymintákat feldaraboltuk. Főbb részeik szerint elkülönítettük a gyökerüket, szárukat, levelüket, virágukat (5. ábra). A növényi részeket ezután kiszárítottuk és felaprítottuk, majd tömény salétromsavval, és hidrogén-peroxiddal kezeltük. A mikrohullámú roncsolóban történő feltárás után a kapott szűrletek nehézfém-tartalmát szintén AAS és ICP-OES-készülékben mértük meg [6].

5. ábra. A savas feltárás menete növényminták esetén



A kapott mérési eredmények kiértékelésénél az iszapos üledékmintákat a „6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet mellékletének határértékeihez hasonlítottuk. A növényminták nehézfém-tartalmát a a kapcsolódó szakirodalomban szereplő átlagértékekhez viszonyítottuk [5.] [9].

[5] Simon László (2004): *Fitoreme-diáció*. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK. Pp. 1–59. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091

Kutatási eredmények bemutatása

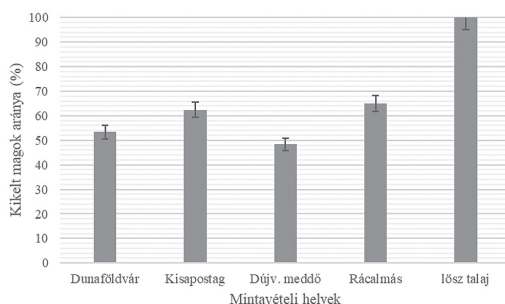
1. Csíranövény-tesztek eredményei [7]

A csíranövény-teszt során minden üledékminta esetén három sorozatot készítettünk el, és ezek átlagértékei alapján értékeltük ki a kapott eredményeket. Elsőként a kikelt magok számát határoztuk meg, majd kiszámítottuk ezek arányát az elvetett magok számához viszonyítva (6. ábra). A kapott eredmények alapján elmondható, hogy az elvetett magok 48–73%-ban csíráztak ki. A dunai iszapmeddőről és a Dunaföldváról gyűjtött üledékmintákon a csírázási képesség kisebb volt. A legjobb csírázási eredményeket a Rácalmásról és Kisapostagról gyűjtött minták mutatták. Átlagosan elmondható, hogy az elvetett magok több, mint 57%-a kicsírázott.

[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Dunaújváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíranövény gyökér- és szárnövekedésgátlási teszt*. http://info.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nyteszt%20laborleirat_2014.pdf

6. ábra. A kikelt magok számának aránya az elvetett magok számához viszonyítva

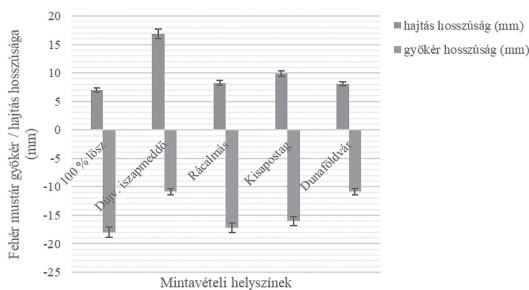


A 7. ábrán a kicsírázott fehér mustármagok átlagos hajtás- és gyökérhosszúságát (mm) mutatjuk be mintavételi helyszínenként.

[5] Simon László
(2004): *Fitoremediació. Környezet-
védelmi Füzetek.*
Azonosító: 2318.
Budapest: BMKE
OMIKK. Pp. 1–59.
ISBN:963 593 429 0,
ISSN 0866-6091

[10] Szegedi László
(2011): *Toxikus
nehézfém-szennyezés
utóhatásának vizsgálá-
sát barna erdőtalaj-
on.* (Doktori (PhD)
értekezés) Gödöllő:
SZIE.

7. ábra. A magok átlagos gyökér- és hajtáshosszúságai (mm)



Összegzésként megállapítottuk, hogy a négy mérőhely üledékmintáin az elvetett magok átlagosan 57%-osan csíráztak ki. Ha ezt összehasonlítjuk a kontroll-mintaként használt lósztalaj 100%-os csírázásával, akkor megállapítható, hogy az üledékekben található szennyező anyagok gátolták a fehér mustármagok csíráképességét.

A kicsírázott fehér mustármagok gyökér- és hajtáshosszait vizsgálva megállapítottuk, hogy a magok átlagos hajtáshosszai nagyobbak voltak, mint a kontrollé. Tehát itt serkentő hatást érzékelünk. Ezzel szemben az üledékminták átlagos gyökérhosszai kisebbek voltak, mint a kontroll eredmények. Tehát az üledékmintákban található szennyezőanyagok gátló hatása inkább a gyökérszét fejlődésére volt hatással.

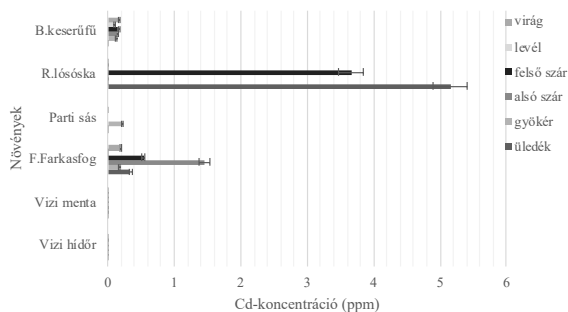
2. AZ ISZAPOK ÉS NÖVÉNYEK NEHÉZFÉM-TARTALMÁNAK ELEMZÉSE

a. Iszap és növényminták átlagos kadmium tartalma

A 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben meghatározott határérték kadmiumra 1 ppm. Ezt az értéket csak a lószka alatti üledékminta kadmiumtartalma haladta meg (8. ábra). A többi tesztnövény alól vett üledékmintában határérték alatti kadmium-koncentráció volt mérhető.

A növények közül a feketéllő farkasfog, lószka és keserűfű fő részeiből volt e szennyező a kimutatható. A kadmium a növények szárában dúsult fel legnagyobb mértékben. A farkasfog és lószka szárrészeiben mért koncentrációk meghaladták az ajánlott értéket (0,5 ppm) [5], [10].

8. ábra. Iszap- és növényminták átlagos kadmiumtartalma

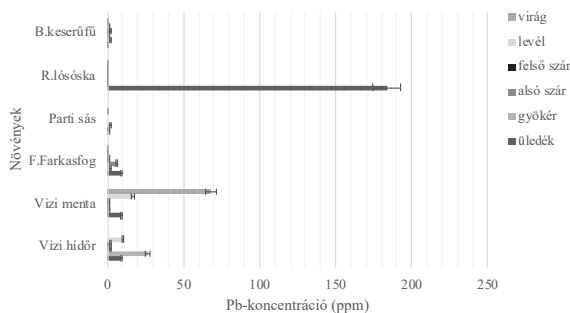


b. Ólomtartalom

A réti lósóska üledékét kivéve a többi teszt növény alatti iszapban mért ólomkoncentrációk a 6/2009 (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet határértéke (100 ppm) alatt maradtak (9. ábra).

A növényekben mérhető ólomkoncentráció ajánlott határértéke 30–300 ppm [5], [10]. A mért adatok a maximális értéket nem közelítették meg. A legnagyobb ólomkoncentrációk a vízi menta leveléből és virágjából, a vízi hídör gyökérzetéből volt kimutatható. A farkasfő, a sás és a keserűfű kevésbé volt képes akkumulálni ezt az elemet.

9. ábra. Iszap- és növényminták átlagos ólomtartalma



[5] Simon László (2004): *Fitoremediació. Környezetvédelmi Füzetek.* Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK. Pp. 1–59. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091

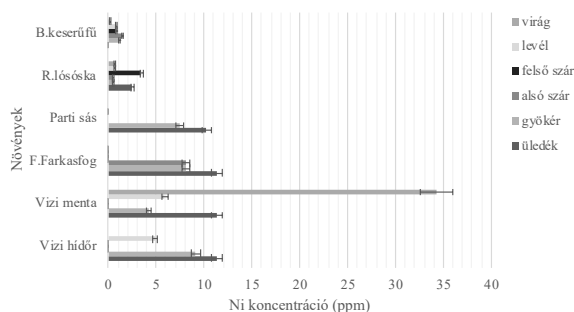
[10] Szegedi László (2011): *Toxikus nehézfém-szennyezés utóhatásának vizsgálata barna erdőtalajon.* (Doktori (PhD) értekezés) Gödöllő: SZIE.

c. Iszap- és növényminták átlagos nikkeltartalma

Az üledékek nikkeltartalma nem haladta meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (40 ppm). A parti sás, a farkasfog, a vízi menta és a vízi hídör üledékében mért nikkeltartalom közel megegyezett, a réti lósóska és a keserűfű alatti üledék nikkeltartalma fele ekkora volt (10. ábra).

A vizsgált növények részeiben mért nikkel koncentráció többnyire nem haladta meg a tűréshatárt (10–100 ppm) [5], [10]. A növények közül legnagyobb mértékben a vízi hídör, a vízi menta és a feketéllő farkasfog tudta a nikkelt akkumulálni. A maximális nikkeltartalom a menta virágjából volt kimutatható (77%). A parti sás csak a gyökérzetében tudta ezt az elemet felhalmozni, a leveleiből nem volt kimutatható. A réti lósóska és a keserűfű esetén a nikkel a növény minden részében megtalálható volt.

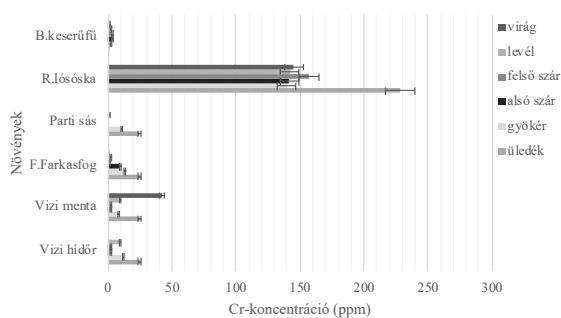
10. ábra. Iszap- és növényminták átlagos nikkeltartalma



d. Összkrómtartalom

Az üledékekben mért krómkoncentrációk csak a lósóska esetben haladták meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (75 ppm). A növényekben mért összkróm mennyisége többszörösen túllépte a növények számára tolerálható 1–10 ppm értéket (11. ábra) [5], [10]. A teszt növények közül legnagyobb mértékben a réti lósóska akkumulálta a krómot. Ez az összetevő az egész növényben egyenletesen halmozódott fel, 19–21%-os volt a megoszlás aránya a lósóska részei között.

11. ábra. Iszap- és növényminták átlagos összkroántartalma

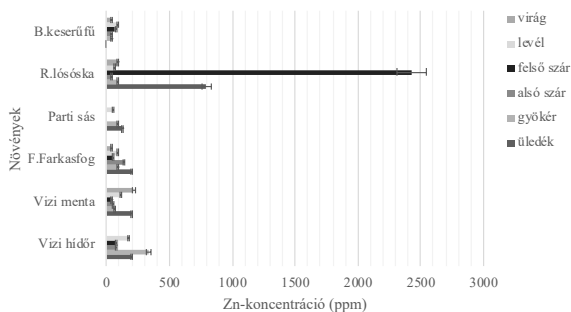


e. Cinktartalom

Az üledékmintákból kimutatott cinktartalom csak a lósoska esetén haladta meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (200 ppm).

A növények számára tolerálható értéket (250 ppm) a mért értékek csak a réti lósoskában lépték túl (12. ábra) [5], [10]. A cink, mint könnyen felvehető, esszenciális elem a teszt növényeken belül minden növényi részben akkumulálódott. Míg a vízi hídör és a parti sás esetében inkább a gyökérzetben halmozódott fel, a többi növényfaj esetében a felsőbb növényi részekből volt nagyobb arányban kimutatható.

12. ábra. Iszap- és növényminták átlagos cinktartalma



[11] Baker, A. J. M.–Brooks, R. R. (1989): Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1: Pp. 81–126.

[12] Lago-Vila, M.–Arenas-Lago, D.–Rodríguez-Seijo, A.–Andrade Couce, M. L.–Vega, F. A. (2015): Cobalt, chromium and nickel contents in soils and plants from a serpentinite quarry. *Solid Earth*. 6. Pp. 323–335.

3. A TESZTNÖVÉNYEK FITOEXTRAKCIÓS POTENCIÁLJÁNAK FAKTORSZÁMÍTÁSAI

1. BAF= Bioakkumulációs faktor

A bioakkumulációs faktor a növény föld feletti hajtásaiban (szár + levél + virág) és a folyóvízi üledékben található nehézfém-tartalom aránya [11], [12].

$$BAF = C_{\text{hajtás}} / C_{\text{üledék}}$$

1. táblázat. A teszt növények BAF-értékei

	BAF faktor					
	Vizi hídör	Vizi menta	F. farkasfog	P. sás	R. lósóska	B. keserűfű
Cd	-	-	-			
Cr	0.484	2.135	0.465	0.023	2.560	-
Pb	1.303	9.290	0.670	0.000	0.000	-
Ni	0.432	3.545	0.720	0.000	2.051	-
Zn	1.635	2.095	1.539	0.363	3.285	-

A hat teszt növény közül a legtöbb elemre a vízi menta BAF-értékei lettek a legnagyobbak (1. táblázat).

Általában elmondható, hogy a hiperakkumulátor-növények részeiben feldúsult összetevőkre nézve a BAF > 1.

2. TF=Transzlokációs faktor

A transzlokációs faktor a növény föld feletti hajtásában (szár + levél + virág) és a növény gyökerében mért nehézfém-koncentráció aránya [11], [12].

$$TF = C_{\text{hajtás}} / C_{\text{gyökér}}$$

2. táblázat. A tesztnövények TF-értékei

	TF faktor					
	Vízi hídőr	Vízi menta	F. farkasfog	P. sás	R. lósóska	B. keserűfű
Cd	-	0.000	12.254	0.000	-	4.192
Cr	1.043	6.964	0.861	0.054	4.195	4.514
Pb	0.457	103.528	5.934	0.000	-	1.732
Ni	0.535	9.537	1.011	0.000	10.731	2.719
Zn	0.966	6.689	3.342	0.554	30.112	5.325

A hat tesztnövény közül a vízi hídőr és a parti sás TF-értékei lettek a legkisebbek a vizsgált összetevőket nézve. A többi növényfaj hatékonyan tudta transzlokálni a szennyező anyagokat a gyökérzetéből a felsőbb növényi részek felé (2. táblázat).

Eredményeink alapján megállapítható, hogy a tesztnövények közül a kadmium felvételére leginkább alkalmas a feketéllő farkasfog és a baracklevelű keserűfű. Az ólmot a vízi hídőr és vízi menta tudta legnagyobb mértékben akkumulálni. A nikkel felvételére a leginkább alkalmas a vízi hídőr, a vízi menta és a feketéllő farkasfog. A réti lósóska volt a legalkalmasabb az összkrom felhalmozására. A cink felvételében a réti lósóska, és a vízi hídőr volt a leghatékonyabb.

A növényi részek és az üledékek nehézfém-tartalma alapján számított BAF-faktorok a vízi menta esetében voltak a legnagyobbak. (Ennél a növényfajnál a számított BAF-értékek >1 voltak.) A vizsgált elemek közül a legtöbbet a vízi menta, a keserűfű és a feketéllő farkasfog tudta transzlokálni a gyökérzetéből a felsőbb növényi részek (levél és virág) felé. A faktorszámítások eredményei szerint a tesztnövények közül a vízi menta rendelkezik a legjobb fitoextrakciós potenciállal.

Alakváltozású rugalmas problémák magasabb rendű peridinamikus modellezése

Összefoglalás: A műanyagból készült gépalkatrészek a gyártásuk és működésük során összetett mechanikai terhelésnek vannak kitéve. Ezen terhelések alatt az üregek és repedések képződhetnek és szaporodhatnak az alkatrészekben, csökkentve annak élettartamát. A repedéskeletkezés, -terjedés és -elágazás modellezése nehéz a klasszikus végelelem-modellezésben (FEM). A rugalmas-rideg testek törésmechanikai problémáira az Extended FEM és a háló nélküli módszerek eredményei adnak választ. A képlékeny anyagok és a nagy deformációk problémája még mindig nyitott a további kutatások számára. A felületre szerelt elektronikus eszközök (SMD) gyártásuk, illetve működésük során összetett termomechanikai terheléseknek vannak kitéve. Már a gyártás során is üregek és repedések keletkezhetnek a forrasztott kötésekben, valamint a rideg anyagokból készült alkatrészekben, például kerámia kondenzátorokban. A kezdeti károsodás káros hatással lehet a termék élettartamára. A repedés keletkezésének és terjedésének modellezése – a matematikai függvények szingularitása miatt – a klasszikus végelelem-modellezés során (FEM) nehéz. A probléma leküzdésére kibővített FEM (X-FEM) és háló nélküli módszereket fejlesztettek ki, ennek ellenére a repedések és repedések elágazásának termo-mechanikus modellezése továbbra is nyitott kérdés a kutatás számára. A peridinamikus kontinuum modellezés (PCM) célja a repedéskeletkezés, terjedésének és a törés folyamatának modellezése integrálegenletek segítségével. Az eredeti bond-based peridinamikában szakadásra képes rugókat képzelünk el a kontinuum összes anyagi pontpárja között, a fejlettebb, állapotalapú peridinamikus modellezésnél az anyagi pont környezetének alakváltozása határozza meg a pontra ható erőt. Munkánkban kidolgoztuk a kapcsolt termomechanikai probléma állapotalapú peridinamikai modelljét, és azt alkalmaztuk a repedések keletkezésének és terjedésének detektálására egy nyomtatott áramköri lap (PCB) forrasztást követő hűtése során.

* *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: ladanyi@uniduna.hu

** *Óbudai Egyetem, Budapest*
E-mail: gonda.viktor@bgk.uni-obuda.hu

A kutatás során az egyik kitűzött célunk egy repedéskeletkezés és terjedés leírására alkalmas megbízható és a korábbiaknál gyorsabb peridinamikusan megoldó létrehozása volt. A csomópontok létrehozása a feladatunk kitűzött egyszerű esettanulmányokban – köszönhetően az egyszerű geometriai kialakításnak – nem járt jelentős időszükséglettel. A későbbiekben, bonyolultabb geometriával rendelkező feladatok esetén itt még felmerülhetnek kérdések.

A peridinamikusan mozgás-, egyensúlyi vagy hővezetési egyenletek nemlokális természetűek, az egy tetszőlegesen kiválasztott anyagi pont gyorsulását/egyensúlyát vagy hőmérsékletét nem csak közvetlen, de véges távolságban lévő környezet is befolyásolja. A csomópontok peridinamikusan kapcsolatain az ezen a távolságon belül elhelyezkedő szomszédokat értjük.

Kulcsszavak: Repedéskeletkezés, Extended FEM és a háló nélküli módszerek, termomechanikai terhelések, X-FEM, peridinamikusan kontinuum modellezés, peridinamikusan mozgás.

Abstract: Machine components made of plastics are subjected to complex mechanical loads during manufacturing as well as during their service life. Under these loadings, voids and cracks can nucleate and propagate in components and can decrease the lifetime of the product.

Modelling of crack initiation, propagation and branching is difficult in classical finite element analysis (FEM). Nevertheless the quite new results of Extended FEM and meshless methods, for ductile materials and large deformations it is still open for further research.

Surface mounted electronic devices (SMD) are subjected to complex thermo-mechanical loads during manufacturing as well as during their service life. Even during manufacturing, voids and cracks can nucleate in soldered joints and also in components such as capacitors, made of brittle materials. An initial damage can have a detrimental effect on the lifetime of the product. Modelling of crack initiation and propagation is difficult in classical finite element analysis (FEM), due to the singularity of the mathematical functions in the differential analysis. Extended FEM (X-FEM) and meshless methods were developed to overcome these problems, nevertheless thermo-mechanical coupling of cracks and crack branching is still open for further research.

Peridynamic Continuum Modelling (PCM) is dedicated to solve the crack initiation, propagation and fracture by integral equations. In original bond-based peridynamics, tearable springs are defined between all the couples of material points of the continuum, while in a more advanced formulation as a state-based modelling, a force vector is defined as well. In this work, the state based peridynamic model of the coupled thermo-mechanical problem was developed, and applied to detect initiation and propagation of cracks during cooling of a printed circuit board (PCB) after SMD soldering in a wave soldering machine.

One of our goals in the research was to create a reliable and faster peridynamic solver suitable for describing crack formation and propagation. The creation of nodes in the simple case studies set out for the task –

thanks to the simple geometric design – did not require significant time. In the case of later tasks with more complex geometries, questions may still arise here.

Peridynamic equations of motion, equilibrium, or thermal conductivity are nonlocal in nature, and the acceleration / equilibrium or temperature of an arbitrarily selected material point is affected not only by a direct but also by a finite distance environment. Peridynamic connections of nodes are understood to mean neighbors located within this distance.

Keywords: Crack initiation, Extended FEM and meshless methods, thermo-mechanical loads, X-FEM, Peridynamic Continuum Modelling, Peridynamic equations.

Kutatás rövid ismertetése

A szilárd testek mechanikájának és általánosabban a fizika peremérték-feladatainak analitikus és numerikus (pl. végeelem, VEM-módszer) módszerei alkalmasak a mérnöki problémák nagy részének megoldására. Vannak azonban területek, melyeken napjainkig nem sikerült megnyugtató választ adni a felmerült kérdésekre. Ide tartoznak a nem folytonos megoldással rendelkező feladatok, mint pl. a repedés keletkezése és terjedése szilárd testekben. A nemlineáris viselkedésű szerkezetek esetén a felmerülő problémák halmozottan jelentkeznek. Mára világossá vált, hogy a sikertelenség oka kettős: egyrészt a probléma matematikai leírására alkalmazott eszközök – parciális differenciálegyenletek –, másrészt az ezek megoldására használt hagyományos numerikus módszerek – pl. VEM – is alkalmatlanok az ilyen típusú feladatok megoldására. A megjelent publikációk alapján a peridinamikus anyagmodell egyértelműen alkalmas szakadással rendelkező mezők leírására. Az alkalmazási területek köre igen széles: szilárd testek kis alakváltozásainak lineáris és nemlineáris problémái, hőterjedési feladatok, redukált feladatok (lemez/héj és rúdfeladatok), korróziós jelenségek leírása, stb.

Itt is vannak azonban nyitott kérdések és új területek:

- A peridinamikus modell paraméterének (anyagi rádiusz) optimális megválasztása.
- A peridinamikus pontok helyének hatása a numerikus tulajdonságokra.
- Az erősen nemlineáris feladatok statikus és dinamikus megoldása: nagy alakváltozások.
- Nemlineáris problémák és anyagi károsodás kapcsolása: kisciklusú fáradás.

A kutatás célja, hogy a mechanika nemlineáris peremérték feladatainak megoldására alkalmas – nem folytonos esetben is megbízhatóan működő – módszer kidolgozása. Vizsgáljuk az ún. peridinamikus modell nemlineáris feladatokra történő alkalmazhatóságát és a modell integrálegyenleteit.

Kutatási előzmények

A kutatás első periódusában tevékenységünket elsősorban a szakirodalomban található eredmények megismerésével és feldolgozásával töltöttük. Ennek során három fő területre koncentráltuk:

1. A szilárd testek nemlineáris mechanikai problémái.
2. A peridinamikus anyagmodellel kapcsolatos eddigi eredmények megismerése.
3. A grafikus kártyák általános célú programozásának megismerése.

Ebben a fejezetben a fenti három terület rövid ismertetésével foglalkozunk.

A SZILÁRD TEST MECHANIKÁJÁNAK NEMLINEÁRIS PROBLÉMÁI

A szilárd testek mechanikájának célkitűzése, hogy matematikai eszközökkel írja le a testeket érő külső mechanikai hatások (terhelések) és a testek alakváltozásainak (elmozdulások) kapcsolatát. A klasszikus mechanikában ez a leírás általában két módon történhet:

- A test belső pontjaira felírt differenciálegyenletek és a test és környezete közt lejátszódó kölcsönhatást leíró peremfeltételek segítségével történik. Ezt a megközelítést „erős formalizmusnak” nevezzük, mivel a megoldást jelentő függvényekkel kapcsolatban szigorúbb követelményeket – pl. kétszeres folytonos differenciálhatóság – támaszt.
- A test egészére felírt variációs vagy egyéb fizikai egyenlet, mely automatikusan teljesíti az előbb említett peremfeltételeket. Ezt a megközelítést „gyenge formalizmusnak” nevezzük, mivel a megoldást jelentő függvénnyel kapcsolatban „gyengébb” követelményeket – általában elegendő az egyszeres folytonos differenciálhatóság – támaszt.

Bizonyítható, hogy a kétféle formalizmus egyenértékű és egymásba alakítható.

A mechanikai problémák leírása általában a következő mennyiségek közti egyenletek felírásával történik:

- elmozdulás:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{X}, t): (\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}^3, \mathbf{X} \in V$$

- alakváltozási mérték (nyúlás): pl.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot (\boldsymbol{\nabla} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \boldsymbol{\nabla})$$

- mechanikai feszültség: pl.

$$\boldsymbol{\sigma} = 2 \cdot G \cdot \left(\boldsymbol{\varepsilon} + \frac{\nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \varepsilon_I \cdot \mathbf{E} \right)$$

A peremfeltételek klasszikus leírása általában

– a test peremén lévő pontok elmozdulásainak

$$\mathbf{u}(\mathbf{X}) = \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in S_u$$

– vagy felületi terhelésének

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{X}) = \mathbf{t}(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in S_\sigma$$

előírásával történik. (Megjegyzés: A fenti egyenletek a lineárisan rugalmas anyagú, homogén, izotrop test alakváltozását leíró egyenletek.)

A lineáris problémák közös jellemzője, hogy a külső hatások és az általuk okozott alakváltozások egyenesen arányosak. Matematikai szempontból ez azt jelenti, hogy a folyamatot leíró differenciálegyenletek lineáris típusúak és a peremfeltételek állandónak tekinthetők.

Mérnöki szempontból tekintve, könnyen belátható, hogy nincs olyan fizikai (mechanikai) folyamat, mely megfelelő pontossági igény esetén tökéletesen lineárisnak tekinthető. A lineáris modell a mérnöki feladatok megoldásának egy jól és általában könnyen kezelhető közelítése. Vannak azonban olyan területek, ahol a lineáris viselkedés feltételezése semmiképp sem elfogadható:

- nagy elmozdulások és/vagy alakváltozások,
- nemlineáris anyagi viselkedés,
- nemlineáris peremfeltételek.

A háromféle nemlineáris probléma kombinálódhat és megoldásuk a lineáris problémák megoldásánál sokkal nehezebb. Kutatásunkban az első problémakörre fókuszálunk, de a későbbiekben vizsgálatainkat valószínűleg kiterjesztjük a második kérdéskörre is.

A nemlineáris problémák megfogalmazása után általában két újabb kérdéssel szembesülünk:

1. Milyen módszerrel oldható meg a megfogalmazott peremérték-feladat?
2. Hogy igazolható, hogy a matematikai modell megoldása és a fizikai jelenség „közel van egymáshoz”?

A nemlineáris problémák megoldására általában nem létezik analitikus módszer, így ebből a szempontból a numerikus módszerek jelentősen felértékelődnek. Az alkalmazott matematikai eszköztár egyértelműen meghatározza a definiálható és megoldható fizikai problémák körét, nevezetesen a térben folytonosan változó megoldással rendelkező differenciálegyenleteket.

Az 1950-es évektől kezdődően a mai értelemben vett számítógépek megjelenésével lehetővé vált a matematika numerikus módszereinek alkalmazása e differenciálegyenletek megoldására. Az 1970-es évek közepére tisztázódott a végeselem-módszer matematikai háttere, így az elfogadottá válhatott a mérnöki – és általánosabban a fizikai – feladatok numerikus megoldására.

A számítógépek teljesítményének növekedésével lehetővé vált a bonyolultabb problémák kezelése:

- bonyolult geometriával rendelkező testek,
- nemlineáris problémák: geometriai-, anyagi-, peremfeltételek okozta (érintkezés) problémák,
- dinamikai problémák,
- nem mechanikai problémák megoldása.

Az 1980-es évek közepére világossá vált, hogy a végeselem-módszer – és az azzal konkurens, rendelkezésre álló egyéb módszerek – alkalmatlanok a nem folytonos (szakadós) megoldással rendelkező egyenletek megoldására. A problémát látszólag a közelítő megoldás hálófüggése, illetve a hálógenerálás időigényének jelentős növekedés okozta.

Az 1990-es évek közepén jelentek meg az első hálózást nem igénylő – hálómentes – módszerekről szóló publikációk. Szerzőik beszámoltak a különböző alternatív lehetőségek alkalmazhatóságáról és a felmerült kérdésekről:

- peremfeltételek kezelésének kérdései,
- konvergencia-kérdések,
- a végeselem-módszerhez képesti alacsony sebesség.

A PERIDINAMIKUS ANYAGMODELLEL KAPCSOLATOS EDDIGI EREDMÉNYEK MEGISMERÉSE

A hálómentes numerikus módszerek kutatása során kiderült, hogy alkalmazásuk csak részben vagy egyáltalán nem oldja meg a kifejlesztésüket motiváló problémákat. A VEM-nél tapasztalható kovergenciaproblémák kezelhetővé váltak, a repedések keletkezésével és terjedésével kapcsolatban azonban számos kérdés megválaszolatlan maradt. A kérdések háttérében mélyebb, kontinuum- (KM) és törés-mechanikai (TM) problémák állnak:

- A repedéscsúcs környezetében az elmozdulásmező parciális differenciálhányadosai nem értelmezhetőek, így a differenciálegyenletek érvényüket veszítik.
- Az erre megoldást jelentő nemlokális modellekben a repedéskeletkezés és terjedés feltételeinek megfogalmazása nehézkes, fizikailag nem megalapozott.

A 2000-es évek elején jelentek meg az első publikációk, melyek egy a klasszikus kontinuummechanikai megközelítéssel szakító leírást javasolnak. A módszer elnevezése peridinamikus anyagmodell lett. Az elnevezés az anyagi pontok közt értelmezett távolba ható erőkre utal.

Az új anyagmodell lehetővé teszi, hogy a mozgásegyenleteket differenciál- helyett integrálegyenletek segítségével fogalmazzuk meg. A beépítésre kerülő konstitutív egyenletek magukban hordozzák a károsodás és repedésterjedés leírásának lehetőségét.

A megjelent publikációk világossá tették, hogy a módszer alkalmas a KM és TM kérdéseinek megválaszolására. Ezek mellett azonban új problémák és kérdések fogalmazódtak meg:

- A módszer sebessége alacsony a KM módszereihez képest.
 - A mozgásegyenletek elsősorban dinamikai feladatok explicit megoldóinak alkalmazását tették lehetővé.
- A nemlineáris problémák kezelése – a fenti okokból kifolyólag – egyelőre váratott magára.

A GRAFIKUS KÁRTYÁK ÁLTALÁNOS CÉLÚ PROGRAMOZÁSÁNAK MEGISMERÉSE

A mechanikai feladatok numerikus megoldása hagyományos eszközökkel csak a legegyszerűbb esetekben megvalósítható. A feladatok mérete és bonyolultsága mind méretben, mind időben nagyon hamar meghaladja a papíron történő megoldhatóság határát. Már az 1950-es évek során kiderült, hogy a numerikus megoldási módszerek általában jól algoritmizálhatók, azaz viszonylag könnyű rájuk számítógépes programot írni.

A már említett végeelem-módszert kezdetben elsősorban építőmérnöki szerkezetek tervezési folyamatában az erőtanai számítások meggyorsítására alkalmazták.

A személyi számítógépek megjelenésével, fejlődésükkel sebességük, memória- és tárolókapacitásuk növekedésével a megoldható feladatok köre jelentősen kiszélesedett. Ezzel együtt az is elmondható, hogy a mérnöki igények is jelentősen megnöttek. Újabb és újabb kihívások jelentek meg a már meglévő hardver- és szoftverkörnyezetekkel szemben.

Megjegyzés: A kezdeti 1 dimenziós, lineárisan rugalmas statikus problémák helyett/mellett ma már általánosak a 3 dimenziós, tranziens, nemlineáris esetleg kapcsolttér-analízis feladatok (pl. folyadék-szilárdtest-kölcsönhatás modellezése).

A mérnöki feladatok numerikus megoldásának általában két tényező szab határt:

- a megoldásra rendelkezésre álló idő,
- az adatok kezelésére és tárolására rendelkezésre álló memória és háttértár.

Az előbbi gátat – az elsősorban multimédia alkalmazások igényeinek eleget tevő – a piacon megjelenő nagy kapacitású és olcsó memóriák és háttértárak ledönteni látszanak. A második akadály azonban még a ma már több GHz órajel-frekvencián működő processzorok ellenére sem tűnik legyőzöttnek.

Megjegyzés: Az Intel i8086 típusú 1978-ban kiadott processzora 5 MHz órajel-frekvencián működött.

Ennek oka elsősorban az, hogy a számítások elvégzése a számítógép egységei közt rengeteg kommunikációt tesz szükségessé, ez az adatáramlás pedig általában nagyságrendekkel kisebb sebességű, mint a processzoron belüli sebesség.

1. táblázat. Számítógépes memóriatípusok összehasonlítása

Memória típusa	Elérési idő	Adatátviteli sebesség
Regiszter	$\sim 100 \text{ psec}$	n/a
Gyorsítótár (CACHE)	$\sim 10 \text{ nsec}$	$\sim 100 \text{ Gbyte/sec}$
RAM	$\sim 500 \text{ nsec}$	$\sim 1 \text{ Gbyte/sec}$
Hálózati gyorsítótár	$\sim 50 \text{ } \mu\text{sec}$	n/a
SSD	$\sim 200 \text{ } \mu\text{sec}$	$\sim 25 \text{ Mbyte/sec}$
HDD	$\sim 20 \text{ } \mu\text{sec}$	$\sim 6 \text{ Mbyte/sec}$

A feladatok megoldásához szükséges idő csökkentésének több lehetősége is van:

- A processzorsebesség további növelése,
- Az adatátviteli sebesség növelése,
- A programokban egymástól független adatokon műveleteket végző algoritmusainak egyidejű futtatása: párhuzamosítás.

A processzorok sebessége fizikai okokból nem növelhető bizonyos érték fölé. Ezt a határt a jelenleg alkalmazott technológia lassan el is éri.

A következő lehetőség, hogy az algoritmusok ismeretében a szükséges adatokat jó előre a processzorhoz közel helyezzük el, így csökkentve a processzor várakozási idejét. Ezt a célt szolgálják a gyorsítótárak (CACHE-ek).

Az adatforgalom sebessége növelhető, ha az egyszerre mozgatott adatok mennyiségét növeljük. Az erre szolgáló megoldás a processzorok be- és kiviteli csatornájának szélesítése. A korábbi 8/16 bit helyett számítógépeinkben ma már 64 bites megoldások találhatók.

A párhuzamosításnak mára számos formája elterjedt:

- SISD-architektúra: Single Instruction Single Data,
- MIMD-architektúra: Multiple Instruction Multiple Data:

- Párhuzamosság a processzek szintjén: több független CPU (multicore).
- Párhuzamosság a szálak szintjén: több szál CPU-n belül (multithread).
- MISD-architektúra: Multiple Instruction Single Data (hibatűrő rendszerek),
- SIMD-architektúra: Single Instruction Multiple Data.

Ez utóbbi azt jelenti, hogy ugyanazt az utasítást vagy algoritmust egyszerre több adaton is végrehajtjuk. Ez a megközelítés bár gyökeresen eltér a hagyományos programok lineáris programfuttatási modelljétől, a numerikus módszerek jelentős részénél előnyösen alkalmazható és jelentős sebességnövekedést eredményez.

Az elmúlt időszak kutatási eredményei

A szilárd test peridinamikus modelljének matematikai leírása

Az elmúlt kutatási időszakban két fizikai probléma peridinamikus leírásának megfogalmazásával foglalkoztunk:

- A hőrugalmas test feladata [1],
- A szilárd test nagy alakváltozásokkal járó deformációjának feladata [2].

Az alábbiakban a fenti két témában elért eredményeinket ismertetjük.

[1] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Peridynamic modelling of crack initiation and propagation in thermo-mechanically loaded electronic devices. *EuroSimE* 2018. 15–18. 04. 2018. Toulouse, France.

[2] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

A HŐRUGALMAS TEST FELADATA

Lineárisan rugalmas anyagi viselkedést feltételezve a nyúlások és feszültségek közti összefüggést az általános Hooke-törvény írja le, míg a hőterjedés és a hőmérsékleti mező közti összefüggés a Fourier-törvény szerint alakul.

$$\begin{aligned}\sigma &= \mathbf{C} \cdot \varepsilon + \beta \cdot \theta \\ \varepsilon &= \frac{1}{2} \cdot (\nabla \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \nabla) \\ \mathbf{q} &= -\mathbf{k} \cdot \nabla \cdot \theta\end{aligned}$$

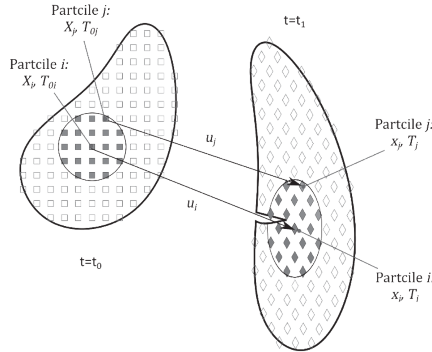
ahol σ , ε , θ és $\mathbf{q}$ a feszültség, fajlagos nyúlás, hőmérséklet és hőfluxus vektor. A szükséges anyagjellemzők a $\mathbf{C}$, β és $\mathbf{k}$ mennyiségek a rugalmassági, termikus és hővezetési tenzor.

A differenciál hányadosok – és így a gradiens – peridinamikus közelítését alkalmazva, a nyúlástenzor és hőfluxus a következő alakot ölti:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left[\int_{\mathcal{H}} \omega(|\mathbf{X}|) \cdot (\mathbf{U} \otimes \mathbf{X} + \mathbf{X} \otimes \mathbf{U}) dV_{X'} \right] \cdot \mathbf{K}_0 \right)$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \cdot \left[\int_{\mathcal{H}} \omega(|\mathbf{X}|) \cdot (\mathcal{T} \cdot \mathbf{X}) dV_{X'} \right] \cdot \mathbf{K}_0$$

1. ábra. A vizsgált pont peridinamikus környezetének értelmezése



A fenti összefüggésekben a következő jelölésekkel éltünk:

– a referencia-pozíció állapot:

$$\mathbf{X}_{ij} = \mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i$$

– az alaktenzor:

$$\mathbf{K}_i = \int_{\mathcal{H}_i} \mathbf{X}_{ij} \circ \mathbf{X}_{ij} d\mathbf{X}_j$$

– az elmozdulásállapot:

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i$$

– a hőmérsékleti állapot:

$$\mathcal{T}_{ij} = T_j - T_i$$

– a nyúlásállapot:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot \int_{\mathcal{H}_i} \omega(|\mathbf{X}|) \cdot (\mathbf{X} \circ \mathbf{u} + \mathbf{u} \circ \mathbf{X}) d\mathbf{X}_j \cdot \mathbf{K}^{-1}$$

- a hővektorállapot: $\mathbf{q} = -k \cdot \int_{\mathcal{H}_i} \omega(|\mathbf{X}|) \cdot \mathbf{X} \cdot \mathcal{T} d\mathbf{X}' \cdot \mathbf{K}^{-1}$
- az erőállapot: $\mathbf{T}_{ij} = \omega(|\mathbf{X}_{ij}|) \cdot \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{X}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$
- a hőfluxus-állapot: $Q_{ij} = \omega(|\mathbf{X}_{ij}|) \cdot \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{X}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$
- a mozgásegyenlet: $\varrho \cdot \ddot{\mathbf{u}}_i = \int_{\mathcal{H}_i} (\mathbf{T}_{ji} - \mathbf{T}_{ij}) d\mathbf{X}_j + \mathbf{b}_i$
- a hővezetés egyenlete: $\varrho \cdot c_V \cdot \dot{\Theta}_i = \int_{\mathcal{H}_i} (Q_{ji} - Q_{ij}) d\mathbf{X}_j + \boldsymbol{\beta} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i \cdot \Theta_{i0} + h_i$

A vizsgált test diszkretizálást követően az egyensúlyi és a hővezetési egyenlete a következő alakra hozható:

$$\mathbf{B}_j^{mech^T} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_j + \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{B}_j^{therm} \cdot \boldsymbol{\Theta}_j = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B}_j^{therm^T} \cdot \mathbf{Q}_j + \varrho \cdot s_j = 0$$

ahol

$$\mathbf{B}_i^{mech} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_1 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

$$\mathbf{B}_0 = \sum_{j=1}^n \mathbf{B}_j$$

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{K}_i \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & 0 & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} & 0 \\ 0 & \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \dots & 0 & \omega_{in} \cdot \Delta Y_{in} \\ \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta Y_{in} & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} \end{bmatrix}$$

és

$$\mathbf{B}_i^{therm} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_1 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

$$\mathbf{B}_0 = \sum_{j=1}^n \mathbf{B}_j$$

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{K}_i \cdot \begin{bmatrix} \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} \\ \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta Y_{in} \end{bmatrix}$$

[1] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Peridynamic modelling of crack initiation and propagation in thermo-mechanically loaded electronic devices. *EuroSimE* 2018. 15–18. 04. 2018. Toulouse, France.

[2] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

valamint

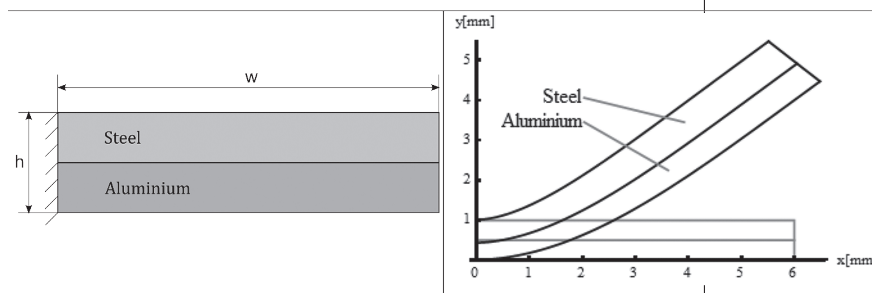
$$\Sigma_j = [\sigma_0^T = \sigma_j^T \quad \dots \quad \sigma_n^T]$$

$$Q_j = [q_0^T = q_j^T \quad \dots \quad q_n^T].$$

A fenti egyenletrendszer megoldását stacioner és tranziens hővezetés esetére is vizsgáltuk. Foglalkoztunk a megoldás konvergenciájának vizsgálatával. A peridinamikus sugár rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és az adott rsugárra jellemző értékhez tart. A szomszédos csomópontok számának rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és a klasszikus megoldáshoz tart.

Eredményeinket a [1] előadásban és a kapcsolódó konferenciakiadványban tettük közzé.

2. ábra. Bimetál hőtágulása: a peridinamikus modell alakváltozása



A szilárd test nagy alakváltozásokkal járó deformációjának feladata [2]

A nagy alakváltozásokkal járó mechanikai feladatok megoldása során általában a növekményes, azon belül pedig iterációs módszerek alkalmazása vált be. K. J. Bathe klasszikusnak tekinthető „Finite Element Procedures” című könyvében e módszerekkel szemben támasztott követelményekről az alábbiakat olvashatjuk:

- ...the correct calculation of $\mathbf{F}_{t+\Delta t}^{i-1}$ from $\mathbf{U}_{t+\Delta t}^{i-1}$ is crucial. Any errors in this calculation will, in general, result in an incorrect response prediction.
- ...the correct evaluation of tangent stiffness matrix $\mathbf{K}_{t+\Delta t}^{i-1}$ is also important. The use of the proper tangent stiffness matrix may be necessary for convergence and, in general, will result in fewer iteration until convergence is reached.

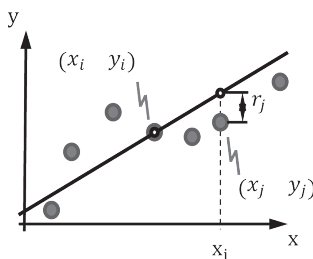
A fenti idézetek alapján tehát kijelenthetjük, hogy:

- akkor várhatunk pontos eredményeket a megoldótól, ha az elmozdulás-növekmények pontosan elő tudják állítani az alakváltozási gradiens növekményét,
- akkor várhatunk elvárható sebességű konvergenciát, ha az érintőmerevségi-mátrix előállítása szintén pontos.

Megvizsgáltuk, hogy az állapotalapú peridinamikus modell esetében a fenti követelmények teljesíthetők-e és arra az eredményre jutottunk, hogy a módszer nem alkalmas nagy, merevtestszerű elmozdulások pontos kiszámítására.

Bizonyítottuk, hogy ennek oka: Az állapotalapú peridinamikus modell által előállított differenciál hányadosok, így az alakváltozási gradiens is, a vizsgált pont környezetében lévő függvényértékek lineáris közelítésének meredekségével egyeznek meg. Nézzünk erre egy rövid magyarázatot!

3. ábra. A lineáris regressziós egyenes értelmezése



Az egyenes egyenlete egy x_i csomópont környezetében:

$$\tilde{y}_i(x) = y_i + a_1 \cdot \Delta x_{i,j}$$

Alakmazva az egyenletet az i . pont környezetében lévő $j=1..NP$ pontokra:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{i,1} \\ \Delta x_{i,2} \\ \vdots \\ \Delta x_{i,NP} \end{bmatrix} \cdot \{a_1\} = \begin{Bmatrix} y_1 - y_i \\ y_2 - y_i \\ \vdots \\ y_{NP} - y_i \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{a} = \Delta \mathbf{y}$$

Az így kapott túlhatározott lineáris egyenletrendszer legkisebb hibanégyzet megoldása:

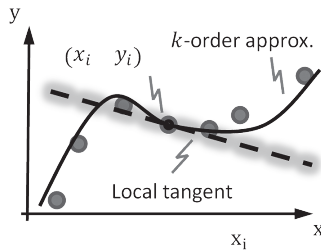
$$\mathbf{a} = (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \Delta \mathbf{y}$$

Ha a $p(x)$ polinom lineáris, a közelítő függvény első deriváltja megegyezik a derivált szokásos peridinamikus közeklítésével:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_i) = \mathbf{K}^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{NF} \omega_{i,j} \cdot \mathbf{x}_{i,j} \otimes \mathbf{x}_{i,j}$$

Korábbi, a hálómentes módszerekkel kapcsolatos, kutatási eredményeinkre támaszkodva bevezettünk egy a függvényértéket magasabb fokon közelítő és így pontosabb deriváltakat eredményező peridinamikus modellt.

4. ábra. A k -fokú regressziós polinom és lokális érintője



A lineáris helyett magasabb fokú közelítést alkalmazva

$$\tilde{y}_i(x) = y_i + \mathbf{p}(x - x_i) \cdot \mathbf{a}$$

ahol $p(x)$ egy tetszőleges fokszámú polinom bázis:

$$\mathbf{p}(x) = \{x, y, x^2, x \cdot y, y^2, x^3, x^3 \cdot y, x \cdot y^2, y^3, \dots\}$$

A polinom tagjainak együtthatói: $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots\}$

Az együtthatók és a függvény deriváltjainak x_i helyen felvett értéke közti kapcsolat bizonyíthatóan:

$$\mathbf{a} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}, 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}, \dots \right\}$$

A fenti eredményt alkalmazzuk a mechanikai feladatban szereplő egyenletek összeállítására!

- A csomópontok kezdeti koordinátáinak halmaza: $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \dots, \mathbf{X}_A, \mathbf{X}_{(A+1)}, \dots, \mathbf{X}_{NN}\}$
- A pillanatnyi koordináták halmaza: $\mathbf{x} = \{.. \}$.
- Az A csomópont családja: $\mathbf{X}_A: \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{A+1}\}$
- A család tagjainak száma: NN_A
- A polinom bázis: $\mathbf{p}(\mathbf{x}) = \{x, y, x^2, x \cdot y, \dots, y^{NP}\}$
- A csomóponti polinom mátrix:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(\mathbf{X}_{A1}) \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{A2}) \\ \vdots \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{ANNA}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_A) \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_A) \\ \vdots \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{ANNA} - \mathbf{X}_A) \end{bmatrix}$$

The complete differential operator:

$$\mathbf{D} = ((\mathbf{P})^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot (\mathbf{P})^T \cdot \mathbf{W}$$

Legyen az alakváltozási gradiens vektor: $\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{21} \\ F_{22} \end{Bmatrix}$

Az alakváltozási gradiens előállító mátrix:

$$\mathbf{V}_F = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{12} & 0 & \dots & \dots & D_{1NNA} & 0 \\ D_{21} & 0 & D_{22} & 0 & \dots & \dots & D_{2NNA} & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 & D_{12} & \dots & \dots & 0 & D_{1NNA} \\ 0 & D_{21} & 0 & D_{22} & \dots & \dots & 0 & D_{2NNA} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}^A = \mathbf{V}_F^A \cdot \mathbf{x}^A = \sum_{B=1}^{NNA} \mathbf{V}_F^{AB} \cdot (\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_A) \cdot \Delta V_B$$

[2] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

Legyen a feszültségvektor: $\mathbf{P}^T = \{P_{11} \ P_{22} \ P_{12}\}$

Legyen a feszültség-divergencia vektor: $DIV \mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_{11,1} + P_{21,2} \\ P_{12,1} + P_{22,2} \end{Bmatrix}$

A divergencia vektort előállító mátrix:

$$\nabla_{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{21} & 0 & D_{12} & 0 & D_{22} & 0 & \dots & D_{1N} & 0 & D_{2N} & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 & D_{21} & 0 & D_{12} & 0 & D_{22} & \dots & 0 & D_{1N} & 0 & D_{2N} \end{bmatrix}$$

$$DIV \mathbf{P} = \nabla_{\mathbf{P}}^A \cdot \mathcal{P} = \sum_{B=1}^{NNA} \nabla_{\mathbf{P}}^{AB} \cdot (\mathbf{P}(\mathbf{X}_B) - \mathbf{P}(\mathbf{X}_A)) \cdot \Delta V_B$$

A mozgásegyenlet a teljes Lagrange-formalizmusban megfogalmazva:

$$DIV \mathbf{P}(\mathbf{X}_A) + \mathbf{B}(\mathbf{X}_A) = \varrho \cdot \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{X}_A)$$

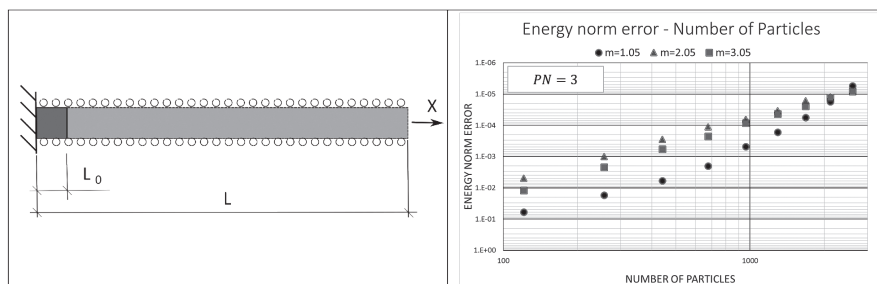
$$\sum_{B=1}^{NNA} \nabla_{\mathbf{P}}^{AB} \cdot (\mathbf{P}(\mathbf{X}_B) - \mathbf{P}(\mathbf{X}_A)) \cdot \Delta V_B + \mathbf{B}(\mathbf{X}_A) = \varrho \cdot \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{X}_A)$$

$$\nabla_{\mathbf{P}}^{AB} = \begin{bmatrix} D_{1B} & 0 & D_{2B} & 0 \\ 0 & D_{1B} & 0 & D_{2B} \end{bmatrix}$$

A fenti egyenletrendszer megoldását statikus feladatok esetében vizsgáltuk. Foglalkoztunk a megoldás konvergenciájának vizsgálatával. A $\mathcal{r}$ peridinamikus sugár rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és az adott $\mathcal{r}$ sugárra jellemző értékhez tart. A szomszédos csomópontok számának rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és a klasszikus megoldáshoz tart.

Eredményeinket a [2] előadásban és a kapcsolódó konferenciakiadványban tettük közzé.

5. ábra. Nagy (16-szoros) alakváltozásnak kitett lemez: a peridinamikus modell hibájának konvergenciája



[3] Ladányi, G.–Gonda, V. (2018): Development and application of P-adaptive peridynamics on large deformation hyperelasticity. *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*.

A NUMERIKUS FELADAT ELŐKÉSZÍTÉSÉNEK PROBLÉMÁJA

A számítások végrehajtása általában az alábbi forgatókönyv szerint zajlik:

1. Csomópontok létrehozása a testen belül és annak peremén.
2. A csomópontok peridinamikus kapcsolatainak összeállítása.
3. A mozgás/egyensúlyi vagy hővezetési egyenletrendszer felírása és
 - a. egy lépéses vagy
 - b. nemlineáris esetben többlépéses megoldása.
4. Az eredmények kiértékelése és a másodlagos eredmények kiszámítása.

A kutatás során az egyik kitűzött célunk egy megbízható és a korábbiaknál gyorsabb peridinamikus megoldó létrehozása volt.

A csomópontok létrehozása a feladatul kitűzött egyszerű esettanulmányokban – köszönhetően az egyszerű geometriai kialakításnak – nem járt jelentős időszükséglettel. A későbbiekben, bonyolultabb geometriával rendelkező feladatok esetén itt még felmerülhetnek kérdések.

A peridinamikus mozgás-, egyensúlyi- vagy hővezetési egyenletek nemlokális természetűek, az egy tetszőlegesen kiválasztott anyagi pont gyorsulását/egyensúlyát vagy hőmérsékletét nem csak közvetlen, de véges távolságban lévő környezet is befolyásolja. A csomópontok peridinamikus kapcsolatainak ezen a távolságon belül elhelyezkedő szomszédokat értjük.

Megmutattuk, hogy a peridinamikus megoldás minősége – pontossága és a számítások stabilitása – egyértelműen függ a csomópontok kapcsolatainak számától. [3]

A kapcsolatok összegyűjtésére számos algoritmus található a számítógépes grafikával (computational graphics) és a szemcsés halmazok (particle dynamics) mechanikájával kapcsolatos szakirodalomban. A peridinamikus kutatások egyelőre nem helyeztek erre túl nagy súlyt. A szomszédkeresés kétféle követelmény szerint lehetséges:

- az NN számú legközelebb lévő szomszédot keressük vagy
- az R sugarú körön/gömbön belül lévő szomszédot keressük.

A legelterjedtebb szomszédkereső algoritmusok:

Lineáris keresés

Az NNS-probléma legegyszerűbb megoldása az, ha kiszámítjuk a lekérdezési ponttól az adatbázis minden más pontjához való távolságot, nyomon követve az „eddig legjobbat”. Ennek az algoritmusnak, amelyet néha naiv megközelítésnek is neveznek, $O(kN)$ futási ideje van, ahol N az S halmaz elemeinek száma, és k az M tér dimenzionalitása. Nyilvánvaló, hogy nagy elemszám esetén a lineáris keresés lassú, viszont nincsenek fenntartandó keresési adatstruktúrák, valamint a naiv keresés akár felül is múlhatja a térfelosztási megközelítéseket a magasabb dimenziós tereken.

Térfelosztás

A térfelosztáson alapuló módszerek lényege, hogy a keresési halmazt, egy pontot kiválasztva és eltávolítva, két elkülönült térrészre osztják, majd a létrejött részhalmazokon rekurzív módon folytatják a felosztást, ezáltal egy bináris keresőfát hozva létre. Az NNS a keresőfa bejárásával valósul meg, összehasonlítva a keresési pontot az aktuális csomópontban tárolt értékkel. Az egyes módszerek az egyes térrészek elkülönítésének módjában különböznek egymástól (koordinátasíkokkal történő metszés, általános helyzetű síkokkal történő metszés, gömbalakú térrészek elkülönítése stb.)

Véletlenszerű eloszlásban adott pontok keresési halmazán a térfelosztási eljárások komplexitása $O(\log N)$, ami a lineáris keresésnél jóval kedvezőbb. A legrosszabb esetben a komplexitás $O(kN^{1-1/k})$.

Közelítő módszerek

Az előzőekben felsorolt módszerek az egzakt algoritmusok csoportjába tartoznak. A keresés eredménye a lekérdezési ponthoz ténylegesen legközelebbi pont. Mindazonáltal egyes algoritmusok teljesítménye romlik, ha az adatok dimenziószáma növekszik (curse of dimensionality). Így fordulhat elő, hogy a magas dimenziószerű rendszerekben a kifinomult algoritmusok nem teljesítenek jobban, mint a nyers erővel végrehajtott lineáris keresés.

Az NNS közelítő módszereinél a fő szempont a lekérdezés ideje és a pontosság közötti kompromisszum, melyet a megtalált pontnak az igazi legközelebbi ponttól vett távolságával, vagy az igazi legközelebbi pont megtalálásának valószínűségével lehet jellemezni. Többféle megközelítés létezik, és megvalósításukat széles körben használják a gyakorlati alkalmazásokban.

[3] Ladányi, G.–Gonda, V. (2018): Development and application of P-adaptive peridynamics on large deformation hyperelasticity. *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*.

A megfelelő algoritmus kiválasztása

A peridinamikus feladatok esetében jellemző a nagy elemszám, és a dimenziók viszonylag alacsony száma, lévén a két- vagy háromdimenziós euklideszi térről szó, ezért a közelítő módszerek alkalmazása nem indokolt. Ugyanezen szempontok alapján a lineáris keresés sem célszerű, hanem valamely térfelosztási módszer használata tűnik megfelelőnek. Választásunk az adatszerkezetek és az algoritmusok viszonylagos egyszerűsége okán a KD-tree adatszerkezetre esett.

Kutatásainkban összehasonlítottuk az alábbi algoritmusok alkalmazhatóságát és sebességét:

- naiv algoritmus CPU-n futtatva,
- K-d tree algoritmus CPU-n futtatva,
- Fast Clustering algoritmus CPU-n futtatva,
- K-NearestNeighbours algoritmus GPU-n futtatva.

Megmutattuk, hogy a csomópontok számától és kívánt kapcsolatok számától (NN) vagy a kívánt sugár (R) méretétől függően a CPU-alapú K-d tree vagy a GPU-alapú K-NearestNeighbours algoritmus a hatékonyabb. [3]

A KD-tree adatszerkezet

Az adatszerkezet leírása

A KD-tree (k-dimensional tree, k dimenziós fa) egy bináris térfelosztáson alapuló adatszerkezet a k-dimenziós térben lévő pontok rendezéséhez.

A KD-tree egy bináris fa, melynek csomópontjai k-dimenziós pontokat tárolnak. A nem-levél csomópontok implicit módon metszősíkokat (hipersíkokat) határoznak meg, melyek a teret két részre, félterekre osztják. A metszősík egyik (pozitív) oldalán található pontok a jobb alfában (subtree), míg a másik (negatív) oldali pontok a bal alfában tárolódnak. A metszősíkok tartalmazzák az adott csomópontban tárolt pontot. A metszősíkok orientációja olyan, hogy normálisuk mindig valamelyik koordinátatengely. A fa egy adott szintjén a metszősíkok normálisa megegyezik. A fa első szintjén a metszősík normálisa az x tengely, a következő szinten az y tengely, majd a z tengely és így tovább. A metszési orientációk ciklikusan követik egymást, tehát háromdimenziós esetben a fa negyedik szintjén ismét az x koordináták szerinti szétválasztás történik.

Tehát ha egy adott csomópontban az x tengely a szétválasztási tengely, valamennyi pont a csomópont-hoz tartozó alfában, melynek kisebb az x koordinátája, mint a csomópontban tárolt, a bal oldali alfában, a többi a jobb oldali alfában lesz található.

Műveletek a KD-tree adatszerkezeten

Létrehozás

Az adatszerkezet létrehozásakor többnyire megtörténik a teljes adatmennyiség (N db pont) feltöltése, melynek szokásos módja:

- A fában lefelé haladva ciklikusan váltogatjuk a felosztási síkokat.
- Az aktuális alfához tartozó csomópontba a ponthalmaz aktuális szintnek megfelelő koordinátaértékek szerinti mediánja kerül.
- A ponthalmaz mediánnál kisebb koordinátájú pontjai a bal oldali alfába kerülnek, a többi a jobb oldaliba.
- A bal és jobb oldali ponthalmazok felosztása rekurzív módon folytatódik, míg a felosztandó ponthalmaz számossága el nem éri az 1-et.

Ez a módszer kiegyensúlyozott fát eredményez, vagyis a bal- és jobboldali részfákban tárolt pontok száma megegyezik, ezáltal a fa mélysége minimális lesz.

A medián választása nem feltétlenül szükséges, de ekkor a fa nem lesz kiegyensúlyozott, sőt szélsőséges esetben – mikor az input pontok úgy érkeznek, hogy mindig a bal ágra (vagy mindig a jobbra) kerülnek – a fa láncolt listává fajulhat. A túl szabályosan érkező bemenő adatok kiküszöbölésének egy egyszerű módja azok előzetes összekeverése. Egyes implementációk néhány véletlenszerűen választott pontra végzik el a sorba rendezést, majd ezen pontok mediánját használják a metszősík meghatározására.

Egy alternatív algoritmus az adatok sorba rendezése a KD-tree felépítése előtt. Ha a fa felépítése közben megőrizzük az előre megállapított sorrendet, elkerülhető a felosztás minden szintjén elvégezni a költséges mediánkeresést. A sorba rendezést k esetben kell elvégezni, minden egyes dimenzióra.

Elem hozzáadása

Új elemet ugyanúgy kell hozzáadni a KD-tree adatstruktúrához, mint bármely más keresőfához. Először bejárjuk a fát annak gyökerétől kezdve, az ágakon balra, vagy jobbra haladva, aszerint, hogy a beillesztendő pont a hasítósík „bal” vagy „jobb” oldalán van-e. Amint egy levélhez jutunk, hozzáadjuk az új pontot a levél bal vagy jobb gyermekeként, az új pont és a levélben tárolt pont megfelelő koordinátájának összevetése alapján. Az ilyen pontok hozzáadása a fa kiegyensúlyozatlanságához vezethet.

Elem törlése

Az elem törlésekor meg kell őrizni a fa rendezettségét. Egy lehetséges megoldás, hogy képezzük a törlendő ponthoz tartozó részfában tárolt elemek halmazát, és ezen elemekre újra elvégezzük a fa felépítését ezekkel az elemekkel.

Kiegyensúlyozás

A KD-tree adatszerkezet utólagos kiegyensúlyozása a bináris fákra alkalmazott forgatási technikával nem lehetséges, mert az felborítaná a fa azon tulajdonságát, hogy a csomópontoktól balra eső pontok a csomóponthoz tartozó metszősík egyik oldalán, a jobbra eső pontok a másik oldalon helyezkednek el.

NNS

A legközelebbi szomszédkeresési (NN) algoritmus célja, hogy megtalálja a fa azon pontját, amely a legközelebb van egy adott bemeneti ponthoz. Ez a keresés hatékonyan végezhető el, hiszen a fa tulajdonságainak segítségével gyorsan kiküszöbölhetjük a keresési tér nagy részét.

Az algoritmus egyszerű módosítással bővíthető úgy, meg tudja adni a ponthoz legközelebbi m szomszédot, ha egy helyett m aktuális legjobbat tart fenn. Egy részfa csak akkor hagyható figyelmen kívül, ha már rendelkezésre áll m eddigi legjobb, és a részfának nem lehet közelebbi pontja, mint az m aktuális legjobb közül a legtávolabbi.

Tartomány-keresés

Egy adott lekérdezési tartomány (téglalap, téglatest, hipertéglatest) összes pontjának megtalálásához a gyökértől kezdve rekurzív módon bejárjuk mindkét alfát. Ha a keresési tartomány nem metszi a vizsgált csomópontoz tartozó tartományt, akkor a csomópont és részfáinak további feltárása nem szükséges. Vagyis csak azokat a részfákat járjuk be, amelyeknél van esély a lekérdezési tartományba eső csomópontok találására.

Az általános célú grafikus kártya programozása során feltérképeztük a két legelterjedtebb – az NVIDIA/CUDA és az OpenCL – rendszer ilyen irányú lehetőségeit. Tapasztalatunk szerint az NVidia grafikus kártyák – tesztjeink során egy GeForce GTX950M és egy GeForce 1660 Ti videokártyával felszerelt számítógépet használtunk – a CUDA programozási nyelv alkalmazásával 5–25%-kal gyorsabb eredményre vezettek ugyanazon feladatok megoldása során. Az OpenCL-környezet ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a megírt kód szinte változtatás nélkül más, nem nVidia gyártmány videokártyán, illetve heterogén számítási környezetben is futhasson. Ennek tesztelésére programjainkat a grafikus kártyák mellett számítógépeinkben található többmagos processzorokon is futtattuk. A tesztekhez egy Intel i5-650, egy Intel i7-5820 és egy Intel i7-9750 típusú processzorral rendelkező számítógépet használtunk. Tapasztalataink szerint a két típus és azon belül a generációk közti teljesítmény-növekedés jelentős, ugyanakkor a CPU-n történő futtatás sebessége 2–3 nagyságrenddel elmarad a GPU-n történő futtatáshoz képest.

Bizonyított, hogy a Fast Clustering eljárás részét képező d-tree struktúraépítő eljárás a leggyorsabb szomszédkereső algoritmus, sebessége $n \cdot \log(n)$ nagyságrendű. Ez az algoritmus azonban nem párhuzamosítható, így alkalmatlan a CUDA/OpenCL nyelv lehetőségeinek kiaknázására. A fában történő keresés párhuzamosítható.

A naiv algoritmus nem optimális, sebessége n^2 nagyságrendű, ugyanakkor jól párhuzamosítható.

A leghatékonyabb megoldást egy kombinált program összeállítása jelentheti. A szomszédkereséshez szükséges fastruktúra felépítésére a Fast Clustering-módszert érdemes használni, a fában a szomszédok keresését párhuzamosítva, grafikus processzoron érdemes végrehajtani.

A megoldás hátránya, hogy két architektúra – a CPU (host) és a GPU (device) – közti kommunikáció általában két nagyságrenddel lassabb az adott architektúrán belüli átviteli sebességnél. Ez a hátrányt csak nagy mennyiségű adat kezelése esetén képes kompenzálni a két architektúrára illesztett kód.

A NUMERIKUS FELADAT MEGOLDÁSÁNAK PROBLÉMÁJA

A szilárd test peridynamikus modelljének matematikai leírása alfejezetben ismertetet egyenletek analitikus megoldására nincs általános módszer, ezért *A numerikus feladat előkészítésének problémája* alfejezetben összefoglalt módszerekkel létrehozott csomópontokra diszkrétizált egyenletrendszert értelmeztünk. Az lineáris egyensúlyi problémák vizsgálata során ez az egyenletrendszer egy

$$[K] \cdot \{d\} = \{F\}$$

alakú lineáris egyenletrendszer, mely tartalmazza a belső csomópontok egyensúlyi feltételeit és a peremen elhelyezkedő pontok terhelési feltételeit. A tapasztalataink szerint ennek az egyenletrendszernek stabilitása függ a csomópontok elhelyezkedésétől és a csomóponti kapcsolatok számától. Azonosan kedvezőtlen feltételek mellett több megoldási módszert is kipróbáltunk:

- Gauss-elemináció (GE).
- Gauss-elemináció részleges főelemkiválasztással.
- Gauss-elemináció teljes főelemkiválasztással.
- Krylov-módszer.
- Adaptív dinamikus relaxáció (ADR) módszere.

Tapasztalatink szerint az utolsóként említett módszer bizonyult a legstabilabbnak. [4]

Az ADR-módszer alkalmazása mellett szól az a tény is, hogy rendkívül alkalmas párhuzamos megvalósításra. Ennek bizonyítására elkészítettük az ADR-módszer CUDA/OpenCL környezetben működő kódját.

A kód sebességét különböző méretű és tulajdonságú lineáris egyenletrendszereken teszteltük, illetve teljesítményét összehasonlítottuk az elmúlt időszakban közzétett cuBLAS-könyvtár adta lehetőségekkel. Tapasztalataink szerint az említett kódok hatékonysága a következőképpen alakul:

1. cuBLAS.
2. ADR on CUDA.
3. Gauss-elemináció-részleges főelemkiválasztással CUDA-környezetre ültetve.

[4] Ladányi G.:
Nemlineáris szilárdsági feladat megoldása adaptív relaxáció módszerével.
Tudományos Hét –
Dunaújváros – 2017.
11. 15.

[5] Ladányi, G.–
Gonda, V. (2018):
Application of higher
order peridynamics
on large deformations.
IWCMM 2018. 10-13.
09. 2018. Glasgow,
UK.

A nemlineáris egyensúlyi problémák esetében a fenti egyenletrendszer az alábbiak szerint módosul:

$$[K(\mathbf{d})] \cdot \{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{F}(\mathbf{d})\}$$

Vagyis a szerkezet merevsége és a terhelés az elmozdulás függvénye. A feladat megoldását ebben az esetben általában növekményes módszerek segítségével állítjuk elő. A szilárd testek mechanikájában elsősorban a Newton–Raphson iterációs eljárások a legelterjedtebbek. Kifejlesztettük az ehhez szükséges algoritmusokat, melyeket az előző alfejezetben említett statikai feladatok megoldására eredményesen alkalmaztunk.

Elkészítettük a módosított NR- (mNR) iteráció algoritmusát. Tapasztalatunk szerint enyhén nemlineáris feladat esetében az mNR-algoritmus sebessége meghaladja az NR-algoritmusét, míg erős nemlinearitás esetén az NR-algoritmus bizonyult hatékonyabbnak.

A REPEDÉS MEGJELENÉSÉNEK ÉS TERJEDÉSÉNEK PROBLÉMÁJA [5]

A nagy alakváltozásokkal járó statikus vagy kvázi-statikusan feladatok, illetve a repedésterjedési folyamatok általában nagyságrendekkel eltérő időléptékben zajlanak le. Egy szakító kísérlet például általában több másodpercig tartó rugalmas vagy rugalmas-képlékeny alakváltozást okozó tehernövekedéssel jár, majd a makroszkopikus repedés megjelenését követően néhány ezred vagy század másodperc alatt a keresztmetszet teljes töréséhez vezet.

A numerikus modellezés során ez a skálabeli eltérés komoly gondot okoz. A repedésterjedés leírása szinte kizárólag időben explicit típusú megoldóval lehetséges. Ennek stabilitása a választott időlépés nagyságától függ. Általában elmondható, hogy ha pontosabb megoldást eredményező több csomópontot alkalmazunk, kisebb időlépésre van szükség.

Ez az időlépés azonban elfogadhatatlanul rövid a repedés megjelenését megelőző kvázi-statikusan feladat megoldásához.

A kvázi-statikusan feladat megoldását, különösen, ha az geometriai vagy anyagi nemlinearitást tartalmaz, időben implicit megoldóval érdemes meghatározni. Az implicit megoldókról az előző alfejezetben már röviden említést tettünk.

Az általunk fejlesztett rendszerben lehetőség van arra, hogy a mechanikai feladat megoldását automatikusan két szakaszra bontsuk. A megoldó elkészíti a kvázi-statisztikus feladat repedésmentes megoldásának lépéseit. Minden teherlépés megoldása után megvizsgálja, hogy az adott lépésben volt-e repedés-megjelenés. Ha nem, úgy az implicit megoldó folytatódik a következő teherlépéssel. Ha igen, akkor az implicit megoldó átadja a futási eredményeket az explicit megoldónak, mely folytatja a repedésterjedési probléma megoldását.

A fenti megoldási stratégiát eredményesen alkalmaztuk vékony, síkjukban terhelt lemezek szakadásának modellezésére. Eredményeinkről konferenciaelőadásban és kiadványban számoltunk be. [5]

A peridinamikus modellezés hatékonyságának javítása ekvidisztáns pontkiosztás esetén

A korábbiak során feltételeztük, hogy a peridinamikus pontok elhelyezkedése tetszőleges a vizsgált testen belül. Ez a feltételezés számos pontban megnehezíti a peridinamikus modellezést:

- a szomszédkeresésre csak a már ismertett általános rutinok használhatók,
- a pontok erősen heterogén sűrűségű elhelyezkedése esetén a megoldandó egyenletrendszer gyakran rosszul kondicionált, így a megoldás instabil és gyenge minőségű,
- nemlineáris feladatok esetében a stabilitási probléma halmozottan jelenik meg.

Jelentős leegyszerűsítést jelent, ha a teljes modellt egymástól azonos távolságban lévő, azaz ekvidisztáns, pontkiosztással valósítjuk meg. Ekkor a fent leírtnál hatékonyabb szomszédkereső algoritmusok is alkalmazhatók, továbbá a megoldandó egyenletek is kedvezőbb tulajdonságúak.

Vizsgálatainkban arra kerestük a választ, hogy az egyenletrendszer – szintén jelentős számítási kapacitást lekötő – összeállítása gyorsítható-e.

Vizsgálatunkat egy első pont – azaz a test határától a peridinamikus sugárnál nagyobb távolságra lévő – pont mozgásegyenletének elemzésével kezdtük. Arra – ma már nyilvánvalónak tűnő – következtetésre jutottunk, hogy ilyen pont esetében a pontra jellemző egyenletrendszer mindig azonos. A lokális egyenletrendszerből a globálisba történő másolás „csak adatszerkezet-manipulációs” kérdés, a pont szomszédjainak ismeretében jól algoritmizálható.

A test pereméhez közel – vagyis a peridinamikus sugárnál közelebb – eső pontok esetében első közelítésben érdemes lehet minden pont egyenletrendszerét kiszámolni. A problémát megvizsgálva arra a következtetésre juthatunk, hogy a peremhez közeli pontok – attól függően, hogy hány szomszédot tartalmazó peridinamikus sugárral dolgozunk – tipizálhatók néhány alapesetre.

A típuspontok egyenletrendszere ismét típusonként azonos. Az egyenletrendszerekből készítettünk egy könyvtárat – talán helyesebb a look-up-analógia – melyből tetszőleges pont típusa alapján kiválasztható a neki megfelelő egyenletrendszer. A pontok tipizálása és az egyenletrendszer betöltése után a lokális egyenletrendszerből a globálisba történő másolás „csak adatszerkezet-manipulációs” kérdés, a pont szomszédjainak ismeretében jól algoritmizálható.

A hagyományos és az így felépített programsebesség közti különbség a csomópontok számának növelésével rohamos mértékben nő. Megállapítottuk, hogy a look-up tábla alkalmazása rendkívüli sebességnövekedést eredményez.

Biológiailag lebomló polimerek

Összefoglalás: A PLA egy keményítőből készült bioműanyag, pontosabb megfogalmazásban, a genetikailag módosított kukorica keményítőjéből gyártják. Egyes szakirodalmak szerint a PLA biológiai úton bomlik le. Ez az állítás azonban nem egyértelmű, mivel a „biológiai bomlás”-t mint degradációs folyamatot elég tág határok között alkalmazzák. A PLA egy „komposztálható műanyag”, amely „degradáció” útján bomlik le, de igazi „biodegradáció”-ról nem beszélhetünk. Ennek az az oka, hogy a PLA nem bomlik vagy biodegradálódik a hulladéklerakóban, csak hőhatásra kezd el bomlani (konkrét esetben 60°C-on, öt nap után). Kutatómunkám során a politejsavak különböző környezeti paraméterekkel szembeni viselkedését tanulmányoztam, választ kerestem arra, hogy a hőmérséklet és a páratartalom, hogyan befolyásolja a 3D-eljárással nyomtatott PLA-szakítópálcák mechanikai jellemzőinek értékét. Klímakamrás teszteleseket végeztünk 40°C, 60°C és 70°C-on 45–65–80% páratartalom mellett. A tesztelt mintákon szakítóvizsgálatot végeztem, melyek eredményeit jelen prezentációmban ismertetem.

Kulcsszavak: Politejsavak; klímateszt; szakítóvizsgálat; hőmérséklet és páratartalom hatása.

Abstract: PLA is a bioplastic made from starch, more specifically made from genetically modified corn starch. According to some literature, PLA is biodegradable. However, this statement is not clear because „biodegradation” is used as a degradation process over a fairly wide range. PLA is a „compostable plastic” that degrades by „degradation”, but real „biodegradation” cannot be said. This is because PLA does not decompose or biodegrade in the landfill, it only starts to decompose under the influence of heat (in this case at 60°C, after five days). In the course of my research I studied the behavior of polylactic acids against different environmental parameters, I was looking for an answer to how temperature and humidity affect the value of the mechanical

* *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: pazman@uniduna.hu

** *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*
E-mail: kovacsbe@uniduna.hu

properties of PLA tensile rods printed by the 3D process. Climate chamber tests were performed at 40°C, 60°C and 70°C and 45–65–80% humidity. I performed a tensile test on the tested samples, the results of which I present in this article.

Keywords: Polylactic acid; climate test; tensile test; temperature and humidity.

Bevezető

A kutatómunka azzal kezdődött, hogy a szakirodalomban és az internetes hozzáféréseknél megkerestük a biológiailag lebomló polimerek definícióját, hogy támpontot adjon a kísérleti munkák megtervezéséhez és kivitelezéséhez. A keresgélés eredményeként az alábbi megfogalmazásokat találtuk.

1. Lebomló műanyag, mely esetében a bomlást a természetesen előforduló mikroorganizmusokkal, valamint a baktériumokkal, gombákkal és algákkal való kölcsönhatás eredményezi.
2. Az ASTM (Nemzetközi Szabványügyi Szervezet) definíciója a biológiai úton lebomló műanyagokra: *lebomló műanyag, amely esetében a bomlást a természetesen előforduló mikroorganizmusokkal, úgy, mint baktériumokkal, gombákkal és algákkal való kölcsönhatás eredményezi.*

A definíciók értelmezésében a szakirodalomban használt kifejezések keveredhetnek, valamint biológiai úton történő bomlási folyamatokat, azaz a biodegradációt nagyon tágan értelmezik. A szakirodalmi összefoglalók alapján *a piacon jelenleg háromféle olyan műanyag kategória van, amely lebomlik vagy biológiai úton bomlik le. Ezek a műanyagok három különböző folyamati úton bomlanak le:*

- a) PLA (politejsav),
- b) oxidatív lebomlás (oxodegradáció)
- c) mikrobiológiai lebomlás (mikrobiodegradáció).

A PLA egy keményítőből készült bioműanyag: konkrétan, genetikailag módosított kukorica keményítőjéből gyártják. A technológiai és támogató szervezetek, mint például a BPI (Biológiailag Lebomló Termékek Intézete) megerősíti azt a tényt, hogy a PLA biológiai úton bomlik le ezért. Ez az állítás azonban nem egyértelmű, mivel ők rendkívül szabadon használják a „biológiai bomlás”-t mint degradációs folyamatra vonatkozó kifejezést. A PLA egy „komposztálható műanyag”, amely „degradáció” útján bomlik le és ezért ez nem igazi „biodegradáció”. A PLA nem bomlik vagy biodegradálódik a hulladéklerakóban, és csak hőhatásra kezd el bomlani (konkrét esetben 60°C-on, öt nap után). Ilyen környezet csak kereskedelmi

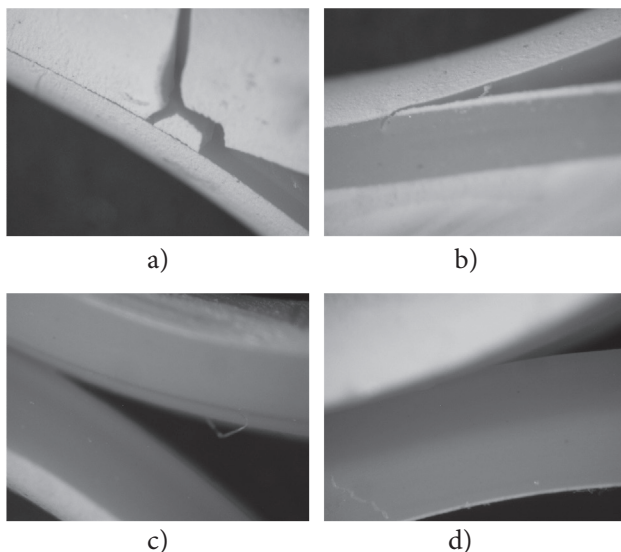
komposztáló telepeken fordul elő, nem pedig a kerti háztartási komposztálóban. A PLA komposztálása során a visszamaradó anyag széndioxid, és mivel a professzionális komposztáló létesítmények jelenleg nem fogják fel a keletkező gázokat, ez általában belekerül a légkörbe. [1]

A definíciókeresést követően arra a megállapításra jutottunk, hogy különböző közegekben fogjuk vizsgálni a politejsavak viselkedését. A kezdeti szakaszban végeztünk virágföldes kísérletet, desztillált vizes áztatást, mesterségesen bekevert tengervízben való áztatást, illetve etil-acetátban is áztattuk a mintákat. A vizsgálati eredmények közül csupán az etil-acetátos áztatás említésre méltó.

[1] (átvéve: http://www.okotermek.hu/index.php?route=pavblog/blog&blog_id=21)

Etil-acetátos áztatás szobahőmérsékleten

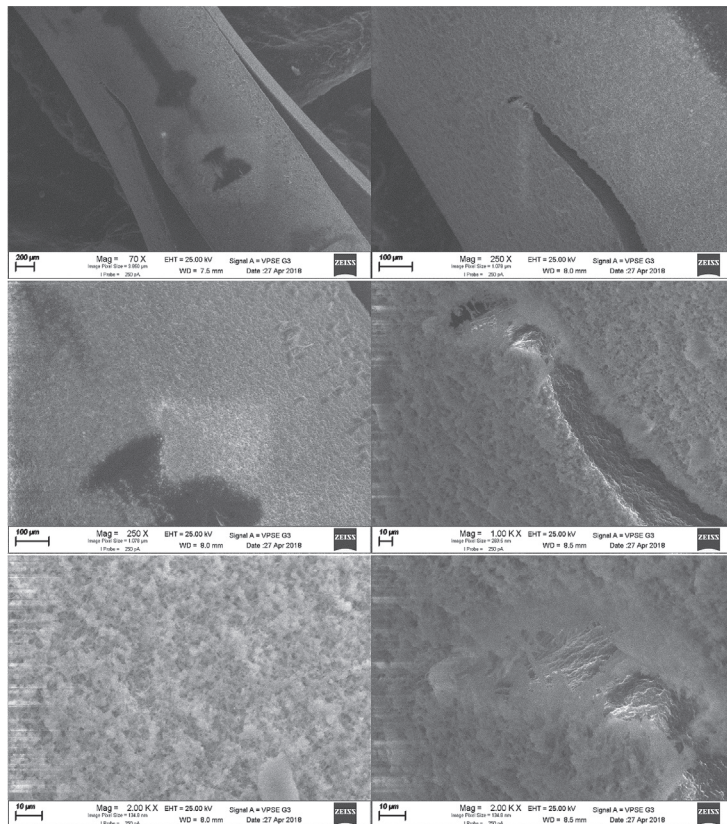
1. ábra. Sztereomikroszkóppal készített felvételek a PLA-szálmintákról



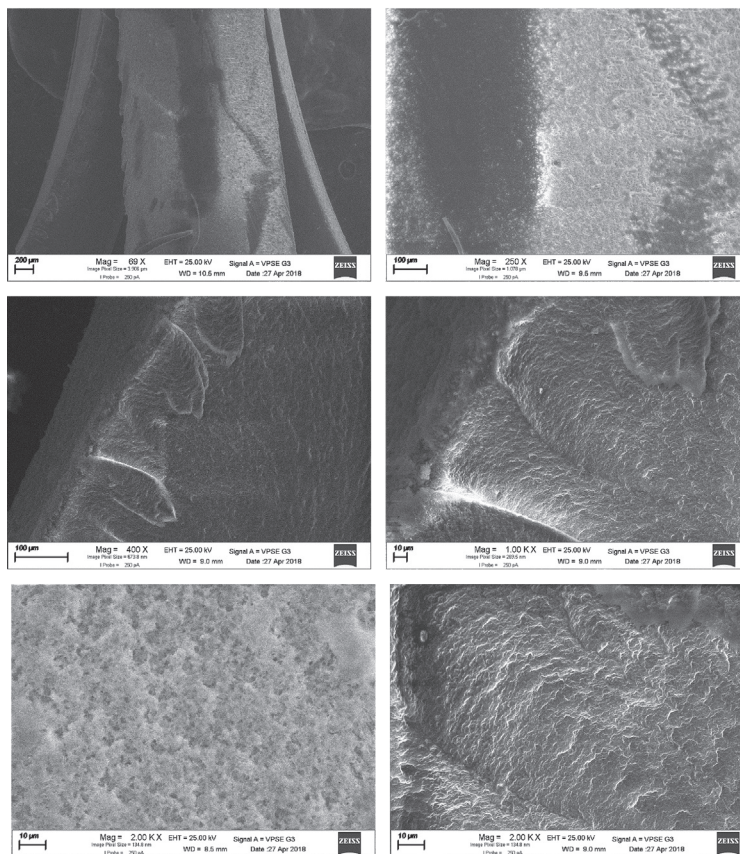
a) 2h áztatás b) 4h áztatás c) 6h áztatás d) 24h áztatás

A szerkezeti változások nyomon követésére pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket is készítettünk.
SEM-vizsgálatok felvételei: etil-acetátban történő áztatás.

2h minta: A fehér réteg a SEM-felvételeken jól látható, hogy a fehér réteg nagyon apró kimaródások, bomlási reakciók terméke, mely a 2000-szeres nagyításban még egyértelműbben kivehető.

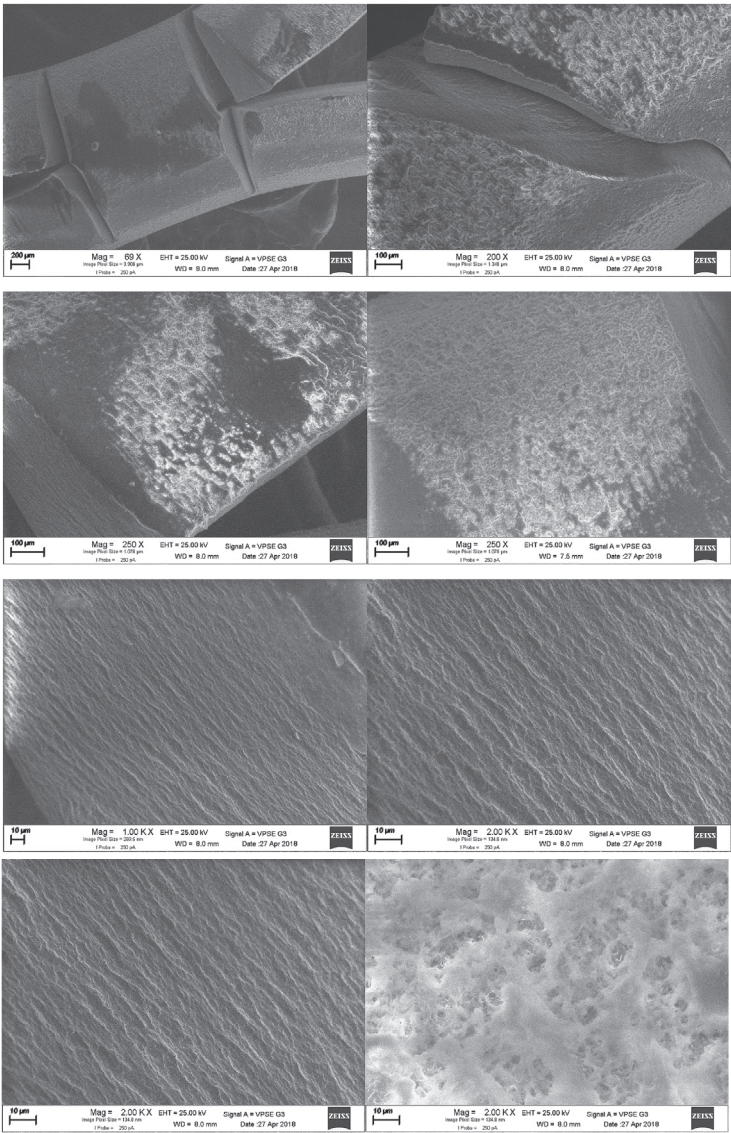


1 napos –24h áztatású minta:



Az 1 napos áztatás után a már szétvált szálak belső felületein is – rétegenként – szétválási folyamatok indultak meg.

14 napos minta:



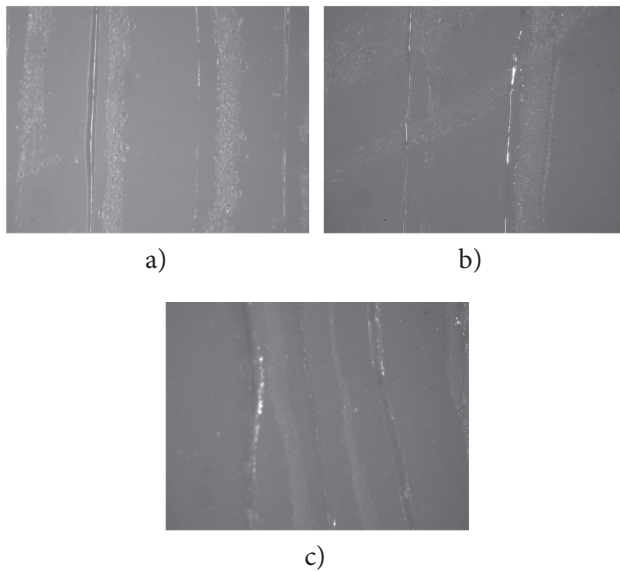
A 14 napos áztatás esetén a hosszmenti repedéseket a keresztmenti felhasadások követték, és végbe ment a teljes minta bomlási folyamata.

Ezt követően a mintákat mesterségesen szimulált esőztetés és napfény együttes hatásának tettük ki, ezek összefoglalóját a második alfejezet foglalja össze.

Xenon-lámpás gyorsított időjárás-vizsgálatok

A gyorsított időjárás-vizsgálatokat xenon lámpás öregbítő kamrában végeztük el, ahol mind a 60°C, mind pedig az esőztetést beállítottuk, tehát a mintákra a meleg és a pára együttes hatását vizsgáltuk. Itt 30x30 mm 3D nyomtató tollal készített lapkákon végeztük el a vizsgálatokat. A vizsgálati idők hasonlóak voltak, mint a korábbiak, itt 1 napos, 7 napos és 14 napos intervallumokat határoztunk meg. A mintákról sztereomikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk.

2. ábra. Xenon-lámpás öregbítésen átesett minták sztereomikroszkópos vizsgálatai

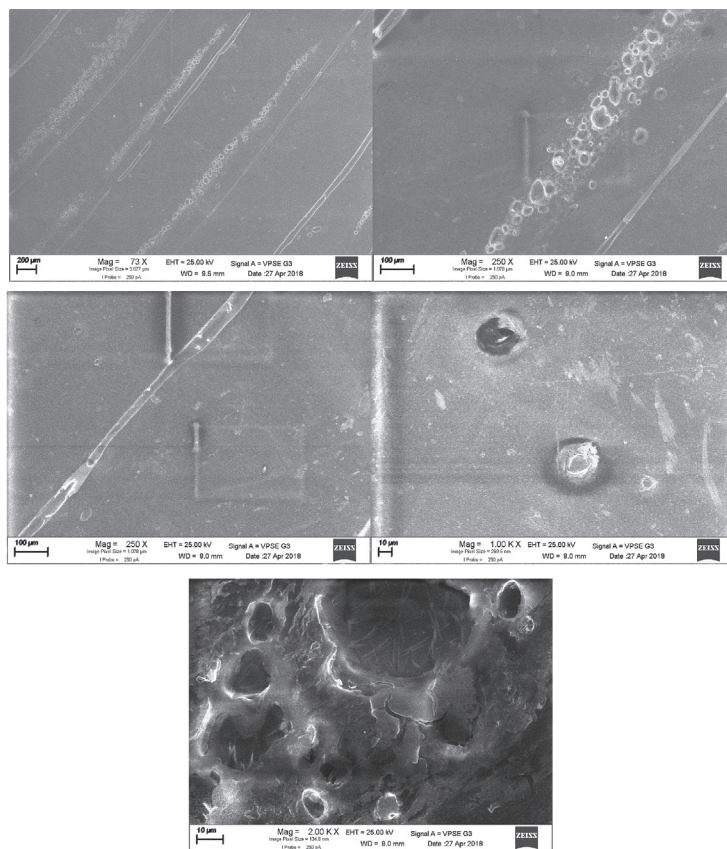


A vizsgálati mintákról készített 50-szeres nagyítású felvételeken az idő előrehaladtával színfakulás, valamint egyre több helyen megjelenő és egyre szélesebb sávokban kialakuló felületi mattulás és hólyagosodás figyelhető meg.

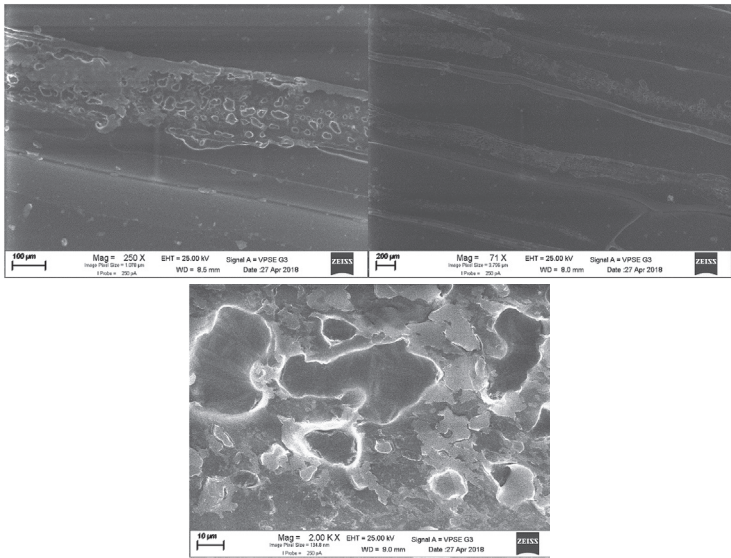
Ezekről a mintákról pásztázó elektronmikroszkóppal is készítettünk felvételeket, ezeken a felületi változások sokkal jobban nyomon követhetők.

SEM-vizsgálatok felvételei:

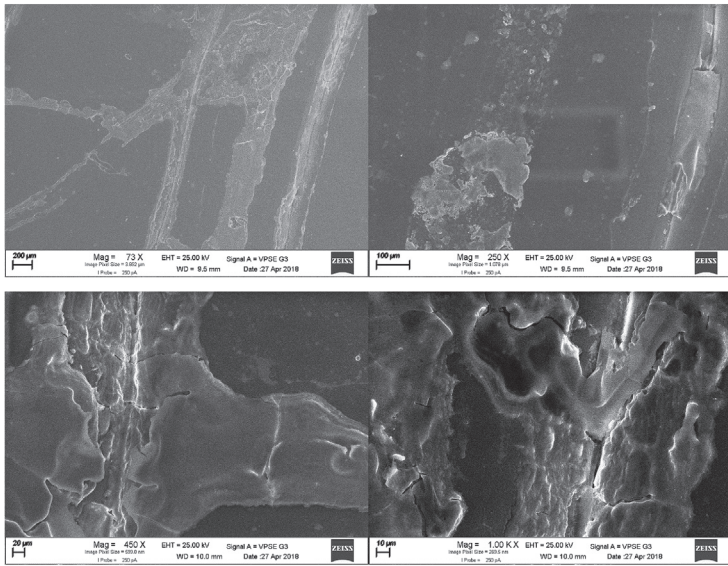
1 napos minta

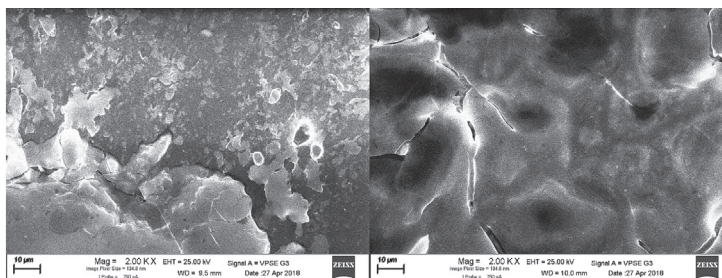


7 napos minta



14 napos minta

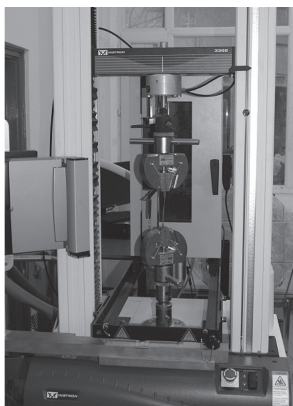




Az előkísérleteket követően egy klímakamra érkezett az egyetemre. Ebben a klímakamra, melyben páratartalom és hőmérséklet, valamint fényintenzitás is beállítható. A páratartalom teljes skálájának felhasználásához eltekintettünk a fényintenzitástól, és csak a páratartalom valamint a hőmérséklet hatását vizsgáltuk a 3D-nyomtatott, immár egzakt geometriával rendelkező mintákra. A próbatesteket 3D-nyomtatóval készítettük szabványos lapos próbatest alakban, melynek lényege az volt, hogy a kezeletlen, illetve a különböző paraméterekkel kezelt mintákon szakítóvizsgálatot végzünk. Ennek segítségével – változtatva a hőmérsékletet és a páratartalmat – információt kapunk a minták PLA mechanikai tulajdonságairól. További változó volt a vizsgálatok során, hogy a 3D-nyomtatás során a minták kitöltöttsége is eltérő volt, készült 20%, 50%, 80% és 100% kitöltöttségű PLA-szakítópálca.

Az első lépés a kezeletlen minták vizsgálata volt, melyhez az alábbi vizsgálóberendezést alkalmaztuk:

Az egyetem felületfizikai laboratóriumában található 1 tonnás INSTRON 3366L1092 szakítógép, mely egy kétszlopos, asztali telepítésű vizsgálati berendezés. Szakító és/vagy nyomás vizsgálatára alkalmas, 50 kN terhelésgény alatt, vagyis elsősorban műanyagok, gumik vizsgálhatók vele.

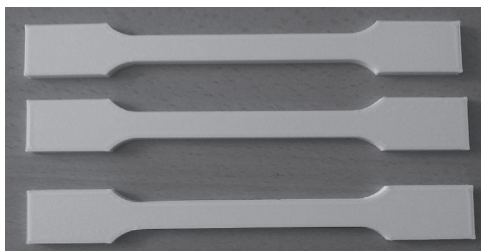


Főbb paraméterek:

- Maximális terhelés: 10 kN (2 250 lbf) teljesítmény.
- Pontosság: 0.5%-os terhelési pontosság a kijelzett terheléshez képest.
- Visszatérési sebesség: max. 1 000 mm/perc (40 in/min).
- Függőleges vizsgálati felület: 1193 mm (47 in).

A vizsgálati mintákat, melyet a 4. ábra szemléltet, a 3. ábrán látható szakítógéppel szakítottuk el, majd a szakadási felületekről a korábban ismertetett sztereomikroszkóppal kis és nagy nagyítású felvételeket készítettünk.

4. ábra. 3D nyomtatott szakítópálcák



VIZSGÁLATI PARAMÉTEREK

Első körben csak magát a vizsgálati módszert és a beállított paramétereket ellenőriztük, melyhez PLA-mintákat használtam, de ezek még fehér színűek voltak és csupán egy kitöltöttségi fokkal rendelkeztek. Mivel a szakítóvizsgálathoz minimum 3 pálcza szükséges, hogy a vizsgálat kiértékelhető legyen, így én is ezt a darabszámot használtam. A szakításhoz alkalmazott húzási sebesség 4 mm/perc volt. A kezdeti vizsgálati eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

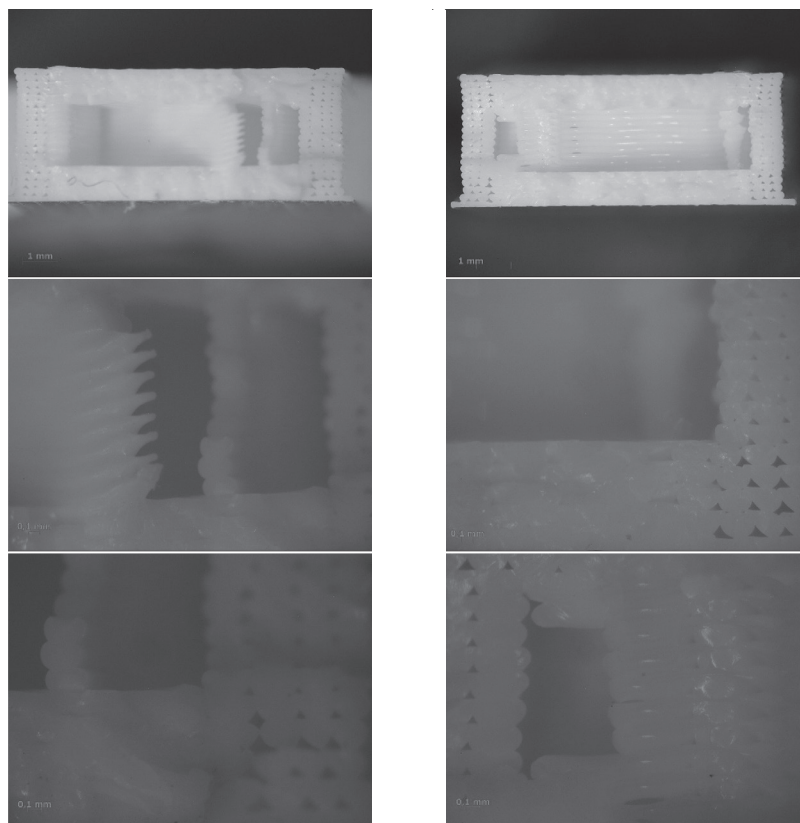
1. táblázat. PLA-szakítóvizsgálat eredményei – elővizsgálatok

Megnyúlás – törési szakadás (%)	Maximum terhelés (N)	Modulusz (GPa)
3,1	1401,36	1,42
3,26	1480,27	1,5
3,15	1331,8	1,36

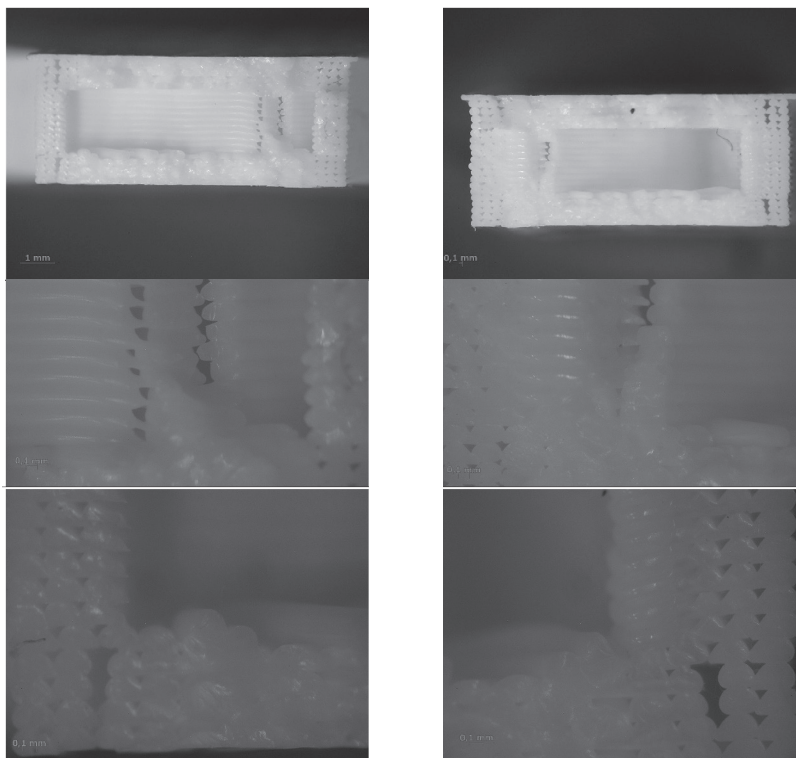
A vizsgálati eredmények alapján látható (1. táblázat), hogy az azonos módon és azonos telítettséggel készített minták hasonlóképpen szakadtak. A kapott maximális terhelőerők is nagyon hasonlóak, csupán a 3. mintáé tér el jobban a másik kettőtől. A szakadásig elviselt nyúlásértékekben számottevő különbség nem figyelhető meg, mindegyik minta kb. 3%-ot nyúlt.

A mintákról szakítás után készített felvételeket a következő ábrák mutatják:

1. minta



2. minta



Ezt követően különböző kitöltöttségű PLA-szakítópálcákat készítettünk, s ezek vizsgálatával folytattuk a PLA-minták mechanikai tulajdonságainak megismerését. A különböző kitöltöttségű PLA-minták szakítóvizsgálatát végeztük el, mely során minden kitöltöttségből 3–3 mintát vizsgáltam. Digitális tolómérővel megmértük 3–3 pontban a minták vastagságát és szélességét, ebből meghatároztuk a kiinduló keresztmetszetet, majd a szakítóvizsgálat után regisztráltuk a szakadáshoz szükséges maximális terhelést, mely értékeket elosztva a kiindulási keresztmetszettel, megkaptuk a minták szakítószilárdság-értékét. A szakítógép számítógépes programja pedig a kiindulási vizsgálati hosszából meghatározta a szakadási nyúlásértékeket. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat. PLA-minták szakítóvizsgálatának eredményei

Kitöltött-ség	Szakítószilárdság (MPa)	Átlag-érték	Szakadási nyúlás (%)	Átlag-érték
20	15,91	13,84	2,82	2,5
20	11,06		1,92	
20	14,56		2,79	
50	19,18	17,48	2,59	2,5
50	16,92		2,42	
50	16,35		2,43	
80	20,33	19,31	2,24	2,2
80	18,38		2,09	
80	19,22		2,26	
100	38,79	38,28	4,26	3,8
100	38,57		3,17	
100	37,47		4,1	

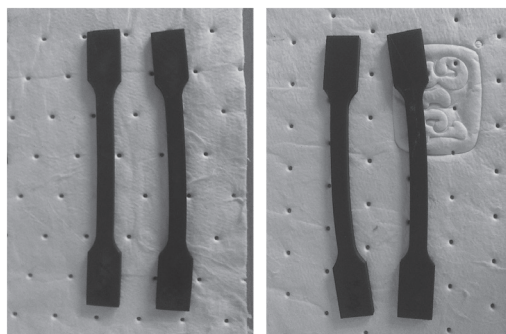
Az eredményekből kitűnik (2. táblázat), hogy a kitöltöttség növelésével a szakítószilárdság növekedett (ezt is vártuk), illetve – s ez egy kicsit meglepett – , hogy az átlagos nyúlásértékek is növekedtek.

Ezt követően újabb 3D-nyomtatott mintákon xenonlámpás tesztnek tettük ki ezeket a mintatípusokat, és az ezt követően is elvégeztük a szakítóvizsgálatot. Arra voltunk kíváncsiak, hogy a 60°C-os szimulált napfény és ezt követő esőztető ciklikus ismétlése hatással lesz-e a szakítószilárdsági eredményekre.

A szakítópálcákról a kezelés után készítettünk felvételeket, hogy lássuk, vizuálisan már magának az öregítésnek is van-e hatása a vizsgálati mintákra.

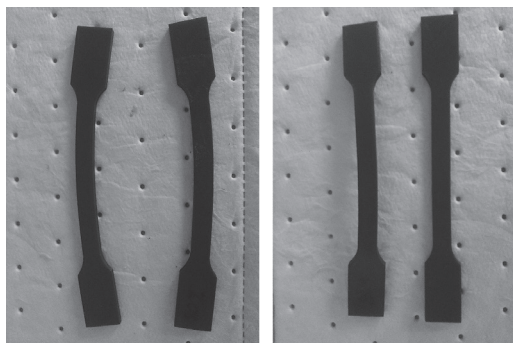
A makrofelvételeket az 5. ábra mutatja.

5. ábra. PLA 1 napos öregített minták szakítóvizsgálat előtt



a)

b)



c)

d)

- a) 20% kitöltöttség
- b) 50% kitöltöttség
- c) 80% kitöltöttség
- d) 100% kitöltöttség

A felvételeken jól látszik, hogy a nem 100%-ban kitöltött minták a kezelés hatására elgörbültek. Ezt a görbületet a vizsgálat előtt igyekeztünk belőlük kisebb előfeszítéssel kivenni, hogy a szakítóvizsgálat során értékelhető eredményeket kapjak.

Elvégeztük a különböző kitöltöttségű PLA-minták 1 napos xenonlámpás öregbítését a korábban 3D-nyomtatással készített szakítópálcákon. Mindegyik kitöltöttségből 2–2 mintát öregítettünk, ugyanis csak ennyi állt rendelkezésünkre. A xenonlámpás öregítés során 60°C-ot szimulált napfényt és azt követő esőztetést végeztem 24 órás időtartam alatt. Az így öregített mintákon ezt követően végeztük el a szakítóvizsgálatot. A vizsgálat előtt digitális tolómérővel megmértük 3–3 pontban a minták vastagságát és szélességét, ebből meghatároztam a kiinduló keresztmetszetet, majd a szakítóvizsgálat után regisztráltuk a szakadáshoz szükséges maximális terhelést, mely értékeket elosztva a kiindulási keresztmetszettel, megkaptuk a minták szakítószilárdság-értékét. A szakítógép számítógépes programja pedig a kiindulási vizsgálati hosszából meghatározta a szakadás nyúlás értékeit. Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

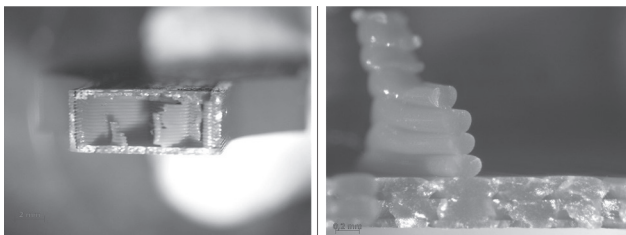
3. táblázat. Öregített PLA-minták szakítóvizsgálatának eredményei

Próbatest neve	Kitöltöttség	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Jeltávolság	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
Ö1	20	9,9	4,1	80,6	586,3	14,62	3,1	0,7
Ö2	20	9,9	4,1	79,7	586,8	14,56	3,1	0,7
Ö3	50	10,0	4,0	75,2	649,3	16,30	2,9	0,8
Ö4	50	9,9	4,0	82,1	694,0	17,62	3,1	0,8
Ö5	80	9,9	4,0	82,3	794,5	20,04	3,1	0,9
Ö6	80	9,9	4,1	80,4	857,0	21,48	3,9	0,9
Ö7	100	9,9	4,1	81,0	1382,3	33,96	3,3	1,5
Ö8	100	9,9	4,1	80,2	1436,4	35,59	4,7	1,5

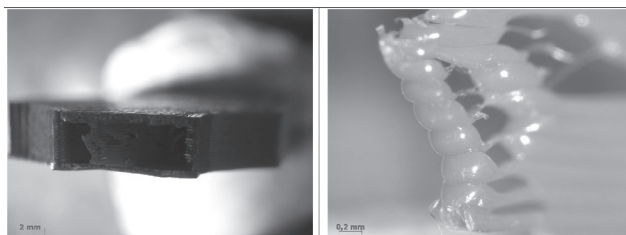
A vizsgálati eredmények alapján látszik (3. táblázat), hogy a kitöltöttség növelésével a szakítószilárdsági értékek növekedtek. A 20% kitöltöttséghez 14,6 MPa, míg a 100%-hoz 33–35 MPa. Ha ezeket az értékeket összehasonlítjuk az előző, nem öregített minták mechanikai jellemzőivel (melyek rendre: 20% – 13,84MPa; 50% – 17,48 MPa, 80% – 19,31MPa, 100% – 38,28 MPa), akkor látható, hogy a 20%-os öregített minta nagyobb szakítószilárdsági értéket, az 50%-os kismértékű csökkenést (17MPa), a 80%-os ismét növekedést (20,75MPa), míg a 100%-os minta jelentősebb csökkenést mutat (34,75MPa). Tehát már az egynapos kezelésnek is van hatása a szakítószilárdsági értékekre, de a degradációs folyamatok még csak most kezdtek

beindulni, tényleges hatást csak hosszabb kezelésekkal lehet kimutatni. A szakadási felületekről sztereomikroszkópos felvételeket készítettünk, ezek az alábbiak:

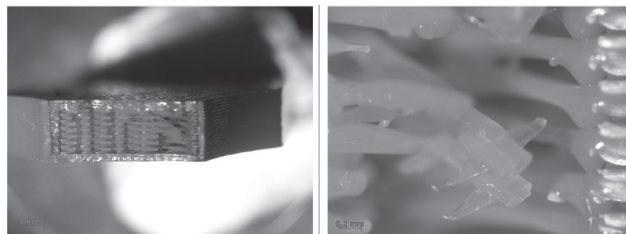
Öregített minta 1. (20%)



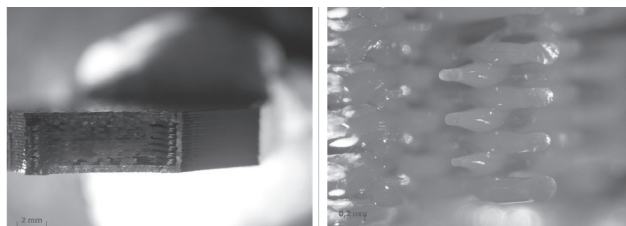
Öregített minta 2. (20%)



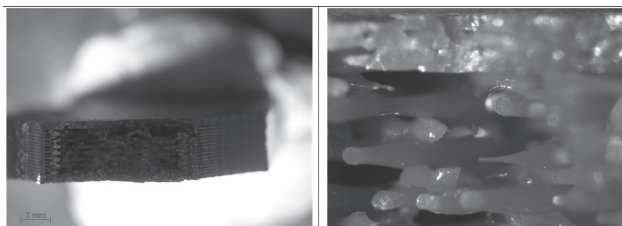
Öregített minta 3. (50%)



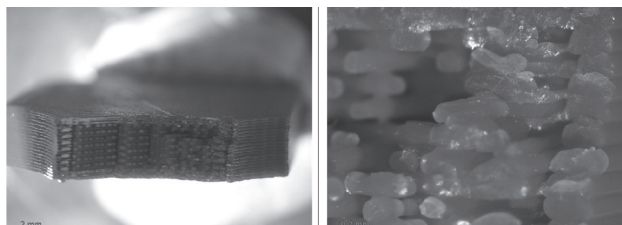
Öregített minta 4. (50%)



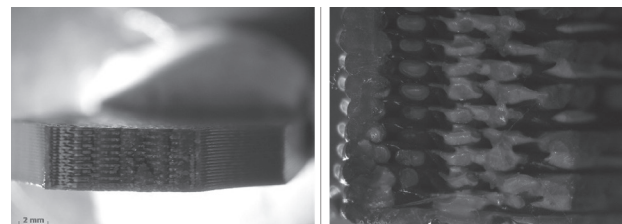
Öregített minta 5.



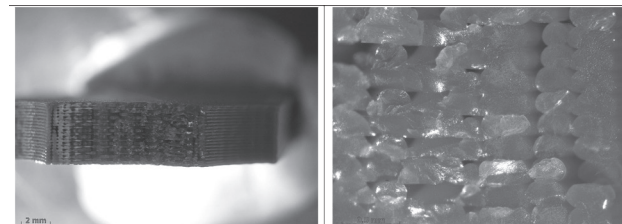
Öregített minta 6.



Öregített minta 7.



Öregített minta 8.



Ezt követően – megismételve a teszteléseket – tovább folytattuk a vizsgalatokat. Ezeket a vizsgálati eredményeket foglalja össze a 4. táblázat.

4. táblázat. PLA-minták szakítóvizsgálata – 2. sorozat

Próbatest neve	Kitöltöttség	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Jeltávolság (mm)	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
II/1.	20	9,9	4,0	71,5	689,07	17,19	4,03	0,75
II/2.	20	9,9	4,0	71,0	671,54	17,00	3,52	0,76
II/3.	20	9,9	4,1	72,1	706,49	17,34	4,17	0,75
II/4.	50	10,0	4,0	71,7	789,94	19,65	5,5	0,86
II/5.	50	9,9	4,1	72,3	780,52	19,05	4,35	0,86
II/6.	50	10,0	4,0	71,6	771,06	19,19	4,21	0,84
II/7.	80	10,0	4,1	72,7	869,69	21,02	4,35	0,94
II/8.	80	10,1	4,0	71,9	860,03	21,23	5,56	0,93
II/9.	80	10,0	4,1	72,2	848,68	20,80	5,79	0,96
II/10.	100	10,2	3,9	71,0	1508,75	38,21	5,23	1,52
II/11.	100	10,1	3,9	71,3	1520,41	38,24	3,75	1,56
II/12.	100	10,2	4,0	72,4	1491,03	36,29	6,67	1,49

A kapott vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy a 20%-os kitöltöttség kb. 17 MPa, az 50%-os kb. 19 MPa, a 80%-os 21 MPa, a 100%-os pedig 37–38MPa szakítószilárdságot eredményez.

Időközben a projekt iránt megnőtt a hallgatói érdeklődés, és két hallgató is jelezte, hogy ebből a témából szeretné írni szakdolgozatát. Így két témakiírás készült, melyek a következők:

1. Kacsó Flóra: Politejsavak bomlási folyamatainak vizsgálata – a hangsúlyt a bomlási hőmérséklet vizsgálatára helyezzük.
2. Perjési József: Politejsav-minták degradációs folyamatainak vizsgálata a páratartalom függvényében – itt a páratartalom hatását vizsgáljuk.

Kacsó Flóra szakdolgozati kísérletek:

A vizsgálatokat egy egyszerű tömegméréssel kezdtük és arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen hőmérséklet okoz tömegváltozást az adott mintákon. PLA-minták bomlásának vizsgálatát az 20; 50; 80; 100%-os kitöltöttségű mintákon végeztük el. A tesztelést – ahogy korábban már említettük – elszakított mintákon kezdtük. A vizsgálati paraméterek a következők voltak (termikus analízis, különböző páratartalom és hőfok mellett):

a) szárítás szárítószekrényben:

- i) 50°C-on 1; 2; 4 óra
- ii) 60°C-on 15 perc; 30 perc; 1 óra; 2 óra
- iii) 70°C-on 10; 20; 30 perc
- iv) 24 órára letett minták 30°C 65% RP
- v) 24 órára letett minták 40°C 75% RP

Mivel ezek alapján a legnagyobb változást a 100% kitöltöttség adta, ezeket a mintákat vittük további vizsgálatokra, így 3–3 alap minta mérése, illetve különböző hőmérsékleten és időn történt szárítás:

- vi) 50°C-on 4 óra szárítás
- vii) 60°C-on 2 óra szárítás
- viii) 70°C-on 30 perc szárítás

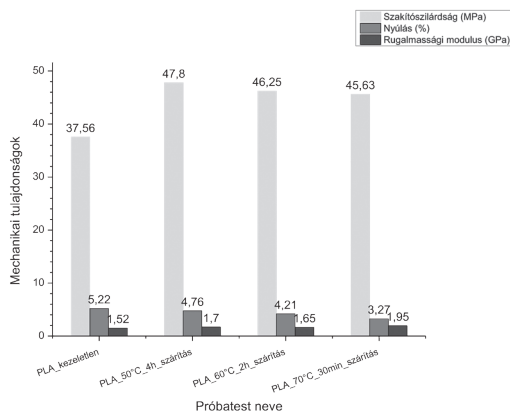
Elvégeztük a szakítóvizsgálatokat, mely során arra voltunk kíváncsiak, hogy a szárítás hoz-e mechanikai jellemzőben változást, valamint – az összehasonlítás végett – a szárított minták mellé párában kezelt mintákat rendeltünk. A kapott vizsgálati eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázat első három sora az alap, kezeletlen minta szakítóvizsgálati eredményeit mutatja, ezt követik a 60°C-on 65%-os páratartalomban 24h-n keresztül kezelt minták eredményei, majd 70°C-on 2h szárítás és az 50°C-on 4h-ig szárított minták szakítószilárdság, nyúlás és rugalmassági modulusza látható.

5. táblázat. PLA-alap, szárított és párában kezelt mintáinak szakítóvizsgálati eredményei

Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugal-massági modulusz (Gpa)
alap, II/10.	100	1508,75	38,2	5,23	1,52
alap, II/11.	100	1520,41	38,2	3,75	1,56
alap, II/12.	100	1491,03	36,3	6,67	1,49
60-65-100_7	100	2452,25	55,6	4,21	1,85
60-65-100_8	100	2539,01	57,6	4,71	1,87
60-65-100_9	100	2569,2	58,4	4,79	1,91
70_2hszárítás_7	100	2559,06	57,0	4,46	1,84
70_2hszárítás_8	100	2443,7	54,5	4,08	1,86
50_4hszárítás_1	100	1947,41	45,5	4,83	1,61
50_4hszárítás_2	100	2033,24	47,8	4,92	1,7
50_4hszárítás_3	100	2114,64	49,9	4,54	1,78

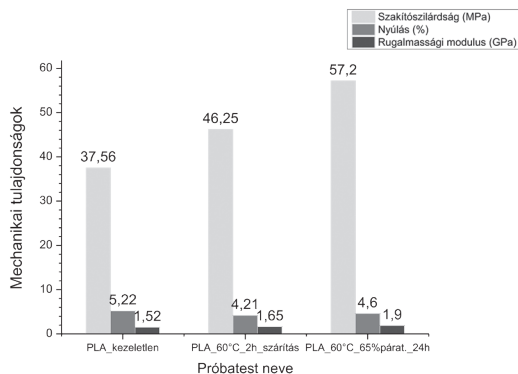
A PLA-minták szakítóvizsgálatát Origin-program segítségével értékeltük ki. A programmal készített oszlopdiagramokban ábrázoltuk a szakítószilárdság, a nyúlás és a rugalmassági értékeket. A 6. ábra a szárított minták diagramjait mutatja. Az első diagramból jól látszik, hogy a szárítás hatására a kezeletlenhez képest a szakítószilárdsági értékek növekedtek, míg a nyúlásértékek csökkenést mutatnak. A szárított minták tehát nagyobb szilárdságúak és kisebb nyúlásúak, mint az eredeti minta.

6. ábra. Szárított minták szakítóvizsgálati eredményei



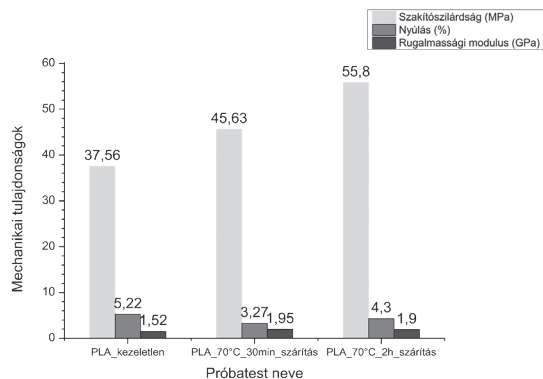
A rugalmassági modulusban számottevő változás nem mutatkozik. Tehát az anyag elveszíti nedvességtartalmát, vagyis képes felvenni nedvességet a környezetéből, ami a szárítás hatására eltávozik, és így a rugalmassága csökken, rideggé válik. A 7. ábra a 60°C-on kezelt minták eredményeit mutatja, végeztünk szárítást és klímakamrás 65% páratartalomban végzett kezelést is. Az eredmények alapján a szárítás javítja a mechanikai szilárdságot, de csökkenti a nyúlást, míg a klímakamrában végzett kezelés – meglepetésre – a szárított mintához képest mind a szilárdságot, mind pedig a nyúlást javítja.

7. ábra. 60°C-on kezelt minták szakítóvizsgálati eredményei



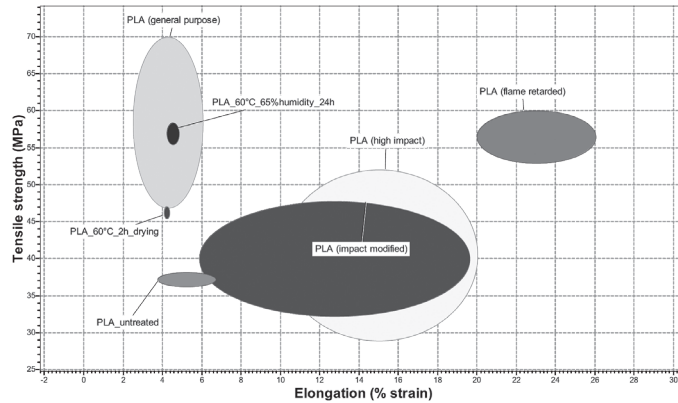
A 8. ábra pedig a 70°C-on végzett vizsgálatok eredményeit foglalja össze. A tendencia hasonló mint a 60°C-on végzetteké. A szakítószilárdság növekszik, a nyúlás szintén, de a rugalmassági modulusz azonos a szárítás és a páratartalom hatására.

8. ábra. 70°C-on kezelt minták szakítóvizsgálati eredményei



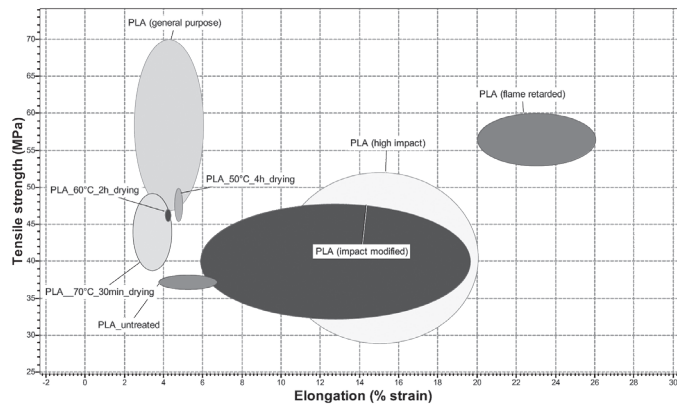
A kapott vizsgálati eredményeket összevetettük a CES EDUPACK-szoftver adatbázisával, mely közel 4000 anyagféleség teljes fizikai, kémiai és mechanikai adatait tartalmazó szoftver, és ebbe 10 db saját adatot is be lehet illeszteni. Így a kapott vizsgálati eredmények az adatbázisban lévő értékekkel összevethetők és tanulmányozhatók. A 9. ábra a 60°C-os minták adatait mutatja és hasonlítja össze a szoftver adataival. A kezeletlen értékek messze elmaradnak az általános célra gyártott PLA értékeitől, de a szárított értékek már az alsó határt elérik, míg a klímakamrás kezelt mintáké a középérték tartományban vannak.

9. ábra. PLA 60°C-os minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



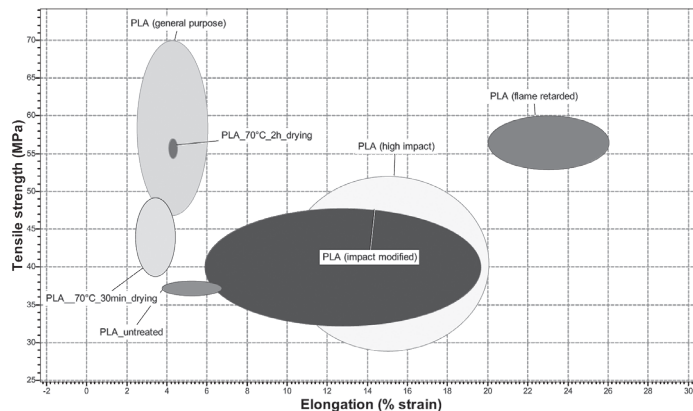
A 10. ábra a különböző hőmérsékleten és ideig kezelt minták értékeit hasonlítja össze az adatbázissal. Itt a vizsgálati értékek egyik célcsoport értékeihez sem tartoznak, az általános célra gyártottakétól alulról elérik, de nem képeznek vele metszetet.

10. ábra. Különböző hőmérsékleteken száárított PLA-minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



A 11. ábra a 70°C-os minták eredményeit mutatja az adatbázis eredményeivel összehasonlítva. A szárítási idő növelésével az értékek egyre inkább illeszkednek az általános rendeltetésű PLA értékeihez.

11. ábra. 70°C-on kezelt PLA-minták adatainak összehasonlítása a CES EDUPACK 2019 szoftver adataival



A klímatesztes kezelést követően tovább folytattuk a 3D-nyomtatott PLA-minták szakítóvizsgálatát. A klímatesztesztet az alábbi klímakamrával végeztük el.

A klímatesztes vizsgálatok változó paraméterei a hőmérséklet és a páratartalom.

12. ábra. Binder KBWF 720 klímakamra



- Hőmérséklet-tartomány: 0–70°C
- Hőmérséklet-tartomány fénnel: 0–60°C
- Páratartalom: 10–80% RH
- Pozícionált kazetta 5 fluoreszcens csővel
- Előmelegítési lehetőség
- Szabályozható ventilátorsebesség
- Páratartalom-szabályozás kapacitív páraszenzor és gőzpára
- Intuitív érintőképernyő időszegmens és valós idejű programozás
- A mért értékek kiolvasása nyitott formátumban, mint pl. USB

Az új minták esetén elsőként a bomlási hőmérsékletnek számító 60°C-ot választottuk, ahol kétféle kitöltöttséget vizsgáltunk és 45% páratartalmat alkalmaztunk. A minták 20, illetve 80%-os kitöltöttséggel rendelkeztek. Sajnos, a korlátolt mintaszám miatt csupán 2–2 mintát teszteltünk. A kapott eredményeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. 60°C-on 45% páratartalommal kezelt minták vizsgálati eredményei

60°C 45% páratartalom	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
	60-45-20_1	20	1435,1	32,6	4,3	1,2
	60-45-20_2	20	1610,8	37,5	4,7	1,2
	60-45-80_1	80	1341,3	30,7	4,0	1,2
	60-45-80_2	80	1473,2	33,7	4,8	1,2

A 6. táblázat eredményei alapján látszik, hogy a 80% kitöltöttségű minták – viszonylag kis szórásértékkel – 30–33 MPa szakítószilárdságot mutatnak. Míg a 20% kitöltöttség esetén nagyobb eltérés van a két mérés között nagyobb eltérés van, illetve nagyobb nyúlásértékek is adódtak, úgy tűnik, mintha a nagyobb kitöltöttség ridegedést eredményezne. Összehasonlítottuk a 60°C-os 45% és 65% páratartalmú kezelések eredményeit 80% kitöltöttség esetén (7. táblázat).

7. táblázat. 60°C-on kezelt minták vizsgálati eredményei 45% és 65% páratartalom alkalmazása mellett

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
60	45	32,2	4,4
	65	42,1	4,11

Látható, hogyha a páratartalom növekszik, akkor a szakítószilárdság nő, vagyis a minta vizet vesz fel, duzzad, és nyúlásértéke csökken, tehát merevvé, ridegebbé válik (7. táblázat).

A klímatesztes kezelést követően tovább folytattuk a 3D-nyomtatott PLA-minták szakítóvizsgálatát, ami 70°C-ot és 65%-ot jelentett. A vizsgálati eredményeket a 8. táblázat foglalja össze. A vizsgálati eredmények alapján az azonos kezelést kapott minták között nincs jelentős eltérés. Így a 80%-os kitöltöttségű minták 40–41, míg az 50%-osak 33–34 MPa szakítószilárdságot mutatnak. A nyúlásértékekben, eltérő kitöltöttség mellett, számottevő eltérés nem mutatkozik.

8. táblázat. 70°C-os 65% páratartalom mellett kezelt minták vizsgálati eredményei

70°C, 65% páratartalom, 24h	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugal-massági modulusz (Gpa)
	70-65-80_1	80	1741,63	40,38	4,58	1,44
	70-65-80_2	80	1781,28	41,00	4,75	1,42
	70-65-50_3	50	1511,44	34,36	4,96	1,19
	70-65-50_4	50	1475,15	33,63	4,50	1,20

A vizsgálatok célja az volt, hogy a próbatest tesztelési hőmérsékletének növelésével és változatlan páratartalommal, 80%-os kitöltöttség mellett hogyan változnak a mechanikai jellemzők.

9. táblázat. Különböző hőmérsékletű és 65%-os páratartalommal kezelt minták vizsgálati eredményei

Páratartalom (%)	Hőmérséklet (°C)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
65	60	42,09	4,11
	70	40,69	4,67

A 9. táblázatban jól látszik, hogy a hőmérséklet növelésével a szakítószilárdság kismértékben csökken, míg a nyúlásérték növekszik. Úgy tűnik, hogy a polimer kilágyul és így a rugalmassága, nyúlása növekszik.

Folytatva a gondolatmenetet, a 3D-nyomatott PLA-minták szakítóvizsgálatában a 70°C-os és 80%-os páratartalom-kezeléseket végeztünk 80%-os kitöltöttségű mintákon. A vizsgálati eredményeket a 10. táblázat foglalja össze. Továbbá, áttekintettük a korábbi 70°C-os minták eredményeit a most kapottakéval együtt.

10. táblázat. 70°C -os kezelésű minták vizsgálati eredményei

	Próbatest neve	Kitöltöttség	Maximális terhelés (N)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)	Rm (MPa)	A (%)
70°C, 80% páratartalom, 24h	70-80-80_5	80	1691,4	38,99	5,25	1,42	39,23	5,27
	70-80-80_6	80	1719	39,46	5,29	1,42		
70°C, 65% páratartalom, 24h	70-65-80_1	80	1741,6	40,38	4,58	1,44	40,69	4,67
	70-65-80_2	80	1781,3	41,00	4,75	1,42		
	70-65-50_3	50	1511,4	34,36	4,96	1,19	33,99	4,73
	70-65-50_4	50	1475,2	33,63	4,50	1,20		

A vizsgálatok célja az volt, hogy ha a próbatest tesztelési hőmérsékletét továbbra is 70°C-on tartjuk, de a páratartalmat 80%-ra növeljük, hogyan változnak a mechanikai jellemzők. A 10. táblázat adatai alapján a páratartalom növelésével csökken a szakítószilárdság értéke (nagyon csekély mértékben), míg a nyúlás közel 1%-kal nő. Tehát a polimer nedvességet vesz fel, duzzad.

A következő vizsgálati paraméteregyüttes az volt, hogy a vizsgálati hőmérsékletet 40°C-ra, a páratartalmat 45%, 65% és 80%-ra állítottuk be. A vizsgálati minták kitöltöttsége csupán 20% volt, a vizsgálati eredményeket a 11. táblázat foglalja össze. A páratartalom változtatásával a szakítószilárdsági értékekben érdemi eltérés nem mutatkozik. A nyúlásértékeknél nem vonható le egyértelmű következtetés a páratartalommal összefüggésben.

11. táblázat. 40°C-os minták vizsgálati eredményei

	A próba- test neve	Kitöltött- ség	Maximá- lis terhe- lés (N)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Rugalmassági modulusz (Gpa)
40°C, 45% páratartalom, 24h	40-45-20_1	20	1316,16	31,04	4,25	1,15
	40-45-20_2	20	1326,14	31,32	5,46	0,82
40°C, 80% páratartalom, 24h	40-80-20_3	20	1266,35	29,77	5,04	0,93
40°C, 65% páratartalom, 24h	40-65-20_7	20	1349,15	32,21	4,63	1,13
	40-65-20_8	20	1327,34	31,79	4,54	1,12

12. táblázat. 40°C-os 20% kitöltöttségű minták szakítóvizsgálati eredményei

Hőmérsékelt	Páratartalom	Rm (MPa)	A (%)
40°C	45%	31,18	4,86
	65%	32	4,59
	80%	31,17	4,75

A 12. táblázat alapján látható, hogy a páratartalom közel duplázása a 40°C-os kezelésnél a szakítószilárdság-értéken és a nyúlásértéken sem változtat. Ez azzal magyarázható, hogy a polimerben ilyen alacsony hőmérséklet hatására nem indulnak be látványos, mérhető szerkezeti változások (mint pl. a vízfelvétel), illetve a duzzadás jelensége, mely 60–70°C-on tapasztalható.

A 60°C-os kezeléseket különböző kitöltöttség és páratartalom-értékek mellett végeztük el a 3D nyomtatott PLA-mintákon. A vizsgálati eredményeket a 13–18. táblázatok tartalmazzák. A 13. táblázatban a 20% kitöltöttségű minták vizsgálati eredményeit foglaltam össze. Jól látható, hogy a szakítószilárdság-értékek a 40%-os páratartalomról 65%-ra történő növelésével csökkentek, míg a páratartalmat tovább növelve, növekedtek.

13. táblázat. 60°C-os, 20%-os kitöltöttségű vizsgálati minták szakítóvizsgálatának eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakító-szilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	80%	20	37,5	4,835
	65%	20	30,9	4,04
	45%	20	35,0	4,48

A 80%-os kitöltöttség esetén csak kétféle páratartalmat vizsgáltam (14. táblázat). Ennek alapján a páratartalom növelése szakítószilárdság-csökkenést, a nyúlásértékben pedig kismértékű növekedést eredményez.,

14. táblázat. 60°C-os 80%-os kitöltöttségű vizsgálati minták szakítóvizsgálatának eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakító-szilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	65%	80	42,09	4,11
	45%	80	32,19	4,40

15. táblázat. Eltérő kitöltöttségű minták vizsgálati eredményei 60°C és 65% páratartalom esetén

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakítószilárdság (Mpa)	Nyúlás (%)
60°C	65%	20	30,90	4,04
		80	42,09	4,11
		100	57,19	4,57

A 15. táblázatban a kitöltöttség függvényében gyűjtöttem össze az adatokat, melyek a kitöltöttség növelésével egyre inkább a tömör anyag viselkedését mutatják és már nem az individuális szálak szilárdsága és szívóssága a domináns.

A korábban elvégzett szakítóvizsgálatok eredményeit rendszerezve, lehetőség nyílt absztrakt megírására a kutatási téma vizsgálataiból. Mivel a polimerek vizsgálata az egyetemen gyerekcipőben jár egy nagyobb terjedelmű cikk megírásához elegendő eredmény és tudás nem halmozódott fel, eddigi vizsgálatainkat azonban néhány absztrakttal már megmutathatjuk. Két absztrakt megírását terveztem, melyek a PLA-vizsgálatokhoz kapcsolódnak:

1. 3D-nyomtatott PLA-próbatestek viselkedése a hőmérséklet függvényében
2. 3D-nyomtatott PLA-próbatestek viselkedése a páratartalom függvényében

Az absztraktokban felhasznált vizsgálati adatokat a 16. táblázat foglalja össze, melyben azonos kitöltöttséggel készített próbatestek különböző hőmérsékleten és egy adott páratartalom mellett végzett eredményeit gyűjtöttem egybe.

16. táblázat. 80%-os kitöltöttségű minta 65%-os páratartalom mellett vizsgálva – szakítóvizsgálat-eredmények

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
70	65	80	40,69	4,67
60	65	80	42,1	4,11
kezeletlen		80	19,31	2,2
Xenonlámpás öregbített		80	20,76	3,5

A 16. táblázat eredményei alapján az látszik, hogy a polimer bomlási hőmérsékletén végzett kezelések hatására a minták közel 2x-es szakítószilárdsági értékeket mutatnak, és a nyúlás is duplázódott.

17. táblázat. 65%-os páratartalom és 20%-os kitöltöttségminták vizsgálati eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
40	65	20	32	4,59
60	65	20	30,9	4,04
kezeletlen		20	13,84	2,5
Xenon lámpás öregbített		20	14,59	3,1

A 17. táblázat eredményei alapján a hőmérséklet növelése nem változtat a szakítószilárdság-értékeken, és a nyúlásértékek is csak kismértékben változnak.

Az eddigiek alapján elmondható tehát, hogy a polimerben a szakirodalmi bomlási hőmérséklet alatt érdemi folyamatok nem játszódnak le. A bomlási hőmérsékleten és fölötté – a páratartalom megtartása mellett – mechanikai tulajdonságromlás figyelhető meg. Ennek igazolása további kísérletek és vizsgálatok elvégzését igényli.

A 18. táblázat eredményei alapján a bomlási hőmérsékleten kezelt 100%-os kitöltöttségű minta szakítószilárdsági értéke a kezeletlen mintához képest közel másfélszeres, míg a nyúlásérték kb. 0,8%-kal növekedett.

18. táblázat. 60°C-os és 65% páratartalom mellett kezelt minták vizsgálati eredményei

Hőmérséklet (°C)	Páratartalom %	Kitöltöttség (%)	Szakító- szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
60	65	100	57,19	4,57
kezeletlen		100	38,28	3,8
xenonlámpás öregbített		100	34,78	4

A kutatómunka az alábbi paraméterekkel folytatódott:

19. táblázat. Vizsgálati paraméterek mátrixa

Hőmérséklet (°C)	Kitöltöttség (%)	Páratartalom (%)					
40°C	20	30	45		65		80
60°C	20	30	45	55	65	75	80
60°C	80		45		65		80
70°C	80		45		65		80

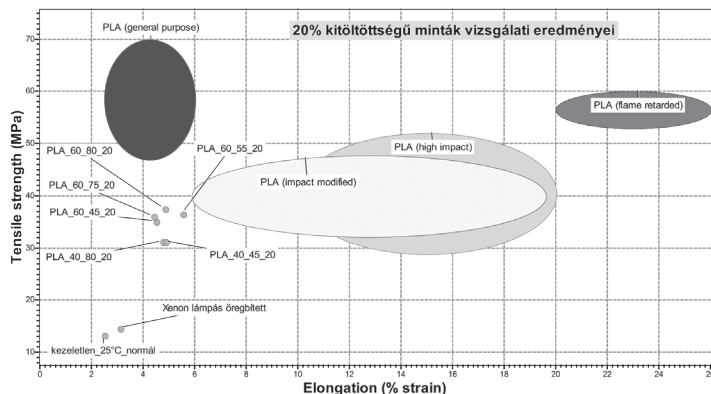
A további vizsgálatokat 60°C-on, 30–55–75% páratartalom mellett, 20%-os kitöltöttségű mintákon végeztük. Mindegyik paraméteregyüttesnél 2–2 mintát teszteltünk, hogy a vizsgálati eredmények reprodukálhatóságát is ellenőrizni tudjuk. A vizsgálati eredményeket a 20. táblázat foglalja össze.

20. táblázat. Vizsgálati eredmények 20%-os kitöltöttségű minták esetén

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	Kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
Kezeletlen	25	Normál	20	13,4	2,5
Öregített			20	14,6	3,1
PLA_60_80_20	60	80	20	37,52	4,84
PLA_60_30_20	60	30	20	35,32	3,87
PLA_60_30_20	60	30	20	16,09	2,95
PLA_60_45_20	60	45	20	35,04	4,48
PLA_60_75_20	60	75	20	36,08	4,40
PLA_60_75_20	60	75	20	34,99	5,25
PLA_60_55_20	60	55	20	36,53	5,54
PLA_60_55_20	60	55	20	36,47	5,21

A vizsgálati eredmények alapján, ha a kitöltöttséget és a vizsgálati hőmérsékletet változtatlanul hagyjuk, és csak a páratartalom növekszik, a következő tendencia rajzolódik ki a szakítóvizsgálat eredményeként kapott szakítószilárdság és szakadási nyúlás eredményei alapján.

13. ábra. Ashby-diagram (CES EDUPACK2019 szoftver alkalmazásával) a 20%-os kitöltöttségű minták esetén



A 13. ábrán jól látszik, hogy a 40°C-on végzett vizsgálatok esetén a páratartalom-növelés nem indukál semmilyen szilárdsági és szívóssági jellemzőváltozást a mintákban, ezzel szemben a 60°C-on elvégzett vizsgálatok esetén a páratartalom növelésével egy kismértékű szakítószilárdság-növekedés figyelhető meg. Az 55%-os páratartalommal kezelt minta kilóg a sorból, abban a tekintetben kilóg a sorból, hogy a szilárdságnövekedés mellett kb. 1–1,5% nyúlás növekmény is megfigyelhető. Ha mind a 40, mind a 60°C mintákat a kezeletlen és az öregbített minták vizsgálati eredményeihez hasonlítjuk, akkor a kezdeti kb. 15 MPa szakítószilárdság duplájára vagy a 60°C-os minták esetén közel háromszorosára nőtt, míg a szakadási nyúlás-értékek is duplájára változtak. Tehát a PLA-minták növelt hőmérséklet és páratartalom mellett vízfelvételre képesek, minek eredményeként a szálakból 3D-nyomatással készített minták közel tömbi anyagként kezdenek el viselkedni, és ennek eredményeként a szilárdsági és szívóssági jellemzőkben javulás detektálható.

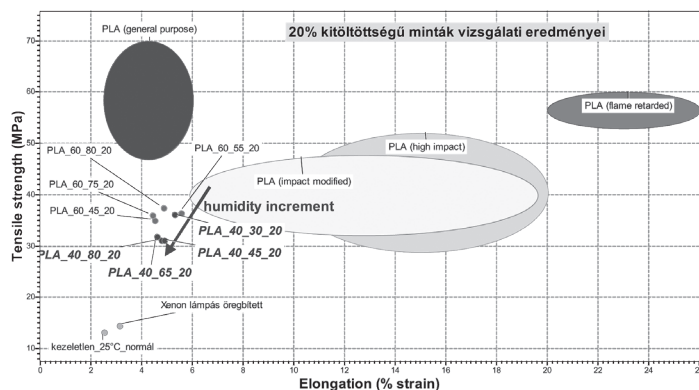
A 40°C-on végzett kísérleteket kiegészítettük a 30%-os és a 65%-os páratartalommal kezelt mintákkal, a vizsgálati eredményeket a 21. táblázat foglalja össze.

21. táblázat. 40°C-on végzett vizsgálati eredmények összefoglalása

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
PLA_40_45_20	40	45	20	31,18	4,86
PLA_40_80_20	40	80	20	31,17	4,75
PLA_40_30_20	40	30	20	36,3	5,27
PLA_40_65_20	40	65	20	32	4,59

A 21. táblázat adatai jól mutatják, hogy a korábban vizsgált 45 és 80%-os páratartalom közel azonos szilárdsági és szívóssági értékeket eredményezett, míg a vizsgálatokat 30%-os páratartalomban kivitelezve a szilárdsági értékek nagyobbak. Ugyanez mondható el a szívóssági jellemzőre, azaz a szakadási nyúlásra is.

14. ábra. Ashby-diagram a 40°C-os minták vizsgálati eredményeire



A vizsgálatot 65%-os páratartalom esetén is megvalósítva már lényeges csökkenés figyelhető meg, mely érték belesimul a csökkenő tendenciába. Tehát 40°C-on a növekvő páratartalom rontja a szakítószilárdság és szakadási nyúlás-értékeket és csökkenés detektálható.

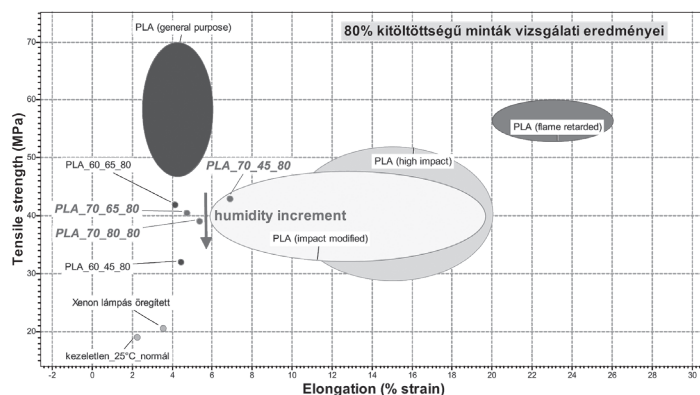
A 70°C-on végzett kísérletekkel folytattuk a kutatást, melyeknél a 45–65–80% páratartalmat alkalmaztuk, a minták pedig a korábbi 20%-os kitöltöttség helyett 80%-osak voltak. A vizsgálati eredményeket a 22. táblázat foglalja össze, mely a szakítószilárdság és szakadásnyúlás-értékeket helyezi középpontba.

22. táblázat. 70°C-os kísérletek vizsgálati eredményei

Minta neve	Hőmérséklet (°C)	Páratartalom (%)	kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)
PLA_70_45_80	70	45	80	43,1	6,82
PLA_70_80_80	70	80	80	39,23	5,27
PLA_70_65_80	70	65	80	40,69	4,67
PLA_70_65_50	70	65	50	33,99	4,73

A 22. táblázat eredményei alapján megállapítható, hogy az azonos kitöltöttségű, és azonos hőmérsékleten végezett, de páratartalmában folyamatosan növelt terhelést kapott mintáknál a szakítószilárdság csökken, és míg a szakadási nyúlás egy V-alakú trendet rajzol ki. Ez utóbbi tényleges igazolására további vizsgálatok szükségesek, mert jelen esetben csak három vizsgálati pont áll rendelkezésre. Még további legalább kettő köztes páratartalom szükséges az állítás megerősítésére.

15. ábra. Ashby-diagram a 70°C-on végzett kísérletek eredményeire



A fenti csökkenő tendencia szépen látszik az Ashby-diagramon (15. ábra) is, továbbá a nyúlásértékek V-alakzata is kirajzolódik.

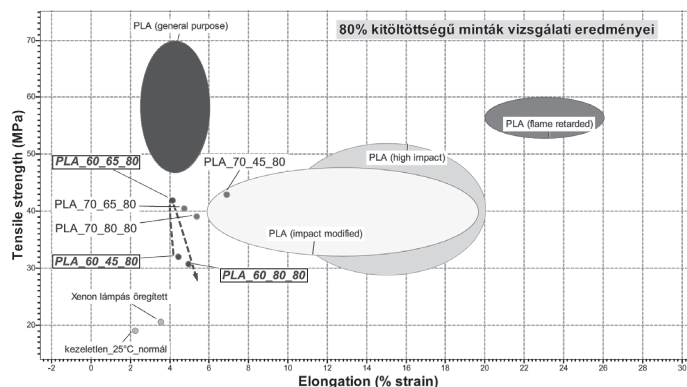
A 80%-os kitöltöttségű minták elemzését is elvégeztük. Ezt a kitöltöttséget csak azoknál a klímatesztes vizsgálatoknál alkalmaztuk, melyek a szakirodalomban közölt 60°C vagy a feletti hőmérsékletet, jelen esetben 70°C-ot kaptak. A páratartalom széles skálán mozgott, melyet a 23. táblázat foglal össze.

23. táblázat. 70°C-os kezelésű minták vizsgálati eredményei

Minta neve	Állapot		Kitöltöttség	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)
	hőmérséklet	Páratartalom			
Kezeletlen	25	Normál	80	19,3	2,2
Öregített			80	20,8	3,5
PLA_70_65_80	70	65	80	40,7	4,7
PLA_70_80_80	70	80	80	39,2	5,3
PLA_60_45_80	60	45	80	32,2	4,4
PLA_60_65_80	60	65	80	42,1	4,1
PLA_60_80_80	60	80	80	30,9	4,9

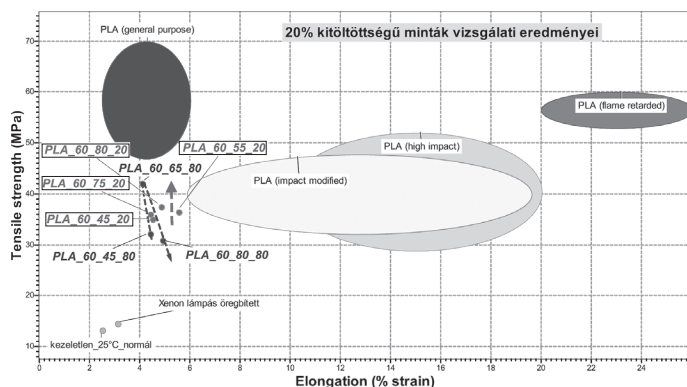
A 23. táblázat adatai alapján látszik, hogy a páratartalom ezeknél a mintáknál 45–65–80% volt.

16. ábra. Ashby-diagram 60°C-on kezelt és 80%-os kitöltöttségű minták esetén



A 16. ábra Ashby-diagramján a kerettel kiemelt minták vizsgálati eredményei egy fordított V-alakot írnak le, mely azt jelenti, hogy a 60°C-on a 80%-os kitöltöttségű mintáknál eddig elvégzett klímatesztek alapján a páratartalom növelésével a minták szilárdsági jellemzője növekszik, majd a páratartalom további növelésével lecsökken a 45%-os páratartalmú minta értékére. Természetesen, hogy a trendet igazolni lehessen, a további vizsgálatok elvégzése is indokolt.

17. ábra. 60°C-on végzett vizsgálatok összefoglaló Ashby-diagramja



A 60°C-os minták elemzését is elvégeztük. Az 17. ábra foglalja össze. A kerettel kiemelt 20%-os kitöltöttségű mintáknál a páratartalom növelésével a szakítószilárdság-értékek nőnek, míg a 80%-os minták esetén a korábban ismertetett fordított V-alak rajzolódik ki.

Ha azonos paraméterekkel kezelt, de eltérő kitöltöttségű mintákat veszünk alapul, akkor pl. PLA_60_45_20 és PLA_60_45_80 esetén nagyobb a 20%-os kitöltöttségű minta szakítószilárdság-értéke, ami azzal magyarázható, hogy a 20% esetén a mintában elegendő üres tér áll rendelkezésre, hogy a szálak duzzadni tudjanak, azaz nedvességet tudjanak felvenni. A 80% esetén ez nem áll fenn, és egy belső feszültség indukálódik, ami ridegíti az anyagot és így kisebb húzóerőnél már elszakad. A PLA_60_80_20 és PLA_60_80_80 mintáknál ugyanez az összefüggés látszik

Összefoglalás

A PLA-minták klímatesztes vizsgálatait az alábbi táblázatban található paraméterekkel végeztük el.

24. táblázat. A klímatesztes vizsgálatoknál használt vizsgálati paraméterek

Hőmérséklet (°C)	Kitöltöttség (%)	Páratartalom (%)					
40°C	20	30	45		65		80
60°C	20	30	45	55	65	75	80
60°C	80		45		65		80
70°C	80		45		65		80

A vizsgálatokból az alábbi következtetések vonhatók le:

- A polimer a bomlási hőmérséklet alatt (60°C) a páratartalom függvényében érdemi mechanikai jellemzőkben nem mutat változást.
- A 60°C-on, 20% kitöltöttséggel készített minták esetén a páratartalom függvényében egy minimumos görbe rajzolódik ki, melynek a minimuma 65% páratartalomnál van, ennek tényleges igazolása további vizsgálatokat és kísérleteket igényel.
- A 60°C-os, 80% kitöltöttségű minták esetén a páratartalom növelése szilárdságnövekedést mutat, ennek tényleges igazolása további vizsgálatokat és kísérleteket igényel.

- A 70°C-on végzett vizsgálatok esetén a páratartalom változtatása 65%-ról 80%-ra nem okoz érdemi változást a mechanikai tulajdonságokban, a kitöltöttségben megmutatkozó különbség a mechanikai jellemzőket követi.
- 40°C-on elvégzett kísérleteknél a négy különböző páratartalommal végzett vizsgálatból megállapítható, hogy a PLA-mintáknál azonos kitöltöttség esetén, a szakítószilárdság a páratartalom növelésével csökkenő tendenciát mutat. Míg a szakadási nyúlás-értékeknél szintén csökkenés detektálható, de ezek az értékek a 80%-os páratartalomnál elmozdulnak a jellemző növekedési irányba. Vajon a páratartalom további növekedése emelkedést indukálna a szilárdsági jellemzőkben is? Sajnos az egyetemen lévő készülék lehetőségeit kimagoltuk.
- 60°C-on végzett vizsgálatok esetén a 20%-os kitöltöttségnél egy teljes vizsgálati sort alkalmaztam, a teszteleseket hat különböző páratartalom mellett hajtottam végre. A vizsgálati eredmények alapján az látszik, hogy a páratartalom növelésével a szilárdsági jellemző is növekszik. (Megjegyzés: a 30%-os páratartalomnál két nagyon eltérő eredményt kaptunk, így ezt a továbbiakban nem vettem figyelembe, mert további tesztelés szükséges, hogy egyértelműen látható legyen melyik érték adja a valós jellemzőt.). A szakadási nyúlásoknál a kezdeti kimértékű növekedést kimértékű csökkenés követ. Egyértelmű trend nem állítható fel, tulajdonképpen az mondható, hogy a páratartalom növelése nem okoz jelentősebb változást a szakadási nyúlás értékében.
- 60°C-on, 80%-os kitöltöttségnél a szakítószilárdságnál – a kapott eredmények alapján – egy fordított V-alak rajzolódik ki, a kapott eredmények alapján, de a tendenciát csak további eredményekkel lehet egyértelműen igazolni.
- 70°C-os tesztelés után a páratartalom növelésével a szakítószilárdság értékeiben egyértelmű csökkenés mutatkozik, ami arra utal, hogy a felvett nedvesség jelentős belső feszültséget indukál az anyagban és ez ridegíti a 3D-nyomtatott próbatesteket. Mindez a szilárdság csökkenésében mutatkozik meg. A szakadási nyúlásnál egy V-alak rajzolódik ki, melynek igazolása további vizsgálatokat igényel.

kieverékek és különböző adalekanyagok hatása a természetes és mesterséges alapanyagokra

Összefoglalás: Szakirodalmi összefoglalónkban olyan cikkeket dolgoztunk fel, amelyek megmutatják, hogyan hatnak az alkalmazott adalekanyagok a természetes nyersgumi, illetve a vulkanizált gumi mechanikai tulajdonságaira. A kutatási projektekben használt korom, szilika, fémrészecskék, kalcium-karbonát, nanorészecskék, kitozán stb. jelentős mértékben képesek növelni a szilárdsági jellemzőket – mint a szakítószilárdság és a csavarási szilárdság –, s ezzel párhuzamosan csökkentik a szívóssági jellemzőt, a szakadási nyúlást. Azonban mindegyik publikáció beszámol arról, hogy van egy határérték, amely felett a különböző mikro es nano töltőanyagokat adagolva a mechanikai tulajdonságokban csökkenés/romlás tapasztalható. Ez az érték 50–80 phr között változik. A cikkekből megadott 100 phr értékű adalekanyagok szinte kivétel nélkül rosszabb mechanikai tulajdonságokat mutattak, mint a nyersgumi.

Kulcsszavak: Mesterséges gumi; korom, szilika; bio adalekok.

Abstract: In our review of the literature, we have developed articles that show how the applied additives affect the mechanical properties of natural raw rubber and vulcanized rubber. Carbon black, silica, metal particles, calcium carbonate, nanoparticles, chitosan, etc. as filling additives used in research project are able to significantly increase strength characteristics such as tensile strength and tear strength, and in parallel reduce the toughness characteristic tensile elongation. But each publication reports that there is a limit above which, when the various micro and nano fillers are added, there is already a decrease / deterioration in the mechanical properties. This value ranges from 50 to 80 phr. The additives with a value of 100 phr given in the articles showed almost without exception worse mechanical properties than the raw rubber.

Keywords: Artificial rubber; carbon black; silica; bio additives.

* *Dunaiújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet*

E-mail: pazman@uniduna.hu

[1] *Inc. J. Appl. Polym. Sci.* 2019, 136, 47272.

Bevezető

Kutatómunkánk során szakirodalom-kutatást folytattunk annak érdekében, hogy minél részletesebb és szélesebb körű átfogó tudást szerezzünk a gumikeverékek és a hozzáadagolt különböző természetű anyagok hatásáról.

Szakirodalmi összefoglaló

1. cikk: „*Effects of the degree of crosslinking and test rate on the tensile properties of a crosslinked polyacrylic pressure-sensitive adhesive and vulcanized rubber; Yusuke Kashiwara Shun Okada Yoshiaki Urahama Shigeki Hikasa Satoshi Makuta Kazuko Fujiwara Syuji Fujii Yoshinobu Nakamura; First published: 11 November 2018 <https://doi.org/10.1002/app.47272>*”

A cikk szerzői meghatározták és összehasonlították a szakítószilárdság tesztelési sebességének hatását a nyomásérzékeny ragasztó (PSA) és a vulkanizált gumi tulajdonságaira. PSA-anyagként egy változó térhálósítású poli (n-butil-akrilát-akrilsav) véletlenszerű kopolimert használtak, melyben a keresztkötések mértékét és gyakoriságát változtatták. A vizsgálati eredmények alapján megállapították, hogy a PSA 100%-os modulusa növekszik a térhálósítás mértékével és a gyorsabb húzási sebesség alkalmazásával. Ezzel szemben a vulkanizált gumi 100%-os modulusa nem mutatott vizsgálati sebesség-függést. Ennek a hatásnak a kiértékeléséhez a kémiai és fizikai térhálósítási pontok közötti molekulatömeget egyensúlyi duzzadással, dinamikus mechanikai analízissel és szakítóvizsgálattal határozták meg. A fizikai térhálósítási pontok aránya sokkal nagyobbak bizonyult a térhálósított PSA-ban. Mivel ezek az összefonódási pontok a lassú deformációra reagálva könnyen szétválaszthatóak, a teszt sebességének változásai csak a PSA-t érintették. [1]

2. cikk: *Mechanical properties and swelling behavior of cross-linked natural rubber/chitosan blends; Jobish Johns and Vijayalakshmi Rao; International Journal of Polymer Anal. Charact., 14: 508-526. 2009.*

Ez a cikk a vulkanizált természetes gumi (NR) és a chitosan (CS) keverék felületi keménységével, az oldószer felvételével, a keresztkötés-sűrűséggel és diffúziós koeficienssel és szilárdsági tulajdonságaival foglalkozik; keresztkötést létesítő ágens-

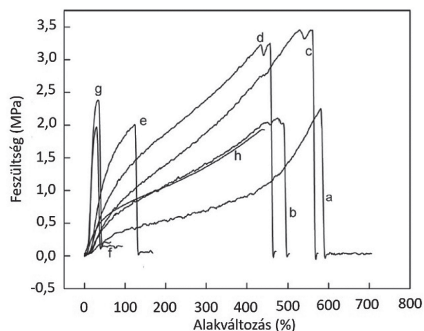
ként Dicumil-peroxidot használtak. Dicumil-peroxidot használtak, mint keresztkötést létesítő ágenst. A szilárdsági tulajdonságok tekintetében a keresztkötéseket tartalmazó természetes gumi sokkal magasabb szakítószilárdságot és Shore A keménységet mutatott, mint a nem vulkanizált minták. Megvizsgálták továbbá, hogy a hő hatására bekövetkező öregítés hogyan befolyásolja a vulkanizált keverék mechanikai tulajdonságait. A vulkanizált minták oldószerrel való ellenállóképességét az egyensúlyi duzzasztásos vizsgálattal ellenőrizték, mely során benzint használtak oldószerként. Mindezek mellett megvizsgálták a kitozán tömegarányának hatását a szállítási tulajdonságokra. A peroxiddal vulkanizált keverék javított oldószerrel szembeni ellenállóképessége biztosította a keresztkötések képződését a gumifázisban. A keverék csökkentett duzzadást mutatott, ami a szerkezet bonyolultságának, a csökkentett szabadúthossznak

1. táblázat. Szakítószilárdság és keménységértékek a vulkanizált és nem vulkanizált NR/CS-keverékeknél

Minta neve CS/NR	UTS (MPa)				Keménység (Shore A)	
	Nem vulkanizált		Vulkanizált (3pphr)		Vulkanizált (3pphr)	Nem vulkanizált
	Nem öregített	Öregített	Nem öregített	Öregített		
0/100	0,46	1,61	2,28	0,58	42	20
5/95	1,13	1,56	2,12	0,52	46	23
10/90	0,98	1,82	3,47	0,91	52	36
15/85	1,93	2,18	3,27	1,73	71	51
20/80	1,78	2,17	2,04	2,45	76	58
35/65	3,25	3,37	2,01	1,62	80	68
50/50	0,96	2,33	2,39	2,21	83	82

Az 1. táblázat a különböző keverékek szakítóvizsgálattal és keménységméréssel meghatározott eredményeit foglalja össze. Az első minta tisztán természetes gumi, melynek nem vulkanizált, vulkanizált, továbbá hőkezeléssel öregített, illetve nem öregített állapotában mutatja a szakítószilárdsági értékeket. A keverék összetétele oly módon változott, hogy a természetes gumihoz 5–10–15–20–35–50% mennyiségben adagoltak kitozánt. Az értékekből jól látszik, hogy már 5% kitozán közel háromszorosára növeli a nem öregített minta szilárdsági értékét, de az öregítés ezt a drasztikusan lecsökkenti. A kitozán mennyiségének növelése egészen 35% javítja a szakítószilárdság értékeit, de már az 50–50%-os keverék esetén is drasztikus csökkenés figyelhető meg. Ezeket a trendeket mutatják a következő diagramok ezeket a trendeket mutatják egy-egy változó függvényében.

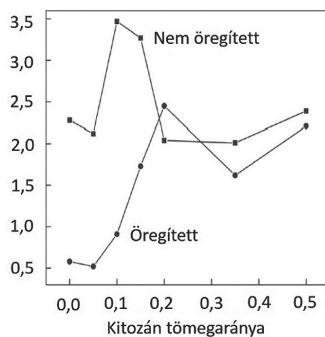
1. ábra. Vulkanizált minták feszültség és alakváltozás görbék



a) NR, b) NR95CS5, c) NR90CS10, d) NR85CS15, e) NR80CS20, f) NR65CS35, g) NR50CS50

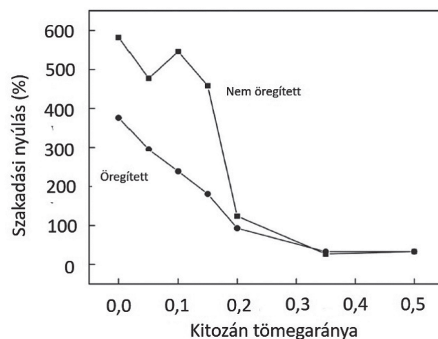
Az 1. ábra a felvett szakítódigramokat mutatja az egyes keverékek esetén. A görbeseregéből kirajzolódik, hogy természetes gumi, valamint a 5, 10, 15% kitozán esetén a nyúlásértékek megőrzése mellett, illetve a kitozán mennyiségének növelésével a szakítószilárdság is növekszik. Ám a 20% feletti kitozánmennyiség drasztikus csökkenést okoz a nyúlásértékekben, és a szakítószilárdsági értékek is csökkenést mutatnak.

2. ábra. A termikus öregítés hatása az egyezményes szakítószilárdság-értékekre a kitozán tömegarányának függvényében



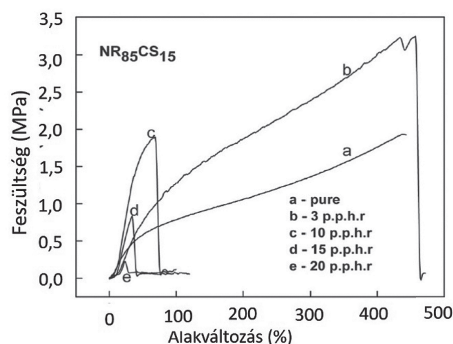
A 2. ábra az öregített és nem öregített állapotú keverékek szakítószilárdságát mutatja a kitozántartalom függvényében. A nem öregített minták esetén a maximális szakítószilárdságot a 10, illetve a 15% CS-tartalom esetén adja, míg öregítést alkalmazva a 20% kitozántartalom adja a maximumot. De ez a maximum messze elmarad a nem öregített állapotú minta 3,5 MPa értékétől.

3. ábra. A termikus öregítés hatása a nyúlásértékekre a kitozán tömegarányának függvényében



A 3. ábráról egyértelműen leolvasható, hogy 20% kitozántartalom elérését követően a nyúlásértékek drasztikus csökkenést mutatnak. Itt már az öregítés sem hat jelentősen a minták nyúlására, inkább a kitozántartalom a meghatározó.

4. ábra. Különböző DCP-koncentráció hatása az NR85CS15-keverékre



A 4. ábra a 15%-os kitozántartalomú minta szakítódigramjait mutatja, ahol DCP-koncentráció-eltérések vannak. A diagramok egyértelműen mutatják, hogy a 10 vagy a feletti DCP- (dicumil-peroxid) koncentráció drasztikusan lecsökkenti a nyúlás- és a szakítószilárdsági értékeket. Ezeknél a mintáknál a keresztmetszések mennyisége ugrásszerűen megnő, így a polimer merevsége, ridegsége hirtelen növekszik.

A 2. táblázat a konkrét vizsgálati eredményeket foglalja össze a 15% kitozántartalmú természetes gumi-keverék esetében változó keresztmetszést elősegítő DCP-koncentrációnál.

2. táblázat. A szakítószilárdság, a szakadási nyúlás és a keménység alakulása a DCP mennyiségének függvényében

DCP mennyisége	UTS (MPa)		EAB (%)		Keménység (Shore A)
	nem öregített	öregített	nem öregített	öregített	
0	1,93	2,18	438	415	51
3	3,27	1,73	458	181	71
10	1,94	1,7	68	31	71
15	0,88	1,15	35	32	70
20	0,27	1,6	24	54	70

Az elvégzett szilárdsági vizsgálatok alapján a cikk szerzői megállapították, hogy a természetes gumi- és kitozánkeverék, melyet a keresztmetszést elősegítő dicumil-peroxiddal vulkanizáltak, nagyobb szilárdságot és keménységet mutat, a nyúlásértékek viszont csökkennek, ha összehasonlítják a nem vulkanizált mintákkal. A maximális szakítószilárdságot a vulkanizált, 10% kitozánt tartalmazó keverék esetén figyelték meg. Az öregítés egyedül a 20% kitozán esetén hatott kedvezően a szilárdsági értékre, a többi minta esetén csökkenést figyeltek meg.

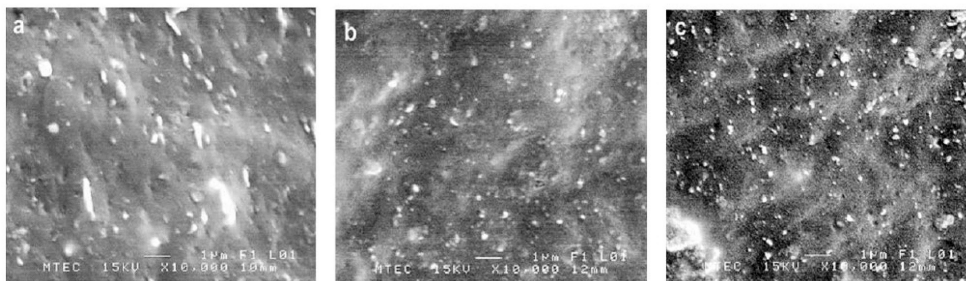
3. cikk: *Natural Rubber and Reclaimed Rubber Composites – A Systematic Reviewer; Mente P, Motaung TE, and Hlangothi SP, Polymer Sciences 2016, Vol. 2 No.1:7.*

A cikk áttekintést ad, olyan gumialapú kompozitanyagok szerkezeti és mechanikai tulajdonságairól ad áttekintést, amelyek különböző töltőanyagokat tartalmaznak (pl. agyag, feketeszen, szilika). A cikk átfogó tanulmány a természetes szákkal erősített gumikompozitok és a visszajáratott gumi szilárdsági, vulkanizálási, morfológiai és hőtani tulajdonságairól. A természetes száak alkalmazása a szálerősítő polimer kompozitokban az elmúlt időben vált érdekessé a kutatók, a mérnökök és a tudósok számára. Mindezt olcsóságuknak, kedvező mechanikai tulajdonságaiknak és nagy fajlagos szilárdsági értékeiknek, továbbá kevésbé abrazív, környezetbarát és biodegradábilis jellemzőiknek köszönhetik. A hagyományos száak

(üveg, aramid) helyettesítését ezekkel a természetes szálakkal tehát megoldották. A természetes szálakkal erősített kompozitok szilárdsági tulajdonságait főként a mátrix és az erősítő szál közti határfelületi adhézió befolyásolja. Számos kémiai módosítást alkalmaztak, hogy javítsák a mátrixerősítő szál közti határfelületi kötést és ezzel növeljék a kompozitok szilárdsági jellemzőit. Így egyre nagyobb figyelmet kapnak a polimer- és a természetes gumik. Ebben a cikkben fontos szerepet kap az egyre nagyobb környezeti problémát okozó elhasznált gumiabroncsanyagok élettartamának meghosszabbítása azzal, hogy visszajaratják ezeket a termékeket, mégpedig devulkanizálással.

Az 5. ábra azon a kompozit anyagok a felületét mutatja, melyek 6 phr (part per hundred rubber – száz gumiegységre vonatkoztatott arány) agyagot, fekete szenet és szilikát tartalmaznak. Ezek a felvételek pásztázó elektronmikroszkóppal készültek.

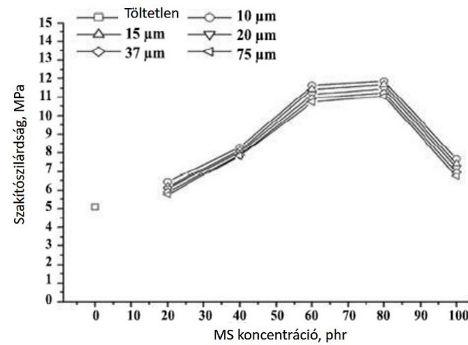
5. ábra. SEM-felvételek a 6phr agyaggal (a), korommal (b) és szilikával (c) töltött kompozitokról



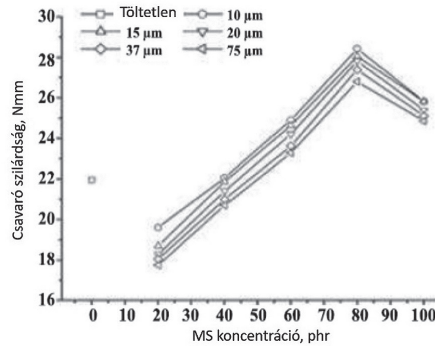
A 6. ábra a természetes gumikompozitok szakítószilárdságát mutatja a töltőanyag-mennyiség és szemcse-méret függvényében.

A keverékek szakítószilárdsága nem függ kizárólag a töltőanyag-terheléstől és a töltőanyag-részecske méretétől, de függ a szálorientációtól: ahol nagyobb mértékű a szálorientáció, ott a keverék nagyobb szakítószilárdságot mutat. A töltetlen mintához képest a 20 phr csekély mértékben módosít a szakítószilárdságon, de ha ennek mértéke 60 phr vagy afelett van, 80 phr-ig a szilárdság – függetlenül a részecskemérettől – több mint kétszeresére nő.

6. ábra. Természetes gumikompozit-anyagok szakítószilárdsága változó töltőanyag és részecske méret mellett

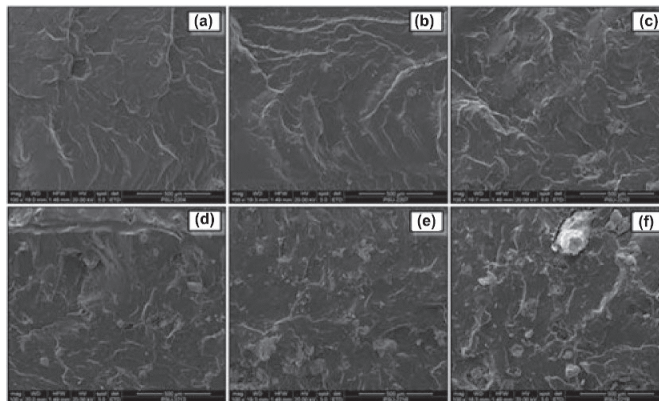


7. ábra. Csavarószilárdság-változás a természetes gumikompozitoknál, növekvő töltőanyag-terheléskor



A 7. ábra a szakadáskor mért feszültségértékeket mutatja a töltőanyag mennyisége és részecskeméretének függvényében. Itt azonban a 80 phr adja a maximumot addig folyamatos növekedés detektálható, ezt követően pedig csökkenés figyelhető meg.

8. ábra. SEM-felvételek (a) természetes gumi, (b) 5phr-töltővel erősített természetes gumikompozit, (c) 15 phr, (d) 25 phr, (e) 35 phr, (f) 45 phr



A 8. ábra a töltőanyag mennyiségének növelésével mutatja a minták felületét. Latható, hogy a töltőanyag phr-értékének növelésével a felület is egyre növekszik.

A gumianyagokban alkalmazott erősítőszálak javították a modulus értékét, a szakítószilárdságot, a szakadáshoz tartozó feszültségeket, és a szakadási nyúlást. A töltőanyagok jelenléte kimutatta a maximális csavarónyomatékokot, és csökkentette a beégési és vulkanizálási időt. A töltőanyag-mennyiség tekintetében általában két extrém véglet adható meg. Az alacsony kb. 3%, és a nagyon magas a kb. 20%, amelyek relatíve gyenge mechanikai tulajdonságokat eredményeznek. Az optimális tulajdonságok eléréséhez kb. 5–10% töltőanyag-mennyiség szükséges. A nedvesítési tulajdonságok javulnak a töltőanyagok adagolásával és romlanak a hőmérséklet növelésével, azonban a modulusromlás nem változik szignifikánsan a töltőanyag-adagolással.

A nedvesítési faktor és a tárolásimodulus-értékek bizonyították, hogy a keresztkötések mértéke növekszik a töltőanyagok adagolásával, és ez a mennyiség növelésével tovább javul. A természetes gumi bomlási mechanizmusa nem változik a töltőanyagok adagolásával, de a bomlási hőmérséklet növekszik, ami azt jelenti, hogy a hozzáadott töltőanyag növeli az anyag hőstabilitását. A töltőanyagok bekeverése hatással van a kompozit felületi morfológiájára: ahol igen nagy a töltőanyag-mennyiség, ott gyenge a töltőanyag-részecskék diszperziója (eloszlatása), ami agglomerátumok, azaz csoportok képződését idézi elő. Ez látszik a pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken is, és ez adja az érdekesebb felületeket.

Ha a szűz gumihoz visszajáratott gumianyagot adunk, a visszajáratott anyag minősége, összetétele és gyártási eljárása erőteljesen meghatározza a kompozitanyagok tulajdonságait.

Az eddigi vizsgálatok alapján elmondható, hogy a visszajáratott gumianyagok alkalmazása javítja – késlelteti a termékek öregedési folyamatát. A gumikompozitoknál a keresztkötések és az adalékanyagok kombinációjának alkalmazása idézi elő a legnagyobb változásokat.

A visszajáratott gumi és a nyersgumi biomassa formájában történő alkalmazása hiányzó koncepció a gumikompozitok összeépíthetőségében. A természetes szálakkal erősített természetes gumi és a visszajáratott gumikompozitok megoldást jelenthetnek a környezeti szennyezésre és a gazdaságosságra. Ebből következik, hogy megérné törekedni arra, hogy ilyen összetett rendszereket lehessen minél jobb tulajdonságokkal előállítani. A visszajáratott gumianyagok polimer keverékekben történő alkalmazását is meg kellene vizsgálni.

4. cikk: egy könyvrészlet: *Natural Rubber-Based Composites and Nanocomposites: State of the Art, New Challenges and Opportunities*; C. H. CHAN,^a JITHIN JOY,^b HANNA J. MARIA^b AND S. THOMAS.

A könyvrészlet 1.4. és 1.5. fejezete foglalkozik a részfeladat témájával, vagyis azzal, hogy milyen természetes adalékanyagokat lehet alkalmazni a gumikeverékekben, és ezek milyen hatással vannak a keletkezett összetett anyag tulajdonságaira. Ezeket az összetett anyagi rendszereket a szakirodalom kompozitanyagoknak hívja és mivel az adalékanyagok szemcse/részecskemérete mikron alatti, ezért nanokompozitokról beszélünk. A mátrixanyag sok esetben a braziliai hevea brasiliensis (kaucsukfa) kéreg alatti nedveiből előállított nyers/természetes gumi (NR), de manapság már mesterséges, azaz polimerekből előállított gumianyagokat is alkalmaznak. Ilyen pl. a butadién-sztirol, vagy csak sztirolalapanyagok felhasználása, melyek rendre a BSR-, vagy SR-alapanyagokat adják. A cikk első körben a természetes gumikompozitokat taglalja. Így szó esik az NR-kompozitokban alkalmazott adalékok előnyös hatásairól, arról, hogy az NR mátrixában lévő töltőanyag-erősítésnek köszönhetően a termékek anyagköltségei csökkenthetők, a kívánt tulajdonságok javíthatóak és az NR feldolgozási folyamatai is optimalizálhatóak. Az NR-nél használt, kereskedelemben is kapható töltőanyagok a fekete szén/korom (CB), a szilika (SiO₂) és a kalcium-karbonát stb. Az NR-alapú gumiabroncs-ipart úgy ismerik, mint a nanoméretű kormot felhasználó vezető ágazatot. A korom az elsőszámú erősítő adalék a NR-alapú kompozitok számára. Az NR-alapú gumiabroncsokhoz adagolt korom csökkenti a járművek üzemanyag-felhasználását, mivel csökkenti a gördülési ellenállást. Általában a hagyományos töltőanyagok nagy mennyiségének adagolása, azaz kb. 40%-a kívánatos, hogy meg lehessen valósítani az autóalkatrészek számára optimális mechanikai tulajdonságokat. Az adagolt töltőanyagok nagy mennyisége csökkentheti az anyagok gyárthatóságát, növelheti a termék súlyát éppúgy, ahogy növelheti a törekenységet, továbbá hatással van a végtermékek átlátszóságára is. Ez vezetett ahhoz a folyamatos problémához, hogy új, költséghatékony és kis tömegű NR-kompozitokat fejlesszenek ki egyre jobb és jobb tulajdonság-kombinációkkal. Ezeknek a kompozitoknak az előállításához új gyártási módszereket is megalkottak, úgymint a keverési technológiákat, azon belül is a kéthengeres keverőket, az őrlemények keverését, az oldatban való keverés technológiáját, az ömledékkeverést, és a koagulációt.

Ezekről a technológiákról az alábbi publikációk adnak részletesebb leírásokat:

Örlemények keverése:

- J. B. Donnet, Compos. Sci. Technol., 2003, 63, 1085.
- M. A. Lo´pez-Manchado, J. Biagiotti, L. Valentini and J. M. Kenny, J. Appl. Polym. Sci., 2004, 92, 3394.
- Q. Liu, Y. Zhang and H. Xu, Appl. Clay Sci., 2008, 42, 232.
- H. Ismail and R. Ramli, J. Reinf. Plast. Compos., 2008, 27, 1909.
- J. Carretero-González, H. Retsos, R. Verdejo, S. Toki, B. S. Hsiao, E. P. Giannelis and M. A. Lo´pez-Manchado, Macromolecules, 2008, 41, 6763.

Oldatban való keverés:

- M. Ganter, W. Gronski, P. Reichert and R. Mu¨lhaupt, Rubb. Chem. Technol., 2001, 74, 221.
- M. Pramanik, S. K. Srivastava, B. K. Samantaray and A. K. Bhowmick, J. Appl. Polym. Sci., 2003, 87, 2216.
- R. Stephen, S. Thomas, K. V. S. N. Raju, S. Varghese, K. Joseph and Z. Oommen, Rubber Chem. Technol., 2007, 80, 672.
- R. Stephen, S. Varghese, K. Joseph, Z. Oommen and S. Thomas, J. Membr. Sci., 2006, 282, 162.

Ömledék keverés:

- Y. T. Vu, J. E. Mark, L. H. Pham and M. Engelhardt, J. Appl. Polym. Sci., 2001, 82, 1391.

Koaguláció:

- P. Danwanichakul, R. Werathirachot, C. Kongkaew and S. Loykulnant, Eur. J. Sci. Res., 2011, 62, 537.

ADALÉKANYAGOK HATÁSAI

Koromadalékok

A korom (CB) vitathatatlanul a legszélesebb körben alkalmazott erősítő töltőanyag az NR-készítményekben. Javítja az NR-alapú anyagok húzó- és szakítószilárdságát, modulusát és keménységét, kopás- és hőoxidációs ellenállását stb. A CB-t különféle eljárásokkal állítják elő – beleértve a csatornaeljárást is –, hogy különböző kormot állítsanak elő (ilyen pl. a kemencefekete, a termikus fekete, a lámpafekete és az acetilén fekete). Az NR-alapú kompozitok és a nanokompozitok CB hozzáadásával monoton fekete színt mutatnak a késztermékekben. Megfigyelték továbbá, hogy az NR-nanokompozitoknál (átlagos részecskeméret 30

nm) a CB- (N330) adagolás mechanikai tulajdonságaik javulását eredményezi a nem adalékolt polimerhez képest. A vulkanizált nanokompozitok szakítószilárdsága 50 tömeg% CB-töltőanyag-adagolással 20,6-ról 22,1 MPa-ra nő. A szakadási nyúlás azonban ellentétes tendenciát mutat, 973-ról 573%-ra csökken. Számos publikáció vizsgálta a CB (N234) NR-mátrixra gyakorolt hatását is. Más szerzők publikációiban is hasonló megfigyeléseket rögzítettek a korom mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását illetően. Így pl. a vizsgálatok során 21,2 MPa-nyomáson mért szakítószilárdságnál és 50 tömeg% töltőanyag-adagolásnál a szakadási nyúlás csökkenéséről számolnak be. A CB-t gyakran használják más töltőanyagokkal együtt, hogy hibrid töltőanyagokkal tovább tudják javítani a késztermék mechanikai tulajdonságait. Liu és társai a nanoszintált CB-t és poli(etilén-glikollal – PEG) módosított agyagot adtak NR-nanokompozitjukhoz. A vizsgálati adatok alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a hibrid töltőanyagokkal rendelkező NR sokkal jobb mechanikai tulajdonságú, mint azok a minták, melyekben az NR-hez csak CB-t adalékolnak. Rattanasom és társai arról is beszámoltak, hogy a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás 15,3-ról 25,4 MPa-ra, illetve 460-ról 605%-ra nő a CB-vel töltött NR-hez képest, ha az NR-hez hibrid töltőanyagokat azaz CB-t és módosított agyagot adtak.

További vizsgálati eredmények a koromadalékolt gumikompozitok esetén:

1. *EkoprenaTM as a reinforcement modifier for graphene oxide/carbon black filled natural rubber*; Nik Intan Nik Ismail és társai; <https://www.researchgate.net/publication/3253338884>; 2018 május

3. táblázat. Gumikompozitok mechanikai tulajdonságai

Mechanikai tulajdonságok	NR/GO/CB
Szakítószilárdság, MPa	22,9±1,01
Szakadási nyúlás, %	848±7,57
M1000, MPa	1,2±0,03
M300, MPa erősítési index	3,2±0,08
M300/M1000	2,62±0,08
Keményység, IRHD	56,7±0,02
Abrázív ellenállási index, %	57,5±0,02

A cikkben közölt szakítószilárdsági érték (3. táblázat) közel azonos, mint a korábbi publikációban megadott érték, de itt hibrid töltőanyagot keverték a természetes gumiba, az ugyanis a korom mellett grafén-oxidot is tartalmaz.

2. Formulation, Preparation, and Mechanical Characterization of Nitrile-Butadiene Rubber (NBR) Composites; Noor Aldeen Bawadukji and Rafi Jabra; Materials Science: An Indian Journal, Research Vol. 15, Issue 1.

Ebben a cikkben többféle adalékanyaggal készített mesterséges gumikeverékeket vizsgáltak. Most csak a korommal adalékoltakat emeltem ki. A korom mennyiségét a nitril-butadién gumiban a táblázat tartalmazza, mely szerint a mesterséges gumi száz gumiegységre vonatkoztatva 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 és 100 CB-t tartalmazott. A keverékek vizsgálati adatai alapján az látszik, hogy a szilárdsági értékek 50 CB-ig a szakítószilárdság, illetve a nyúlásértékek tekintetében is nőnek, ezt követően drasztikus romlás következik be, ami a korom-agglomerátumok megjelenésével magyarázható. Az ebben a cikkben szereplő 50% CB-töltöttség adja a maximális szilárdságot, ami közel azonos, mint a korábbi cikkekben közölt érték.

4. táblázat. Természetes alkotók aránya az NBR-gumiban

Alkotók	(phr)
NBR Krynac 3370F	100
ZnO	3
IPPD	1
DPG	1
Korom N330-csoport	0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100
Aetosil 200 nano-szilika csoport	0, 10, 20, 30, 40, 50, 75
Természetes vulkanikus tuffa csoport	0, 10, 30, 50, 75
Sztearinsav	2
DOP	10
Szulfín	2,5

5. táblázat. NBR Krynac3370F-kompozit-minták mechanikai tulajdonságai

Minta	Szakító-szilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Szívósság (J)	Keménység (Shore A)
NBR	2,25	182	0,5	53
NBR10C	4,83	366	1,82	55
NBR20C	7,03	412	3,08	61
NBR30C	12,58	452	6,31	65
NBR40C	19,21	479	10,06	67
NBR50C	20,48	484	9,94	75
NBR75C	18,02	274	6,69	85
NBR100C	14,08	109	2,51	86

Agyagadalékok alkalmazása, és tulajdonságmódosító hatásuk

Az agyag (módosítatlan) évek óta fontos NR-töltőanyag, de nagy mérete és alacsony felületi aktivitása miatt az erősítő képessége gyenge. A réteges szilikátok (LS) a talaj és az agyag fő aktív ásványi anyagai. Ezek a legszélesebb körben használt 2D nanotöltőanyagok (rétegenkénti szétválasztás és/vagy interkaláció után), melyek két egymáshoz kapcsolódó szilikát-tetraéder réteg között egy fématomot tartalmazó oktatédert tartalmaznak, például Al- vagy Mg-atomokkal. A rétegeket gyenge dipól-dipólus erő köti egymásra, és kifelé negatív töltést mutatnak, melyeket a rétegek közötti terekben elhelyezkedő kationok, mint a Na és a Ca semlegesítenek. Mivel a rétegeket összetartó erők viszonylag gyengék, a kis molekulák interkalációja a rétegek között könnyen elvégezhető. Az LS rétegenkénti szétválasztott nanorétegei azonban a polimerek többségében nem könnyen diszpergálhatóak, mivel az agglomerálódott kétdimenziós (lapszerű) részecskék egymáshoz viszonyított párhuzamos elrendeződéseiben a lap-lap-kapcsolatot előnyben részesítik. A taktoidok diszkrét egyréteggé történő diszperzióját tovább gátolja a hidrofíls LS- és a hidrofób NR-mátrix belső összeegyeztethetlensége. Ezért az LS-t szervesen módosítani kell, hogy polimerrel kompatibilis agyaggá vagy szerves gyűrűkké váljanak. Ezt jól bizonyították, ha az LS üregeiben vagy „galériájában” lévő szerves töltéssel rendelkező kationokat alkil-ammónium felületaktív anyagokkal helyettesítették.

Kis mennyiségű szerves réteg bejuttatása a vulkanizált NR-be lényegesen javíthatja a mechanikai tulajdonságokat, például a szakítószilárdságot, a modult, a keménységet, a kopásállóságot, a szakadási feszültséget és az oldószerállóságot, az égési ellenállóképességet, a gáztárolási tulajdonságokat és a NR-mátrix biokompatibilitását. A töltőanyag mennyiségét phr-ban (részek wt/100 résztömeg/szárazgumi) fejezik ki, a korom CB-(SPHERON 6400) helyettesítőjeként pedig oktadecilamin-módosított montmorillonitot (organo-MMT) alkalmaznak.

[2] Mechanical, rheological, and swelling behavior of natural rubber/montmorillonite aerogels prepared by freeze-drying; *Applied Clay Science*, Volume 50, Issue 2, October 2010. Pp. 271–279.

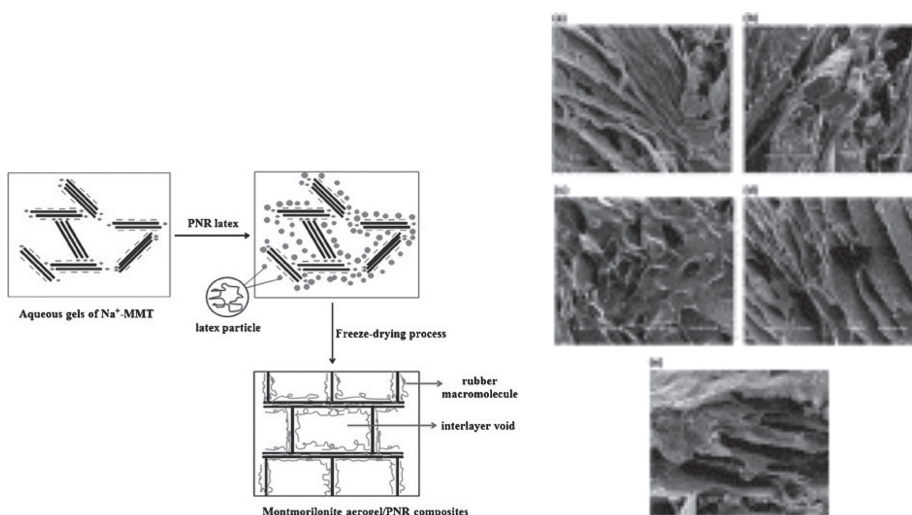
6. táblázat. Mechanikai tulajdonságok különböző töltőanyagok használatával készült kompozitok esetén

Mechanikai tulajdonságok	NR	NR/Na+ -MMT (10phr)	NR/szerves MMT (10phr)	NR/CB (10phr)	NR/CB (40phr)
Szakadási nyúlás (%)	700	555	700	464	434
Keménység (Shore A)	28,8	20,7	43,5	30,5	38,3
Kopási veszteség (mm ³)	286,2		217,5	282	199,3
Alakváltozási modulus 100% (MPa)	0,59	0,53	1,72	0,83	1,6

A 6. táblázat adatai alapján jól látszik, hogy a 10 egység Na-MMT-t tartalmazó gumikompozit tulajdonságai rosszabbak, mint a természetes gumié, de ha szerves bevonattal ellátott montmorillonitot alkalmaznak, a szakadási nyúlás azonos, a keménység jobb, mint a természetes guminál mért érték.

A kompozit szerkezetépítő mechanizmusait, illetve a valódiszerkezet SEM-felvételeit mutatja a 9. ábra. [2]

9. ábra. Montmorillonit beépülési mechanizmusa és SEM-felvételek a kompozitokról

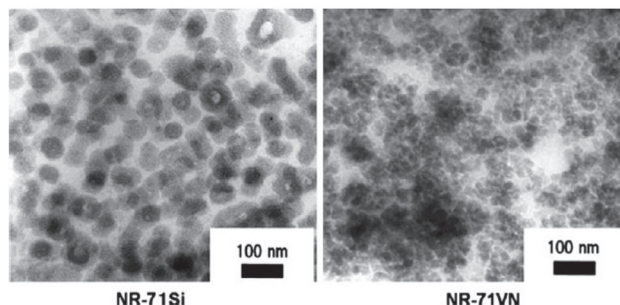


Szilika-adalékok alkalmazása és szilárdsági tulajdonságokra gyakorolt hatása

A szilícium-dioxid (SiO_2) egy kiváló, nem fekete, gömb alakú erősítő töltőanyag, melyet széles körben alkalmaznak színes NR-termékek előállítására. Alacsony hőfelhalmazódása és gördülési ellenállása miatt különösen a környezetkímélő, zöld gumiabroncs futófelületén használják. A SiO_2 különféle módszerekkel állítható elő, például vizes nátrium-szilikátoldat kicsapása, pirogénus eljárással füstölt szilícium-dioxid, természetes erőforrásokból származó szilícium-dioxid (pl. Rizshéj hamu⁷⁴ és pernye⁷⁵) és/vagy szilícium-dioxid-szol szol-gél eljárással. Ikeda és mtsai. mind nano- SiO_2 -tal töltött NR-kompozitot (NR-71Si), mind kereskedelmi kovasavval (Nipsil VN-3) töltött NR-kompozitot (NR-71VN) készítettek. NR-71Si-t készítettek nano- SiO_2 -vel (100–400 nm átmérőjű) in situ-módszerrel tetraetoxi-szilán szol-gél reakciójával, körülbelül 80 phr-ig. Az NR-71VN-t hagyományos módszerrel állították elő, 71 phr SiO_2 -tartalommal. Az in situ módszerrel előállított nano- SiO_2 és az NR-mátrix közötti nagy kölcsönhatás miatt az NR-71Si szakítószilárdsága nő az NR-71VN-hez képest. Az NR-71Si kisebb feszültséget mutat a 200%-os megnyúlásig, és nagyobb feszültséget mutat a 200%-nál nagyobb megnyúlásnál. A hagyományos SiO_2 -val töltött NR nagy

modulusa kis nyúlásnál a SiO_2 nagyobb aggregátumainak kialakulásának köszönhető. Az in situ előállított nano- SiO_2 kiváló erősítő hatást mutat az NR-vulkanizátumokra. Az in situ nano- SiO_2 és kereskedelmi célú SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) képeit mutatja a következő ábra.

10. ábra. Nano- SiO_2 és kereskedelmi SiO_2 -vel töltött NR-vulkanizátumok



A 10. ábrán látható, hogy az in situ-generált nano- SiO_2 x diszperziója a természetes gumimátrixban jobb, mint a kereskedelmi forgalomban lévő SiO_2 diszperziója az NR-mátrixban.

Arun és társai 78 nano- SiO_2 és SiO_2 -mal töltött NR nanokompozitokat és kompozitokat ko-vulkanizálási módszerrel készítettek. Összehasonlították az NR-kompozitok mechanikai tulajdonságait a megfelelő nano- SiO_2 -tal töltött NR-vel. Vizsgálati eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy alacsony töltőanyag-terhelés mellett (0,8 phr) a nano- SiO_2 jól diszpergálódott az NR-ben, ami valószínűleg a javított NR és a nano- SiO_2 közti kölcsönhatásnak köszönhető. A SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok esetében a szakítószilárdság kezdetben kissé növekszik, majd folyamatosan csökken, amikor a SiO_2 mennyiségét 5 phr-ról továbbnövelik. Ennek az lehet az oka, hogy gyenge a NR és SiO_2 közti kölcsönhatás, valamint a töltőanyag-eloszlás kissé egyenetlen. De a nano- SiO_2 -val töltött NR-vulkanizátumok esetében a szakítószilárdság fokozatosan növekszik, és 0,8 phr nano- SiO_2 hozzáadásával eléri a 35 MPa maximális értéket, majd kissé csökken. Ha összehasonlítjuk a kapott vizsgálati eredményeket, akkor a nano- SiO_2 -val töltött NR maximális szakítószilárdsága nem a nagyobb (10 phr) töltöttségek esetén, hanem az alacsonyabb (0,8 phr) töltőterhelésénél figyelhető meg. A SiO_2 mennyiségének növekedésével a SiO_2 -val töltött NR esetén csökken a szakadási nyúlás. A nano- SiO_2 -val töltött NR esetén azonban a szakadási nyúlás folyamatosan növekszik, és eléri az 1550%-os maximális értéket, majd csak ezt követően figyelhető csak meg csökkenés. A szakadási nyúlás maximális értékét a nano- SiO_2 töltőanyag-töltés alacsony szintje mellett mérték (0,8 phr), összehasonlítva a SiO_2 töltőanyag-töltet (2,5-10 phr) értékével.

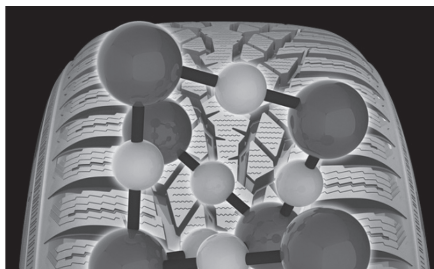
Ennek az lehet az oka, hogy a nano-SiO₂ és a javult NR-nano-SiO₂ határfelületi kötés is homogénen oszlik el az NR-mátrixban.

Idrus és társai a töltőanyagként használt ultrafinom SiO₂ különböző szemcseméretének hatását vizsgálták a vulkanizált NR tulajdonságaira. A Hosokawa Alpine osztályozó módszerrel, 50 ATP-vel kényszerített örvény osztályozó alkalmazása mellett három töltőanyagformát (kőbös, hosszúkás és szabálytalan, 1,25

mm, 1,18 mm és 1,18 mm átlagos szemcsemérettel) állítottak elő. Abban az esetben, ha a töltőanyag adagolását 10-ről 20 phr-re növelik, az SiO₂ mindhárom alakja növekvő szakítószilárdságot, szakadási nyúlást, keménységet (part A) és a 100%-os nyúláshoz tartozó alakítási modulust mutat. A mechanikai tulajdonságok javulását az adott töltőanyag-tartományban az SiO₂ jobb diszperziója teszi lehetővé. Nagyobb SiO₂-terhelésnél (30 phr) azonban a SiO₂ – NR kölcsönhatások SiO₂ – SiO₂ kölcsönhatásokkal való helyettesítése gyengébb szakítószilárdsághoz vezethet. A szabálytalan SiO₂-val töltött NR általában nagyobb szakítószilárdságot, szakadási nyúlást, szakítómodulust és keménységet mutat, majd ezt követi a hosszúkás és kőbös SiO₂-val töltött NR. Ennek az lehet az oka, hogy a szabálytalan SiO₂-nek nagyobb a felülete, amely nagyobb érintkezési/kötési felületet biztosít a SiO₂ és az NR-mátrix között; ezért pozitív erősítőhatás figyelhető meg.

Ezeknek a gumikeverékeknek a felhasználását mutatja és alkalmazza a Nokian Twin Trac Silica (11. ábra) gumikeverékében a Nokian Tyres Manufacturing Company.

11. ábra. Nokian Twin Trac Silica



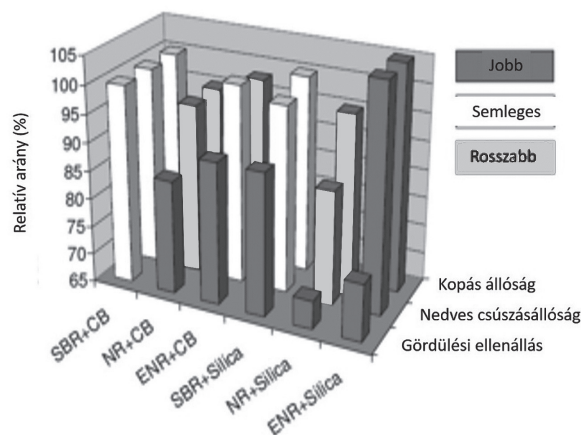
A természetes kaucsukot, szilícium-dioxidot és repceolajat tartalmazó Nokian Twin Trac szilícium-dioxid-kaucsuk-keverék egyedülálló részecskeeloszlása biztosítja a csúcsapadást a havas és nedves utakon. Ez a korszerű összetett újítás javítja a vezetési stabilitást és a kopásállóságot is. A nagy mennyiségű természetes kaucsuk és repceolaj biztosítja, hogy a kiváló téli tapadási tulajdonságok a hőmérséklet változása és a kilométerek összeadódása mellett is változatlanok maradjanak. Az extrém kis gördülési ellenállás alacsony üzemanyag-fogyasztást biztosít.

12. ábra. Performance Traction Silica



A *Performance Traction Silica* (12. ábra) a természetes kaucsukot, szilícium-dioxidot és repceolajat tartalmazó gumikeverék kiváló téli tapadást biztosít. Ez a korszerű összetett újítás javítja a vezetési stabilitást és a kopásállóságot is javítja. A repceolaj szakítószilárdságot biztosít. A szakítószilárdság miatt a gumiabroncs rendkívül ellenálló a kopásnak, ütéseknek és defektnek. A nagy mennyiségű természetes kaucsuk és repceolaj biztosítja, hogy a kiváló téli tapadási tulajdonságok változatlanok maradjanak a hőmérséklet változása és a kilométerek összeadódása mellett is. A rendkívül alacsony gördülési ellenállás alacsony üzemanyag-fogyasztást eredményez.

13. ábra. Keverékek kopásállósága, nedves csúszásállósága és gördülési ellenállása



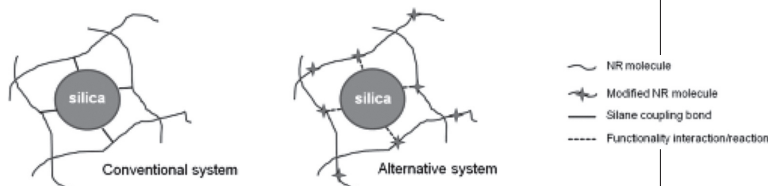
[3] https://www.utwente.nl/en/et/trc/projects/Silicates_modifiedrubber/

Mindezek mellett további kutatási projektek folynak a szilika és a természetes gumi minél jobb határfelületi kötéseinek kialakítása érdekében. Az alábbi oszlopdiagram azt mutatja, hogy a természetes és a mesterséges gumiba kevert korom, illetve szilika, hogyan segíti vagy éppen rontja a gumiabroncs kopásállóságát, a gördülési ellenállást (ez az üzemanyagfogyasztással van szoros összefüggésben), és a nedves utakon való megcsúszási valószínűséget. A diagram adatai alapján elmondható, hogy a gördülési ellenállás csökkentését mindegyik keverék elősegíti (13. ábra), a gondok azonban a nedves utakon való megcsúszásnál és a kopásállóságnál jelentkeznek. Ennél a paraméternél a természetes gumi a korom- és szilika-adalékkal egyaránt rosszul viselkedik. Míg ugyancsak ezek a keverékek adják a rosszabb kopásállóságot is, kiegészülve az ENR+CB- (epoxidált természetes gumi+ korom) keverékkel. [3]

A kutatási projekt célja az, hogy javítsák a gumi fogyasztásának >40%-át képviselő NR és az adalékanyagok kölcsönhatásait, ugyanis a szilícium-dioxid-technológia és az NR kombinációja révén környezetbarátabb gumiabroncsokat lehet előállítani. Az NR a fenntartható energiatermelés egyik legideálisabb példája, ahol a világ hatalmas területein a levegőből CO₂ kerül e természetes polimer előállításához, és a fák élettartamuk után bútorgyártásra használják.

A szilika-adalékokat a természetes gumihoz szilán-kötésekkel kapcsolják hozzá, mivel ezek képesek javítani a gumi feldolgozhatóságát és a szilícium-dioxiddal töltött gumitermékek általános tulajdonságait. A módosított NR-ekkel történő helyettesítés megfontolható az optimális tulajdonságok keresése és kapcsolószerszám használata nélkül. Ugyanis a minél több kémiai kötés és bevitt anyag, s így a közöttük kialakuló kémiai/fizikai kölcsönhatások befolyásolják a gumi tulajdonságait. A célkitűzés olyan technikák feltárása, amelyek elősegítik a jobb szilícium-dioxid-gumi kölcsönhatást vagy reakciót, és így a gyártástechnológia továbbfejlesztését biztosítják.

14. ábra. Kötések kialakulási mechanizmusa



Megcélzott reakciók/kölcsönhatások kialakítása a szilanizált és a funkcionizált szilikával módosított NR-rendszer esetén (*For more information regarding this project, contact W. Kaewsakul MSc*)

Kálcium-karbonát alkalmazása és hatása

A kalcium-karbonátot (CaCO_3) (vékonybajszú tőkehal) széles körben használják nem erősítő és erősítő töltőanyagként, hogy az NR-alapú kompozitokban a kívánt szint tudják produkálni és csökkentsék a termék költségeit. A CaCO_3 két fontos típusa az őrlött mészkő és a kicsapódott CaCO_3 .

Az őrlött mészkövet ásványi mészkő őrlésével állítják elő, és a kicsapódott CaCO_3 -ot sóoldatból kémiai kicsapással nyerik. Az őrlött CaCO_3 hozzáadásával az NR alacsony szakítószilárdságot eredményez, ugyanakkor a kicsapódott, esetenként kisebb részecskeméretű CaCO_3 növeli az NR-termék szakítószilárdságát.

Számos kutató tanulmányozta már a CaCO_3 -erősített NR-kompozit gyógyulási és fizikai-mechanikai tulajdonságait. Kutatásaik során $3,25\ \mu\text{m}$ átlagos részecskeméretű CaCO_3 -at használtak. Az NR-ben lévő 20 phr CaCO_3 -mal rendelkező kompozitok szakítószilárdsága 13,4 MPa, a szakadási nyúlás pedig 825%. Az NR-mátrixban a magasabb CaCO_3 -tartalom a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás csökkenését okozza. A CaCO_3 töltőanyagként történő használata javítja az öregedési viselkedést és a fizikai-mechanikai tulajdonságait a γ -besugárzással szemben. Kutatásokat folytattak a CaCO_3 -mal megerősített NR-kompozitokkal, melyek átlagos részecskeátmérővel $1,55\ \mu\text{m}$ volt. A vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a 15 phr CaCO_3 hozzáadásával a szakítószilárdság 24,8 MPa-ra, a nyírási szilárdság pedig 70 kN/m-re növekszik. Azonban ha a CaCO_3 mennyisége meghaladja a 15 phr-t, a mechanikai tulajdonságok fokozatosan csökkennek. A CaCO_3 NR-mátrixba történő növekvő terhelésével a szakadási nyúlás szintén csökkenést mutat.

Fémrészecskék alkalmazása gumikeverékekben

Köztudott, hogy egy szigetelő közeg dielektromos tulajdonsagai – pl. Az NR – úgy módosíthatóak, hogy az elektromosan vezető részecskéket a közegbe dispergáljuk. A szigetelő gazdaanyag a közegben dispergált fémrészecskék mennyiségétől függően vezetővé vagy félvezetővé alakítható.

Fémes mágneses töltőanyagként használják pl. a ferromágneses vas-, nikkel- és kobaltrészecskéket stb. A nikkelrészecskék kémiaiilag stabilabbak, mint a vas és a kobalt, ezért azokat jobban alkalmazzák. A szakirodalomban – különböző mennyiségű nikkelrészecskék beépítésével – a NR/nikkel-kompozit mágneses tulajdonságaival is foglalkoznak. A vizsgálati eredmények alapján azt állapították meg, hogy a kompozitok

ferromágneses viselkedést mutatnak, és a telítettség mágnesezettsége növekszik a nikkeltartalommal. A dielektromos permittivitás a nikkeltartalom növekedésével nő, és a hőmérséklet emelkedésével csökken. A 7. táblázat a vulkanizált NR különböző nikkeltömegeinek mágnesezettségét és mechanikai tulajdonságait szemlélteti. A vulkanizált NR mágneses tulajdonságainak növekedése egyértelműen azt mutatja, hogy a nikkelrészecskék ferromágneses jellemzői megmaradnak a kompozitokban. A minták rugalmassági modulusa a kompozitok nikkeltartalmának növelésével javulást mutat. Az alakváltozási modulus növekszik a nikkel mennyiségének növekedésével, ami igazolja a nikkel nanorészecskék erősítő hatását a NR-mátrixban. A töltőanyag-terhelés növekedésével azonban a szakadási nyúlás monoton módon csökken. Mindez a töltőrészecskék NR-mátrixban történő csoportosulásaival magyarázható.

7. táblázat. Ni különböző mennyiségének hatása a vulkanizált NR mechanikai tulajdonságaira

Nickel-koncentráció (phr)	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)	100% alakváltozáshoz tartozó modulusz (MPa)
0	28,9	1210	0,75
20	26,7	1102	0,8
40	22,8	930	0,91
60	21,6	858	1,1
80	20,5	858	1,1
100	19,2	764	1,4

A 7. táblázatban látható, hogy a nikkelrészecskéket nem tartalmazó minták esetén a szakítószilárdság 28,9MPa, a szakadási nyúlás 1210%, és az alakváltozási modulus – 100% alakváltozás esetén – 0,75MPa. Ehhez képest, kis mértékben, már a 20 phr Ni-mennyiség is növeli az alakváltozási moduluszt, és csökkenti a szakítószilárdság- és szakadásnyúlás-értékeket. Ha a nikkel mennyiségét 5-szörösére növelik, akkor a szakítószilárdságban 34%-os csökkenés figyelhető meg, ugyancsak csökken a szakadási nyúlás (37%-kal) ugyancsak csökken, míg az alakváltozási modulus közel kétszeresére nő.

Bioalapú adalékanyagok alkalmazása a gumiabroncsokban

Az anyagok fenntarthatósága az ipar és az egyetemi intézmények kutatásának fejlesztésében az egyik legfontosabb kérdés. A nem ásványolaj-alapú töltőanyagok keresése felgyorsította a biomasszából származó bio-nanotöltők kutatását. Bizonyos esetekben a bioalapú nanokompozitok egyedülálló előnnyel

rendelkeznek a hagyományos szervesetlen nanorészecskékkal szemben. Az NR-ben általánosan használt bio-nanotöltőanyagok a cellulóz, a kitozán, a keményítő nanokristályai stb. Ezenkívül a kutatók remélik, hogy az NR-mátrixban történő diszpergálás után a bioalapú töltőanyagok biokompatibilitása és biológiai lebonthatósága megmarad.

KITINKRISTÁLYOK

A kitin a második leggyakoribb félkristályos poliszacharid. A kitin természetes forrásai közé tartozik a kagylók külső csontváza (a garnélarák vagy a rákhéj 8, illetve a 33% kitint tartalmaz), a rovarok és a sejtfalak rostos anyagai a gombákban és az algákban. A kitin makromolekulák N-acetil-D-glükózamin egységekből állnak. A kitin nem mérgező, szagtalan, biokompatibilis az élő szövetekkel, és biológiailag lebontható. A kitin amorf részének eltávolítása kristályos kitin-nanokristályok vagy kitin kristályok előállításához vezet. A szakirodalomban fellelhető adatok alapján a kitint rákhéjból történő savas hidrolízissel készítik, melyek vékony párhuzamos csövekből felépülő kitinkristályok.

A kitinkristályok NR-mátrixban történő alkalmazása a nanokompozitok modulusát, hőstabilitását és mechanikai tulajdonságait is javították. Becslések szerint a kitin-egy kristályok átlagos hossza és szélessége kb. 240, illetve 15 nm körül volt, a nyújtottságuk közel 16.

A szakítóvizsgálati eredmények alapján a kitin-egy kristályok alacsonyabb erősítő hatást mutatnak a vulkanizált NR-mátrix esetében, mint a vulkanizálatlan rendszerekben. Ennek az lehet az oka, hogy az NR-mátrix térhálósítása zavarja az egy kristályok háromdimenziós hálózatának kialakulását.

A kitin-egy kristályok jelenléte az NR-mátrixban a modulus jelentős növekedését eredményezheti anélkül, hogy a szakadási nyúlás jelentősen csökkenne. Erősítő hatásuk nagyban függ attól, hogy képesek-e egy merev, háromdimenziós hálózatot kialakítani, mely erős kölcsönhatásokból, például az egy kristályok közötti hidrogénkötésekből adódik.

A kutatási projektek arra is törekednek, hogy elérjék a nanorészecskék és az alpmátrix közötti jobb határfelületi kötések kialakulását, miáltal erősítő hatásukat a nanorészecskék még intenzívebben tudják kifejteni. Ilyen adalékanyag, felületmódosító lehet pl. a fenil-izocianát (PI), az alkenil-borostyánkősav anhidrid (ASA), a 3-izopropenil-R, illetve az R0-dimetil-benzil-izocianát (TMI), melyek alkalmazásával kémiai módon módosítják a kitin-egy kristályokat. Ezeknek az NR-kompozitoknak a mechanikai teljesítménye azonban a kémiai módosítás után jelentősen csökkent. Ennek az lehetett az oka, hogy a kitin-egy kristályok háromdimenziós hálózata részlegesen vagy teljesen megsemmisült, amit a módosítatlan kompozitok esetében feltételeztek. Néhány kutató kitozánnal töltött NR-vegyületeket állított elő 90 µm átlagos részecskeméretű kitozán-por alkalmazásával. Az eredmények azt mutatták, hogy az NR-kompozit szakítószilárdsága kitozán hozzáadásával csökkent. A kitozán szabálytalan alakja csökkenti a kompozitok mechanikai

szilárdságát, mivel a kitozán képtelen átvenni az NR-mátrixból érkező feszültséget. Általánosságban elmondható, hogy a perzselési idő, a kikeményedési idő és a szakadási nyúlás a NR kitozánterhelésének növekedésével csökken. Megfigyelhető azonban a kitozánnal töltött NR maximális nyomaték és húzómodulja.

NANO-CELLULÓZ

A cellulóz egy homopoliszacharid, mely 1,4-anhidro-D-glükopiranoz egységeket tartalmaz. A természetes cellulózforrások közé tartoznak a természetes rostok (kender, len, sárga karórépa, búza, banán, kókuszrost stb.) és a farostok stb. A cellulóz monomer egységeinek három hidroxil-csoportja van.

Ezek a hidroxilcsoportok hidrogénkötést kezdeményezhetnek más molekulákkal és/vagy makromolekulákkal, azaz a cellulózorientált kristályos ligandumokkal, és ez szabályozza a kifejlesztett anyagok fő fizikai tulajdonságait. Az 5–60 nm átmérőjű nano-cellulóz-rostok különféle kémiai kezelésekkal kivonhatók különféle, természetben előforduló növényi rostokból, mint például hancs, kender, nátronpép, kukoricacsutka, olajpálmafa liszt, sárga karórépa stb. Híg szuszpenzióiból TEM-képeket mutat a gyapot, a cukorrépa-pép és a tunicin (tunikából kivont cellulóz).

Kutatók készítettek NR/bambuszrost-kompozitokat készítettek 180–270 mm átlagos hosszúságú szákkal. A szálterhelés növekedésével a kompozitok szakítószilárdsága és nyírószilárdsága csökkenést mutatott. Növekvő szálterhelés mellett, a bambuszrost szabálytalan alakja –párosulva az NR-mátrix gyenge tapadásával – a szakító- és nyírószilárdság romlásának fő tényezőit jelentette. Emellett kutatásokat végeztek papíriszappal töltött NR-kompozitok előállításával kapcsolatban, különféle (10–40 phr) papíriszap töltőanyagok beépítésével, melyek átlagos töltőmérete 300 nm volt. Végül beszámoltak arról, hogy a kompozitok szakítószilárdsága a töltőanyag-tartalommal együtt csökken, és ez ismét a papíriszap-töltőanyagok szabálytalan alakjának tudható be. Éppen ezért a kutatók más nanorészecskéket is előállítottak annak érdekében, hogy a felmerült rossz tapadásra megoldást keressenek. Így pl. nádzsák répából készített nano-cellulóz-egykristályok hossza 84 és 102 nm, szélessége pedig 4–10 nm között volt.

A vulkanizálatlan, nano-cellulózzal erősített NR-ek szakítószilárdsága a töltőanyag-tartalom 7,5-ről 10 tömeg%-ra történő emelésével 4-ről 17 MPa-ra növekedett. Ez a jelentős szakítószilárdság-növekedés annak a mechanikus perkolációs hálózatnak a kialakulásának tudható be, amely hidrogénkötéssel merev és folyamatos hálózatot képez. A 13-as nyújtottságú rúdszerű egykristályok perkolációs küszöbértéke 7,7 tömeg% B-nek felel meg, feltételezve, hogy a száraz NR 1 g cm³-nél és a kristályos cellulóz 1,5 g cm³-nél sűrűbb. A Bagasse nano-cellulóz a legalacsonyabb nyújtottságot adja összehasonlítva a Capim Dourado és datolyapálma egykristályokkal, így az a alacsonyabb szakítószilárdságot is eredményezhet ezeknek az NR/bagasse-egykristályokat tartalmazó nanokompozitoknak.

A kutatások során további nano-töltőanyagok kifejlesztésével is foglalkoznak, így pl. a szintetizált nanokristályos lemezeket viaszos kukoricakeményítőből állították elő, melyek 6–8 nm vastagságú, 40–60 nm hosszúságú és 15–30 nm szélességűek.

Elemezték az ezekkel a nanokristályokkal megerősített vulkanizálatlan NR tulajdonságait. Ennek a nanokristályos töltésű NR-nek a szakadási nyúlása csökken a nanokristály-tartalom növekedésével 1960-tól (töltetlen) 920%-ig (30 tömeg%-kal töltve meg). A 10, 20 és 30 tömeg% töltőanyagot tartalmazó nanokompozit-filmek tárolási relaxációs modulusa 25°C-on körülbelül 10, 75 és 200-szor nagyobb, mint a kitöltetlen NR-mátrixé.

Keményítő-nanokristályok

A keményítő – a cellulóz után – a második leggyakoribb biomassza-anyag a természetben a cellulóz után. Fő forrása a növényi gyökér, a szár, a termésmag és a vágott növények (pl. rizs, kukorica, búza, tápióka, burgonya stb.). A keményítő fő komponensei az amilóz (72–82%) és az amilopektin (18–28%). Az amilózt az (1–4) -a-D-glikozidos kötésekkel összekapcsolt glükózegységek lineáris molekulájaként definiáljuk, amelyek (1–6) -R-kötésekkel kissé elágaznak. Az amilopektin egy erősen elágazó láncú polimer, amely (1–4) -a-D-glükopiranoz viszonylag rövid elágazásaiból áll, amelyet (1–6) -a-D-glikozidos kötések kötnek össze körülbelül 22 glükózegységenként. A keményítő lisztszerű fehér porként fordul elő, mely a növényekből történő kivonása után, hideg vízben oldhatatlan. A natív keményítők 15–45% kristályos anyagot tartalmaznak. A keményítő kristályos, a keményítő nanokristályos, a mikrokristályos keményítő és a hidrolizált keményítő mind a keményítő kristályos részére vonatkozik, melyet savas hidrolízis különböző mértékű előállításával nyernek. A szakirodalomban közölt publikációkban töltőanyagként főleg a keményítő-nanokristályokra összpontosítanak. A cellulóz-nanokristályok 100%-ban kristályos anyagok, a keményítő-nanokristályok 45%-ban kristályos részekből állnak. A viaszos kukoricakeményítő esetében a megadott tömegű keményítőszemcséket ismert koncentrációjú H_2SO_4 -oldattal keverjük össze.

A szuszpenziót kiválasztott sebességgel keverik, azaz orbitális rázást alkalmaznak. Különböző időtartamú hidrolízis után a szuszpenziót egymást követő centrifugálással, desztillált vízben, semlegességig mossák.

A szakirodalom említ szintetizált nanokristályokat, melyek lemezkealakúak és viaszos kukoricakeményítőből állították elő. Méretek: 6–8 nm vastagság, 40–60 nm hosszúság és 15–30 nm szélesség. Ennek a keményítő-nanokristálynak – mely aggregátumok formájában van – átlagos mérete 4,4 nm. Erősítő hatását vizsgálták a vulkanizálatlan NR-mátrixban.

A filmeket/vékony rétegeket 0% relatív páratartalom mellett kondicionálták. Ennek a nanokristályokkal töltött NR-kompozitnak a szakadási nyúlása csökkent a nanokristály-tartalom növekedésével 1960-tól

(töltetlen) 920%-ig (30 tömeg% töltöttség mellett). A szilárdsági modul a keményítőtartalom növelésével szinte exponenciálisan növekedett, a kitöltetlen NR-mátrix 0,64 MPa-jától a 30 tömeg% keményítő-nanokristályt tartalmazó kompozit filmeknél 77,8 MPa-ig. A 10, 20 és 30 tömeg% töltőanyagot tartalmazó nanokompozit-filmek tárolási relaxációs modulusa 25°C-on körülbelül 10 (12,3 MPa), 75 (96 MPa), és 200-szor (257 MPa) magasabb, mint a kitöltetlen NR-mátrixé (1,28 MPa). A húzó modulus csökkent a nagyobb töltőanyag-tartalom esetén (pl. 20 tömeg%), ha az anyagokat 43% relatív páratartalomnak tették ki, szemben az azonos töltési terheléssel, ahol 0% relatív páratartalom volt. A szakadási nyúlás 1500%-ra csökken 5–20 tömeg% töltőanyag-terhelésnél, 43% relatív páratartalom mellett. Magas nedvességtartalom vagy RH mellett a keményítő-nanokristályos töltésű NR tulajdonságainak fenti romlásáért a keményítő-nanokristályok hidrofil jellege felelős. Amikor az anyagokat mechanikai vizsgálatoknak vetik alá, a vízben gazdag töltőanyag/NR-mátrix-interfázis kialakulása az anyagok magas páratartalom mellett történő tárolása esetén akadályozhatja a feszültségátadást a határfelületen.

Ember-számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek alkalmazási lehetőségei

Összefoglalás: Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része, elsősorban az ember-számítógép, a megjelenítő és elemző interfészek, továbbá a virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások és kutatási irányok kerülnek összefoglalásra.

Kulcsszavak: Ember-számítógép-interfész; VR; megjelenítő és elemző interfész.

Abstract: This article summarizes some of our research carried out in the project named EFOP-3.6.1-16-2016-000003 „Long-term strengthening of R & D & I processes at the University of Dunaújváros”, mainly human-computer and visualization and analysis interfaces, and research and research directions and related to the topic of virtual reality.

Keywords: Human-computer interface; VR; display and analysis interface.

Bevezető

Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része, elsősorban az ember-számítógép, a megjelenítő és elemző interfészek, továbbá a virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások és kutatási irányok kerülnek összefoglalásra. Az egyes kutatási témákat a kutatásban részt vett kutatók foglalják össze.

* Dunaújvárosi Egyetem,
Műszaki Intézet
E-mail: kovari@uniduna.hu

** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: katonaj@uniduna.hu

*** ISD Dunafer Zrt.
E-mail: wizner.krisztian@isd-dunafer.hu

**** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: ujbanyit@uniduna.hu

***** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: nagy.balint@uniduna.hu

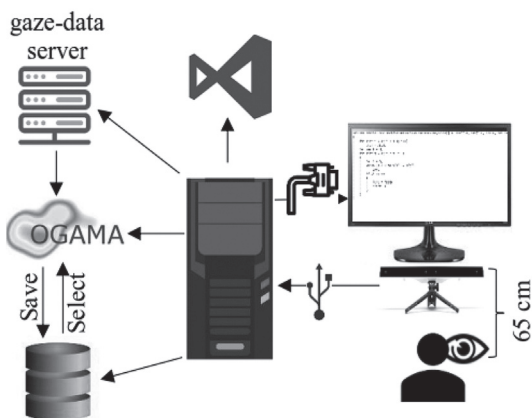
***** Széchenyi Egyetem
E-mail: berki.borbala@sze.hu

***** Széchenyi Egyetem
E-mail: sudar.anna@sze.hu

Eye-tracking alkalmazása programozási technológiák összevetésének és a forráskód érthetőségének, olvashatóságának és karbantarthatóságának vizsgálatára (Katona József)

A szemmozgáskövető rendszerek lehetőséget kínálnak olyan komplex kognitív folyamatok megfigyelésére és tanulmányozására, mint a programozás és az implementáció. Az egyre növekvő programrendszerek következménye, hogy a szoftverfejlesztőknek egyre több programozási technológiát kell hatékonyan alkalmazni. Az 1. ábra egy olyan szemmozgáskövető rendszert és annak elemeit illusztrálja, amelyek együttműködve lehetővé teszik az olyan összetett kognitív folyamatok vizsgálatát, mint a programozás, az elérhető programozási technológiák értelmezhetőségének összevetése, a forráskód-olvasás és -értelmezés, valamint az eltérő hibakeresési módszerek hatékonyságának vizsgálata.

1. ábra. A szemmozgáskövető rendszer és komponenseinek sematikus ábrája



EYE-TRACKING ALKALMAZÁSA A PROGRAMOZÁS-OKTATÁSÁBAN, VALAMINT
A DEBUGGOLÁSI TECHNIKÁK ELEMZÉSE CÉLJÁBÓL

Napjainkban a különböző programozási tárgyak oktatása egyre nagyobb kihívást jelent, mivel a növekvő felhasználói igények miatt újabb és újabb paradigmákat és technológiákat kell a diákok számára átadni.

A felsőoktatásban mostanra olyan hallgatók tanulnak, akik már a digitális világban születtek, azonban a különböző programozási tárgyak teljesítésének sikeressége azonban elmaradást mutat. A közelmúltban az ember-számítógép-interfészalapú kutatások egyre több tudományterületen jelentek meg és az oktatást is forradalmasíthatják. Az ilyen jellegű interfészek egyfajta támogató rendszerként is segíthetnék az oktatókat a hatékonyabb tudásanyag átadásában, a tanulókat pedig az otthonaikban támogathatnák a megfelelő tanulási kultúra kialakításában. Az [1], [2], [3] tanulmányok a szemmozgáskövető rendszerek alkalmazhatóságát vizsgálták programozási feladatok tekintetében, melynek során a helytelenül működő algoritmusok hibáinak feltárása és kijavítása alatt megfigyelésre, rögzítésre, valamint kiértékelésre kerültek a szemmozgás-paraméterek. A vizsgálat során néhány, a tesztalanyokra jellemző paraméterek alkalmazásával két csoport került kialakításra. Az első csoport debuggolás során inkább az apróbb módosításokat és a gyakoribb fordítások és futtatások technikáját alkalmazta (ami a programozást tanuló diákokra amúgy is jellemző), míg a második csoport tagjai nagyobb hangsúlyt fektettek az értelmezésre. A statisztikai kiértékelés során a két csoport szemmozgásainak követésére jellemző paraméterek, valamint ezen csoportok hatékonyságai kerültek elemzésre. A 2. ábra egy véletlenszerűen kiválasztott tesztalanytekintet-útvonal térkép illusztrációja implementációs hiba keresése közben.

2. ábra. Véletlenszerűen kiválasztott tesztalanytekintet-útvonal térkép illusztrációja implementációs hiba keresése közben

```
private static void ModifiedInsertionSort(int[] A)
{
    int key = 0;
    int i = 0;

    for(int j = 1; j < A.Length-1; j++)
    {
        key = A[j];
        i = j - 1;
        while( i >= 1 && A[i] > key )
        {
            A[i + 1] = A[i];
            i = i - 1;
        }
        A[i] = key;
    }
}
```

[1] Kővári, A.–Katona, J.–Costescu, C. (2020): Evaluation of Eye-Movement Metrics in a Software Debugging Task using GP3 Eye Tracker. *Acta Polytechnica Hungarica*. 17. (2)

[2] Katona, J. et al. (2019a, October): The Examination Task of Source-code Debugging Using GP3 Eye Tracker. In: *2019 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 329–334.

[3] Katona, J. et al. (2019b, October): Recording Eye-tracking Parameters during a Program Source-code Debugging Example. In: *2019 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 335–338.

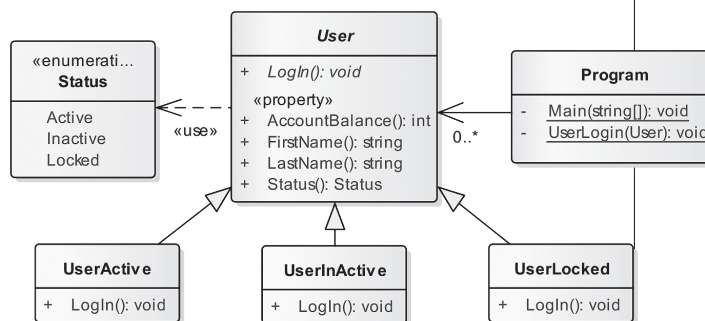
[4] Katona, J. (2021): Clean and Dirty Code Comprehension by Eye-tracking Based Evaluation using GP3 Eye Tracker. *Acta Polytechnica Hungarica*. In press.

[5] Katona, J. et al. (2020, September): Using eye-tracking to examine query syntax and method syntax comprehension in LINQ. In: *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 437–444.

EYE-TRACKING ALKALMAZÁSA PROGRAMOZÁSI TECHNOLÓGIÁK ÉRTHETŐSÉGÉNEK ÉS OLVASHATÓSÁGÁNAK ÖSSZEVETÉSE CÉLJÁBÓL

Katona J. (2021) [4] megjelenés alatt lévő cikke a tiszta kód technikájának hatékonyságát vizsgálja és veti össze az ebben a technikában megfogalmazott elvek nélkülözésével előállított dirty code-al. A hagyományos tudásszintfelmérő tesztek és a szubjektív vélemények mellett figyelemtérkép és tekintetútvonal elemzésével és szemmozgás-paraméterek mérésével és kiértékelésével meghatározásra került a megvalósított kód olvashatósága és érthetősége. A 3. ábra az egyik tisztakód technikáját alkalmazó forráskód UML-osztálydiagramját ábrázolja.

3. ábra. Az egyik tisztakód technikáját alkalmazó forráskód UML-osztálydiagramja



Katona J. és szerzőtársai (2020, September) [5] cikkükben a C# programozási nyelv egyik lehetőségének a Language-Integrated Query adatsztraktációs rétegének két típusát, a query és method-syntax-alapú lekérdezések olvashatóságát és érthetőségét elemzi tudásszintfelmérő tesztek, valamint szemmozgás-paraméterek kiértékelése útján. Az egyes lekérdezések jól elhatárolt elemezhetősége tekintetében AOI-területek kerültek kijelölésre (4. ábra). A cikkben leírt eredmények alapján kijelenthető, hogy a szemmozgáskövető rendszerek alkalmazása összetett kognitív folyamatok vizsgálata során jól alkalmazható és további kiegészítő információkkal is szolgálhat a fejlesztők vagy kutatók részére a legérthetőbb technológia kiválasztása céljából.

4. ábra. AOI-terület meghatározása method-syntax-alapú LINQ-lekérdezés esetében

```
double minimumAverageScore = 70;
var mStudents = students
    .Select(x => new { AverageScore = x.Scores.Average(), FullName = x.FirstName + " " + x.LastName, x.ID })
    .Where(student => student.AverageScore > minimumAverageScore)
    .OrderBy(student => student.AverageScore)        AOI
    .Select(student => new { StudentID = student.ID, student.FullName, student.AverageScore } );

foreach (var student in mStudents)
    Console.WriteLine("{0}, {1}, {2}", student.StudentID, student.FullName, student.AverageScore);
```

Megjelenítő interfészek optimalizálását szolgáló matematikai módszerek – alakzatok pakolása (Joós Antal)

Alakzatok eltolt példányival történő pakolásról akkor beszélünk, amikor az alakzatokra olyan eltolásokat alkalmazunk, hogy az eltolt példányoknak nincs közös belső pontjuk. A diszkrét geometriában gazdag irodalmat találhatunk a kongruens körök pakolásáról. A legsűrűbb körpakolás bizonyításában, amikor megmutatják, hogy a jelölt körpakolásnál sűrűbben nem lehet a síkon köröket pakolni, kulcsszerepet játszik a Hajós lemma [6]. Ennek a kulcsfontosságú lemmának két lehetséges általánosításával foglalkozik a Bezdek és Joós cikke [7].

A d -dimenziós euklideszi tér hányadostere egy d -rangú ráccsal egy tórusz. Ha a 2 dimenziós (négyzet) tórusz alakzatai körök, akkor Melissen, Heppes, Dickinson et al., Brandt et al., Musin et al. és Przeworski munkáiban sok eredményt találunk. A 3 dimenziós (kocka) tóruszon pakolásról nincsenek eredmények [8].

A tóruszon pakolás kiterjesztése az egész térre egy térbeli periodikus pakolás, amit egy véges térrésszel jellemzünk. Ezzel a módszerrel az egész térre vonatkozó periodikus pakolásokat tudunk megjeleníteni a képernyőn.

Az egész tér helyett egy véges térrészben (konténerben) is pakolhatunk alakzatokat. Ha a konténer a szabályos, egységoldalú háromszög, akkor Graham és Lubachevsky, Groemer, Orel, valamint Melissen munkáiban találunk eredményeket legfeljebb 12 vagy $k(k+1)/2$ darab kongruens kör pakolására. A 13 kör pakolására először Melissen (1993), majd Garham és Lubechevsky (1995) fogalmazott meg sejtést. Ezeket a sejtéseket sikerült bizonyítani Joós (2020a) cikkében.

[6] Molnár, J. (1965): Kreislagerungen auf Flächen konstanter Krümmung. *Math. Ann.* 158. Pp. 365–376.

[7] Bezdek, A.–Joós, A. (2020): Area minimization of special polygons. *Acta Math. Hungar.* 160. (1.) Pp. 33–44.

[8] Joós, A.–Nagy, B. (2020): Optimal packings of 2, 3 and 4 equal balls into a cubical flat 3-torus. *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana.* 13. Pp. 335–340.

[9] Joós A. (2019):
On covering the
square flat torus by
congruent discs.
*Australasian Journal
of Combinatorics*,
Volume 75. (1.) Pp.
113–126.

[10] Bezdek A.–Guan
Z.–Hujter M.–Joós
A. (2021): Cubes and
Boxes Have Rupert's
Passages in Every
Nontrivial Direction.
*American Mathematical
Monthly*, accepted.

Ha a képernyő nem téglalap, hanem pl. háromszög alakú, akkor a cikk segíthet a képernyőn történő gazdaságos megjelenítésben. Hasonló téma Joós (2020b, 2021), amikor a konténer egy téglalap vagy d -dimenziós téglatest és a bepakolandó alakzatok különböző méretű négyzetek vagy d -dimenziós kockák.

A fenti problémák duálisa a következő. Adott egy halmaz, amit le szeretnénk fedni alakzatokkal. Az alakzatok akkor fedik a halmazt, ha az alakzatok uniója tartalmazza a halmazt. A Joós (2019) [9] cikkben a négyzet tórusz fedését találjuk 1, 2 illetve 3 körrel. A tórusz fedésének kiterjesztése az egész térre egy térbeli periodikus fedés, amit egy véges térrésszel jellemezünk. Ezzel a módszerrel az egész térre vonatkozó periodikus fedéseket tudunk megjeleníteni a képernyőn.

A 17. századig visszanyúló gyökerekkel rendelkező Rupert-probléma, amikor egy kockából kivájunk egy olyan lyukat, hogy a kocka ne essen szét darabokra, de egy nagyobb kockát átdughassunk a kivájt lyukon. A kérdés az, hogy mennyire lehet felnagyítani az átdugandó kockát (ez az arány a kockánál a Nieuwland-konstans), vagy esetleg, a kocka helyett, milyen más testre igaz ez a tulajdonság. A (Bezdek et al. 2021) [10] cikkben azt sikerült megmutatni, hogy a kocka minden nem triviális irányból rendelkezik ezzel a tulajdonsággal. A cikkben ennek egyik alkalmazása, hogy a Nieuwland-konstans keresésénél elég a kockában egy maximális négyzetet keresni (amin átdugjuk a nagyobb kockát). A cikk segíthet abban, hogyan lehet ügyes trükkökkel minél nagyobb alakzatot megjeleníteni a képernyőn.

Megjelenítő és elemző interfész az acélöntés folyamatának vizsgálatára (Wizner Krisztián)

Kutatásunkban az acélgyártás egyik folyamatát, a folyamatos acélöntést, azon belül a nem állandósult szakaszainak hatását vizsgáltuk az öntött brammából hengerelt lemeztermék leminősülésére. A folyamatos öntés ipari gyakorlatában elkerülhetetlenek az állandósult állapotot megzavaró események. Ezen szakaszok vizsgálatát több tényező is nehezíti. A folyamatkövetés szemlélete alapján a rögzített nagy mennyiségű adat időalapon kerül letárolásra, ami nem ad könnyen értelmezhető információt arról, hogy az adott esemény az öntött szál mely szakaszát, milyen mértékben érintette.

Az öntési folyamat adatainak időalapról (folyamatkövetési szemlélet) öntőthossz-alapra (termék-szemlélet) történő átalakításával pontosabb kép adható a nem állandósult szakaszok elhelyezkedésével kapcsolatosan, ezáltal pontosabban vizsgálhatóvá válik hatásuk az öntött szátra, azaz a metallurgiai fázis végtermékét jelentő brammára.

A brammák azonosítása a diszkrét adaggyártás adminisztrációs szempontjainak figyelembevételével történik, mely alapján egy bramma kizárólag egy adaghoz tartozhat. Ez a megközelítés a folyamatos öntés vizsgálatánál csak korlátozottan alkalmazható. A folyamatos acélöntés technológiájából kifolyólag az egymás után öntött adagok a pufferszerepet betöltő közbenső üstben keverednek, ezért ilyen esetekben az érintett szálszakasz jellemzői a két adag összetett tulajdonságaitól függenek. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a vevői igények alapján összeállított brammahosszok (brammatömegek) az esetek túlnyomó többségében nem feleltethetők meg pontosan egy-egy adag ~135t tömegének. Emiatt elkerülhetetlen, hogy az adag kezdeti vagy végbrammájának egy része másik adagból kerüljön leöntésre.

A hengerelt termékek metallurgiai jellegű leminősüléseinek vizsgálatához a fent említett folyamatos öntési jellegzetességek miatt egy öntés- (szekvens-) szemléletű adatkezelés kialakítása szükséges, melynek segítségével minden brammához egyértelműen hozzárendelhető a rá jellemző adaggyártási, finomítási és öntési körülmény.

Az acélgyártás metallurgiai folyamatai nagyon összetettek és számos tudományterületet érintenek. A folyamatok során képződő nagy mennyiségű adat több szempontból történő értelmezése és értékelése nagy kihívás elé állítja a szakembereket. A leminősülések okainak azonosításában különösen nagy kihívást jelent, hogy az egymást követő technológiai fázisok (acélgyártás, finomítás, folyamatos öntés, megleghengerlés) gyakran elfednek vagy éppen felszínre hoznak olyan leminősülési okokat, amelyek más technológiai fázisban keletkeztek. Ilyen hibák például a megszilárdulási fázisban kialakuló felszín alatti repedések, melyek a hengerlési fázisban, az alakítás hatására akár el is tűnhetnek, de a hevítő kemencében akár a felszínre is kerülhetnek, és így leminősülést okozhatnak.

A kutatás elsődleges célja egy tudományos alapokon nyugvó, komplex adatfeldolgozó és adatvizualizációs informatikai rendszer kialakítása, mely támogatást nyújt a hengerelt termékben megjelenő metallurgiai hibák okainak feltárásához, valamint – az acél minőségének javítása érdekében – megteremti az alapot a komplex vizsgálati módszerek kidolgozásához.

A rendszerrel szemben támasztott követelmények:

- Adaptálhatóság (kis átalakítással más kohászati üzemben is alkalmazható legyen).
- Bővíthetőség (új vizsgálati szempontokkal).
- Ingyenes, nyílt forráskódú programozási eszközök használata.
- Ipari informatikai infrastruktúrába illeszthetőség biztosítása.
- Platformfüggetlen (webes) adatvizualizáció.
- Nagy szabadságfokú, dinamikus adatmegjelenítési lehetőség.

[11] Wizner K.–Kővári A. (2020a): Metallurgiai eredetű hibák reklamáció-kivizsgálását támogató szakértői rendszer kialakítása az ISD DUNAFERR Zrt. technológiájában. *MagyarAcél*. IV. (1.) Pp. 44–48.

[12] Wizner, K.–Kővári, A. (2020b): Root cause analysis of metallurgical defects in continuous cast steel slabs at ISD DUNAFERR Zrt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, P. 903.

[13] Wizner, K.–Kővári, A. (2020c): Novel concepts for establishing expert support systems to investigate the defect occurring in metallurgical phases in the technology of ISD DUNAFERR Zrt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, P. 903.

[14] Wizner, K.–Kővári, A. (2020d): Effect of the Production Conditions of Continuously Cast Steels on the Degree of Hot Rolled Product Downgrading. *Acta Materialia Transilvanica* (EN), 3. (1.) Pp. 55–59.

- Szakemberek közötti kooperatív munka biztosítása (megoszthatódiagram-nézetek).
- Egységes vizsgálati szempontok kialakítása tegye lehetővé (pl. leminősülések).
- A szakemberek terhelésének csökkentése az adatok elő-feldolgozása és vizualizációja által.

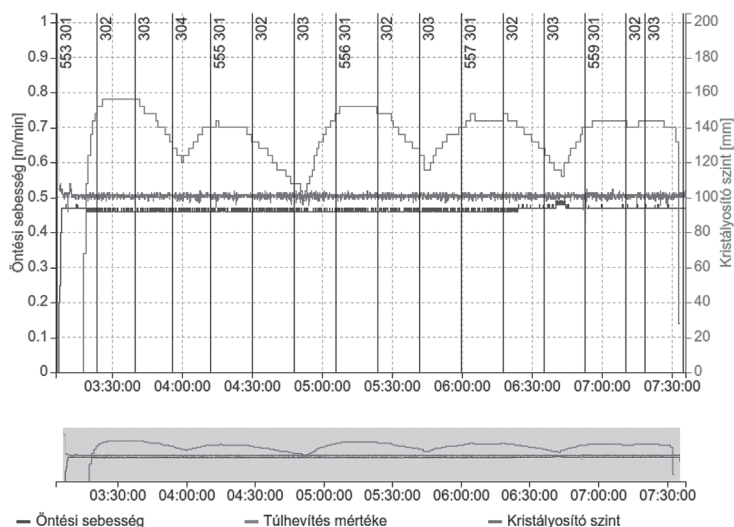
Az acélgyártás, az üstmetallurgiai kezelés és a folyamatos öntés adatai, valamint a brammák összetételi minősítésének feltételei az acélmű Oracle-adatbázisából származnak. A brammákból hengerelt termékek (lemez, tekercs) leminősülési adatai a vállalatirányítási rendszer részét képező SAP/R3 adatbázisából származnak. Az adatok elő-feldolgozására a legkézenfekvőbbnek a Python nyelv alkalmazása mutatkozott, a későbbiekben azonban az adatfeldolgozás kódja az üzem kérésére átírássá került az acélmű Oracle adatbázisán futó PL/SQL-kódra. Az adatfeldolgozás programozásával párhuzamosan folyt az acélmű PHP-szerverén futó webes megjelenítő programozása – szintén az üzem kérésére – PHP és JavaScript nyelveken.

Az alábbi feladatok a Python nyelv eszközeivel kerültek implementálásra (numpy, scipy, pandas, matplotlib, sklearn, statmodels-csomagok):

- Nem állandósult öntési szakaszok kívülállóérték-határainak meghatározása (boxplot alapján).
- Szelvénymérettől függő határértékek korrekciója lineáris regresszió segítségével.
- Statikus adatábrázolás.
- Leminősülési arányok különbözőségének ellenőrzése z-teszttel.

A kutatások egyes eredményeit a Wizner és Kővári (2020 a, b, c, d) [11], [12], [13], [14] cikkek foglalják össze. Az 5. ábrán az elemzést lehetővé tevő alkalmazás felhasználói felületének részlete látható.

5. ábra. Öntési diagramot megjelenítő felület részlete



A hengerelt terméket ért körülmények a rendszer segítségével automatizálhatóan, egyben válnak vizsgálhatóvá a nyersacél legyártásától egészen a hengerlési fázis befejezéséig. Az elemzett adatok felhasználásával a jelenlegi lehetőségekhez képest sokkal mélyebb betekintés nyerhető az öntés technológiai folyamataiba, a minőséget befolyásoló hatások könnyebben azonosíthatóak. A termékszempontú (öntőtthossz-alapú) adatvizsgálat lehetőségének megteremtésével pontosabb információ vált elérhetővé a brammákat ért hatások azonosítása érdekében. Az adatfeldolgozó rendszer további nagy előnye, hogy a feltárt tipikus adathibák ismeretében, valamint az öntési szakaszok azonosítási elvének felhasználásával további folyamatos öntőművekre is tetszőlegesen adaptálható.

Szem-mozgás- és kézmozgáskövetés alkalmazása egyes feladatok végrehajtásának elemzésére, az oktatás hatékonyságának növelésére (Ujbányi Tibor)

Az információfeldolgozás mikéntje egyre nagyobb hangsúlyt kap a műszaki oktatásban. A hallgatóknak egyre növekvő információhalmazból kell kiválasztani, szűrni és hasznosítani a számukra megfelelőt, majd ebből abból információhalmazt előállítani, továbbgondolkodni és folyamatosan építeni a megoldás felé vezető úton.

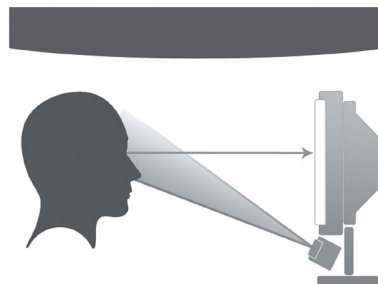
[15] Ujbányi, T.–Katona, J.–Kővári, A. (2018): Analysis of fixations while solving a test question related to computer networks. *Teaching Mathematics and Computer Science*. 16. (1.) Pp. 111–129.

[16] Ujbányi, T.–Stankov, G.–Nagy, B. (2019): *Eye tracking based usability evaluation of the MaxWhere virtual space in a search task*. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications. Pp. 469–474.

[17] Ujbányi T. et al. (2019): Pilot Application of Eye-Tracking to Analyze a Computer Exam Test. In: *Cognitive Infocommunications, Theory and Applications*. Pp. 329–347.

Az algoritmikus gondolkodás képessége, az analitikus gondolkodásmód fejlesztése, a rendszerben történő gondolkodás elősegítése középpontba kerül. Az információ kiválasztása, szintetizálása, hasznosítása, az információkkal való kollaboráció, a kreativitás, a problémamegoldó gondolkodás fejlesztése kulcskérdés. A felsőoktatásban – azok interoperabilitása okán – előszeretettel használnak LMS- (Learning Management System) rendszereket (pl. Moodle), megadva ezzel minden szükséges támogatást az e-Learning hatékonyabbá tételéhez. Manapság egyre több kutatás foglalkozik az ún. 3D-s virtuális terek oktatásban történő használatával, ami hosszú távon eredményesen járulhat hozzá az újkori igényeknek megfelelő oktatási módszertanok hatékonyságának növeléséhez. Az elvégzett kutatások a szemmozgáskövetés adta lehetőségeket kihasználva elsősorban egyes feladatok végrehajtásának megfigyelésére irányultak, például a hálózati topológia és a paraméterek megfigyelése [15] vagy a keresési feladat elemzése terén [16]. A szemmozgás megfigyelésének elrendezését mutatja a 6. ábra. A szemmozgáskövető eszköz a tesztalany szemének mozgását tudja rögzíteni, miközben egy monitor képernyőjét figyeli [17].

6. ábra. A szemmozgáskövetés módszere



A vizsgálatok kiterjedtek a szem–kéz-koordináció elemzésére is, amely alatt azt a képességet vagy tevékenységet értjük, amelyhez a kezünk és a szemünk egyidejű használata szükséges oly módon, hogy a szemünk által érzékelt információt (vizuális-térbeli észlelést) használjuk fel a kezünk irányításához. A szem–kéz-koordináció számos mindennapi tevékenységünk alapfeltétele, beleértve az írást és az olvasást. A szem–kéz-koordináció kinematikájában, mielőtt a kezek mozgásba lendülnek, a szemek először fixálják a céltárgyat, így biztosítva az agynak a szükséges térbeli

információkat. Egyes esetekben a tekintet az adott tárgyra fókuszál, s ameddig a kéz meg nem fogja vagy mozgatja a tárgyat, addig a szem végigköveti azt, mielőtt a kezünk cselekedne. A szem a vizuális információ továbbítására, a kéz pedig – a szemtől kapott vizuális információ alapján – egy adott feladat elvégzésére szolgál. A szem–kéz-koordinációnak fontos szerepe van olyan aktív tevékenységek (pl. sport) végzésekor is, amelyek motorikus koordinációt igényelnek. A tématerületet érintő korábbi kutatások jól mutatják a szemmozgás és a finom motoros mozgás közötti összefüggéseket, az ember-számítógép-interfészek fejlesztésében a szem–kéz-koordináció fontos szerepet játszik. Az elvégzett kutatások ennek egy részterületére irányulnak. A kutatásokban bemutatott vizsgálatok célja összefüggéseket feltárni a hagyományos, ill. a kézigesztus-vezérléssel történő feladatmegoldás kapcsán, a szemmozgáskövetéssel összefüggésben. [18], [19] A szem- és kézmozgás megfigyelésére alkalmazott tesztkörnyezet látható a 7. ábrán, melyen a kézmozgás Leap Motion-eszközzel, a szemmozgás pedig Eye-Tribe Tracker-rel került érzékelésre.

[18] Ujbányi, T. (2018): *Examination of eye-hand coordination using computer mouse and hand tracking cursor control*. In 2018 9th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom). Pp. 353–354.

[19] Ujbányi T. et al. (2020): *Examination of the eye-hand coordination related to computer mouse movement*. *Infocommunications Journal*. 12. (1.) Pp. 26–31.

7. ábra. Kézmozgás-elemzéshez használt tesztkörnyezet



[20] Lampert, B.–
Pongrácz A.–Sipos
J.–Vehrer A.–Hor-
váth, I. (2018): „Max-
Where VR-learning
improves effectiveness
over classical tools of
e-learning”. *Acta Poly-
technica Hungarica*.
15. (3.) Pp. 125-147.

VR, digitális és e-Learning-környezetek az oktatás támogatásában (Nagy Bálint)

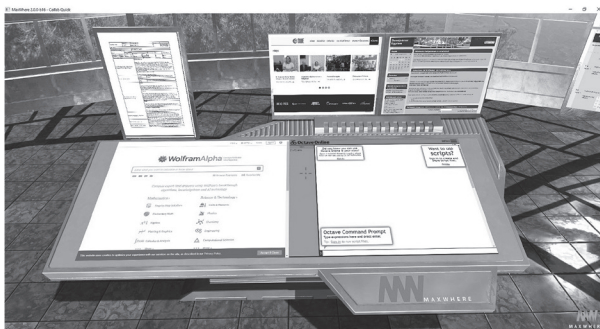
Számos kutatás mutatja, hogy a tananyagok a hagyományos nyomtatott változatnál hatékonyabb formában mutathatók be a virtuális tanulási környezetek és virtuális valóság (VR) alkalmazásával [20]. Az elvégzett kutatások ezen terület vizsgálatára irányultak.

A VR ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE A MATEMATIKA OKTATÁSÁBAN

A *Matematika* 3. tananyag fejlesztése során így figyelmünket a VR által kínált lehetőségek felé fordítottuk. A Moodle tökéletesen ellátja a hallgatók azonosítását és a felhasználókhoz rendeli a tanuláshoz szükséges megfelelő jogokat, így a Moodle-keretrendszerben már felépített tananyagra támaszkodtunk. A *Matematika* 3. tantárgy leírása szerint a félév 13 tanulmányi hete során a hallgatók két zárthelyi dolgozatot írnak. Minden dolgozat tananyaga külön VR MaxWhere térben érhető el, így a tantárgy teljes tananyaga két – célszerűen hasonló felépítésű – térben található meg. A térben a 8. ábrán látható központi asztal és – a tananyagrésznek megfelelően – számos további asztal helyezkedik el. A központi asztalon öt, a tanulás szervezéséhez szükséges tartalom érhető el: az egyetemi weboldal, az egyetemi elektronikus oktatási keretrendszer, a Moodle bejelentkezési oldala, a tantárgy leírása, továbbá két, a gyakorláshoz használható matematikai program – a Wolfram Alpha és az Online Octave – weboldala érhető el. Az egyetemi weboldalról minden, az egyetemi élettel kapcsolatos információ közvetlenül elérhető, így nélkülözhetetlen kiindulópontja a tanulásnak. Innen lehet bejelentkezni az egyetem Neptun-rendszerébe, ahol a hallgatók a tanulmányi ügyekkel kapcsolatos adminisztrációt tudják intézni. Az asztalon szintén megtalálható tantárgyleírás tartalmazza a tantárgy címét, a felelős oktató nevét, a tanulmányi eredményekben kifejezett követelményeket. Itt található a tantárgy fejezeteinek rövid bemutatása is. A kötelező és ajánlott irodalom felsorolása, a zárthelyik leírása, időbeosztása és – természetesen – a tantárgy elsajátításához javasolt ütemezés mind a nappali, mind a levelezős hallgatók számára itt érhető el. Szintén a központi asztalon érhető el a Moodle bejelentkezési oldala, amin keresztül a hallgatóknak be kell jelentkezni a további munkához. Ezután a rendszerben megtörténik a hallgató azonosítása és a megfelelő Moodle-tartalmak és jogok hozzárendelése, így a

hallgató kezdheti a munkát [21]. A tanuláshoz a megfelelő tananyagrészt azonosítása szükséges, melyhez a rendelkezésre álló tantárgytematika ad segítséget.

8. ábra. Központi asztal a MaxWhere virtuális térben



A további asztalokon mindegyik zárthelyihez tartozó tér esetén, hasonló szerkezetben, a szükséges tananyagok érhetőek el, az alábbiak szerint:

- videó;
- az előadás prezentációja;
- a példatár kapcsolódó része megoldásokkal;
- megoldható Moodle-teszt;
- online octave.

A hallgatókkal folytatott személyes beszélgetések felhívták a figyelmünket arra, hogy sokak számára technikai korlátai vannak a tananyagok virtuális térben történő alkalmazásának. Azon hallgatók azonban, akik számára nincs ilyen informatikai korlát, üdvözlötték az új lehetőséget [22].

DISZRUPTÍV TECHNOLÓGIÁK ÉS A KÖZÉPISKOLÁS KOROSZTÁLY

Ebben a felmérésben 116 középiskolás diákot kérdeztünk Dunaújváros két gimnáziumában, 2019 júniusában. Kutatásunk során a technológia oldaláról közelítettük meg az oktatás hatékonyságának és sikerének kérdését. Az alapstatisztikákon kívül

[21] Bognár, L.–Fáncsikné Hamar, É.–Horváth, P.–Joós, A.–Nagy, B.–Strauber, G. (2018): Improved learning environment for calculus courses. *Journal of Applied Technical and Educational Sciences*. 8. (4.) Pp. 35–43.

[22] Nagy B. (2018): VR alkalmazásának lehetősége a matematika oktatásában. In: XXI. Apáczai-napok konferencia. „Útkeresés és újratervezés”. Tanulmánykötet. Pp. 305–309.

[23] Cserné, P. M.–Kocsó, E.–Nagy, B.–Fauszt, T. (2020): Interaction of students and the digital educational environment on the University of Dunaujváros. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 411–415.

[24] Nagy, B.–Váraljai, M.–Mihalovicsné, K. A. (2020): E-learning Spaces to Empower Students Collaborative Work Serving Individual Goals. *Acta Polytechnica Hungarica*. 17. (2.) Pp. 97–114.

[25] Váraljai, M.–Nagy, B. (2019): A Survey in Issues of Disruptive Technologies to Broaden Learning for The Future Students. In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*. Pp. 391–396.

három fő területre összpontosítottunk: az IKT-ellátásra, a virtualitásra és a diszruptív technológiákra, melyek támogatják az egyén eszközhasználati szokásait és tapasztalatait [23], [24], [25].

1. *megállapítás:* A jövő hallgatói generációjánál az internet, az okostelefon és a laptop már beágyazódott a tanulási folyamatba.

2. *megállapítás:* A hallgatók tanulási szokásai teljesen eltérnek az előző hallgatói generációtól. A technológia használatának eredményeként a multitasking és a kollektív tudásmegosztás és generalás erőteljesen befolyásolja esetükben az együttműködés szükségességét, és a közösség összetartó ereje elősegíti fejlődésüket.

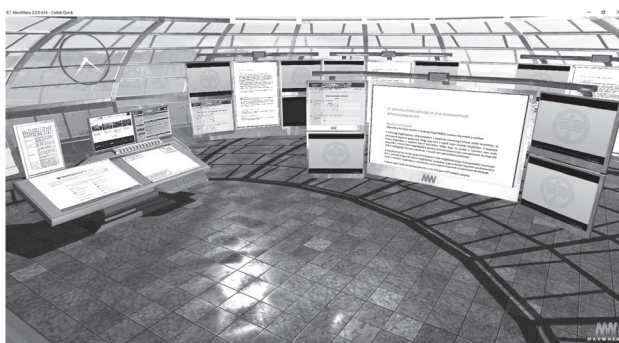
3. *megállapítás:* Mivel a képernyő előtt nőttek fel, nem idegenként viszonyulnak a 3D-s világhoz, szeretik a virtuális játékokat. Élményforrásaik számos érzékre hatnak, ezért érdemes hasonló elemeket is beépíteni a tanulási folyamatba.

4. *megállapítás:* Függetlenül attól, hogy milyen erős a szimbiózis a technológiával, és mennyire nézik a jövőbeni legújabb fejleményeket, fontos szem előtt tartani az emberi tényezőket. A tanuló/hallgató van a tanítási-tanulási folyamat középpontjában, és a technológia az ő szolgálatában áll, hogy sikeres legyen a tanulási folyamat. A technológia és a jólét kapcsolata döntő fontosságú az oktatásban. A jövő generációja számára az együttműködés erős igény: az emberi kapcsolatok hiánya hátrányosan befolyásolja a tanulási folyamatot. A virtuális valóság fejlődése képes egyre kifinomultabb kifejezőerővel ellátni a virtuális teret, pontosabbá tenni a valóságot, s ezáltal képes a lehető legpontosabban közvetíteni és kifejezni az emberi érzelmeket. A reális ábrázolás és az infokommunikáció kombinációja biztosíthatja az emberi kapcsolatok hatékony működését.

5. *megállapítás:* A fenti megfigyelésekből arra is lehet következtetni, hogy a tanulás megszervezésében az emberi tényezők figyelembevétele az elsődleges szempont. A generációs jellemzőket általában ismerjük, de az oktatási folyamat középpontjában az egyén áll, az egyéni igényeket kell kiszolgálni. A cél az

egyének tanulmányi előrehaladásának elősegítése. A középfokú oktatás mint tömeg-oktatás, nem mindig képes alkalmazkodni az egyén igényeihez – sem eszközellátásban, sem módszertanban. Azok számára, akik nincsenek megelégedve a jelenlegi oktatással, alternatív út áll rendelkezésre az egyéni fejlődés támogatására, különféle diszruptív technológiák, például az elektronikus tanulási környezet (Moodle), a tömeges online tanfolyamok (MOOC, K-MOOC) és a virtuális 3D-terek segítségével (9. ábra).

9. ábra. Matematika-tananyagok a CollabQuick VR 3D térben



[26] Schubert T.–Friedmann F.–Regenbrecht H. (2001): The experience of presence: Factor analytic insights, Presence: *Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 10. (3.) Pp. 266–281.

[27] Berki, B. (2020a): Level of Presence in MaxWhere Virtual Reality. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 487–491.

Navigációs módszerek elemzése MaxWhere virtuális térben

(Berki Borbála és Sudár Anna)

Kutatási cél a MaxWhere 3D környezet jelenlétérzés profiljának elkészítése, valamint navigációs módszerének részletes bemutatása, szakirodalmi keretbe ágyazása. Ennek megfelelően elkészült a MaxWhere virtuális valóság asztali verziójának jelenlétérzés-profilja. A felmérés során IPQ-kérdőív [26] került felhasználásra, 31 fő bevonásával.

Az eredmények alapján a MaxWhere virtuális valóságban tapasztalt jelenlétérzés szintje megfelel a más hasonló asztali virtuális valóságokban tapasztalhatóhoz. A kérdőív által mért faktorok közül az általános és a téri jelenlét érzése relatíve magas volt, míg a legalacsonyabb az észlelt realizmus volt [27].

[28] Baranyi, P.–Galambos, P.–Csapó, A.–Jaloveczki, L. (2018): Cognitive navigation and manipulation (CogiNav) method, Patent US 2018/0 032 128A1. *US Patent App.* 15/658,579.

[29] Berki, B. (2020b): Navigation Power of MaxWhere: a Unique Solution. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. Pp. 511–515.

[30] Sudár, A.–Berki, B. (2020): *Proposing a complex cognitive desktop virtual reality test*. In: *The 1st Conference on Information Technology and Data Science: Book of abstract*. Pp. 159-160.

A MaxWhere navigációs technológiájának felmérése alapján elmondható, hogy az egyedi CogiNav [28] technológia a bevett mozgásoperációkon túl a mérnöki szoftverekből ismert orbit funkciót is lehetővé teszi. Az ismert navigációs eszközök használata, mint az egér és az érintőpad, növeli az észlelt természetességet, a navigációs operációk analóg jellemzői pedig lehetővé teszik a könnyű elsajátítást [29].

A másik kutatási cél egy komplex virtuálmérőter megtervezése volt a humán végrehajtó funkciók komplex mérésére a MaxWhere platformon. Ebben a mérésben az alanyok egy virtuális város különböző pontjain hajtanak végre különböző feladatokat (kategorizáció, Stroop-feladat, virtuális, mentális forgatási teszt), s így egy virtuális térben mindhárom funkciót (váltás, gátlás, munkamemória) mérni tudjuk komplexen és kontrollált módon [30].

Összefoglalás

Jelen cikkben az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt keretében végzett kutatásaink egy része került összefoglalásra, elsősorban az ember–számítógép-, valamint megjelenítő és elemző interfészek, továbbá virtuális valóság témakörrel összefüggő kutatások tekintetében. A jövőbeli kutatási irányok meghatározása ezen eredmények értékelésén alapul.

gesztusvezérlés-alapú er-számítógép-interfész

Összefoglalás: A piacon több játék, telefon, tablet is kapható, melyek kézi gesztusvezérléssel is korlátozott gesztusjel-mennyiséggel és korlátozott gesztustérben. A legtöbb ember ma még úgy gondolja, hogy ezek inkább csak játékravalók. Az ipari alkalmazási területe valóban még elég kicsi. Azonban több olyan területen is, ahol a pontos érintés vagy a hangvezérlés nehezen használható, alkalmazható lenne a gesztusvezérléses irányítás. A számítógépek gesztusvezérlését a hagyományos webkamerákkal, a kifejezetten ilyen célra fejlesztett eszközökkel lehet megoldani. Az utóbbi időben egyre több olyan eszköz jelenik meg elérhető áron, melyekkel ún. mélységi felvételeket is lehet készíteni. Ezek az eszközök jól alkalmazhatóak a kutatásban. Több olyan ingyenes szoftver is megjelent az elmúlt egy évben, mely a kéz jeleit értelmezi, legtöbbször alakfelismerő szoftverek segítségével. A COVID-19 megjelenése előtérbe helyezte ezeknek a kutatásoknak a felgyorsítását, hiszen az érintés nélküli vezérlés az egyik legjobb módja a vírusterjedés megelőzésének. A gesztusvezérlést egyre több gyártó építi be pl. az autók számítógépeinek vezérlésébe vagy a nagy szennyezettségű, ill. steril helyen történő vezérlésekhez. **Kulcsszavak:** Gesztusvezérléses irányítás; webkamera; mélységi felvételek; alakfelismerő szoftverek.

Abstract: There are several games, phones, and tablets available on the market, which can also be used with manual gesture control, of course with a limited amount of gesture signals and limited gesture space. Most people today still think they are more of a game. The area of industrial application is still quite small. However, in several places where precise touch or voice control is difficult to use, gesture control could be applied. Gesture control of computers can be solved with traditional web cameras, with tools specially developed for this purpose. Recently, more and more devices are appearing at affordable prices

* Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: kiru@uniduna.hu

** Qualisoft Informatikai Zrt.
E-mail: kirvencel@gmail.com

*** Omoricza Kft.
E-mail: domonkoslevente@gmail.com

with which the so-called. depth shots can also be taken. These tools are well suited for research. Several free software programs have been released in the last year that interprets hand signals most often using shape recognition software. The advent of COVID-19 has highlighted the acceleration of this research, as non-contact control is one of the best ways to prevent the spread of the virus. Gesture control is being installed by more and more manufacturers, for example, in the control of cars' computers, or the control of highly polluted or for controls in a sterile location.

Keywords: Gesture control of computers; webcam; depth shots; shape recognition software.

Bevezetés

A Dunaújvárosi Egyetem 2017-ben alapított kutatócsoportja a gesztusokkal – elsősorban a kéz és ujjak jeleivel – vezérelt számítógépek lehetőségeit kutatja. A piacon több játék, telefon, tablet is kapható, melyek kézi gesztusvezérléssel is használhatóak, természetesen korlátozott gesztustérben, korlátozott gesztusjelmennyiséggel. A legtöbb ember ma még úgy gondolja, hogy ezek inkább csak játékra valók. Az ipari alkalmazási területe valóban még elég kicsi. A gesztusvezérléses irányítás azonban több olyan helyen is alkalmazható lenne, ahol a pontos érintés vagy a hangvezérlés nehezen használható. A számítógépek gesztusvezérlését a hagyományos webkamerákkal, a kifejezetten ilyen célra fejlesztett eszközökkel lehet megoldani. Az utóbbi időben egyre több olyan eszköz jelenik meg elérhető áron, melyekkel ún. mélységi felvételeket is lehet készíteni. Ezek az eszközök a kutatásban jól alkalmazhatóak. Az elmúlt egy évben több olyan ingyenes szoftver is megjelent, mely a kéz jeleit értelmezi, legtöbbször alakfelismerő szoftverek segítségével. A COVID-19 megjelenése előtérbe helyezte ezeknek a kutatásoknak a felgyorsítását, hiszen az érintés nélküli vezérlés az egyik legjobb módja a vírusterjedés megelőzésének. A gesztusvezérlést egyre több gyártó építi be pl. az autók számítógépeinek vezérlésébe, vagy a nagy szennyezettségű, ill. steril helyen történő vezérlésekhez.

Gesztusvezérlési lehetőségek

Az utóbbi időben a kézi gesztusvezérlés egyre inkább elterjedt a játékok és a mindennapi eszközeink terén. Ezek az eszközök a gesztusok felismerésének legkülönbözőbb módszereit használják. A játékoknál leginkább a mozgásérzékelés, míg a komputervezérlésnél a képi feldolgozás ad lehetőséget a gesztusok értelmezésére. Már otthoni eszközvezérlés is elérhető olcsó eszközökkel (Leap motion, Fibaro), illetve saját magunk is készíthetünk programokat a google osztálykönyvtárai segítségével. Arduino-alaplapok és -ér-

zékelők stb. használatával komplett eszközöket is készíthetünk. Nagyon sokan még ma is csak játékként érdekességgént tekintenek a gesztusvezérlésre (az Intel vezére, Brian Krzanichar már 2015-ben robotpókokat ugráltatott kézjelekkel).

A gesztusvezérlés számtalan lehetőséget nyújt az okos otthonok vezérlésében (elektromos berendezések be- és kikapcsolása, hangszórók hangerősségének beállítása, az idővel és kézjelekkel összekötve pl. egy kávé elkészítése mellet kézjelekkel kérhetünk egy biztonsági lezárást vagy akár egy telefonszám (pl. rendőrség, vészhívó) hívását.

A gesztusvezérlésnek a jövőben biztosan nagy jelentősége lesz a kollaboratív robotok irányításában, ill. biztonságtechnikájának kialakításában. A robot, észlelve például a mellette dolgozó humán munkaerő mozdulatait, csak akkor kezdi meg a tevékenységét, ha a humán munkás már befejezte a munkáját (letette az alkatrészt). (A gesztusvezérelt robotokon a SZTAKI munkatársai is dolgoznak.)

A gesztusvezérlés kutatása

Jelenleg több ipari cég és egyetem is foglalkozik a gesztusvezérlés kutatásával (csak néhány példa a világból):

Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar: képfeldolgozás. A kutatólaboratórium kutatása: eljárás kézjelek felismerésére és a számítógép kamerán keresztüli vezérlésére, egyénre szabott, szemmozgás által vezérelt felhasználói felület. A temesvári egyetem kutatócsoportja: Ujjbegyalapú valós idejű követés és gesztusfelismerés a természetes felhasználói interfészek számára. St. Joseph Engineering College, Mangaluru, India: Hand Gesture Recognition using Webcam.

Játékok

A ma gesztusvezérlésként bemutatott játékok inkább a kézre szerelt, az elmozdulást érzékelő (leggyesze-
rűbb induktív elfordulás- és elmozdulásérzékelőkkel ellátott játékok), botkormányos távvezérlőket vagy a playstation-okat váltják ki. Ezek az eszközök nem is nevezhetők igazán gesztusvezérelt berendezéseknek, hiszen nem a gesztusok, hanem az elmozdulás, elfordulás alapján adnak le jeleket.

[1] <https://www.banggood.com/>

[2] <https://www.amazon.de/>

[3] <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>

[4] <https://www.banggood.com/Educational-DIY-Smart-Robot-Car-Kit-Gesture-Control-Car-Hand-Gesture-Car-For-Arduino-p-1732917.html>

1. ábra. Mozgásérzékelő ujj- és karperecek által vezérelt játékok [1], [2], [3]



Eszközbe integrált gesztusfelismerő rendszerek

A Leap Motion egy elég rég a piacon lévő fejlesztés, mely egy olyan kis eszközt tartalmaz, melyet a billentyűzet elé téve és afelett mozgatva adhatjuk meg a gesztusjeleinket. Az eszköz könnyen programozható és elég látványos vezérléseket adhatunk meg vele. A gesztus eszközkészlete nem korlátozott, a szoftvernek további utasításokat is „megtaníthatunk”, s ez a tulajdonsága a Leap Motion-t kétségtelenül a hasonló funkcióban kapható eszközök elé helyezi.

2. ábra. Leap Motion [4]



3. ábra. Fibaro swipe és a Bearbot [5] [6]



[5] <https://www.fibaro.com/hu/>

[6] <https://www.indiegogo.com/projects/bearbot#/>

[7] <https://www.banggood.com/>

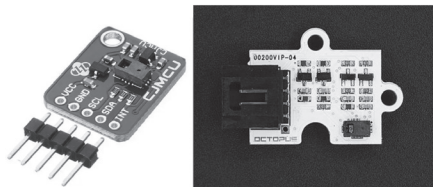
A Bearbot egy barnamedve, mely a távirányítókkal összehangolva, kézjelek alapján vezérli az otthoni készülékeket.

Fibaro swipe kézmozdulatokkal irányítható vezérlő pad okos otthonokhoz

Gesztusfelismerő szenzorok

A piacon egyre több beszerelhető, korlátozott gesztusfelismerésre alkalmas szenzor jelent meg, melyeket hobbi- és ipari alkalmazásokban egyaránt lehet alkalmazni. Az ilyen berendezéseket szintén játékokban használják leginkább. Az Arduino-termékcsaládba integrálható néhány szenzor:

4. ábra. Gesztusfelismerő szenzorok



CJMCU-7620 Gesture Recognition Sensor, Octopus Gesture Sensor PAJ7620U2 [7]

CJMCU gesztusérzékelő szenzor:

9 féle gesztust tud azonosítani, beleértve a felfelé, lefelé, balra, jobbra, előre és hátra; az óramutató járásával megegyező kerületi; az óramutató járásával megegyező lefelé, lefelé, balról jobbra, balról jobbra haladást.

Octopus gesztus szenzor:

Az Octopus Gesture Sensor PAJ7620U2, amely egyetlen chipbe integrálja a gesztusfelismerő funkciót az általános I2C interfésszel. 9 kézmozdulatot képes felismerni, többek között felfelé, lefelé, balra, jobbra stb. Csak egyszerű mozdulatok megkülönböztetésére használható.

Ezek az eszközök a termékcsaládban megtalálható építőcsomagokban is megtalálhatóak, ill. használhatóak (pl. okosautó, robot-mobiltelefon építéséhez, ill. funkcióbővítéséhez).

Telefonokba és mobil eszközökbe épített gesztusvezérlési lehetőségek

A telefongyárók már régóta versenyeznek a felhasználókért, ezért több kamera már mélységérzékelővel is ki van egészítve, ill. az előlapi részen külön mélységérzékelő, ill. egyes telefonoknál egyszerűbb gesztus szenzor is megtalálható.

MOBIL ESZKÖZÖK GESZTUSVEZÉRLÉSE

Androidos telefonok:

A mobileszközökre (telefon, tablet) nagyon hamar megjelentek az érintés lehetőségei; számos készülék szoftverei (Samsung Galaxy S4, Huawei Mate Pro, LG G8 ThinQ) már használják ezeket. Az érintés nélküli mód számos esetben hasznos lehet, ha pl. maszatos kézzel nem akarunk a telefonunkhoz érni, vagy pl. a strandon szeretnénk vizes vagy homokos kézzel felvenni egy hívást). A vezérléshez külön kamerákat építettek be, de arra is van lehetőség, hogy a telefon előlapi kamerájával és szoftveres megoldással vezéreljük készülékünket.

Android:

A letölthető programok a telefonunk, tabletünk előlapi kameráját használva érzékel néhány, a kezünk által leírt alapmozdulatot: legyezéssel lapozhatunk a médiatartalmak között; leállíthatjuk a zene- ill. videolejátszást; a Motion Sense, Wave Control, Proximity Actions szoftverekkel hívásfogadást, -megsza-

kítást vezérelhettünk; integetéssel ki-és bekapcsolhatjuk a kijelzőt (Wave Up, KinScreen). Természetesen ezek a szoftverek sem tudnak működni anélkül, hogy az előlapi kameránkba be ne lenne építve egy távolságérzékelő. Ezek a szoftverek általában a képi alakot és a távolságot mérik, ezért lehet integetéssel vagy – ahogy angolul hangzik – hullámmal (a kéz hullámozó mozdulataival) üzemeltetni őket. Természetesen a kézi gesztusjelek mellett nagyon népszerűek a hanggal vezérelt szoftverek és a hangvezérlés operációs rendszerre ültetése is (ezzel ebben a cikkben nem foglalkozunk).

IOS:

Az Apple eszközökre sokkal kevesebb lehetőséget találtam a gesztusvezérléshez, az érintés nélküli vezérléseket leginkább hangvezérléssel helyettesítené. Bár van letölthető gesztusvezérelt app (pl. Wave Control for iOS), a változatosság közel sem akkora, mint az android eszközök esetében.

PC-k, laptopok gesztusvezérlési lehetőségei (letölthető gesztusvezérelt eszközök)

Többnapos használatban lévő laptop esetében a gyártók már gondoskodtak a gesztusvezérlés lehetőségeiről. A Lenovo pl. saját szoftvert is kínál, a Lenovo Motion Control szoftvert, mely intelligens, intuitív módja a webkamerával való interakciónak. A Lenovo a különféle laptop- és számítógépes eszközei használatához az IntelR RealSense™-szoftvert kínálja.

Az ipar egyik legfejlettebb mozgás- és gesztusvezérlő platformjaiként ismert RealSense™ nemcsak a kéz-, hanem a fejmozdulatokat és az arckifejezéseket is képes felismerni. A RealSense™-technológiát a DELL, az Acer, az HP és a Samsung is alkalmazza több laptopban, ill. kijelzőben, és valószínűleg egyre inkább elterjedt technológia lesz a közeljövőben. A cikk későbbi részében még a kutatáshoz kapcsolódóan foglalkozunk a RealSense-megoldásokkal.

A RealSense-technológia azonban a legtöbb laptopban, monitorban ma még nem található meg, ezért ezeknél az eszközöknél a minden laptopban rendelkezésre álló webkamera használatával tudunk gesztusjeleket értelmezni. Talán a webkamerára kidolgozott gesztus felismerésnek van a legnagyobb publikációja a világban. Az ujjak, ujjbegyek, testmozdulatok, fejmozdulatok, szemkövetés, az egér teljes kiváltását, de még a néma beszéd gesztusjeleinek felismerését is több egyetemen, kutatócsoportban és szoftverfejlesztő cégeknél is kutatják.

Az interneten számos olyan alkalmazás, ill. szoftverkönyvtár érhető el, amely lehetővé teszi a gesztusvezérlések beépítését saját fejlesztésű szoftvereinkbe:

TensorFlow

A Deep Learning, a Machine Learning (röviden: ML) egyik ága, ami olyan algoritmusokkal foglalkozik, melyeket az emberi agy működése inspirált. Ezeket Artificial Neural Network-nek (a magyar szakirodalomban: mesterséges neurális hálózatnak, mesterséges neuronhálónak) nevezik. Az emberekhez hasonlóan, a neuronháló is tapasztalás vagy példák által tanítható.

A Google által fejlesztett TensorFlow egy ingyenes, nyílt forráskódú, neurális operációkat tartalmazó könyvtár, mellyel ML-modelleket tudunk fejleszteni.

OpenCV

Az Open Computer Vision Library, a legszélesebb körben használt képfeldolgozási és ML-osztálykönyvtár. Elsősorban azért hozták létre, hogy közös infrastruktúrát biztosítson a számítógépeslátás-alkalmazások számára, és felgyorsítsa a gépi észlelés használatát.

Handtrack.js

A Handtrack.js egy weboldalon futtatható, kézfelismerést biztosító javascript könyvtár. Tensorflow API-t használ, viszonylag gyorsan és megbízhatóan működik, azonban az ujjakat külön nem tudja felismerni, ezért nekünk nem megfelelő.

Mediapipe

A Mediapipe a Google által fejlesztett, ingyenes, nyílt forráskódú keretrendszer, amivel több platformra (mobil, web, iOS, Linux) tudunk gépi érzékeléssel (OpenCV és TensorFlow modell) ellátott szoftvert készíteni.

A keretrendszer az új modellekkel folyamatosan bővül, ebből néhány kész megoldást biztosít nekünk:

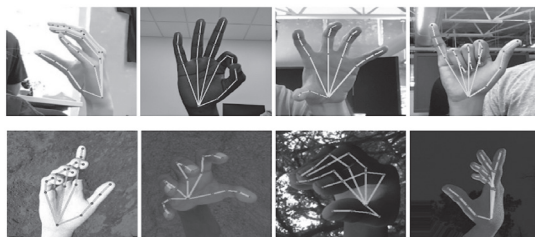
- Arcfelismerés
- Kézfelismerés
- Haj-szegmentálás
- Írisz-felismerés
- Pozitúra-felismerés
- Mozgás-felismerés
- Objektum-felismerés
- Objektum-felismerés 3D-s térben
- KNIFT (Keypoint Neural Invariant Feature Transform)

A kézfelismerés az ujjakat és azok pontjainak pozícióját is pontosan meghatározza, így a különböző gesztusok, kézjelek felismerhetőek. A Mediapipe jelenleg Android-, Linux- és IOS-rendszerek támogató-

sával működik stabilan. Lehetőség van csak CPU-, illetve GPU-támogatással készíteni szoftvert. Utóbbihoz legalább OpenGL ES 3.1 szükséges, aminek köszönhetően Raspberry Pi 4-en is futtatható grafikus kártyával a programunk.

[8] <https://www.slashgear.com/google-mediapipe-hand-tracking-bodeswell-for-ar-and-smart-glasses-26588596/>

5. ábra. A Google Mediapipe kézfelismerési lehetőségei [8]



A Mediapipe működése

A Mediapipe már a nevében is feltűnteti (pipeline) amolyan csővezetékszerű működését. Ez nagyjából stimmel is, hiszen a vezeték egyik végén beküldünk egy bizonyos adatot, például egy képet, és a másik végén visszakapjuk azt filterezve. A gyakorlatban azonban ez kicsit bonyolultabb.

Gráf

A Mediapipe egy gráfos szerkezetet valósít meg, melyhez egy vagy több forrást (input stream) tudunk csatlakoztatni – például videót, kameraképet vagy mikrofont –, és ezeken tudunk számításokat végezni vagy manipulálni, majd kiadni egy vagy több csatornán (output stream), és használni azt. A gráfok csúcsai bizonyos állomásokat jelölnek, ahol az adatmanipulációk vagy számítások történnek. Ezek lehetnek kalkulátorok (calculator node) vagy algráfok (subgraph). Az állomások között meghatározott sorrendben történik a kommunikáció – amiről külön ütemezési rendszer gondoskodik –, saját Mediapipe csomagok (Package) által. A gráf élei jelölik ezen csomagok útvonalát.

A könnyebb átláthatóság miatt a Mediapipe csapata készített egy gráf vizualizációs szoftvert (Visualizer), ami beolvassa a .pbtxt kiterjesztésű gráf-fájlt, majd értelmezi és szemlélteti azt. A Visualizer a <https://viz.mediapipe.dev/> oldalon érhető el.

Az algráfok valójában kalkulátorok egy kisebb, összefüggő csoportja, melynek segítségével a MediaPipe könnyebben modularizálhatóvá válik. Algráf meghatározásához külön gráf-fájlt kell létrehozni.

Kalkulátorok

Kalkulátor alatt egyszerűen egy kódsort vagy osztályt értünk, ami CalculatorBase osztályból van származtatva. A CalculatorBase írja le azt a 4 db szükséges függvényt, amit minden kalkulátornak meg kell valósítania:

- GetContract()
- Open()
- Process()
- Close()

A GetContract()-függvény szolgál a bejövő és kimenő csomagok meghatározására. A gráf inicializálásánál hívódik meg, hogy ellenőrizze és igazolja a csomagok típusait. A csomagok meghatározására két lehetőségünk van:

- Címkézéssel (Explicitly tagged)
- Indexeléssel

A címkezés névvel, az indexelés számozással jelöli meg a kimenő csomagot. Indexelést összetettebb adatok megkülönböztetésére érdemes használni, minden másra elég a tagelés.

Az Open() a gráf indulásakor hívódik meg, egyszer; a kalkulátor-konfigurációt itt kell elvégezni. Ennél a pontnál már rendelkezésünkre áll az első bejövő csomag.

A Process()-en belül tudjuk meghatározni a kalkulátor feladatait. Minden új inputnál meghívódik. Ha hiba lépne fel, a keretrendszer a Close()-függvényt fogja meghívni.

A Close()-függvény az Open() befejezésével vagy hiba esetén hívódik. Ilyenkor már nincsenek kezelhető inputcsomagok, viszont küldhetünk outputot.

A CSOMAGOK SZINKRONIZÁLÁSA

A MediaPipe gráf végrehajtása decentralizált: nincs globális óra, és a különböző csomópontok egyszerre képesek feldolgozni a különböző időbélyegekből származó adatokat.

Node-oknak, melyek egyszerre több input streamet kezelnek, szükségük van valamiféle koordinációra. Például az objektumfelismerésnél ki kell jelölni a felismert objektumot, és kiírni a nevét, majd ezeket időben egyszerre megjeleníteni a videón. Ennek a szinkronizációs feladatnak okán hozták létre az idő-

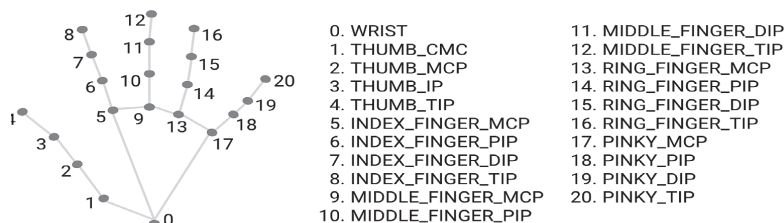
bélyeg- (timestamp) alapú azonosítást, amiért teljes mértékig a keretrendszer felel. Ez annyit jelent, hogy a gráf minden input adathoz időbélyeget rendel, és az azonos időbélyeggel ellátott adatokat – például kép és hang – egyszerre dolgozza fel. Ha a feldolgozási idő különböző, akkor is megvárja az összes azonos időbélyeget, és egyszerre engedi ki az outputra.

[9] <https://github.io/mediapipe/solutions/hands#hand-landmark-model>

Kéz felismerése

A MediaPipe egyik legnagyobb előnye, hogy a gépi felismeréshez optimalizáltabb Machine Learning-modellt alkalmaz. Vegyük példának a kézfelismerést. Az ujjak felismerése előtt azonosítja a tenyér pozícióját, majd ebből számol egy négyszöget, ami meghatározza a vizsgálni kívánt területet az ujjakhoz. A tenyér pozíciója megmarad a memóriában, ezért a következő képkocka esetében már nem kell újra lefuttatni a felismerést, ehhez az előző képkocka közelítő adatai is elegendőek. Legközelebb csak akkor kell újra futtatni, amikor a tenyér eltűnt a képről. Ha a kéz területe megvan, akkor az ujjakat is fel tudja ismerni. Az ujjperceket vektorként kezeli a modell.

6. ábra. Kéz-modell [9]



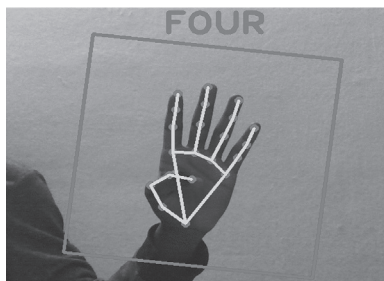
Gesztusok felismerése

Az ujjpercek vektorait felhasználva meg lehet határozni bizonyos formákat, azaz statikus gesztusokat. Statikus gesztusokon kívül lehetőség van bonyolultabb, dinamikus gesztusok felismerésére is, ami használható például lapozásra vagy zoomolásra.

Saját esetünkben a statikus gesztusok elegendőek, hiszen csak számokat akarunk felismerni. A Hand Gesture Recognition kalkulátort használtam, ami már pár, előre megírt gesztust tud kezelni. Működésének lényege, hogy az ujjak nyitott vagy zárt állapotát tárolja változóban, majd ezekhez a különböző állapotokhoz rendel egy string-típust. Például, ha az összes ujj zárt, kivéve a mutató és középső ujjat, a hozzárendelt string értéke kettő lesz.

[10] forrás: <https://gist.github.com/TheJLifex/74958cc59db477a91837244ff598ef4a>

7. ábra. Számfelismerés gesztusok alapján [10]



GUI

A Graphical User Interface-hez (röviden: GUI) több ötlet is felmerült. A GUI egyetlen követelménye, hogy több platformon is futtatható legyen, így a döntés a QT-ra esett. A grafikus felület először QT Creator-ben készült, majd a könnyebb integrálhatóság miatt áttértünk az OpenCV High-level GUI-ra, ami lényegében az OpenCV által használt QT-alapú GUI. Alapértelmezetten az OpenCV QT support nélkül installálódik, ezért újra kellett telepíteni WITH_QT flaget használva. Ezután már készíthetünk saját QT-ablakot a megjelenítéshez.

GUI Handler kalkulátor

A Hand Gesture Recognition kalkulátor alapvetően csak Annotation Overlay kalkulátornak küldi el a stringet változót, ami a gesztus nevét tárolja. Ennek a feladata az, hogy ráírja a videóra ezt a string-értéket. Nekünk viszont a pipe-folyamon kívül kell hozzáférni, ahol a GUI-t hozzuk létre és módosítjuk. A jelenlegi gráf egyetlen outputtal rendelkezik, amin a végleges videóképet küldi, ezért létre kellett hozni még egy output csatornát, ahol a gesztus-string érhető el.

A mi fejlesztésünkben sajnos nem sikerült közvetlen a Hand Gesture Recognition kalkulátorból az új outputra küldeni az adatokat, ezért saját kalkulátort kellett létrehozni – mint új állomást –, ami továbbítja a GUI kimenetre a stringeket. A saját kalkulátor feladata, hogy a bejövő inputot, minden változtatás nélkül továbbítsa a gráf második outputjára. A kalkulátor implementálásához minden olyan gráfot, algráfot módosítani kell, aminél jelen van a kalkulátor. Input-output-streameket és tag-eket jelölni kell a keretrendszer számára.

A kalkulátoron belül az előzőleg is leírt CalculatorBase függvényeket implementáltuk. Az GetContract()-en belül stream-típusok ellenőrzése és beállítása történt. A továbbítás a Process()-en belül történik.

A gráfot egy programon belül kell meghívni. A Mediapipe előre megírt egy gráf implementációt, amit fel tudunk használni. A gráfot a meghívás előtt konfigurálni kell egy CalculatorGraphConfig objektumban, majd egy OutputStreamPoller objektumot kell hozzákapcsolni, ahol a gráf által küldött outputot fogadjuk. Végül a gráfot a StartRun()-függvénnyel tudjuk futtatni.

A Google store-ban található Gravity Gestures a telefon fordításával, rázásával teszi lehetővé egyes alkalmazások indítását.

A Kézi gesztusvezérlés-alapú ember–számítógép-interfész kutatásfejlesztései

WEBKAMERÁVAL HASZNÁLHATÓ GESZTUSFELISMERŐ RENDSZER

A DUE kutatócsoportja által készített, az ujjakkal számokat mutató és azt felismerő alkalmazás a későbbiekben alkalmas lehet érintésnélküli sorszámhúzó automaták vezérlésére. A felhasználó több számot is mutathat egymás után, de az utolsó egy kézen mutatható szám után a felhasználónak az OK jel mutatásával le kell zárnia a szám bevitelét. Az input-számot aztán a számítógép egyéb szoftverei feldolgozhatják. További lehetőség egy számsor mutatása és lezárása, így egy kézzel többjegyű számokat is meg lehet adni a rendszernek. Az alkalmazás segítségével – pl. sorszámhúzó automatáknál – kiváltható az érintéssel vezérlés. A szoftver és a hozzá köthető erőforrás optimalizálása után akár egy kisebb teljesítményű beépített számítógépen is futtatható a rendszer.

8. ábra. DUE-projekt.

A kéz számjel mutatásának felismerése és a szám véglegesítése gesztus segítségével

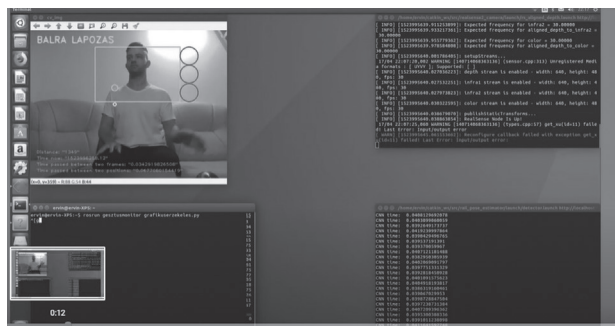


REALSENSE KAMERÁVAL HASZNÁLHATÓ SZÁMÍTÓGÉPES GESZTUSVEZÉRLÉS

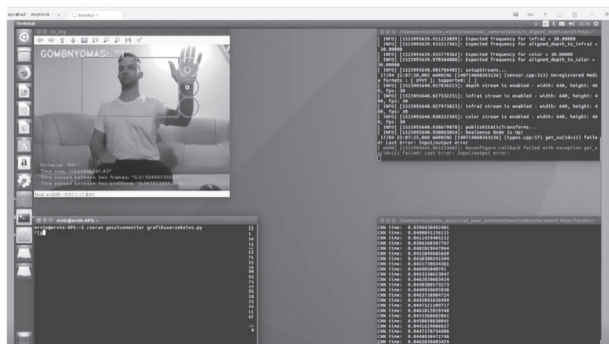
A RealSense kamerákkal használható gesztusfelismerő rendszerek esetében a gesztustér bővíthető. Mivel 3D-s kamerákat használunk, a felhasználó jól pozícionálható. (Kiküszöbölhetőek a több user észlelése általi vezérlési anomáliák: két ember keze van a képernyőn, akkor melyikük vezérel?) A 3D-s kamerák segítségével a gesztustér is sokkal jobban kiterjeszthető. Akár egy egész terem vagy szoba is szolgálhat gesztustérként, míg a webkamerás alkalmazásoknál főleg ez főleg a kamera (monitor) előtti területre korlátozódik. A RealSense kamerák a kineckelt eltűnését követően bukkantak fel az ipari alkalmazások mellett a személyi számítógépek világában. A ma már egyre olcsóbban beszerezhető eszközökkel számos ipari és otthoni alkalmazás készíthető. A kamera alkalmas a felületi eltérések észlelésére éppen úgy, ahogyan gesztusjelek azonosítására is.

A DUE kutatócsoportja a korábbi projektekben beszerzett RealSense kamerához is készített olyan alkalmazást, mely a kéz jeleit használva egy honlapot vagy média lejátszót gesztusjelekkel vezérelni lehet. Az alkalmazásban egy nagyobb gesztusteret választottunk, ebben a felhasználó a teljes karjának elmozdításával lapozhat jobbra balra fel és le, valamint a képernyőre rajzolt gombokra kattinthat tenyere előre tolásával.

9. ábra. Lapozás a kéz mozgásával



10. ábra. Gombnyomás adott helyen



Összefoglalás

A gesztusvezérlés már nem csak egy kicsi célközönség játékaaként jelenik meg napjainkban. A mobil-eszközökbe épített szenzorok lehetővé teszik, hogy drága berendezések megvásárlása nélkül is valós élmény átélésével tudjunk gesztusvezérelt számítógépeket használni. Ez a technológia a közösségi terekben elhelyezett érintőképernyős konzolok használatát is felválthatja, ami a COVID-19 kapcsán kialakult helyzetben különös jelentőséggel bír. Egyre több nyílt forráskódú rendszer teszi azt is lehetővé, hogy akár egy webkamera segítségével is kialakítsunk egy gesztusvezérelt környezetet saját fejlesztésű szoftvereink számára.

Adaptív képfeldolgozási eljárások tervezése, tomográfiai mérési eszközök fejlesztése

Összefoglalás: A képfeldolgozás folyamán a képi információ kinyerésére és megbízható értelmezési eljárás kifejlesztésére koncentráltunk. Ehhez először a fazifikált 2D Gábor-szűrőt és annak tulajdonságait kutattuk. A szűrő hatékonyságát a rendszámtáblafelismerési algoritmus tesztelésével bizonyítottuk. A kutatást a cirkuláris Gábor szűrő paramétereinek fazifikálásával folytattuk. A kutatás célja az volt, hogy lehessen detektálni körhöz hasonló, deformált alakzatokat a képben. A kutatás eredményeit alkalmazni lehet tomográfias képi eredmények értelmezésére, valamint mikroorganizmusok detektálására a mikrobiológiai képekben. A kutatási eredményeket a robotlátás fejlesztésében is alkalmaztuk, itt a fő feladatunk az volt, hogy detektáljuk az akadályokat a falon. Detektálni kellett továbbá a hasznos falfelületet mélységi kamerák, jelfeldolgozás, képfeldolgozás és fuzzy logika alkalmazásával. A mechatronikai/robot rendszerek irányítása zárt körben valósul meg, ahol a szabályozó és állapotbecslő algoritmusok performanciái határozzák meg a megvalósítható dinamikus viselkedést. Egyrészt kifejlesztésre került egy újszerű fuzzy irányítási struktúra, mely a hibajel mellett, a beavatkozáj előállításakor, a pillanatnyi fogyasztást is kiértékeli. A szabályozó az alapjelkövetés mellett az áramtranziensek és az oszcillációkat is limitálja, így mechatronikai rendszerek irányításában előnyösen használható. Másrészt, kifejlesztésre került egy újszerű adaptív állapotbecslő struktúra, mely a rendszer pillanatnyi dinamikus viselkedésének mérésére új mérési módszereket alkalmaz, és ezen mérőszámok függvényében változtatja a szűrőparamétereket. Az adaptív stratégiának köszönhetően robusztus állapotbecslés biztosítható a felsőbb irányítások számára. A hatlábú roboton végzett mérések alapján különféle kutatásokat végeztünk, melyek során a bizonytalanságokat és a robusztusságot kutattuk. Ezáltal pontosabb és jobb becsléseket tudunk végezni és hatékonyabban tudunk optimális szabályzást fejleszteni a mechatronikai eszközök számára. Különféle

* Dunaújvárosi Egyetem
Informatikai Intézet
E-mail: burkus@uniduna.hu

** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: kecskesi@uniduna.hu

*** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: odry.akos@uniduna.hu

**** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: tadityv@uniduna.hu

***** Dunaújvárosi Egyetem,
Informatikai Intézet
E-mail: odry.peter@uniduna.hu

változókat és szenzorokat vizsgáltunk, továbbá az IMU-szenzor jeleiből Kálmán-szűrővel kiszámítottuk a robot szögmozgásokat és annak hibáját is elemeztük. Kutatásunk végén az általunk fejlesztett újszerű optimalizálási eljárás felhasználásával alapokat biztosítottunk arra, hogy hexapod-robotunk új generációját, a Szabad(ka) III robotot meg tudjuk tervezni. Az optimalizálás meghatározta a csatlakozási helyzeteket, valamint a test és a láb szegmenseinek méreteit. Az optimalizálás eredményeként jelentősen csökkent a szenzorokat érintő rotációs mozgás és nőtt a robot által, egy feltöltéssel megtehető távolság. Az optimalizálás elvégzésének feltétele volt a robot paramétereizhető, részletes és validált modellje volt. A fizikai megvalósítás terén eddig legyártásra került a robot legösszetettebb része, a differenciális csuklót tartalmazó moduláris láb egység.

Kulcsszavak: Képi információ kinyerése; értelmezési eljárás kifejlesztése; alakfelismerő szoftverek; mechatronikai/robot rendszerek; Kálmán-szűrő; moduláris láb egység.

Abstract: During the image processing, we focused on the extraction of image information and the development of a reliable interpretation method, for which we first researched the fuzzified 2D Gabor filter and its properties. The efficiency of the filter was tested via license plate recognition algorithm. The research was continued by fuzzifying the parameters of the circular Gabor filter, where the aim of the research was to be able to detect circular-like, deformed shapes in the image. The results of the research can be used to interpret tomographic imaging results as well as to detect microorganisms in microbiological images. The third part of the research is related to robotic vision. The task of this research was to detect obstacles on the wall and to detect the useful wall surface using depth cameras, signal processing, image processing and fuzzy logic. The control of mechatronic/robot systems is realized in closed loop, where the performances of controller and state estimator algorithms determine the feasible dynamic behavior of the system. On one hand, a novel fuzzy control structure was developed, which provides the control action based on both the error signal and instantaneous power consumption. This control solution ensures good reference tracking performance along with limited current transients and oscillations, thereby providing superior performance in the control of mechatronic systems. On the other hand, a novel adaptive state estimator structure was developed. This algorithm employs novel measurement methods for the characterization of the instantaneous system dynamics. Moreover, the algorithm varies its parameters adaptively based on the aforementioned measures. This adaptive approach provides robust performance in closed loop systems.

We performed and completed various researches based on the measurements on the hexapod robot, from which publications were created. Basically, we researched uncertainties and robustness. This allows us to make more accurate and better estimates and more efficiently develop optimal control algorithms for the mechatronic device. Various variables and sensors were examined, and the robot angular movements were calculated from the IMU sensor signals using Kalman filter, and its error was also analyzed. At the end of our research, using the novel optimization procedure we developed, we provided the basis for designing a

new generation of our hexapod robot, Szabad(ka) III. The optimization determined the connection positions and the dimensions of the body and the legs segments. The optimization significantly reduced the rotational motion affecting the sensors and increased the distance the robot could travel on a single charge. To perform the optimization, it was necessary to build the detailed and validated model of the robot which can be parameterized. In terms of physical implementation, the most complex part of the robot, the modular leg assembly with a differential joint, has already been fabricated.

Keywords: Extraction of image information; development of an interpretation procedure; shape recognition software; mechatronic/robotic systems; Kalman-filter; modular leg assembly.

Bevezető

Az EFOP-3.6.1-16-2016-00003 azonosítószámú „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” projekt „Innovatív képfeldolgozási eljárások kutatása; tomográfiai mérési eljárások fejlesztése” című alprogramja eredetileg a mágneses impedancia spektrális tomográfiai kutatásának továbbfejlesztéseként indult, fő feladatként az új képfeldolgozási eljárás volt kitűzve célként. A képfeldolgozás célja a tomográfias eljárás képi megjelenítésének minőségét tűzte ki célul. Az alprojekt előzményeként meg kell említeni, hogy a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027, *„Nagy teljesítőképességű szerkezeti anyagok kutatása” projektben II/B: „Ferromágneses anyagok öregedésének vizsgálata változó frekvenciájú mágneses gerjesztések segítségével”* c. kutatási alprogram eredményeként kifejlesztettünk egy új tomográfiai eljárást, amit MIST-nek (Mágneses Impedancia Spektrális Tomográfiának) neveztünk el, melyhez egy működő „famodell” fejlesztettünk ki. A kutatás eredményeként magyar szabadalmat is szereztünk (P1600165 szám alatt, a következő címmel: *„Spektrális mágneses impedancia-tomográfia mágneses anyagszerkezetek roncsolásmentes mélységi vizsgálatára”*).

A kutatás folyamán két irányban, a képfeldolgozási eljárás kifejlesztése, illetve az eredmények biztosítása, validálása irányában indultunk el. Arra számítottunk, hogy a kutatáshoz – más pályázati forrásból – új tomográfot is létrehozhatunk, de pénzügyi forráshoz, ezúttal, nem jutottunk. Így a kutatási célok nem változtattunk, csak az eszközt változtattuk meg egy hatlábú járórobotra.

A kutatás eredményeit prezentálva három nagyobb eredményt tudunk felmutatni, melyeket kiemelkedő nemzetközi szaklapokban publikáltunk. A 2. fejezet a képfeldolgozás területén elért eredményekkel foglalkozik, a 3. fejezetben a zárt szabályozási körök tökéletesítését végeztük lágy számítási módszerekkel, míg a 4. fejezetben a nemlineáris robotmodell felhasználását szenzorkalibrációra és robusztus szabályzásoptimalizációra mutatjuk be. Az 5. fejezetben a Szabad(ka) III robot mechanikai szerkezetének validációjával és szerkezeti optimalizációjával foglalkozunk.

A képfeldolgozás kutatása

KÉPI SZŰRŐ FUZZIFIKÁLÁSÁNAK KUTATÁSA

A képfeldolgozás folyamán a képi információ kinyerésére és a megbízható értelmezési eljárás kifejlesztésére koncentráltunk, melynek során először a fazifikált 2D Gábor-szűrőt és annak tulajdonságait kutatuk. A szűrő hatékonyságát a rendszámtábl-felismerési algoritmus tesztelésével bizonyítottuk. A javasolt rendszámtábla-detektálási és -kivágási algoritmus a fazifikált kétdimenziós Gábor-szűrőn alapszik. Az így modifikált szűrő hozzájárul a könnyebb és megbízhatóbb rendszámtábla-detekcióhoz és -kivágáshoz a járművek összetett háttérű képeiből. A kifejlesztett eljárás – kisebb átalakításokkal – más, olyan alkalmazásokban is felhasználható, melyek magukban foglalnak alakzatdetekciót, kivágást és felismerést az összetett tartalmú képekből. A Gábor-szűrővel való szűrést a fuzzy logika szemszögéből közelítettük meg, ami nem más, mint az emberi érveléshez közeli hatékony matematikai elmélet. A Gábor-szűrő szögeit (orientációit) és hullámhosszait – a szűrő válaszában javítása céljából – a fuzzy-logika felhasználásával fazifikáltuk. A fejlesztés során arra a következtetésre jutottunk, hogy a Gábor-szűrő fazifikációjában a Bell- és a háromszögtípusú tagsági függvények alkalmazása adja a legjobb szűrési eredményeket. A fazifikált Gábor-szűrő alkalmazása kielégítő eredményeket adott a hatékony detekcióval és rendszámtábla-kivágással együtt, valamint nagyfokú ellenállóságot eredményezett a zajokkal szemben. Az algoritmust különböző kép-adatbázisokon teszteltük, melyekben a járművek különböző körülmények között és különböző környezetben jelentkeznek. A kísérletek célja az algoritmus hatékonyságának a felbecsülése volt olyan képek esetében, amelyek szerény képességű és szerény minőségű fényképezőgépekkel készültek. A kísérletekben használt képek bizonyos feltételek összességét teljesítik, melyek az algoritmus fejlesztése során határoztunk meg.

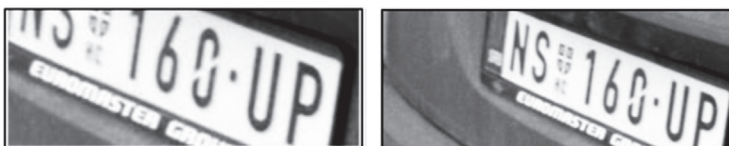
Az algoritmus a következő korlátozásokat szabja meg: a járművet előlről vagy hátulról kell fényképezni bármely oldalról egy meghatározott szög alatt; a jármű méreteinek a képben meghatározott méretek között kell lenni. Az általunk készített képadatbázisból a felsorolt feltételeket 718 kép elégíti ki. Ezenkívül más, nyilvánosan hozzáférhető adatbázisokat is teszteltük. Ebben a kutatási projektben kereskedelmi fényképezőgépekkel készített képeket használtuk fel. Az így rögzített képeknek számos hiányosságuk van, mint pl. az árnyék, a fényvisszaverődés és a zaj. A cél egy olyan ellenálló algoritmus kifejlesztése, mely a szerény minőségű kamerákkal készített, lényegesen gyengébb minőségű képeket hatékonyan dolgozza fel. A javasolt eljárás gazdaságosabb kamerák alkalmazását teszi lehetővé a rendszámtábla detekciójának folyamatában. A fazifikált Gábor-szűrőn alapuló algoritmus – a feltételezett körülmények enyhe deviációja mellett – a kívánt elemeket hatékonyan emeli ki az összetett képekből.

A bemutatott fazi-érvelés engedélyezi a szűrő paramétereinek rugalmas beállítását az adott probléma különleges körülményeihez. A következő kutatásokban a figyelem központjában olyan eljárások kidolgozása

lesz, amelyek a járművek szögének detekcióját és annak kijavítását végzik, mert a túlságos szögeltérés dominánsan kihat a rendszámlektár detekciójára.

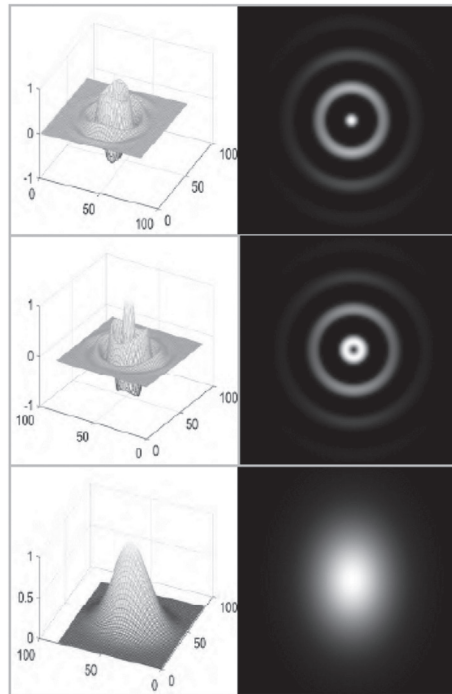
A folytatásban a fuzzy Gábor-szűrő és a Gábor-szűrőbank hatásait hasonlítottuk össze. A kutatás tesztelését ismét a rendszámlektár detektálásán végeztük. Bizonyítottuk továbbá, hogy a fazifikált szűrő jobban érzékeli a bemeneti képből a deformált rendszámlektárt. Továbbá bizonyítottuk, hogy a fazifikált Gábor-szűrő a robusztussága miatt más alakfelismerési problémákban való alkalmazásra is alkalmas.

1. ábra. A Gábor-szűrőbank és a fuzzy Gábor-szűrő eredményei



A kutatás következő lépése egy olyan hatékony és robusztus szűrő fazifikálásának a kutatása volt, amely alkalmas a tomográfiára jellemző alakok és a mikroorganizmusok detektálására egy összetett képből. A kutatás során egy igen keveset ismert és alkalmazott szűrővel foglalkoztunk, a cirkuláris Gábor-szűrővel. Ugyanis, ez a cirkuláris Gábor-szűrő alapvető esetben a kör formájú alakzatokat detektálja, de a fazifikálás során bebizonyosodott, hogy a szűrő a fazifikált paramétereknek köszönhetően képes detektálni a deformált, körhöz hasonló alakzatokat is. Ezzel bizonyítottuk, hogy a cirkuláris Gábor-szűrő alaptalanul van elhanyagolva a kutatásokban. Bizonyítottuk továbbá, hogy a fuzzy-logika által alkalmazott mesterségesintelligencia-módszerek igen hatékonyak többfajta tudományban is. A kísérletek során külön hangsúlyt fektettünk a mikrobiológiai eredetű képekre, mert a kutatás célja az, hogy a mikroorganizmusokat – későbbi szegmentációjuk és felismerésük céljából – minél jobban detektáljuk.

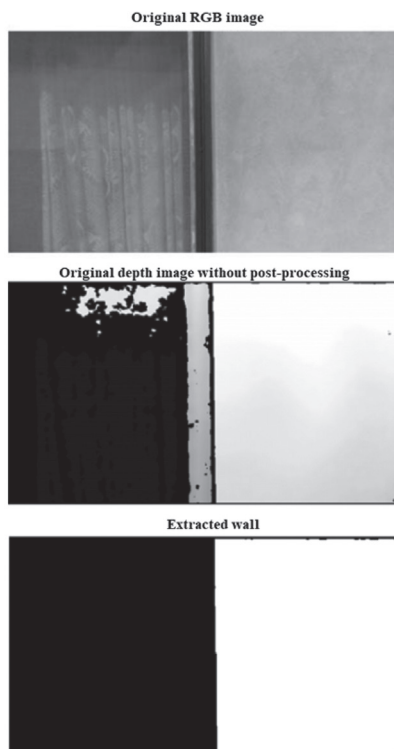
2. ábra. A fuzzy-cirkuláris Gábor-szűrő jellege



A kutatási feladat harmadik része az ipari robotok látásrendszerével kapcsolatos. A projekt feladata a festőrobot képfeldolgozó rendszerének kutatása, fejlesztése és tesztelése volt. A projekt célja szétválasztani a fal felületét az ablak felületétől a fal festése céljából. A projekt egyik alapvető feladata volt kikutatni a mélységi kamerák képességeit és lehetőségeit a robot látásrendszerének kialakításához. Manapság a korszerű robotok látásrendszerének alapja a mélységi kamera, amely a sztereometriai törvényszerűségek alapján működik. A mélységi kameráknak köszönhetően lehetőség van a képen az objektumokat szegmentálni és felismerni nemcsak a tartalom alapján, hanem az objektumok kamerától számított távolsága alapján is. A mélységi kamerák a képelőállítást a képérzékelőtől számított távolság alapján hozzák létre. Intel RealSense D415 és D435 kamerákat alkalmaztunk, melyek ár-minőség szempontjából elfogadható tulajdonságokkal rendelkeznek.

A képfeldolgozási algoritmus alapját ebben az esetben is a fuzzy-logika képezte. Ennek oka az, hogy a mélységi kamera által rögzített mélységi képek gyakran homályosak a különféle zajok, árnyékok, napsugár stb. miatt. A fuzzy-logikával kialakított kontrasztjavító algoritmus hatékonyan küszöböli ki az említett hibákat a képben, melynek köszönhetően a képszegmentáció sikeresen elvégezhető. A fuzzykontraszt-javító műveletet megelőzi egy éljavító művelet is, amely az exponenciális mozgó átlagoló (EMA) szűrőn alapszik. E szűrő feladata a zajos képekben feljavítani a zajos, elmosódott éleket.

3. ábra. A faldetektálás eredménye

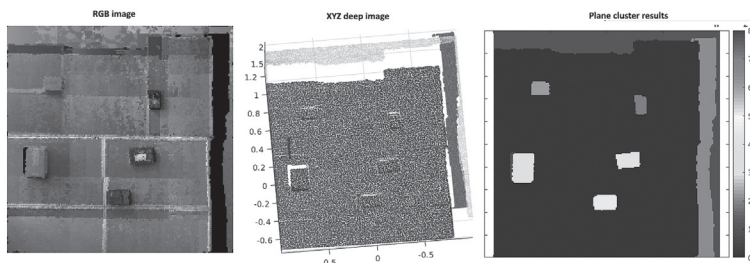


ROBOT 3D-LÁTÁSÁT SEGÍTŐ KLASZTERIZÁCIÓS ALGORITMUS FEJLESZTÉSE

A robot 3D-látását segítő klaszteros algoritmusról részletesebb specifikációs dokumentációt készítettünk. Ez az algoritmus képes a RealSense mélységi kamera adataiból hatékonyan felismerni a térbeli síkokat és akadályokat. Az XYZ-tér adatok és az RGB-színadatok összefűzését, illetve a különböző klaszter- és statisztikai szűrők alkalmazási lehetőségeit tanulmányoztuk. A zajos pontokat a kiugró (outlier) szűrővel érdemes eltávolítani, majd a RANSAC-módszerrel sík felületeket lehet kiválasztani a kamera adataiból.

Az algoritmus az XYZ-tér pontadatait először megszüri statisztikai szűrővel, amely eltávolítja a kívülálló pontokat, és a felhőben síkokat próbál illeszteni ciklikusan, ezzel ismerve fel a nagyobb síkfelületeket. Ezután történik az átalakítás egy 2D-térképpé, melyet a felhasználó látni fog. A 2D-térképen különböző javításokat lehet elvégezni, mint pl. a nem érintkező területek szétválasztása vagy a magányos, illetve hiányzó pixelek kicserélése. Végül, az algoritmus (számokkal) sorrendbe állítja a felismert felületeket, a legnagyobbtól a legkisebbig. Ennek példája látható a következő ábrán.

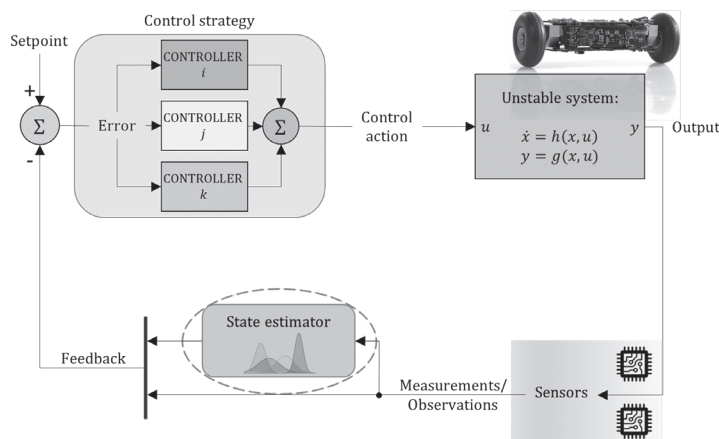
4. ábra. A kép mélységi klaszterizációjának az eredményei



Zárt szabályozási körök tökéletesítése lágy számítási módszerekkel

Mechatronikai rendszerek állapotait rendszerint pozíció- és sebesség-koordinátákkal, valamint áramértékekkel és csuklónyomatékokkal adják meg. A rendszer térbeli mozgása során az ún. pályatervező algoritmus felel azért, hogy előírja azokat a kívánt állapotértékeket, melyek megvalósítása esetén a komplex mechatronikai rendszer az előírt pályán (trajektórián) mozog és a célba ér. A kívánt rendszerállapotok biztosítása valós időben működő szabályozó algoritmusok alkalmazásával valósul meg a zárt irányítási körben (5. ábra).

5. ábra. Valós időben működő szabályzó zárt irányítási kör



Ezen szabályzó algoritmusok feladata a mindenkor beavatkozó jel előállítása a kívánt állapotértékek és pillanatnyi rendszerállapotok alapján úgy, hogy a rendszer a kívánt állapotok környezetébe konvergáljon vagy azok környezetében maradjon. A szabályzó algoritmust úgy kell megtervezni, hogy az effektív módon biztosítsa ezen követelményeket, ugyanakkor energiahatékony beavatkozást szolgáltatson a rendszernek és robusztus módon kezelje a paraméter-bizonytalanságokat és mérési zavarokat. A zárt irányítási kör másik kulcsfontosságú eleme az állapotbecslő algoritmus, mely a rendszer kimenetét mérő érzékelő jelek alapján ad becslést a mechatronikai rendszer állapotaira (állapotvektorra). Mivel a korábbiakban említett szabályzó-algoritmus ezen értékeket felhasználva állítja elő a releváns beavatkozást, ezért a precíz és pontos becslés, valamint a gyors becslési-konvergencia, mint követelmények képezik az alapvető elvárásokat az állapotbecslővel szemben.

A kutatási munka az előbbieken ismertetett algoritmusok tökéletesítésére összpontosult. Egyrészt olyan szabályzó-algoritmusok kerültek kifejlesztése, melyek – mint konvencionális megoldások – azonos alapjelkövetési performancia mellett energiahatékonyabb irányítást biztosítanak. Másrészt, olyan állapotbecslő algoritmusok kerültek definiálása, melyek azonos dinamikus viselkedések mellett, robusztusabb és megbízhatóbb állapotértékeket biztosítanak a felsőbb irányítások számára, mint a konvencionális megoldások. Az új algoritmusok kifejlesztése lágy számítási módszerek alkalmazásával valósult meg. Nevezetesen, a rendszerdinamikára vonatkozó megfigyeléseket és mérnöki következtetéseket fuzzy-logika segítségével implementáltuk a kifejlesztett algoritmusokban.

A paraméterhalmazok finomhangolása az evolúciós algoritmusokon alapuló optimalizációs folyamatok alkalmazásán keresztül a tökéletesített performanciák definiálását eredményezte.

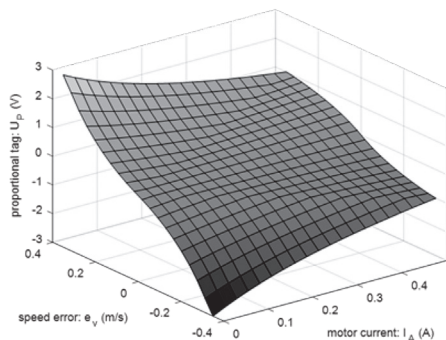
Energiahatékony fuzzy-logikai-szabályozók

Konvencionális szabályozó algoritmusoknál a bemenő jelet az előírt és megvalósított állapotok közötti különbség (hibajel) képezi. Ez a hibajel a mechatronikai rendszer mozgására vonatkozó alapjel követése esetén alapvetően a rendszer-kinematikát (pl. csuklóőpozíció-hiba vagy csuklósebesség-hiba) jellemzi. A stabilizáló beavatkozó jel számítása történhet önmagában ezen hibajel felhasználásával, viszont ekkor a dinamikára vonatkozó jellemzők, mint pl. az áramtranziensek, nyomatékok és vibrációk, nem felügyelhetők és szabályozhatók, vagy azok szabályozása további algoritmusok implementációját igényli. A fuzzy logika lehetővé teszi a megfigyelésekre és következtetésekre vonatkozó mérőszámok alkalmazását a standard hibajel mellett. Ugyanakkor, az intelligens szabályozó-algoritmus a lingvisztikai változók definiálásán keresztül, általános HA-AKKOR nyelvi szabályok segítségével implementálható. Ennek köszönhetően, az alapjel követése mellett – egy és ugyanazon algoritmus alkalmazásával – a rendszer dinamikájára vonatkozó jellemzők is szabályozhatóak.

Ha az algoritmus bemenetét a pillanatnyi hibajel és a motoráram alkotja, akkor az egy előnyös fuzzy-szabályozó struktúrát eredményez, hiszen a motoráram egyértelműen jellemzi a fogyasztást, a nyomatékértékeket, a jelentkező vibrációkat és az oszcillációkat. A fuzzy-logikai szabályozóban a szabálybázis megalkotásának alapja az volt, hogy a nagyobb áramértékek mintavételezésekor csökkentett beavatkozó jel kerüljön előállításra.

Ennek a következtetési mechanizmusnak az implementációjával az irányítást csökkentett áramtranziensek jellemzik, melynek további következménye, hogy a jelentkező oszcillációk és vibrációk mértéke is csökkenni fog az irányításban. Az így létrehozott fuzzy-következtetési rendszer – kompetens alapjelkövetési performancia mellett – olyan dinamikus viselkedést biztosít, amely jobban kíméli a mechatronikai rendszerek elektromechanikai szerkezetét, mint a konvencionális (lineáris irányításokon alapuló) megoldások. Ezt a kímélő mechanizmust jól szemlélteti az 6. ábrán látható fuzzy-felület, ahol megfigyelhető, hogy a hibajel és az éles beavatkozás (kimenet) között egy nemlineáris kapcsolatot definiáltunk a motoráramok függvényében. Ez a nemlineáris fuzzy-szabályozó segítette elő az áramtranziensek és a vibrációk csökkentését az irányításban.

6. ábra. A nemlineáris fuzzy-szabályozó-felület

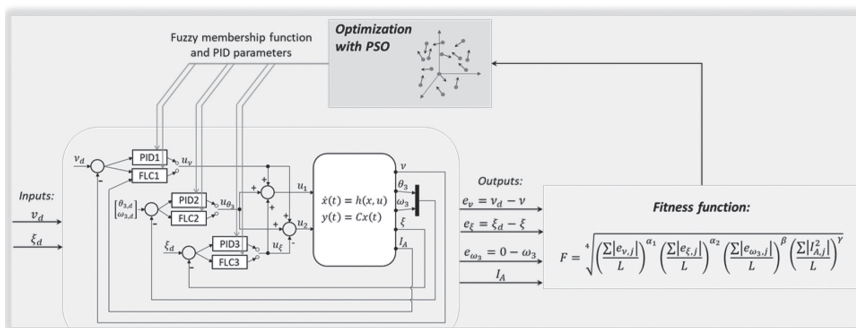


Az fentiekben definiált nemlineáris szabályozó-algoritmus performanciája tovább tökéletesíthető optimalizációval. Ennek során a cél a szabályozó-paraméterek finomhangolása, melyek segítségével az irányítási minőség maximalizálható. A feladat kidolgozása egy átfogó, többcélú költségfüggvény definiálását igényli. Az irányítás minősége négy abszolút eltérés kombinációjaként kialakított mérőszámmal (performancia-index) mérhető. Az alábbi képlet alkalmazásával a következő preferenciák minősíthetők: az előírt mozgástól való eltérések (e_v és e_ξ), a mechatronikai rendszer irányítása során jelentkező oszcillációk és vibrációk mértéke (e_{ω_3}), valamint az irányításban keletkező átlagos motoráramok (I_A).

$$F = \sqrt[4]{\left(\frac{\sum |e_{v,j}|}{L}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{\sum |e_{\xi,j}|}{L}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{\sum |e_{\omega_3,j}|}{L}\right)^{\beta} \left(\frac{\sum |I_{A,j}|^2}{L}\right)^{\gamma}}$$

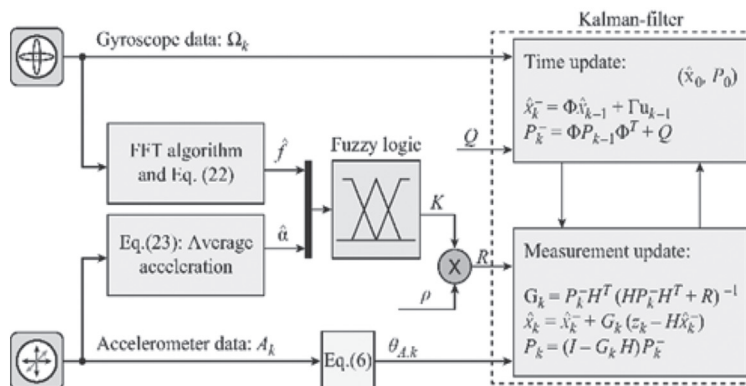
A fenti képletben az α_1 , α_2 , β és γ -változók az egyes preferenciák jelentőségét (súlyát) jellemzik a fenti képletben. A paraméterek finomhangolása a részecskeraj-algoritmus alkalmazásával valósult meg. Ez egy effektív heurisztikus algoritmus, mely hatékony kereső-performanciával rendelkezik nagy paraméterterekben is, és jól kezeli a szakaszos és zajos méréseket. Az algoritmus a fenti mérőszámot (F), mint az irányítás minőségére vonatkozó fitnessz-függvényt, flexibilisen illeszti a részecske-propagációk megválasztásához a paraméterek terében. A kialakított optimalizációs környezet a zárt körben működtetett mechatronikai rendszerre fekete dobozként tekintett; a fitnessz-függvényt kiértékeli minden iterációban a rendszer dedikált kimeneteit felhasználva; végül a részecskeraj-algoritmus finoman hangolja a performanciát befolyásoló szabályozó paramétereket a mérőszám (F) minimalizálásán keresztül.

7. ábra. Szabályozó paraméterek optimalizációja



Ezzel a finomhangolási folyamattal egy olyan fuzzy-szabályozó-struktúra került definiálásra, amely előnyösen alkalmazható olyan mechatronikai rendszereknél, ahol az alapjelkövetés mellett a vibráció- és oszcillációmentes, valamint energiahatékony irányítás is fontos szabályozási követelmény (7. ábra).

8. ábra. A kifejlesztett finomhangolási folyamattal rendelkező fuzzy-szabályozó-struktúra



ROBUSZTUS ÁLLAPOTBECSLŐ ALGORITMUSOK

Az állapotbecslő feladata a valós rendszerállapotok becslése a rendszer kimenetére vonatkozó érzékelőadatok (mérések) alapján. Mivel a mechatronikai rendszer irányítása alatt a rendszerállapotok folyamatosan változnak, ezért az állapotbecslő algoritmusnak (a pontos becslés mellett) gyors konvergenciával kell rendelkeznie. Ugyanakkor, a rendszer irányítása dinamikus környezetben valósul meg, ahol különböző irányú és intenzitású parazita-gyorsulások és vibrációk jelentkeznek. Ezek a dinamikus hatások mérési zajként jelentkeznek az állapotbecslésben és jelentősen befolyásolják az állapotbecslő performanciáját, ezért az algoritmus robusztusságára külön ügyelni kell.

A standard megoldás a sztochasztikus rendszerek állapotbecslésére a Kalman-szűrő. Az algoritmus az érzékelő adatok által definiált sztochasztikus állapotegyenlet alapján optimális becslést ad minimális varianciával (P) az állapotvektorra. A szűrő definíciója a következő képlettel adható meg, ahol x , u és z rendre az állapotvektort, bemenővektort és megfigyelésvektort jelöli, Φ , Γ és H a leképezéseket valósítja meg, míg w és v rendre a folyamat- és megfigyelés-zajokat jelöli.

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma u_k + w_k, \quad z_k = H x_k + v_k$$

$$R = E[v_k v_k^T], \quad Q = E[w_k w_k^T]$$

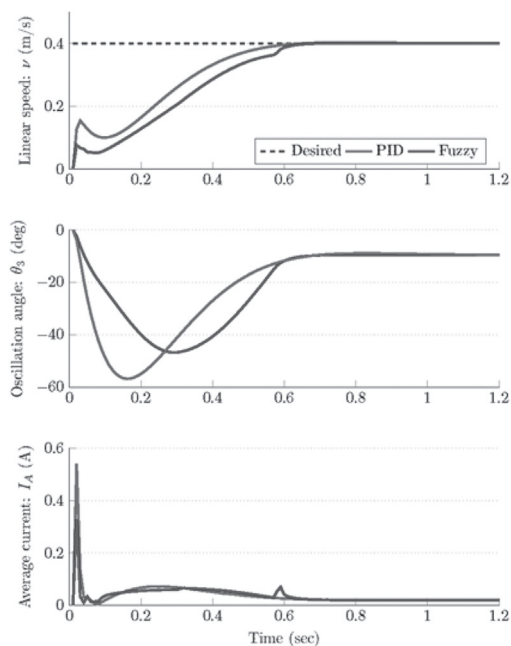
$$E[x_k - \hat{x}_k] = 0, \quad E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] = P_k \rightarrow \inf$$

Az állapotbecslés performanciáját (azaz a becslési hiba $e_k = x_k - \hat{x}_k$ mértékét) a sztochasztikus rendszert jellemző Q és R kovariancia-mátrixok határozzák meg. Amennyiben a fentiekben definiált modellt nem befolyásolják a dinamikus hatások, akkor ezek a szűrő-paraméterek direkt mérésekkel vagy optimalizációs folyamatban finomhangolhatók, és az így beállított állapotbecslő megbízható és pontos eredményeket szolgáltat. Azonban, valós alkalmazásokban, a dinamikus viselkedést nem determinisztikus folyamatok jellemzik, így a keletkező hatások sem modellezhetők a fenti állapotterez leírással. Ennek eredményeként a standard megoldás jelentős bizonytalansággal ad becslést az állapotvektorra külső zavarások esetén.

A fenti probléma robusztusan kezelhető adaptív stratégiákkal. Nevezetesen, olyan szűrőstruktúrát definiáltunk, mely a pillanatnyi rendszerdinamikát mérőszámokkal jellemzi és a mérőszámok függvényében változtatja a szűrő-performanciát befolyásoló kovariancia-mátrixokat. A kifejlesztett valós idejű mérési módszerek egyike a pillanatnyi oszcillációk mértékét határozza meg gyors Fourier-transzformáció segítségével. A másik kifejlesztett mérési módszer a pillanatnyi parazita-gyorsulásokat méri a nehézségi gyorsulásvektor felhasználásán keresztül.

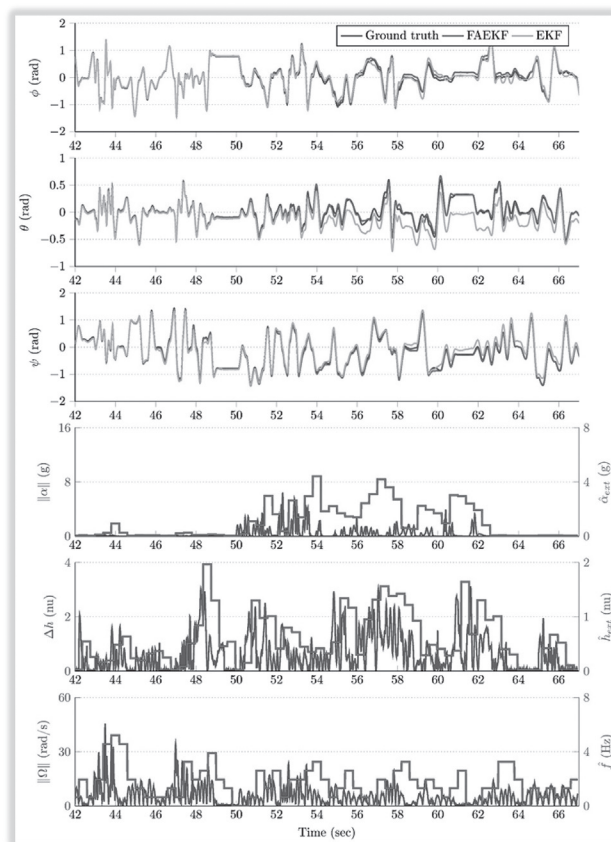
A dinamikára vonatkozó mérőszámok és a szűrőparaméterek közötti kapcsolatot fuzzy-logika alkalmazásával definiáltuk. Ez a módszer lehetővé tette a heurisztikus megfigyelések és következtetések lingvisztikai változókkal és nyelvi szabályokkal történő jellemzését.

9. ábra. A kifejlesztett adaptívszűrő-struktúra kiértékelt eredményei



A kifejlesztett adaptívszűrő-struktúrát (8. ábra) több különböző mérésben került értékeltek. A vizsgálat azt eredményezte, hogy az állapotbecslő algoritmus robusztusabb és megbízhatóbb állapotbecslési performanciát biztosít a felsőbb irányítások számára, mint a standard megoldások. Ezek az előnyös jellemzők az adaptív stratégiával kiegészített szűrőstruktúra flexibilitásának köszönhetőek, hiszen a szűrőparaméterek megválasztása valós időben történik az érzékelő adatok legelőnyösebb fúzióján keresztül, a pillanatnyi dinamikus viselkedés függvényében.

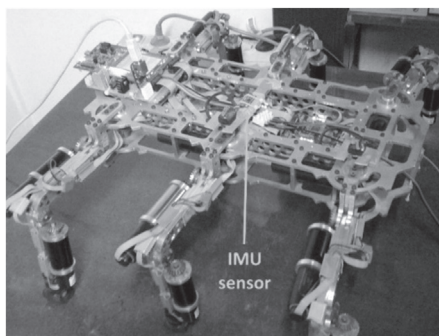
10. ábra. Eredmény-jel kinyerése konkrét példán



Nemlineáris robotmodell felhasználása szenzor-kalibrációra és robusztusszabályozás-optimalizációra

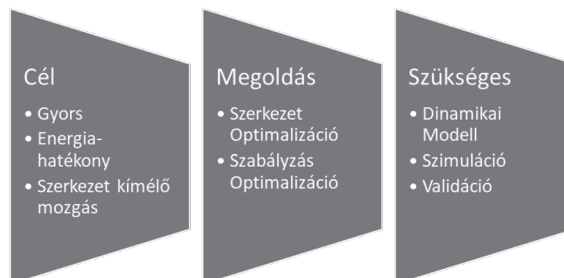
A 18 szabadságfokú Szabad(ka)-II Hexapod robot erősen nemlineáris mechatronikai rendszer, mely hitelesített elektrodinamikai és kinematikai szimulációs modellel rendelkezik. A szimulációs modell segítségével fejlesztettük és optimalizáltuk a robot lábpályagörbét és 12V-os DC-motor szabályozóját. Ezek a paraméterek beágyazhatók a robotba, ezáltal biztosítva van, hogy a robotban ugyanaz a lábpályagörbe és motorszabályzó fusson, mint a szimulációs modellben is. Többcélú és többszenáriós optimalizációs eljárásokat fejlesztettünk a komplex minőségmérési függvények megoldására annak érdekében, hogy minél robusztusabbak legyenek a megoldások az ismeretlen helyzetekre.

11. ábra. IMU-szenzor pozícionálása



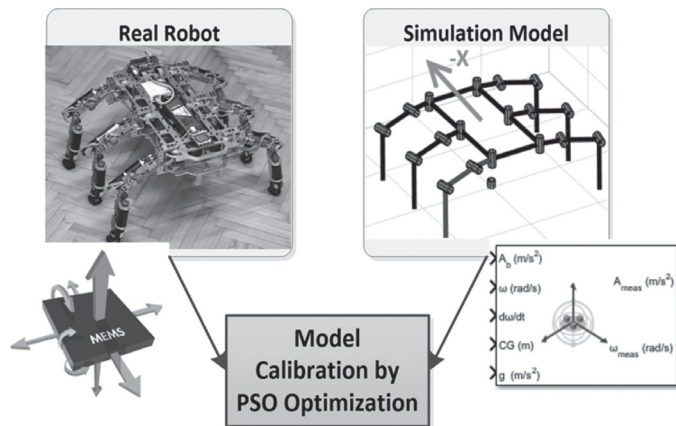
A roboton lévő MEMS-alapú inerciamérő-egység (IMU), vagyis a szenzor elsődleges célja, hogy segítse a robot navigálását és járását ismeretlen talajon és környezetben. Másodlagos célja a robot testkinematikájának követése, amit a szimulációs modell kalibrálására lehet kihasználni. A szenzor statikus vagy „offline” kalibrációja során feltételezzük, hogy a 3D-gyorsulásmérő és 3D-giroszkóp konstans hibái az offset-, a skála és a tengelyirány-hibák. A kalibráció célja, hogy minél pontosabb szimulációs modellt kapjunk, hogy jól megbecsüljük az IMU-szenzor hibaparamétereit és ezáltal annak jeleit minél nagyobb precizitással felhasználni és értelmezni tudjuk.

12. ábra. A projekt céljainak szemléltetése



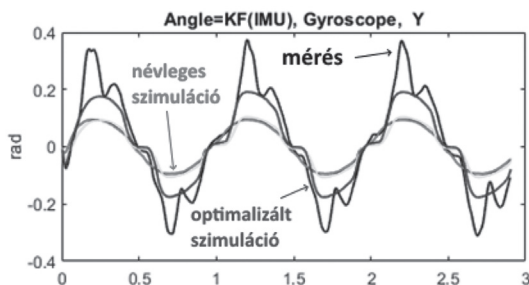
A roboton különböző kalibrációs mozgásokat végeztünk, melyek során – a többi szenzor és mérési paraméterrel együtt – az IMU-szenzorok méréseit is rögzítettük. A robot szimulációs modellje szintén magában foglalja ezen szenzorok modelljeit, ezáltal a szimulációs eredményeket kalibrálni tudtuk a mérési eredményekkel. A robotmodell és az IMU-szenzor ismeretlen, illetve becsült paramétereit úgy optimalizáltuk, hogy a szimulációs eredmények a leghasonlóbbak legyenek a mérési eredményekhez. A különbségeket statisztikailag és spektrálisan is kielemeztük.

13. ábra. Model kalibrálása PSO optimalizációs eljárással



A szenzorfúziós eljárások közül a kibővített Kálmán-szűrő a legelterjedtebb megoldás arra, hogy az IMU-szenzor jeleiből felbecsüljük a robot-test 3D-elfordulását. Ezzel a módszerrel a szimulációban és a valós méréseken is kiszámítottuk a robot szögmozgásait, majd elemeztük annak hibáit.

14. ábra. Mérési adatok



Miután a robotmodell ismeretlen és bizonytalan paramétereit optimalizálási módszerrel illesztettük a valós mérésekhez, a hiba lényegesen (átlagban 10%-kal) kisebb lett. Az IMU-szenzor modelljének paramétereit második körben illesztettük a valós mérésekhez és ez további javulást hozott, a hibák átlagban még további 1%-kal csökkentek. Az IMU-szenzor paramétereinek állítása valójában a gyorsulásmérő és a giroszkóp méréseire volt kihatással, ahol lényeges javulás tapasztalható, különösen a gyorsulásmérő esetén (35% javulás) (14. ábra).

Mivel a gyorsulásmérőhöz képest a giroszkóp sebességet mér, ami a gyorsulást integrálja, ezért várható volt, hogy a nagyobb zajok és különbségek a gyorsulás esetében jönnek elő, magasabb frekvenciatarományban is. Ennek ellenére, korábbi kutatási eredményeinkre hagyatkozva, a nem zajszerű különbségeket is értelmezni tudjuk.

TÖBBCÉLÚ MINŐSÉGMEGHATÁROZÁS ÉS OPTIMALIZÁCIÓ ROBOTIKAI RENDSZEREKNÉL

A sok-szabadságfokos, illetve komplexebb mobilrobotok tervezése és szabályzása csúcstechnológiákra épül. Az energiahatékony és szerkezetkímélő mozgás kulcsfontosságú, hiszen az befolyásolja a teljesítményt, a szükséges alkatrészek minőségét és az árat is. Ezért a modellezés- és a szabályzás-optimalizáció alapvető eszköz az ilyen robotikai rendszerek fejlesztésénél. Optimalizáció esetén a minőség meghatározása lényegében a kapott eredményt is meghatározza. A minőség általában többcélú: ügyesebb vagy

gyorsabb mozgás, kisebb energiafelhasználás, adaptív képesség, robusztusság stb. Ennek vizsgálata és meghatározása – az optimalizáció tervezésének részeként – különösen fontos. A különböző célok megfogalmazása, azok mérhetősége, matematikai kifejezése és végül a célok összevonása, azaz az egymáshoz képesti fontossága beletartozik ebbe a feladatkörbe. Az összevonáshoz hasznfüggvényt alkalmaznak, melynek célja, hogy egy jó megoldást adjon, szemben a Pareto-halmazzal. Úgy a számtani, mint a mértani súlyozott átlagolásnak megvan az előnye és hátránya. Általában különböző mértékegységű célokat kell összevonni, így vagy normalizációval kell számítani, illetve – anélkül – mértani átlagot célszerű számolni. A robusztusságot, mint egy célt, be lehet vonni a többcélú minőségszámításba, vagy olyan hasznfüggvényt kell meghatározunk, amely eleve robusztus megoldáshoz vezet.

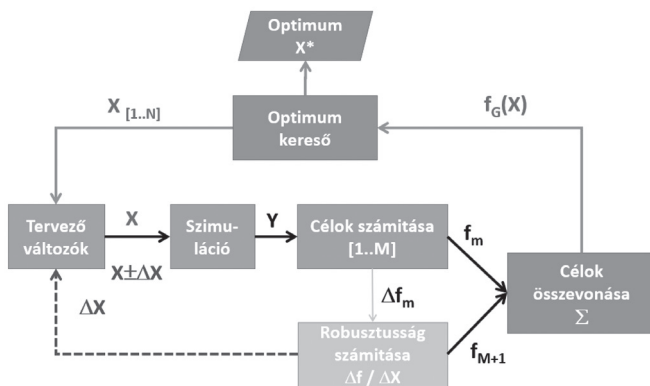
Ezt az elméletet a gyakorlatban két roboton is vizsgáltuk, és a robusztusságot igazoltuk

- a kerekes robot dinamikai és kinematikai szimulációs modelljén végzett számításokkal;
- a validált hexapod járórobot szimulációs modelljén végzett számításokkal.

A HEXAPOD ROBOT MOZGÁSÁNAK ÉS MÉRÉSÉNEK BIZONYTALANSÁGAI

A szimuláció és a valóság közötti különbség pontatlanságot és bizonytalanságot okoz. Korábbi kutatásaink számszerűen is bemutatták ezeket a pontatlanságokat, és rámutattak a Szabad(ka)-II hexapod robot néhány szerkezeti hiányosságára. A bizonytalanságok a szimulációs modell és a valós értékek segítségével definiálhatóak és ebből becsülhető fel a robot szimuláció-modelljének pontossága.

15. ábra. A robusztusság paraméterszámítása



A robot bármilyen mozgásának és szerkezeti minőségének optimalizálása előtt meg kell becsülni a mérési hibákat és bizonytalanságokat. Szükség van továbbá az elvárt minőségi optimum meghatározására, valamint a szimulációs eredmények és hiányosságok helyes értelmezésére.

A bizonytalansági változókat három csoportba lehet sorolni egy optimalizálási problémában: fizikai, tervezési és scenárió- (forgatókönyv-) bizonytalanságok. A fizikai bizonytalanságok a modell azon részeiben jelentkeznek, ahol a modell becsült vagy közelítő megoldásokat alkalmaz. A scenárió bizonytalanságai a scenárió paramétereikhez kapcsolódnak, elsősorban a többscenáriós szimulációkban, a tervezési bizonytalanságokat az optimalizált tervezési változók hordozzák.

A Szabad(ka)-II roboton végzett szekvenciális és párhuzamos mérések kisebb-nagyobb bizonytalanságot mutattak a bal és a jobb oldal, az első és a hátsó lábak, az áram- és feszültségérzékelők között, valamint ugyanazon járási scenáriók megismétlése között. Az ugyanazon scenáriók szerint megfigyelt különbségeket összehasonlítottuk a különböző forgatókönyvek közötti különbségekkel, ezáltal kifejezhető a relatív hiba.

A többi mérési pont mellett a 6 tengelyes gyorsulásmérő jeleit is elemeztük mind időbeli, mind frekvenciatartományban, majd kiszámítottuk a bizonytalansági statisztikákat.

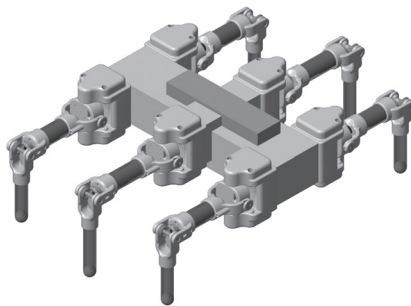
A Szabad(ka) III. mechanikai validációja és szerkezeti optimalizációja

A mobil robotok kutatása folyamatosan bővülő tudományterület, melynek potenciálja egyre inkább növekszik. Ennek megfelelően a kutatók egyre nagyobb érdeklődést mutatnak a különféle mobileszközök fejlesztése iránt. A mobil robotok esetén legtöbbször kerek vagy mászó-járó robotokról (CLAWAR) szokás beszélni. Ezek közül a második kategóriába tartozó, lábakkal ellátott robotok mechanikai összetettsége és vezérlése sokkal bonyolultabb. Cserébe viszont a felhasználásukban sokkal több lehetőség van, mivel sokoldalúbb járásuknak köszönhetően jelentősen magasabb és összetettebb akadályokat is leküzdhetnek. A Szabad(ka) hexapod járó robotokkal kapcsolatos kutatás és fejlesztés célja létrehozni egy hatlábú járó robotot, mely optimális test és lábszerkezettel rendelkezik.

Az itt bemutatott kutatásban a Szabad(ka) II robot modelljének mechanikai validálását és a *Szabad(ka) III* robot (16. ábra) szerkezeti optimalizálását ismertetjük.

Az optimalizálások elvégzéséhez a robot szimulációs környezete (parametrizálható modell). A szimuláció használatának előnye, hogy a szerkezeti optimalizálás elvégezhető a gyártás előtt, illetve, hogy a járásalgoritmusok tesztjei is párhuzamosítva és gyorsan futtathatóak, a valós robot használata nélkül. Az optimalizálás a PSO (Particle Swarm Optimization) segítségével valósult meg.

16. ábra. Szabad(ka) III. optimalizált modell



VALIDÁCIÓS ELJÁRÁS A CSUKLÓSÚRLÓDÁS, A REDUKTOR-ÖNTARTÁS ÉS A FOGASKERÉK-KOTTYANÁS AZONOSÍTÁSÁRA

Kutatásunkban egy új módszert dolgoztunk ki a csuklósúrlódás, a reduktor-öntartás és a fogaskerék-kottyanás paramétereinek azonosítására. A módszert egy meglévő hexapod robot (Szabad(ka) II) felhasználásával fejlesztettük. A folyamat során megfigyeltük és összehasonlítottuk a modell által adott és a valós eszközön mért motoráramokat. Kezdetben az áramgörbék specifikus különbségeket mutattak. Ezen eltérések elemzése után, a kiváltó okokként a csuklósúrlódást, a reduktor-öntartást és a fogaskerék-kottyanást határoztuk meg. A jelenségek paramétereit Swarm-optimalizálással fejeztük ki. A folyamat eredményeként létrejött a robot validált modellje. Az említett mechanikai tulajdonságokat lépésről lépésre azonosítottuk, mely folyamat során az egyik tulajdonság segített a másik felfedezésében. A robotmodellt MATLAB/SIMULINK környezetben hoztuk létre, a Simscape Multibody Toolbox segítségével.

A modell elkészítése során részletesen kidolgoztuk az elektronikus és mechanikai elemeket is. A modellből kapott eredmények (csuklóáramok) kezdetben nagyobb eltérést mutattak a tényleges rendszer mérési eredményeivel összevetve. A validálás során az eltérések okainak azonosítása és ezek paramétereinek optimalizálása után, az ezekből fakadó hibák jelentősen csökkentek. Az validálást megelőzően a három csukló teljesítménymutatói (fitness-függvény – MAE/M) 54,0% (Link1), 65,0% (Link2) és 49,7% (Link3) voltak. A validálás után ezek az értékek 12,6%-ra, 18,9%-ra és 10,3%-ra csökkentek.

SZABAD(KA) III MECHANIKAI ÉS ELEKTRONIKAI FELÉPÍTÉSE

A Szabad(ka) III robotot moduláris felépítésűre terveztük. Ennek lényege, hogy a lábak és a test egymástól függetlenül változtathatóak, illetve bővíthetőek. Ezt figyelembe véve, a fejlesztés folyamán először egy lábanként 3 DOF-os (szabadságfokos) változat kerül megvalósításra és ez lesz később kibővítvé négy szabadságfokúra.

A robotláb a robot legösszetettebb mechanikai szerkezeti eleme. A láb szerves részei egy differenciális meghajtó és a tibia-szegmensben található hármass rugócsillapító rendszer. A robot testének feladata, hogy tárolja az elektronikai elemeket és az akkumulátort, illetve megfelelő felületet (platform) biztosítson a később implementálandó szenzorok (IMU, LIDAR, RGB/RGBD kamera) rögzítéséhez. A test méreteire vonatkozóan annak hosszát, valamint az elülső és a hátulsó lábpárok közötti távolságot határoztuk meg. A robottal szemben támasztott további elvárás, hogy képes legyen 2 kg hasznos teher szállítására.

A lábakban található motorok meghajtását és szabályzását, valamint a szenzorok jeleinek feldolgozását hat darab, saját tervezésű meghajtólap végzi. A lapok központi eleme egy STM32F401 Dynamic Efficiency mikrovezérlő. A meghajtásért laponként 3 darab DRV8801-meghajtó felel. A lábban található érzékelőket a motormeghajtóval SPI, USART, I2C és analóg interfészekon lehet összekötni. A tibiába integrált erőmérő szenzor feladata a talajérintkezés érzékelése, a gyorsulásmérő szenzor pedig az ütközés észlelését végzi.

SZABAD(KA) III ROBOTMODELL

A Szabad(ka) III modellt hasonlóan építettük meg, mint az előző modellt, ezért a folyamatot itt nem részletezzük.

A modell **mechanikai elemeit** két csoportba lehet sorolni. Ezek:

- az előre megtervezett elemek (a testet és a femurt összekötő kéttengelyes differenciális csukló és a femur és a tibia közötti csukló), valamint
- a változtatható paraméterű elemek (a tibia- és femur-szegmensek, illetve maga a test).

Az előre megtervezett, összetett elemeket SolidWorksben realizáltuk, majd Simscape Multibody Link segítségével importáltuk a Multibody-modellbe. A változtatható paraméterű, egyszerű elemeket a Multibody-modellben hoztuk létre.

A rendszer mechanikai leírása mellett, a modell tartalmazza a motorok és a reduktorok részletes mechanikai definícióját is. Ezenfelül, szoftveres oldalról, a modell részét képezik a mozgásalgoritmus-, illetve a motorszabályzó alrendszerek is.

A mozgásalgoritmus-alrendszer (Gait Algorithm) egy Matlab-kódot futtat le 100 Hz-es frekvenciával, melynek feladata a talpak pozícióinak meghatározása és az inverz kinematikai számítások elvégzése. A rendszer három járásmódot tud szimulálni (wave, ripple és tripod), valamint beállítható benne a lépés hossza, magassága és a pálya eltolása. A kimenetet a motorok szögpozíciói képezik.

A motorszabályzó-alrendszer egy PID-szabályzót és annak akkumulátor-modelljét tartalmazza. A PID-szabályzó rész bemenetei az elvárt és a valós csuklópozíciók, míg a kimenetei pedig a motorfeszültségek. Az akkumulátor-modellrész bemenete a motorok által felvett áram, a kimenete pedig az akkumulátor belső ellenállása alapján számított valós feszültség.

A modell legtöbb releváns paramétere változtatható. Az optimalizálás által változtatható paraméterek kezdőértékei korábbi tapasztalatok alapján, az optimalizálás által megengedett határok pedig a racionális keretek között lettek meghatározva.

Egyes paraméterek értéke fix, vagyis optimalizálás által nem változtatható. A robot testének hossza (a két szélső coxa-coxa csatlakozási pontok közötti távolság) egy előre megadott feltétel volt. A test elektronikájának (hozzávetőleges) méreteit és tömegét, valamint az akkumulátor paramétereit szintén előre meg lehetett határozni. A talp és a talaj közötti kapcsolat csúszásmentes, ezért a talp súrlódási paramétere is állandó. A csuklóknál jelentkező súrlódás meghatározása a korábban elvégzett validálás során történt meg. A szimulációk által generált eredmények a következők: Energiafogyasztás, Dexterity, Transzlációs mozgás, Rotációs mozgás, Motornyomatékok.

AZ OPTIMALIZÁLÁS PROBLÉMÁI

Az optimalizálás elvégzéséhez egyrészt szükséges egy megfelelően működő, lehetőleg validált modell, másrészt pedig meg kell határozni az optimalizálás célját, az optimalizálandó paramétereket, valamint az optimalizálási tesztkörnyezetet.

A Szabad(ka) III robot esetében a validált modell adott, mivel korábban elkészült a Szabad(ka) II robot validálása, ami minden elektromechanikai jelenséget figyelembe vett. A Szabad(ka) III modell elődjének validált eredményei alapján épült. Ezután következett a cél, a paraméterek, illetve a tesztkörnyezet meghatározása.

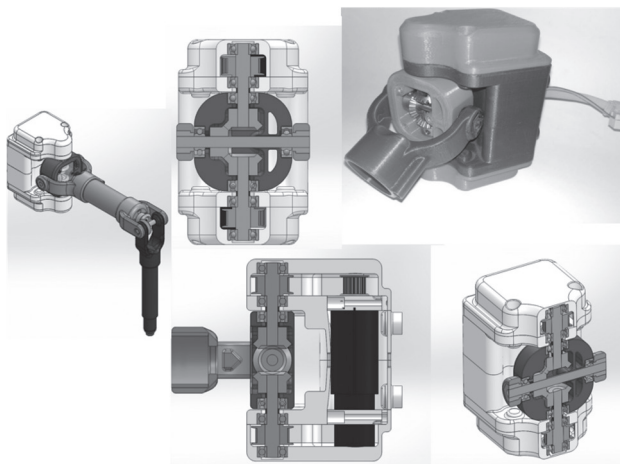
A Szabad(ka) III robot optimalizálásnak célja a legmegfelelőbb elektro-mechanikai elemek kiválasztása és az ideális mechanikai szerkezet létrehozása. A célok konkrét meghatározása (azaz a fitness-függvény leírása) azonban nem egyértelmű folyamat. A célok, részletesebben kifejtve, a következő tételekre bonthatók:

- az energiafogyasztás minimalizálása,
- a tömeg minimalizálása,

- a sebesség és mozgékonyság maximalizálása,
- a test nem kívánt mozgásának minimalizálása,
- a szerkezetet érő káros behatások minimalizálása,
- a csuklónyomatékok közötti különbségek minimalizálása.

A korábbi kutatások során meghatároztuk, hogy a robotnak hatlábúnak kell lennie, amivel ideális arányt lehet elérni a stabilitás, a redundancia és a haladási sebesség terén. Ezenfelül, a hatlábú robotok rendelkeznek bizonyos szintű mechanikai hibátűréssel is, azaz megfelelő hibátűrő járásalgoritmus és adaptív járástervezés alkalmazásával meghibásodott lábbal is képesek járni.

17. ábra. Robotláb és a differenciális robotcsukló és metszeti képei



A lábak elrendezése alapján három szerkezeti koncepció különböztethető meg:

- tengelyszimmetrikus (axisymmetric),
- csak a hosszanti (longitudinális) tengely mentén szimmetrikus, illetve
- a hosszanti (longitudinális) és az oldalirányú (laterális) tengely mentén szimmetrikus felépítést.

A tengelyszimmetrikus elrendezést omnidirekcionális járású robotok esetén érdemes alkalmazni. Ez a járásmód a *Szabad(ka) III* esetén nem volt fontos szempont, ezért ezt a megoldást elvetettük. A robot egyenes irányú járásra lesz optimalizálva, természetesen az elfordulás lehetősége mellett. Fennmaradt a

kérdés, hogy van-e előnye a rovarvilágban is elterjedt, csak hosszanti szimmetriának. Hogy szükséges-e, illetve, hogy milyen mértékű előnyt eredményez a robot eleje és a hátulja közötti aszimmetria, az szintén az optimalizálással dönthető el. A kétszeres aszimmetria egyik célja lehet az előredőlés jelensége, esetleg a ferde talajon vagy lépcsőn történő mászás kezelése.

Az optimalizálандó paramétereket három nagyobb csoportra oszthatjuk. Ezek a szerkezeti, a rugózási és a járásalgoritmus-paraméterek.

Az optimalizálás elvégzéséhez meg kell határozni a megfelelő tesztkörnyezeteket. A Szabadk(ka) III. esetében elsősorban a következő tényezőket kellett definiálni:

- a robot haladási sebessége,
- a terep jellemzői,
- a kiválasztott járásalgoritmus.

A szimulációt olyan haladási sebesség mellett érdemes futtatni, amely sebességet egyrészt gyakran használjuk, másrészt megfelelően magas ahhoz, hogy az extrém igénybevételre jellemző fizikai jelenségek is megnyilvánuljanak. Ezért az a legmagasabb sebesség lett kiválasztva, melynél a robot még hiba (deformáció) nélkül tudja követni a talp pályáját.

A terep jellemzői közé a következők tartoznak:

- a talaj csúszása (talaj és a talp közötti súrlódás),
- a talaj meredeksége (a vízszintes és a talaj síkja által bezárt szög),
- a talajon található akadályok jellege és mérete.

OPTIMALIZÁLÁS

Az optimalizálás célja (fitness-függvény) fejezet meghatározott egy részletes fitness-függvényt, mely minden ismert és releváns optimalizálási szempontot figyelembe vesz. Azonban, ha az optimalizálás minden céllal egyszerre foglalkozna, egy olyan összetett rendszer jönne létre, amelynél nehéz lenne áttekinteni a paraméterek, illetve a célok közötti összefüggéseket. Emiatt érdemes szelektálni, illetve csoportokra bontani a célokat. Az itt bemutatott optimalizálás során a magasabb prioritású célokat valósítottuk meg. Ezek a célok a következők:

- Az energiafogyasztás minimalizálása, ami egy egyértelműen fontos és általános cél.
- A sebesség és a mozgékonyág elérése, ami ebben az esetben egy előre meghatározott feltétel, melyet a robotnak feltétlenül teljesítenie kell a megfelelő működéshez.
- A test nem kívánt mozgásának minimalizálása szintén fontos, mivel a robot szenzorokkal és kamerákkal lesz felszerelve. A szenzorok jellege alapján a rotációs mozgásokat vesszük figyelembe.

Az optimalizálást a PSO (Particle Swarm Optimization) segítségével végeztük. Az optimalizálás során a generációk száma és a populáció mérete is 100–100 volt. Az optimalizálás eredményei (összehasonlítva az alapértelmezett paraméterekkel) az 5.1. táblázatban láthatóak:

1. táblázat

Fitnesz-függvény	Eredeti szerkezet	Optimalizált szerkezet	A hiba csökkenése
Energia	2881 J/m	2090 J/m	27.46 %
Rotációs mozgás	0.3845 degree	0.0401 degree	89.57 %
Dexterity	successful	successful	0

A két szerkezet közötti az eltérés talán különösebben nem szembetűnő, a következő jellegzetességeket azonban ki lehet emelni. A robot teste közelebb került a talajhoz, ami által a gravitációs középpont is lejjebb került. A femur-szegmensek hossza csökkent, a tibia-szegmensek hossza megnövekedett. Ennek következtében a lábak állása jobban hasonlít a rovarok esetében jellegzetes M-alakra (M-shape). A stabilitásra hathat még, hogy a középső lábak csatlakoztatása és a pályája távolabb került a testtől, és hogy a rugók rugóállandója a megengedett maximumhoz közelít.

Ahogy a táblázatban is látható, az Energia-fitnesz-függvény értéke 27,46%, a Rotációsmozgás-fitnesz-függvény értéke pedig 89.57% százalékkal csökkent.

266.4 kJ energiát tároló akkumulátorral az optimalizálás előtti 2881 J/m energiafogyasztással 92, az optimalizálás utáni 2090 J/m értékkel pedig 127 méter távolságot tud egy töltéssel megtenni a robot. Az eredeti érték közel tíz százaléka csökkent rotációs mozgás pedig nagyon nagy jelentőséggel bír a roboton elhelyezett szenzorok által szolgáltatott adatok mérésében.

