

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

Polimertechnika Tanszék



Anyagtudomány és Technológia Tanszék



Áramlástan Tanszék



Műszaki Mechanikai Tanszék



Műegyetem 1782



Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék



MOGI



Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék



BME GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
1871

ÉP
JET



Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék



Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék



Gyártástudomány és -technológia Tanszék



Gép- és Terméktervezés Tanszék

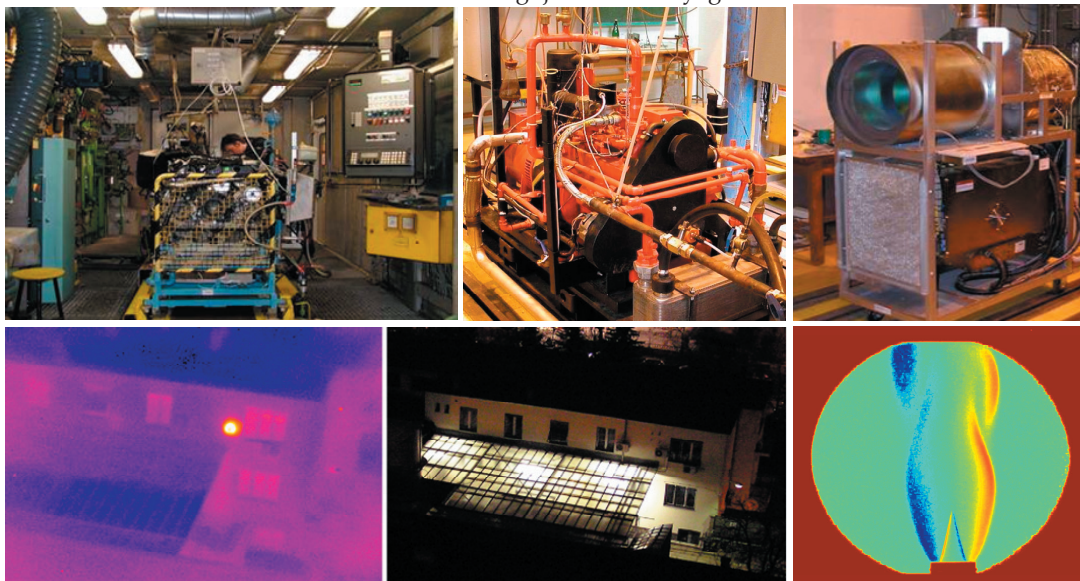
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
KUTATÓEGYETEMI KÜLÖNSZÁM

2010/11.

56 oldal
LXI. évfolyam

BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Hőerőgépek (belső égésű motorok, gőz- és gázturbinák) • Kazánok és tüzelőberendezések
Tüzeléstechnika • Fosszilis és megújuló tüzelőanyagok • Emisszió mérés



Fenntartható energetika • Megújuló energiaforrások hasznosítása • Termodinamikai folyamatok rendszer és berendezés szintű szimulációja • Hőfizikai anyagjellemzők mérése

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék



1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-9. D. ép. 208.
Telefon: 463-2613. Fax: 463-1762
<http://www.energia.bme.hu>



MŰEGYETEM 1782

Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás Technika Tanszék



Steril élelmiszeripari
technológiák



Környezetvédelmi
berendezések

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám
elnök

Dr. Kálmán András
főszerkesztő

Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczy István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bercsey Tibor
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Dudás Illés
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Dr. Jármay Károly
Kármán Antal
Dr. Kulcsár Béla
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálincás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Rittinger János
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Timár Imre
Dr. Tóth László
Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Szerkesztésben közreműködött:
Dr. Szalay Tibor, Dr. Vad János

KÖSZÖNTŐ

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) 2010-ben elnyerte a kutatóegyetem címet, és kutatási munkája továbbfejlesztése érdekében támogatást kapott az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 program keretében a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című projekt – a továbbiakban: Projekt –, megvalósítására.

A Projekt vállalásai között szerepel öt kiemelt kutatási terület gondozása, integrálása a BME távlati kutatási stratégiájába, elősegítve a karok közötti együttműködést, figyelembe véve az ipar részéről jelentkező kutatás-fejlesztési és innovációs igényeket. A projektet gondozó műegyetemi karok a következő, karokon átívelő kiemelt kutatási területeket határozták meg: Fenntartható energetika (FE); Járműtechnika, közlekedés és logisztika (JKL); Biotechnológia, egészség- és környezetvédelem (BEK); Nanofizika, nanotechnológia és anyagtudomány (NNA); Intelligens környezetek és e-technológiák (IKT). A Gépészmérnöki Kar mind az öt kiemelt területen aktív, a Fenntartható energetika területnek pedig vezetője, gesztora.

Ennek a GÉP különszámnak az a célja, hogy ízelítőt adjon a Gépészmérnöki Kar sokrétű, a Projekttel összhangban álló, gyakorlati orientációjú kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenységéből, kiragadott példákon keresztül. Nyolc kari tanszék oktatói és kutatói dolgozták ki a különszámba foglalt közleményeket. Megfigyelhető, hogy a kiemelt kutatási területek nemcsak a karok közötti alkotó együttműködés terepei, de a Gépészmérnöki Karon belüli sokszínűséget is tükrözik.

A különszám a következő tanszékek munkáját öleli fel a zárójelben megjelölt területeken: Anyagtudomány és Technológia Tanszék (NNA), Áramlástan Tanszék (FE, JKL), Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék (FE), Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék (BEK), Gép- és Terméktervezés Tanszék (JKL), Gyártástudomány és -technológia Tanszék (NNA), Mechanika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék (NNA), Műszaki Mechanikai Tanszék (JKL, NNA).

Örömmre szolgál, hogy a GÉP folyóirat BME Gépészmérnöki Kar munkáiból összeállított 2010-es kutatóegyetemi különszámát a Kedves Olvasó figyelmébe ajánlhatom.



Dr. Stépan Gábor
a BME Gépészmérnöki Kar dékánja

A szerkesztésért felelős: dr. Kálmán András. A szerkesztőség címe: 3529 Miskolc, Budai József u. 46.

Telefon/fax: (46) 325-504, 20/9358-812 • e-mail: kaests@t-online.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: ficze.gte@mtesz.hu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP Internetcíme: <http://members.chello.hu/cokom>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: DR. IGAZ JENŐ ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530 E-mail: gazdasz@chello.hu Felelős vezető: Vesza József

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: hirlapelofizetes@posta.hu, faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1000 Ft + áfa. Dupla szám ára: 2000 Ft + áfa.

Előfizetés negyedévre: 3000 Ft + áfa, fél évre: 6000 Ft + áfa, egy évre: 12 000 Ft + áfa.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,

H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

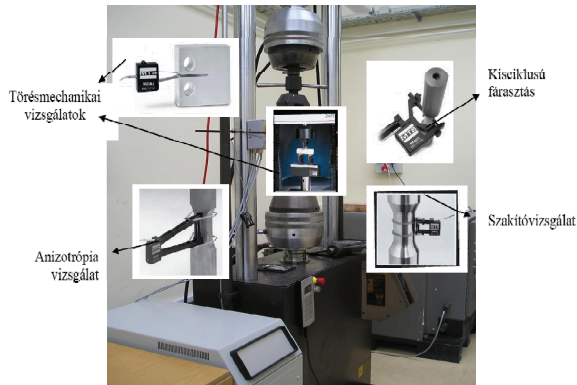
INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

TARTALOM

1. Orbulov, I.:
Szintaktikus fémhabok mikroszerkezeti vizsgálata4
A szintaktikus fémhabok olyan kompozitok, amelyek fém mátrixában a habokra jellemző porozitást kerámia mikrogömbhéjakkal hozzák létre. Szerző vizsgálatai szerint Al mátrix esetén, a fém-kerámia fázishatáron káros kémiai reakciók játszódnak le. A reakciók AlSi12 mátrixszal kiküszöbölhetők.
2. Jesch, D., Kristóf, G., Vad, J.:
Oldalsatornás üzemanyag-szivattyúban kialakuló áramlások tanulmányozá-sára szolgáló tesztberendezés kialakítása és beüzemelése9
A cikk bemutatja egy személygépkocsikban használatos oldalsatornás üzemanyag-szivattyú felnagyított, optikailag átjárható modelljének felépítését, és a tesztberendezés néhány alapvető jellegzetességét. A tesztberendezéssel további áramlási jelenségek (pl. kavitáció) tanulmányozására nyílik lehetőség.
3. Vad, J.:
Fokozott fajlagos teljesítményű, energetikailag kedvező üzemű axiális átöm-lésű füstgázelszívó ventilátorok tervezése és mérése15
A cikk bemutatja az axiális átömlésű ventilátorok „szabályozott örvény” tervezési módszerének fő vonásait, gyakorlati előnyeit. A tervezési módszer alkalmazását ipari utóterelő ventilátor-prototípus tervezésének példáján mutatja be.
4. Czél, B.; Gróf, Gy.:
Érzékenységi vizsgálatok egy numerikus szemléletű anyagjellemző mérési módszer kiértékeléséhez.....19
A numerikus szemléletű módszerek alkalmazása esetén a hővezetési feladat megoldására szinte semmilyen korlát nincs, viszont a kiértékelés jóval bonyolultabbá válik. Érzékenységi számításokkal megvizsgálható, hogy a kijelölt ismeretlen paraméterek becslése elvégezhető-e az inverz feladat megoldásával.
5. Bothné Fehér, K.; Örvös, M.:
Anyagátadási tulajdonságok vizsgálata kén-dioxid leválasztásnál24
Szerzők kísérleti mérések alapján gáz- és folyadékoldali anyagátbocsátási jellemzőket (HOG, HOL, KGa, KLa) határoztak meg, melyek lehetővé teszik a kéndioxid emisszió csökkentésére szolgáló készülékek méretezését. Az eredményeket az irodalomban található más típusú töltetek anyagátadási jellemzőivel hasonlították össze.
6. Szűcs, J.; Váradi, K.; Zobory, I.; Szabó, A.:
Féktuskó-kerékabroncs kapcsolat kopási viselkedése28
A BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszékén telepített vizsgáló próbapad felhasználásával kísérletileg vizsgálták a féktuskó-kerékabroncs kapcsolat kopási viselkedését. A laboratóriumi mérésekkel párhuzamosan a kopás szimuláció módszerének fejlesztése érdekében végelelemes számításokat végeztek.
7. Zwierczyk, P.;Váradi, K.:
Kerékabroncs-féktuskó kapcsolat súrlódási állapotának végelelemes vizsgálata.....33
Szerzők azt az esetet modellezik, amikor a vasúti fékrendszer meghibásodása következtében a fékhatás a szerelvény elindulása után is fennáll. A kidolgozott végelelemes modell alkalmas a féktuskó elmozdulásának és a feszültségeloszlásának meghatározására a kezdeti leragadt szakaszban és a csúszásba való átmenetkor.
8. Samu, K.; Góz, A.:
Egy korszerű gyártástechnológia: a lézeres mikromegmunkálás37
A gépészmérnöki területen a lézersugár sokféle célra használható: vágásra, gravírozásra, hőkezelésre, hegesztésre és nanotechnológiai eljárásokra. A lézeres gyártástechnológia előnyei közé tartozik a nagy pontosság, megbízhatóság, biztonság, kontrollálhatóság, gyorsaság és automatizáltság.
9. Takács, D.; Stépán, G.:
Vontatmányok oldalirányú stabilitásvesztése40
Szerzők a vontatott szerelvények oldalirányú stabilitásának vizsgálatához egy alacsony szabadságfokú mechanikai modellt dolgoztak ki. A modellben szereplő kevés paraméter ellenére műszaki szempontból hasznosítható, a gyakorlatban is könnyen ellenőrizhető stabilitási feltételt vezettek le.
10. Szekrényes, A.:
Az MMB törési teszt alkalmazása hosszú repedések esetén45
Szerző a vegyes módusú hajlító (MMB) teszt alkalmazását mutatja be, amelyet kompozit anyagok rétegfközi szilárdságának vizsgálatára 1988-ban fejlesztettek ki. A berendezés kisebb módosítással hosszú repedéseket tartalmazó kompozitokhoz is használható.
11. Szalay, T.; Székely, F.:
Üveg mikrolencsék nanométer pontosságú megmunkálása.....49
Az EU által támogatott Production4 μ nevű integrált kutatási projekt nagy pontosságú optikai alkatrészek tömegtermelésére alkalmas technológiák fejlesztésével foglalkozik. A cikk példákkal illusztráltan az üvegből készült nagy pontosságú fröccsöntött mikrolencsék megmunkálásának jellegzetességeit ismerteti.

Oktatás – Kutatás – Fejlesztés – Innováció



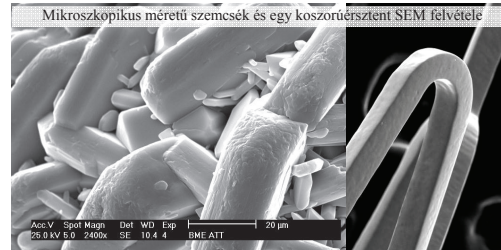
Törésmechanikai vizsgálatok

Anizotrópia vizsgálat

Kisebiklusú fárasztás

Szakítóvizsgálat

Mechanikai anyagvizsgáló laboratórium
 Statikus és ciklikus mechanikai vizsgálatok, törésmechanikai vizsgálatok, károsodás analízis



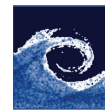
Metallográfiai laboratórium

Optikai mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia (SEM), elektronsugaras mikroanalízis, visszaszórtelektron-diffrakció

Alakítástechnikai laboratórium, Hegesztéstechnológiai laboratórium, Kompozit anyagok laboratóriuma, Bioanyagok laboratóriuma, Mágneses anyagok laboratóriuma

Látogassa meg honlapunkat: www.att.bme.hu

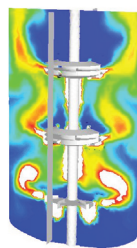
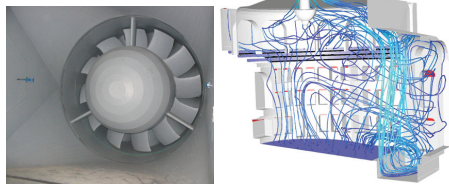
BME Áramlástan Tanszék



- Elkötelezettség a színvonalas áramlástan oktatás, a gyakorlat-orientált mérnökképzés iránt
- Áramlástan alapkutatás és alkalmazott K+F tevékenység, a nemzetközi irányvonalakhoz és az ipari igényekhez illeszkedően
- A hazai és nemzetközi ipar által elismert szakértői tevékenység



- Atmoszférikus áramlási folyamatok
- Szennyezőanyag-terjedés, városklíma
- Épület-aerodinamika
- Szélnek kitett testekre ható erők
- Járműáramlástan



- Áramlástechnikai gépek, berendezések, rendszerek tervezése, üzemvitelének javítása
- Áramlás belső terekben
- Ipari technológiai folyamatok hatékonyságnövelése
- Hibadiagnosztika
- Járműipari K+F
- Akusztikai, rezgéstani vizsgálatok

Méréstechnika – numerikus áramlástan – numerikus aero-akusztika

www.ara.bme.hu

SZINTAKTIKUS FÉM HABOK MIKROSZERKEZETI VIZSGÁLATA MICROSTRUCTURAL INVESTIGATION OF METAL MATRIX SYNTACTIC FOAMS

Orbulov Imre Norbert*

ABSTRACT

Three types of hollow microspheres with different average diameters (100–150 μm) and two aluminium alloys as matrix material were used to produce metal matrix syntactic foams (MMSFs) by pressure infiltration. The phases, which formed at matrix-filler interface, were investigated by line scan energy dispersive spectrometry (EDS). The investigation showed that in syntactic foams, with the Al99.5 matrix, an exchange reaction took place between the matrix and the amorphous components of ceramic hollow microspheres and a relatively thick interface layer was formed. The reaction degraded the walls of the microspheres. In the case of the AlSi12 matrix the reaction was suppressed by the considerable Si content of the matrix. Therefore, the wall of the hollow microspheres remained unharmed and no real interface layer was found.

BEVEZETÉS

A szintaktikus habok a részecskeerősítésű kompozitok speciális osztálya, amelyek a '60-as években jelentek meg először [1]. Első darabjaik polimer mátrixanyag és üveg mikrogömbhéjak egybeépítésével jöttek létre, tulajdonságaikat számos publikációban tanulmányozták [2-6]. Napjainkban egyre inkább elterjedőben vannak fémmátrixú társaik, az úgynevezett szintaktikus fémhabok is. A szintaktikus fémhabokban a habanyagokra jellemző porozitást kerámia mikrogömbhéjak beépítésével hozzák létre. A kerámia mikrogömbhéjak anyaga oxidokból, nagyrészt SiO_2 -ből és Al_2O_3 -ból, kisebb részt egyéb oxidokból (K_2O , Fe_2O_3 és MgO) állnak. A szintaktikus fémhabok esetében túlnyomórészt alumínium ötvözeteket alkalmaznak mátrixanyagként. Kis sűrűségük miatt a szintaktikus fémhabok perspektívikus anyagok burkolóanyagként, bútorok lapjaiként, gépjárműipari és elektromechanikai alkalmazásokban. További előnyös tulajdonságaik a nagy fajlagos nyomószilárdság és termikus stabilitás. A fenti tulajdonságaik alapján jól használhatók energiaelnyelőkként, hangcsillapítókként, vagy gépjárművek burkolóanyagaként.

A szintaktikus fémhabok gyártása és tulajdonságai széles körben tanulmányozottak. Leggyakrabban nyomásos infiltrálással, vagy keveréssel eljárásal állítják elő őket. Ramachandra és Radhakrishna [7, 8] részletesen leírták a keveréssel eljárás technikáját és az előállított fémhabok keménységét és kopási tulajdonságait vizsgálták. A keveréssel eljárás nagyon egyszerű, de csak körülményesen alkalmazható nagy mikrogömbhéj térkitöltés esetén (a keverék viszkozitása megnő és a mikrogömbhéjak tömni kezdenek). Nagy mikrogömbhéj térkitöltésű szintaktikus fémhabok gyártására a nyomásos infiltrálás a legalkalmasabb. Rohatgi és társai [9, 10] ezzel a módszerrel állították elő anyagaikat, amelyeknek aztán a nyomóvizsgálati jellemzőit és viselkedését vizsgálták. Más publikációkban lágyított és hőkezelt állapotú, szintén nyomásos infiltrálással előállított szintaktikus fémhabok tönkremeneteli mechanizmusait vizsgálták [11]. A szintaktikus fémhabok hőkezelésével kapcsolatban ugyancsak vizsgálták a SiC részecskék hozzáadásának hatását is [12]. Mint minden habanyag esetében, így a szintaktikus fémhabok nyomószilárdsága is különös fontossággal bír, mivel a nyomás a fémhabok fő igénybevételi formája [13-16]. Palmer és társai [17] különböző alumínium mátrixanyagokat alkalmazott és az előállított anyagokat zömítő, szakító és hajlítóvizsgálatnak vetették alá.

A sikeres nyomásos infiltráláshoz biztosítani kell egy küszöbnyomás, amely ahhoz szükséges, hogy az olvadt mátrixanyag a mikrogömbhéjak közé hatolhasson. Ezt a küszöbnyomást több kutató is megkísérelte elméleti úton meghatározni. Bárczy és Kaptay [18] elméleti modellt fejlesztett ki, amely figyelembe veszi a nedvesítési szöveget, a felületi feszültséget és a gravitációs, kapillaris és külső erők (infiltráló nyomás) egyensúlyán alapszik. Trumble [19] a mikrogömbhéjak alakján és térkitöltésén alapuló, úgynevezett hidraulikai sugár bevezetésével és a Young-Laplace egyenlet segítségével adott közelítést problémára és nagyon hasonló megoldást adott Rohatgi is [10].

A gyártás során az olvadt alumínium ötvözet mátrixanyag és a mikrogömbhéjak anyaga között kémiai reakció jöhet létre. A reakció hatására képződő átmeneti réteg fontos szerepet tölt be a terhelésátadásban a mátrixanyag és a mikrogömbhéjak között. A terhelésátadás mechanizmusát tanulmányozták is egy publikációban [20]. Mivel az átmeneti réteg legalább olyan fontos, mint a kompozit alkotóelemeinek

* egyetemi adjunktus, BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék

tulajdonságai, vizsgálatuk kiemelt fontosságú. Erre a célra nagyon jól alkalmazhatók a vonalmenti energiadisziperzív röntgenspektrometriai (EDS) vizsgálatok. Jelen cikk célja a szintaktikus fémhabokban kialakuló átmeneti rétegek vizsgálata.

VIZSGÁLT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A vizsgált fémhabokat nyomásos infiltrálással állítottuk elő. Az alkalmazott mátrixanyagok Al99,5 és AlSi12 ötvözetek voltak. Erősítőanyagként Envirospheres Ltd. [21] gyártmányú kerámia mikrogömbhéjakat építettünk be mintegy 64 t%-ban. Három fajta, SL150, SLG és SL300 típusú mikrogömbhéjat alkalmaztunk (30-35 t% Al_2O_3 , 45-50 t% amorf SiO_2 , 19 t% mullit, 1 t% kvarc). Ezek tulajdonságait az 1. táblázatban foglaltuk össze [6, 21].

1. táblázat A mikrogömbhéjak tulajdonságai

Típus	Átlagos átmérő (μm)	Átmérő tartomány (μm)	Fajlagos felület (μm^{-1})
SL150	100	56-183	0,060
SLG	130	85-233	0,046
SL300	150	101-332	0,040

Összességében hat szintaktikus fémhab tömböt állítottunk elő $36 \times 55 \times 170 \text{ mm}^3$ méretben. Az infiltrálás az Al99,5 mátrixanyag esetében $710 \text{ }^\circ\text{C}$ -on 430 kPa nyomással, míg AlSi12 mátrixanyag esetén $620 \text{ }^\circ\text{C}$ -on 350 kPa nyomással történt ($\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ -os túlhevítés). Az előállított fémhabok sűrűségi és porozitási mérőszámai alapvetően befolyásolják a fémhabok tulajdonságait, ezeket lásd korábbi cikkünkben [22].

A kész fémhabokból polírozott mikrosziszolátokat készítettünk, amelyeken vonalmenti EDS méréseket végeztünk egy Phillips XL-30 elektronmikroszkóphoz csatolt EDAX Genesis műszerrel. A vonalmenti vizsgálatokat a mikrogömbhéjak falára merőlegesen hajtottuk végre, így átfogó képhez jutottunk a mátrixanyag és a mikrogömbhéj közötti átmeneti rétegben jelenlévő kémiai anyagok eloszlásáról. A vizsgálat gerjesztőfeszültsége 15 kV volt, egy adott vonalszakaszon 30 mérési pontot rögzítettünk.

EREDMÉNYEK

Az eredmények ismertetését egy korábbi munkánkban [23] végzett röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményeinek összefoglalásával kezdem (2. és 3. táblázat), mivel ezek ismerete elengedhetetlen a vonal menti EDS vizsgálatok eredményeinek értelmezéséhez.

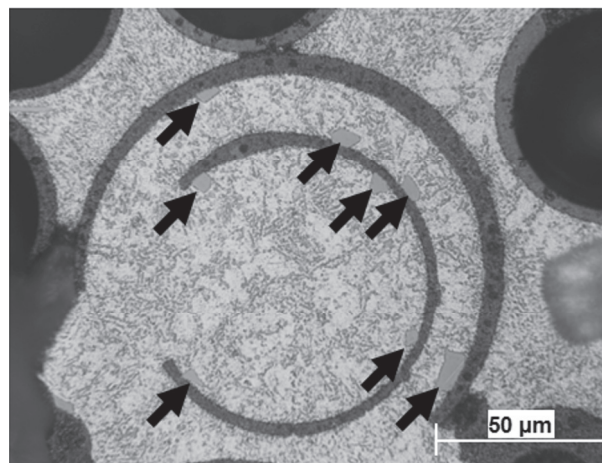
2. táblázat Röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményei (Al99,5)

Jel	Al	Si	Mullit	γAl_2O_3	αAl_2O_3	Amorf
AlSL150	67	8	11	11	3	0
AlSLG	63	6	14	11	4	0
AlSL300	78	0	11	0	0	11

3. táblázat Röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményei (AlSi12)

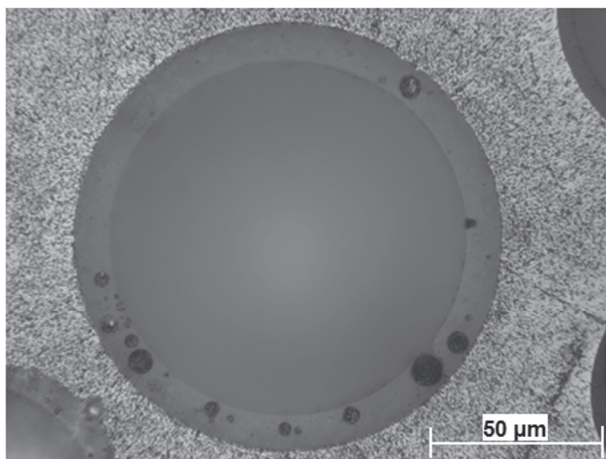
Jel	Al	Si	Mullit	Kvarc	amorf
AlSL150	72	7	13	0	8
AlSLG	72	7	13	0	8
AlSL300	72	7	12	0,5-1,0	8

A mikrogömbhéjak és a mátrixanyag közötti cserereakció ($4Al_{(liq)} + 3SiO_{2(sol)} \rightarrow 2Al_2O_{3(sol)} + 3Si_{(sol)}$, $\Delta G = -310 \dots -313 \text{ kJmol}^{-1}$, $700-850 \text{ }^\circ\text{C}$ között, [24,25]). során az olvadék redukálja a mikrogömbhéj SiO_2 tartalmát és Al_2O_3 -t, valamint elemi Si-t képez. Ez egy diffúzió vezérelte reakció, amely erősen függ az infiltrálási hőmérséklettől és az expozíciós időtől (az az idő, amíg a mátrix megszilárdul). A reakció hajtóereje a mikrogömbhéjak anyagának és a mátrix anyagának eltérő Si tartalma. Az Al99,5 mátrixanyag esetén Al_2O_3 (nagyobb részt γ , kisebb részt α módosulat) és elemi Si vált ki a mikrogömbhéjak környezetében (1. ábra). Az $SiO_2 \rightarrow Al_2O_3$ transzformáció alapvetően előnyösnek lenne mondható (az Al_2O_3 jobb tulajdonságokkal rendelkezik és kémiai is stabilabb), de mivel a reakció diffúziósan megy végbe a mikrogömbhéj fala nagymértékben sérül, így a reakció összességében káros.



1. ábra Al99,5 mátrixú hab sérült mikrogömbhéja, a nyílak az elemi Si kiválásokat mutatják

Az AlSi12 mátrix esetében a mátrixanyag eredendően is viszonylag nagy Si tartalma gátolta a diffúziós reakció létrejöttét, így a mikrogömbhéjak is sértetlenek maradtak (2. ábra).

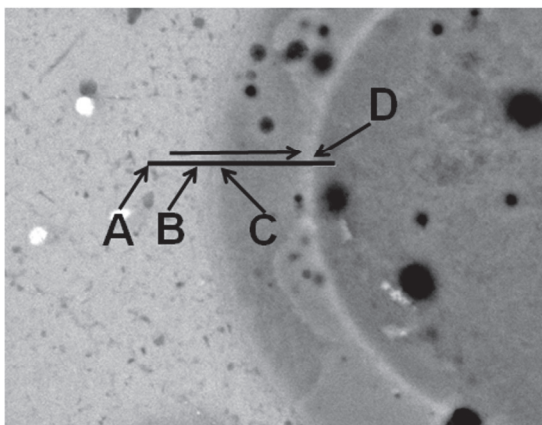


2. ábra AlSi12 mátrixú hab sértetlen mikrogömbhéja

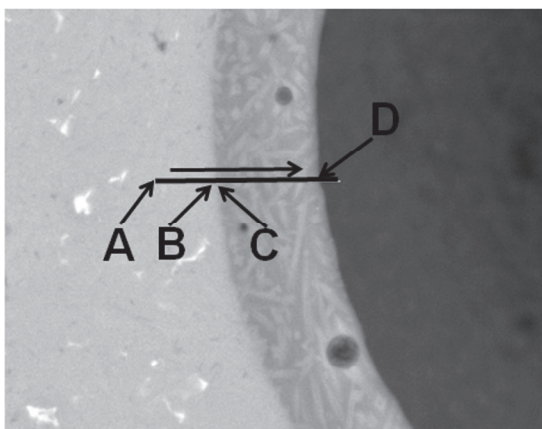
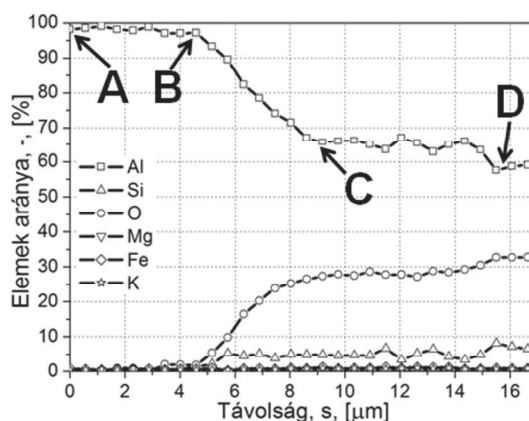
A fentieket figyelembe véve érdekes lehetőség lenne az alumínium mátrixanyag ötvözése olyan módon, hogy az ötvözőt a mikrogömbhéjak felületén, egy felületi rétegben vinnénk be. Ez két előnnyel járna. Egyrészt az ötvöző anyag homogén módon eljutna a kompozit minden részébe, másrészt pedig az ötvöző oldódása időszakosan védelmet nyújtana a mikrogömbhéjak SiO₂ tartalmának az olvadt alumínium redukáló hatása ellen. A módszer fejlesztése folyamatban van.

Az EDS vizsgálatokat gondosan polírozott mintákon hajtottuk végre. A mérési eredmények megmutatják a vizsgált vonal mentén a kémiai elemek egymáshoz képesti százalékos arányát. Ez nagyon jó lehetőséget kínál arra, hogy alkalmas vizsgálati vonal felvételével (a mátrixanyagból a mikrogömbhéj belseje felé haladva, a falra merőlegesen, sugár irányban) vizsgáljuk az átmeneti réteg vastagságát és összetételét. A mérési eredményeket a mérési vonal rögzítésével és a mért pontok elemösszetételének diagramban történő rögzítésével ábrázoltam (3. és 4. ábra).

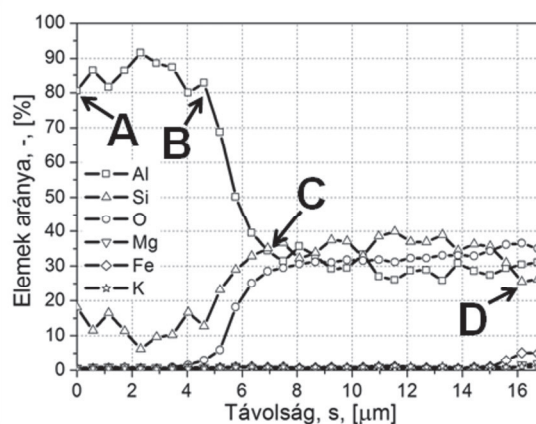
A 3. ábrán látható, hogy az Al99,5 mátrixanyagba épített mikrogömbhéj fala nem határozott, a BSE képen elmosódott. Ez a mikrogömbhéj falának sérülésére utal. A diffúziós reakció egy viszonylag vastag átmeneti réteget hozott létre (az ábrán jelölt B és C pontok között). Az átmeneti réteg vastagságát a rögzített Al diagram deriváltjának lényeges változásai (viszonylag éles meredekség változás) között mértük le és ~6 μm-nek adódott. Az átmeneti rétegben az Al mennyisége fokozatosan csökkent, míg az Si mennyisége fokozatosan nőtt. A C pont után az Al, Si és O mennyisége a mikrogömbhéj falának aktuális összetétele alapján állandó értékre állt be.



3. ábra Al99,5 mátrixú, SL150 típusú mikrogömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhab vonalmenti EDS vizsgálatának eredménye



4. ábra AlSi12 mátrixú, SL150 típusú mikrogömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhab vonalmenti EDS vizsgálatának eredménye



A D jelű ponttól a mérések megbízhatatlanná váltak, mert az elektronnaláb elérte a mikrogömbhéj belső, görbült felületét és szóródott.

Az AlSi12 mátrixanyag esetében (4. ábra) az A és a B pontok között az Al és az Si felváltva, ugrásszerűen változott a mátrixanyagban kivált primer Si részek jelenlétének köszönhetően. A mikrogömbhéj fala a BSE kép szerint éles és jól elhatárolható, azaz sértetlen. A cserereakciót a mátrix eredendően nagy Si tartalma gátolta, a SiO₂ redukciója nem ment végbe. A mérés során rögzített diagram szerint az átmenet a mátrixanyag és a mikrogömbhéjak anyagának összetétele között ugrásszerű volt, csak nagyon vékony átmeneti réteg alakult ki a B és C pontok meglehetősen közel, kevesebb, mint 3 µm távolságban helyezkedtek el egymástól. A mikrogömbhéjak falában (a C és a D pontok között) túszerű, világosabb részek figyelhetők meg. Az EDS vizsgálat szerint ezek a részek Al-ban dúsabbak, mint a környező, szürkébb területek. Ez arra utal, hogy a mikrogömbhéj eredendően amorf SiO₂-ből és mullitból álló anyagában Al₂O₃ részek helyezkednek el.

ÖSSZEFOGLALÁS

Sikeresen állítottunk elő alumínium ötvözet mátrixú, üreges kerámia mikrogömbhéjakkal töltött kompozitokat, vagyis szintaktikus fémhabokat. A kémiai összetétel nyomon követésével vizsgáltuk a mikrogömbhéjak és a mátrixanyag között létrejövő kémiai reakciókat és a kialakuló átmeneti réteget. Az elvégzett EDS vizsgálatok eredményeiből alább felsorolt következtetések vonhatók le.

Az Al99,5 mátrixú szintaktikus fémhabok esetében egy cserereakció következtében intenzív α- és γAl₂O₃ képződés volt megfigyelhető. A cserereakció során az olvadt mátrixanyag redukálta a mikrogömbhéjak falának SiO₂ tartalmát. A reakció diffúziósan ment végbe, a hajtóerő a mikrogömbhéjak anyagának és a mátrixanyagának az eltérő Si tartalma. A reakció folytán a mikrogömbhéjak fala sérült, a mátrixanyag és a mikrogömbhéjak közötti határvonal elmosódott, a mechanikai tulajdonságok várhatóan rosszabbak [26].

Az AlSi12 mátrixanyag esetében a cserereakció létrejöttét gátolta a mátrixanyag eredendően nagy Si tartalma. A mikrogömbhéjak és a mátrixanyag között nem alakult ki érzékelhető vastagságú átmeneti réteg, a mikrogömbhéj falának határvonala a mikroszkópi képeken jól elkülöníthető a mátrixanyagtól. A mikrogömbhéjak sértetlenek maradtak. Ez azt jelenti, hogy ha az Si tartalom közel van az oldhatósági határhoz, akkor a mikrogömbhéjak strukturális sértetlensége megmarad. Ezért az AlSi12 mátrixú szintaktikus fémhabok jobb választásnak bizonyulnak szerkezeti anyagként történő felhasználásra (a mechanikai tulajdonságaik várhatóan jobbák az Al99,5 mátrixú társaikénál [26]).

A kerámia mikrogömbhéjak alkalmazhatók ötvöző hordozókként. Akár úgy, hogy falanyagukban

hordozzák az ötvöző anyagot, akár úgy, hogy felületükön, felületi réteggént (bevonatként) hordozzák az ötvözőt. Az ilyen (akár lokális) ötvözéssel a szintaktikus fémhabok tulajdonságai kedvezően befolyásolhatók.

SUMMARY

Ceramic hollow microsphere filled aluminium matrix metallic foams were produced, and the possible reactions which can be taken place in the interfaces, were investigated by determining the phase and elemental composition of the metal matrix syntactic foams (MMSFs). From the results of the EDS measurements described above, the following statements can be made.

In the Al99.5 matrix syntactic foams intensive α- and γAl₂O₃ formation occurred due to an exchange reaction. These alumina phases formed in the reductive reaction of the amorphous SiO₂ by the molten aluminium. The driving force of this diffusion controlled reaction was the Si concentration gradient between the microspheres and the matrix. The interface was damaged and cannot be so easily separated. The reaction between the microsphere and the matrix degraded the hollow microspheres' wall.

As for the AlSi12 matrix syntactic foams, the exchange reaction were suppressed by the considerable amount of the Si in the matrix alloy: there were no interface layers between the hollow microspheres and the matrix. The wall of the hollow microspheres remained unharmed. This means, that when Si content of the matrix is near to the solubility limit, the ceramic hollow microspheres can preserve their structural integrity. Therefore, the AlSi12 matrix syntactic foams seem to be a much better choice for structural applications.

The ceramic microspheres can be used as a source of alloying elements in MMSF systems. The appropriate choice and concentration of alloying element in the wall material or in a surface coating of the microspheres can enhance the properties of the MMSFs.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. Köszönet Blücher József professzornak a támogatásáért. A Fémes Kompozitok Labor a GVOP 3.2.1-2004-04-0145/3.0. és az NKTH-OTKA PD 83687 szerződések támogatták. A kutatási eredmények és a cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. Külön köszönet Tóth Róbertnek és a C. H. Erbslöh Hungaria Speciality and Industrial Minerals Kft-nek a mikrogömbhéjak biztosításáért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] KALLAS DH, CHATTEN CK (1969) *Ocean Eng* 4:421
- [2] GUPTA N, KISHORE, WOLDESENBET E, SANKARAN S (2001) *J Mater Sci* 36:4485. doi:10.1023/A:1017986820603
- [3] GUPTA N, WOLDESENBET E, KISHORE (2002) *J Mater Sci* 37:3199. doi:10.1023/A:1016166529841
- [4] WOLDESENBET E, GUPTA N, JADHAV A (2005) *J Mater Sci* 40:4009. doi:10.1007/s10853-005-1910-2
- [5] FINE T, SAUTEREAU H, SAUVAN-MOYNOT V (2003) *J Mater Sci* 38:2709. doi:10.1023/A:1024403123013
- [6] ISLAM MM, KIM HS (2007) *J MATER SCI* 42:6123. doi:10.1007/s10853-006-1091-7
- [7] RAMACHANDRA M, RADHAKRISHNA K (2005) *J MATER SCI* 40:5989. doi:10.1007/s10853-005-1303-6
- [8] RAMACHANDRA M, RADHAKRISHNA K (2007) *Wear* 262:1450
- [9] ROHATGI PK, GUO RQ, IKSAN H, BORCHELT EJ, ASTHANA R (1998) *Mater sci technol* a 244:22
- [10] ROHATGI PK, KIM JK, GUPTA N, ALARAJ S, DAOUD A (2006) *Compos Part A* 37:2006
- [11] BALCH DK, O'DWYER JG, DAVIS GR, CADY CM, GRAY GTIII, DUNAND DC (2005) *Mater Sci Eng A* 391:408
- [12] RAJPUT V, MONDAL DP, DAS S, RAMAKRISHNAN N, JHA AK (2007) *J Mater Sci* 42:7408. doi:10.1007/s10853-007-1837-x
- [13] DOU ZY, JIANG LT, WU GH, ZHANG Q, XIU ZY, CHEN GQ (2007) *Scripta Mater* 57:945
- [14] WU GH, DOU ZY, SUN DL, JIANG LT, DING BS, HE BF (2007) *Scripta Mater* 56:221
- [15] KISER M, HE MY, ZOK FW (1999) *Acta Mater* 47:2685
- [16] ZHANG LP, ZHAO YY (2007) *J Compos Mater* 41:2105
- [17] PALMER RA, GAO K, DOAN TM, GREEN L, CAVALLARO G (2007) *Mater Sci Eng A* 464:85
- [18] BÁRCZY T, KAPTAY GY (2005) *Mater Sci Forum* 473–474:297
- [19] TRUMBLE PK (1998) *Acta Mater* 46:2363
- [20] Balch DK, Dunand DC (2006) *Acta Mater* 54:1501
- [21] ENVIROSPHERES PTY. LTD. <http://envirospheres.com>
- [22] ORBULOV IN, DOBRANSZKY J (2008) *Period Polytech Mech Eng* 52:1
- [23] ORBULOV IN, DOBRÁNSZKY J, NÉMETH Á (2009) *J Mater Sci* 44:4013
- [24] WEAST RC (1990) *CRC handbook of chemistry and physics*, 70th edn. CRC Press, Boca Raton, FL, p D-33
- [25] SAMSONOV GV (1973) *The oxide handbook*. IFI/Plenum Data Corporation, New York, p 122
- [26] ORBULOV IN (2009) *Szintaktikus fémhabok*, PhD disszertáció

OLDALCSATORNÁS ÜZEMANYAGSZIVATTYÚBAN KIALAKULÓ ÁRAMLÁSOK TANULMÁNYOZÁSÁRA SZOLGÁLÓ TESZTBERENDEZÉS KIALAKÍTÁSA ÉS BEÜZEMELÉSE

EXECUTION AND APPLICATION OF A SIDE CHANNEL PUMP TEST FACILITY

Jesch, D. *, Kristóf, G**, Vad, J.***

ABSTRACT

This article provides documentation on the execution of a side channel fuel model pump facility, its installation, and the first measurement campaign describing the characteristic curve (total pressure rise vs. volume flow rate) and the overall efficiency (hydraulic performance over electric power input to the electric drive). The facility aims at providing experimental data for validation of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools elaborated and being elaborated for re-design and further development of the small-scale fuel side channel pump under consideration. Therefore the equipment is capable to carry out Particle Image Velocimetry (PIV) measurements and to investigate cavitation in the suction side channel with it. The facility was built up and the experiments were carried out at the Department of Fluid Mechanics, Budapest University of Technology and Economics.

JELÖLÉSJEGYZÉK

D_{mean}	a járókerék átlagos átmérője
n	fordulatszám
v	kinematikai viszkozitás
Re	Reynolds-szám
T	hőmérséklet
ρ	közegsűrűség
μ	dinamikai viszkozitás
q_v	térfogatáram
A_{mean}	oldalcsatornák átlagos keresztmetszete
Φ	mennyiségi szám
Ψ	össznyomászám
η	összhatásfok
Δp_t	össznyomás-növekedés
P_e	villamos teljesítmény

* doktorandusz, BME Áramlástan Tanszék

** egyetemi docens, BME Áramlástan Tanszék

*** egyetemi docens, BME Áramlástan Tanszék

BEVEZETÉS

Egy kereskedelmi forgalomban kapható, személygépkocsikra jellemző (pl.: a Ford gépjárműveiben használt) oldalcsatornás üzemanyagszivattyú továbbfejlesztése és újratervezése során felmerült az igény a szivattyúban kialakuló áramlás részletes megértésére. Ehhez numerikus áramlástan (Computational Fluid Dynamics, CFD) modellek kerültek kidolgozásra [1], melyek pontosításához, validálásához saját mérési eredmények váltak szükségessé az irodalomban fellelhető eredményekkel való összehasonlításon túl [2,3]. A nehézséget az okozta, hogy a zárt szivattyútérben kialakuló áramlások hagyományos mérési eszközök számára hozzáférhetetlenek. Ezen probléma áthidalására a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén egy egyedülálló mérési berendezést terveztünk és állítottunk össze. A modell egyes részei optikailag átjárhatóak, ennek következtében az optikai elven működő mérőberendezések számára az áramlási tér láthatóvá válik. A mérőberendezéssel kapcsolatos elvárás az volt, hogy legyen alkalmas

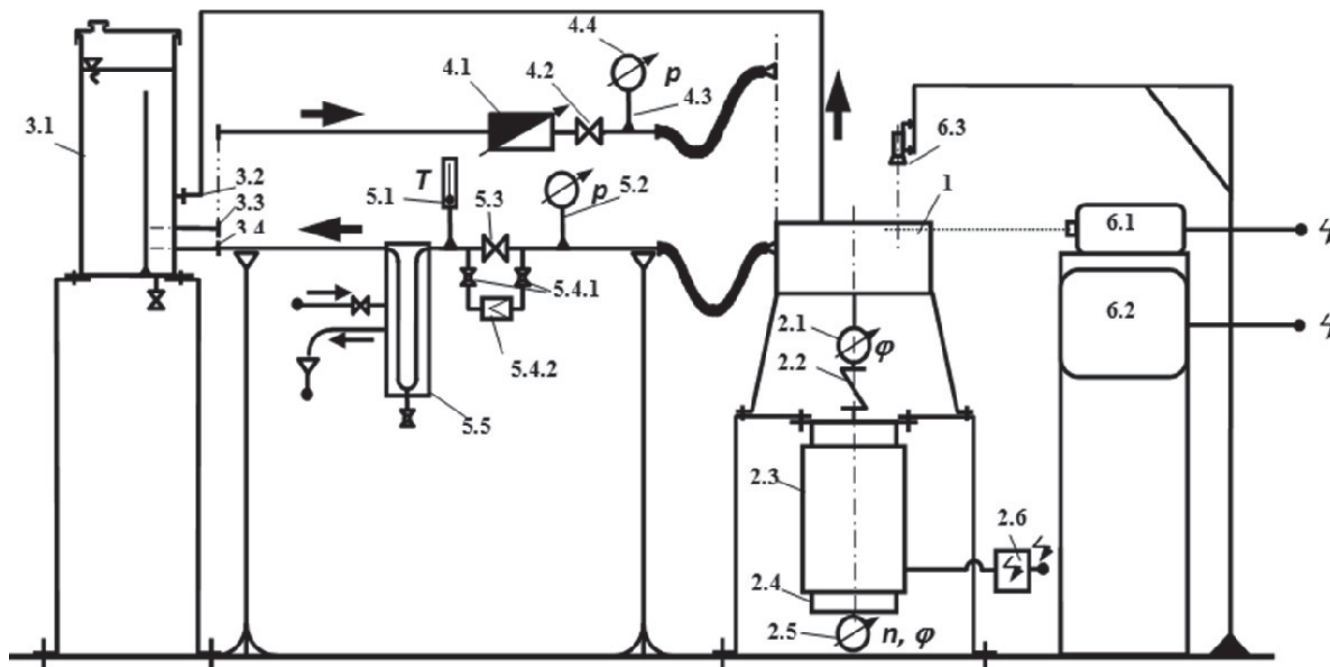
- a szivattyú jelleggörbéinek mérésére (össznyomás növekedés és hatásfok a térfogat-áram függvényében)
- a szívóoldali csatornában kialakuló áramlás lézeres áramlásmérési technikával - Particle Image Velocimetry (PIV), vagy igény szerint Laser Doppler Velocimetry (LDV) - történő mérésére
- a szívóoldali csatornában a kavitációs jelenségek vizsgálatára
- meghatározott helyeken a nyomáseloszlás meghatározására.

A cikk bemutatja a mérőberendezés alkatelemeit, főbb jellemzőit, és a mérőberendezés alkalmazásával készült első jelleggörbe- és hatásfok-mérések eredményeit. A berendezés komplexitását jól jellemzi, hogy a projekt végrehajtásában az egyes alkatrészek beszállítójaként és szolgáltatóként több mint 50 vállalkozás vett részt.

A MÉRŐBERENDEZÉS FELÉPÍTÉSE

A mérőberendezés 6 alapvető részegységből tevődik össze, a sématis összeállítási rajzot az 1. ábrán láthatjuk.

optikai hozzáférhetőséget (2. ábra). A plexiüveg gyártás során keletkezett belső feszültségeit temperálással csökkentették. Az anyag törésmutatója pontos meghatározásra került, ezzel biztosítva a feltételeket az optikai mérésekhez. Az optikai mérések során



1. ábra: a mérési berendezés sématis összeállítási rajza – 1. Szivattyú modell; 2. Szivattyú hajtás: 2.1 Fordulatonkénti triggerjelet szolgáltató egység, 2.2 Tengelykapcsoló, 2.3 Villamos motor, 2.4 Motor hűtés, 2.5 Szögjeladó, 2.6 Tápegység; 3. Folyadékátároló: 3.1 Tartály, 3.2 Gőzelvezető vezeték csatlakozása, 3.3 Folyadék kivezetés, 3.4 Folyadék bevezetés; 4. Szívócső: 4.1 Átfolyó peremes áramlásmérő, 4.2 Pillangószelep, 4.3 Körvezeték, 4.4 Nyomásátalakító; 5. Nyomóvezeték: 5.1 Hőmérő, 5.2 Körvezeték nyomásátalakítóval, 5.3 Fojtószelep, 5.4.1 Golyósszelep, 5.4.2 Szűrő, 5.5 Hűtő, 6. PIV: 6.1 lézer, 6.2 Adatgyűjtő berendezés: PC 6.3 Detektorok: PIV kamera, CCD kamera, megvilágító berendezések

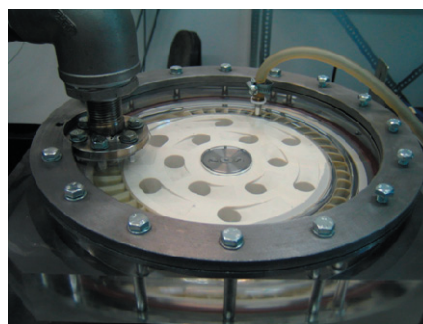
1. Szivattyú modell – A modell egy valóságos üzemenyagszivattyú 1:8 arányban felnagyított változata. A nagyítási faktor némiképp eltérő a járókerék esetén, mely valamivel kisebb vastagságú szerelési és gyártási okok miatt. Hasonló okokból kifolyólag a folyadék beáramlási és kiáramlási csatlakozó geometriai kialakítása is mutat némi eltérést.

Lényeges különbség, hogy az eredeti kialakításhoz képest a mérőberendezés konfigurációja fordított: a szívóoldal felfelé néz a jobb optikai hozzáférés érdekében. Ennek következtében a járókerék által generált axiális erő lefelé mutat, hasonlóképpen az eredeti verzióhoz viszonyítva arányaiban jelentősebb gravitációs erőhöz. Ezen erők hatásaként az axiális rések aszimmetrikussá válhatnak, ami hatással lehet a szivattyú működésére.

A járókerék és a szivattyúház közti érintkezés megelőzése céljából a tengelyre beépítésre került egy axiális irányú mozgáshatároló ütköző.

A szivattyúház szívóoldal felőli része plexiüvegből készült, ezzel biztosítva a belső áramlási térhez való

igénybevett felületek optikai minőségűre csiszoltak: az oldalfalak, melyeken keresztül a lézersík behatol az áramlási térbe; az oldalcsatorna fala; a felső zárófelület, mely a CCD kamerás vizsgálatok szempontjából fontos.



2. ábra: a szivattyúmodell szívóoldal felőli nézete az optikailag átjárható szivattyúházzal

2. Szivattyú hajtás – A hajtás és a szivattyú tengelye közti kapcsolatot egy fogazott tengelykapcsoló biztosítja. A hajtás tartalmaz egy, a tanszék által kifejlesztett jeladót, mely fordulatonként triggerjelet generál a PIV mérések vezérléséhez. A merev tengelykapcsoló biztosítja a jeladó és a járókerék szinkronizált működését. A hajtás maga egy villamos motorral történik, melynek fordulatszámát egy frekvenciaváltó szabályozza. Ez a kialakítás szükségessé teszi egy motorhűtő ventilátor alkalmazását is. A motor tengelyének alsó végéhez kapcsolódik egy szögjeladó, melynek feladata a tengely szögelfordulásának és szögsebességének pontos detektálása. Ez a berendezés a mérések eddigi szakaszában azonban még nem került felhasználásra.

3. Folyadék tároló – Az alkalmazott folyadékot egy tartályban tároljuk, melynek fedelén lehetőség van mind a folyadék utántöltésére, mind a lézeres áramlásméréshez szükséges fényszóró részecskék bejuttatására. A kialakítás továbbá lehetővé teszi enyhe túlnyomás vagy depresszió kialakítását is. A tartály rendelkezik csatlakozóval a szívócsövön és a nyomóvezetékén túl a gőzelvezető furathoz is, melynek szerepéről a későbbiekben lesz részletesen szó.

4. Szívócső – A tartályhoz kapcsolódó szívócső elegendően hosszú ahhoz, hogy a szabványos térfogatáram mérő berendezéseket alkalmazni tudjuk [4]. A térfogatáram meghatározása átfolyó mérőperemmel történik. A mérőperemen mérhető nyomáskülönbséget fordított U-csöves manométerrel határozzuk meg. A kavitációs vizsgálatokhoz szükséges viszonylag kis nyomás kialakítása érdekében a szívócsőben található egy pillangószelep. A nyomásméréshez 4 csatlakozással kialakított körvezetékét használunk, mely biztosítja a statikus nyomás átlagolását a mérési hely kerületén. Ezen a ponton az abszolút nyomás meghatározható, ennek a kavitációs vizsgálatok szempontjából van nagy jelentősége.

5. Nyomóvezeték – A nyomásmérés a nyomóoldalon szintén körvezetékkel történik. A szivattyú munkapontjának átállítása céljából beépítésre került egy fojtószelep. A fojtószelep előtti és utáni csőszakaszt egy megkerülő vezeték köti össze, melyben golyósszelepek és egy szűrő található. A szűrő célja kettős: egyrészt megvédeni a berendezést az esetleges szennyeződésektől, másrészt ha a fényszóró részecskék száma kedvezőtlenül magas, akkor ezek kiszűrése is lehetséges általa.

A fojtószelep után található egy hőmérő, mely a hűtőrendszerbe belépő folyadék hőmérsékletének folytonos megfigyelésére szolgál. A hőmérséklet állandó monitorozásának szükségességét a folyadék mérés szempontjából kritikus tulajdonságainak – sűrűség, viszkozitás, törésmutató – hőmérsékletfüggése indokolja. **6. PIV berendezés és kiegészítők** – A berendezés részét képezi a lézer, a lézersík-generátor szonda, a PIV kamera és a CCD kamera. Mindezen eszközök egy PC-hez kapcsolódnak, mely az adatfeldolgozásért felelős.

A MÉRÉSEK KÖRÜLMÉNYEI, BIZONYTALANSÁGA

A PIV-vel végzett mérések során szükséges, hogy az alkalmazott folyadék és a szivattyú falait alkotó plexiüveg törésmutatója megegyezzen, továbbá hogy a modell és a valóságos szivattyú oldalcsatornájában kialakuló áramlások hasonlósága teljesüljön. Ennek feltétele a *Reynolds-számok* (Re) közel egyező értéke [5].

$$Re = \frac{D_{mean}^2 \pi n}{\nu} \quad (1)$$

A valódi szivattyú fordulatszáma 5000 – 9000 1/perc között mozog. A PIV mérésekhez a modell szivattyú esetében a legkisebb olyan fordulatszámot választottuk, amely mellett a valós esetben előforduló legalacsonyabb Re érték biztosítható. Ily módon minimalizálható a nagy nyomás által a modellen okozott esetleges előre nem látott károsodások keletkezésének kockázata, továbbá a PIV mérések során nem kívánatos kavitáció mértéke. Ezek a megfontolások 300 1/min-es fordulatszámot eredményeztek.

A törésmutatók egyezéséhez a szakirodalomban javasolt anyagok helyett [4] dekalin és tetralin keverékét alkalmaztuk, ezen folyadékelegy fizikai tulajdonságai ugyanis sokkal stabilabbnak és könnyebben kontrollálhatóbbnak bizonyultak mint a javasolt glicerin-víz elegy, továbbá nevezett folyadék esetleges használata esetén a kívánt Re szám egyezés nem lett volna megoldható. A megfelelő keverési arányt kísérleti úton határoztuk meg. A végső elegy lényeges fizikai paraméterei $T=25^\circ C$ -ra vonatkoztatva az alábbi táblázatban olvashatóak (a benzin adatok az üzemanyagellátó rendszerek minőségellenőrzéséhez használatos tesztbenzin reprezentatív értékei, a valóságos szivattyú adatai kereskedelmi forgalomban elérhető gépkocsikba szerelt szivattyú előzetes vizsgálatából származnak):

Karakterisztika	Valódi szivattyú (benzin)	Modell szivattyú (dekalin + tetralin)
Dinamikai viszkozitás μ [kg/(ms)]	0.00048	0.00240
Sűrűség ρ [kg/m ³]	720	910
Kinematikai viszkozitás ν [m ² /s]	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$26.4 \cdot 10^{-7}$
Oldalcsatorna átlagos átmérője D_{mean} [mm]	28.2	225.6
Fordulatszám n [1/min]	5000 (min.)	300
Járókerék kerületi sebessége D_{mean} -nél [m/s]	7.38	3.54
Reynolds szám Re [-]	$3.11 \cdot 10^5$	$3.03 \cdot 10^5$

A kavitációs és nyomáseloszlást vizsgáló mérésekhez desztillált vizet használtunk. E mérések során ugyanis nem lényeges a törésmutatók egyezése. Az egyszerű csapvíz alkalmazása kerülendő, a benne lévő szennyeződések kicsapódása ugyanis rontja a plexi optikai tulajdonságait. Az alkalmazott folyadék paraméterei: $T=25^\circ\text{C}$, $\rho=997 \text{ kg/m}^3$, $\mu=0.0009 \text{ kg/(ms)}$. A méréseket ebben az esetben is 300 1/min-es fordulatszámok mellett végeztük, a Reynolds számok egyezése azonban ebben az esetben sokkal kevésbé lényeges, az áramlások hasonlósága ugyanis a gőzfázis jelenléte miatt nem teljesülhet tökéletesen.

A mérési eredmények bizonytalanságát a későbbi diagramokon feltüntettük. A hibaanalízist a vonatkozó irodalomnak megfelelően végeztük a négyzetes középértékek módszerével [4,7]. A fő bizonytalanságforrások:

- a szívócsőben történő térfogatáram mérés dekalin-tetralin alkalmazása esetén – becült hiba: ± 15 liter/h 400-3000 liter/h térfogatáram mellett
- a szívócsőben történő térfogatáram mérés víz alkalmazása esetén - ± 70 liter/h 500-3200 liter/h térfogatáram mellett
- a szívócsőben való nyomásmérés - ± 10 mbar a -950 – 50 mbar tartományban
- a nyomóvezetékben való nyomásmérés - ± 10 mbar a 0 – 2000 mbar tartományban
- hőmérsékletmérés - $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 0 20-40°C tartományban
- PIV mérések - további analízis tárgya a hiba mértéke. A fő hibaforrás a geometriai kalibráció bizonytalansága

- kavitációs mérések – A fő bizonytalanságforrás a fordulatszám méréséből származik: ± 0.1 1/min a 0-1000 1/min tartományban

JELLEGGÖRBÉK

A forgógépek vizsgálata során szokásos módon a működési állapotokat az alábbi dimenziótlan mennyiségekkel jellemezzük:

- mennyiségi szám: a mért térfogatáram az oldalcsatornák átlagos keresztmetszetével és a járókerék D_{mean} -nél mérhető kerületi sebességével dimenziótlanítva

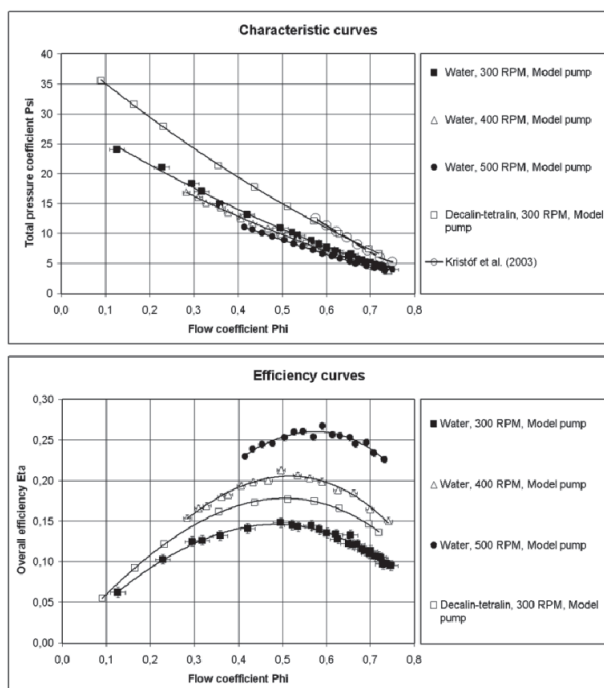
$$\Phi = \frac{q_v}{2A_{mean}(D_{mean}\pi n)} \quad (2)$$

- össznyomásszám: az össznyomásnövekedés a járókerék D_{mean} -nél mérhető kerületi sebességével számolható dinamikus nyomással dimenziótlanítva

$$\Psi = \frac{\Delta p_t}{\rho/2(D_{mean}\pi n)^2} \quad (3)$$

- összhatásfok: a térfogatáram és az össznyomásnövekedés szorzata osztva a bevezetett villamos teljesítménnyel

$$\eta = \frac{q_v \Delta p_t}{P_e} \quad (4)$$



3. ábra: Jelleg- és hatásfok görbék: a vízzel és a dekalin-tetralin keverékkel üzemelő modell-szivattyú összehasonlítása

A beüzemelés során mért jelleg- és hatásfok-görbéket a 3. ábra mutatja be. A modell szivattyú esetén a vízzel végzett mérésekhez tartozó görbék nagyobb térfogatáramot mutatnak, mint azt az eredeti szivattyú működése alapján várnánk, melynek oka egyrészt a zárt gözelvezető furat – ez magyarázza a nagyságrendileg 10%-os eltérést –, másrészt a már korábban említett apró geometriai eltérések a csatlakozók esetén. A hasonlósági szabályok ebben az esetben az elvárhatónál kevésbé pontosan érvényesülnek. A magyarázatot a nagyobb sebesség esetén a járókerékre ható axiális irányú, lefele mutató erő megnövekedése adhatja, melynek hatására az axiális rések aszimmetrikussá válnak, ezzel befolyásolva az áramlást. A jelenség még további vizsgálatokat igényel.

A hatásfok-görbék jelentősen függenek a fordulatszámtól és a közegtől. Ezt részben magyarázza, hogy a sebesség növekedésével a frekvenciaátalakító hatásfoka jelentősen növekszik.

A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a dekalin-tetralin alkalmazásakor a modell szivattyú teljesítménye lényegesen nagyobb, mint a víz áramoltatása alkalmával. Ennek oka az lehet, hogy a Reynolds-szám nem elegendő jellemzője az áramlásnak az axiális résekben, ahol a kialakuló folyadékfilmnek tömítő szerepe van a nyomott és szívott oldalak közt. A nagyobb viszkozitású dekalin-tetralin keverék esetén ez a tömítés sokkal hatékonyabb lehet, aminek következménye a nagyobb nyomásnövekedés. A résekben végbemenő folyamatok megértéséhez további vizsgálatok szükségesek.

Látható továbbá, hogy a fordulatszám növekedésével – tehát a nyomásnövekedés fokozásával – vizes üzemi esetén a dimenziótlan jelleggörbék lejjebb tolnak. Ennek oka lehet, hogy a plexi deformálódik a nyomás hatására, és nőnek a rések, nő a volumetrikus veszteség.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutattuk egy oldalcsatornás üzemanyagszivattyú felnagyított, optikailag átjárható modelljének felépítését, és a tesztberendezés néhány alapvető jellegzetességét, a jelleggörbék kimérését. Már az eddigi eredmények is felvetettek további, megválaszolandó kérdéseket – résáramlások, aszimmetrikus axiális rések, plexi deformációjának hatása –, melyek jól illusztrálják, hogy a berendezés számos tudományos kérdés jobb megértéséhez szolgáltat értékes adatokat. A kialakítás lehetővé teszi a további kutatási irányok megnyitását is, úgy mint a kavitáció tanulmányozása és a kialakuló áramlások PIV mérésekkel való tanulmányozása.

SUMMARY

This article outlined an extensive experimental program carried out for an optically accessible model fuel pump, which is a scaled-up version of a real side channel fuel pump. The installation of the test facility and the measurement of its characteristic curves are described. Several questions have already arisen - asymmetry of the axial gap, leakage flow in the axial gap, effect of the deformation of the plexi under high pressure – which show how valuable data this facility can provide in order to understand the mentioned phenomena. Its capability for various measurements in the future – such as cavitation studies and PIV measurements - and for their evaluation was also demonstrated herein. The activity carried out so far envisaged further research and development tests related to the elaborated test facility.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak Istók Balázs, Jezsó István, Kalmár Gábor, Lakos Péter, Marschall József, Mátyási Gyula, Mészáros Imre, Poppe László, Réger Tamás és Szabó Gábor kollégáknak a berendezés kialakításában és beüzemelésében nyújtott közreműködésükért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

A cikk megjelenését támogatta az OTKA K 81621 projekt is.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] KRISTÓF, G., FODOR, G., MEZŐSI B., PÖSZMÉT, I., RÉGERT T., DÁVID N.: Numerical Simulation of a side channel pump. The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, 2003
- [2] KRAKE A., FIEDLER K.: Laser 2 Focus Measurements and Flow Visualisation within the Rotating Rotor and the Side Channel of a Side Channel Compressor, The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii (2002)
- [3] SCHIMPF A., SIEKMANN H.E., STEINMANN A.: Stereo-PIV in Aerated Wastewater Pond and Side Channel Blower, The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii (2002)
- [4] STANDARDS: A/ European Standard, Ref. No. EN ISO 5167-1:2003 E. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements. B/ European Standard, Ref. No. EN ISO 5167-2:2003 E. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates
- [5] LAJOS TAMÁS: Az Áramlástan alapjai (Fundamentals of Fluid Mechanics), Műegyetemi Kiadó, 2004
- [6] BUDWIG, R.: Refractive index matching methods for liquid flow investigations. Experiments in Fluids, Vol. 17, pp. 350-355, 1991
- [7] VAD, J., KWEDIKHA, A. R. A., JABERG, H.: Effects of blade sweep on the performance characteristics of axial flow turbomachinery rotors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy, Paper No. JPE249, Vol. 220, pp. 737 – 751, 2006.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara, a Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kara, az Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kara valamint a Typotex Elektronikus Kiadó Kft. a Társadalmi Megújulás Operatív Program keretében támogatást nyert el a

„Közép-magyarországi Régió Gépészmérnöki Karok informatikai háttérű képzési anyagai és tartalmi kidolgozása”

(projekt száma: TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0029) projekt megvalósítására.
A megvalósítás időtartama: 2010. április 1. - 2011. szeptember 30.
A támogatás összege: 80 000 000 Ft.



Nemzeti Fejlesztési Ügynökség

ÚMFT infovonal: 06 40 638 638
nfu@meh.hu • www.nfu.hu

Befektetés a jövőbe



FOKOZOTT FAJLAGOS TELJESÍTMÉNYŰ, ENERGETIKAILAG KEDVEZŐ ÜZEMŰ AXIÁLIS ÁTÖMLÉSŰ FÜSTGÁZELSZÍVÓ VENTILÁTOROK TERVEZÉSE ÉS MÉRÉSE

DESIGN AND MEASUREMENT OF AXIAL FLOW FLUE GAS EXTRACTOR FANS OF HIGH SPECIFIC PERFORMANCE AND ENERGETICALLY FAVOURABLE OPERATION

Vad, J.*

ABSTRACT

The paper presents the main features and practical advantages of controlled vortex design applied for axial flow fans. The application of such design technique has been demonstrated in the paper in an example of industrial prototype fan with outlet guide vanes, forming the basis of a new, commercially available flue gas extractor axial fan family. For aerodynamic measurements on the new fans, test rigs in „from-duct-to-surroundings” arrangement have been designed and executed. The measurements demonstrate the high specific performance and energetically favourable operation of the new fans, as result of the thorough design technique.

JELÖLÉSJEGYZÉK

u_k	[m/s]	a lapátcsúcs kerületi sebessége
Φ	[-]	mennyiségi szám: térfogatáram osztva az axiális ventilátor gyűrűkeresztmetszetével és a lapátcsúcs kerületi sebességével
Ψ	[-]	össznyomásszám: össznyomás-növekedés osztva a $\rho u_k^2/2$ fiktív dinamikus nyomással
ρ	[kg/m ³]	közegsűrűség
η	[-]	összhatásfok: a térfogatáram és az össznyomás-növekedés szorzata osztva a járókerék tengelyén bevezetett mechanikai teljesítménnyel

BEVEZETÉS

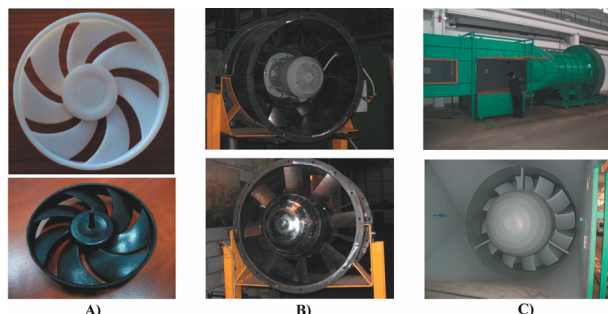
Axiális átömlésű járókerekek „szabályozott örvény” tervezése (controlled vortex design [1]) során az előírt lapátcikláció – és így az ideális össznyomás-növelés – a sugár mentén növekszik a lapátmagasság túlnyomó részén, szemben a klasszikus, sugár mentén állandó ciklációra történő tervezéssel („potenciális örvény” tervezés, free vortex design [2]). A szabályozott örvény tervezés jelentős gyakorlati előnyökkel jár:

- A nagyobb sugarakon lévő lapátmetszetek aerodinamikailag jobban kihasználhatóak, nagyobb mértékben hozzájárulnak a légtechnikai teljesítményhez. Ezáltal fokozott fajlagos teljesítményű járókerekek hozhatók létre, azaz viszonylag nagy térfogatáram és/vagy össznyomás-növekedés valósítható meg mérsékelt gépmérettel, lapátszámmal és fordulatszámmal is.
- A lapátterhelésének csökkentésével az agynál fellépő össznyomás-veszteség mérsékelhető.
- A statikus hatásfok javítható az agy átmérőjének és így a kilépési veszteségnek a csökkentésével.
- Egyszerű, könnyen gyártható lapátvezetés hozható létre, pl. a sugár mentén (közel) állandó lapátszög (mérsékelt elcsavarodás) és/vagy lapáthúrhossz révén. A lapátok kerület menti átfedése elkerülhető, miáltal költségkímélő módon, egyszerű öntő- vagy fröccsöntő szerszámmal megvalósítható, egybeönthető járókerék (kerékagy + lapátok együtt) hozható létre.
- Többfokozatú gépben a járókerékből kilépő közeg áramlási szöge beállítható úgy, hogy a következő lapátrácsra a közeg belépése áramlástanilag kedvező szögben történjen.
- A lapátmagasság túlnyomó része mentén növekvő, de a lapátcsúcs közelében mérsékelt lapátciklációt előírva, a kerületen a kilépő közeg perdülete mérsékelhető. Ezáltal a sugárventilátorok által keltett levegősugár stabilitása, koherenciája javítható.
- A kilépő axiális sebességeloszlás testre szabható az adott alkalmazásban. Például villanymotor-hűtőventilátorok esetén, mivel a hűtőbordák a motor kerületén helyezkednek el, fokozott légáramlást célszerű megvalósítani a nagyobb sugarakon, míg a kisebb sugarakon a légáramlás szerepe másodlagos.

A szabályozott örvény tervezés magyarországi alkalmazását Somlyódy [3] munkája alapozta meg. A tervezési módszer az elmúlt évtizedekben folyamatosan fejlődött és sokféle termékben hasznosult Magyar-

* egyetemi docens, BME Áramlástan Tanszék

országon. E helyütt csak a legfrissebb, impakt faktoros folyóiratokban megjelent cikkeket idézem, melyek e témában a Szent István Egyetemen [4] valamint a BME-n [5] készültek. Az **1. ábra** példákat mutat az általam magyarországi felhasználók, iparvállalatok számára szabályozott örvény módszerrel tervezett és megvalósult axiálventilátorokra [6-8].



1. ábra: Példák magyarországi felhasználók, ipari vállalatok számára tervezett axiális ventilátorokra, a lapátsúcs-átmérők megadásával.

A) Villamos motor-hűtő ventilátorok, $\varnothing 110$ mm, $\varnothing 124$ mm [6]. B) Nagy vetőtávolságú ventilátor, $\varnothing 710$ mm [7]. C) Szélcsatorna-ventilátor, $\varnothing 2000$ mm [8]

A cikk a szabályozott örvény módszer újabb alkalmazását mutatja be, melynek keretében ventilátor prototípust terveztem az Air-Technik Légtechnikai Kft. számára. E tervezés képezte alapját a jelenleg már piaci forgalomban elérhető, új HV-BVHA füstgázelszívó ventilátor termékcsaládnak [9].

TERVEZÉSI SZEMPONTOK ÉS MÓDSZER; A MEGVALÓSULT VENTILÁTOROK

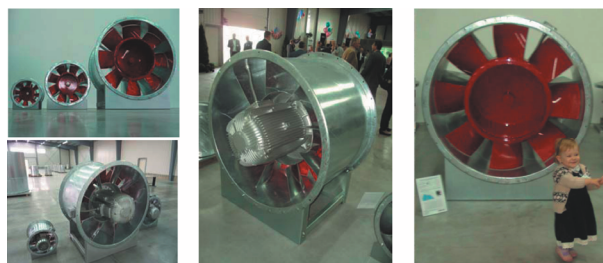
A szabályozott örvény tervezés alkalmazását a következő szempontok tették szükségessé:

- A tüzeset során elvárt gyors és intenzív füstmentesítés érdekében fokozott fajlagos teljesítmény; viszonylag nagy nyomásnövelési igény.
- A forszírozott üzem ellenére a hatásfok legyen kedvező, annak érdekében, hogy az elvárt légtechnikai teljesítményt a lehető legkisebb névleges tengelyteljesítményű hajtó motor biztosítsa, így csökkentve a költséget.
- A versenyképes ár érdekében egyszerűen gyártható lapátgeometria: állandó hűrhossz, mérsékelt elcsavarodás.

A prototípus ventilátor agy/lapátsúcs átmérőviszonyára 0.56, a járókerék lapátszámára 5, az utóterelő lapátszámára 9 értékeket választottam. A kellően nagy utóterelő-lapátszám és így megfelelő szilárdságtani jellemzők által a terelőlapátok egyúttal a motor-tartóborda szerepet is ellátják. Az elemi járókerék- és utóterelő lapátrácsokat szárnyrács-mérési adatok [10] alapján méreteztem. A költségkímélés érdekében a megrendelő instrukciója alapján körív vázvonalt

lemezlapátot vettem alapul. A cirkuláció sugár menti eloszlását [11] nyomán hatványfüggvényként írtam elő. A tervezés során figyelembe vettem, hogy a szabályozott örvény módszer révén a lapátszámokban jelentős radiális sebességkomponens lép fel. Ennek megfelelően az elemi lapátrácsok számítását kúpos áramfelületek feltételezésével végeztem el [11]. A szabályozott örvény tervezésnek megfelelő üzemi állapot a csatornafali határréteg vastagságát fokozza. A megnövekedett kizorítási vastagságot – amely befolyásolja az axiális sebességeloszlást a lapátmagasság mentén – az [5] cikkben bemutatott irányelvek alapján építettem be a tervezési eljárásba. A veszteségek mérséklése érdekében biztosítottam, hogy a Lieblein diffúziós tényező [12] ne lépje túl a [13] szakirodalomban ajánlott 0.6 küszöbértéket – viszont attól ne is maradjon el nagymértékben a külső lapátmetszeteken sem, a lapátmozgás megfelelő kiterheltsége, a fokozott fajlagos teljesítmény megvalósíthatósága érdekében. A megvalósult ventilátorok esetén a lapáthűrhosszból és a kerületi sebességből számítható Reynolds-szám meghaladja a [13] szakkönyvben javasolt $1.5 \cdot 10^5$ értéket, ezzel is hozzájárulva a kedvező hatásfokhoz.

A prototípus alapján elkészült a HV-BVHA füstgázelszívó ventilátor termékcsalád, melynek néhány tagját a **2. ábra** mutatja be.



2. ábra: Példák a HV-BVHA füstgázelszívó axiálventilátorokra: $\varnothing 400$ mm, $\varnothing 630$ mm, $\varnothing 1250$ mm

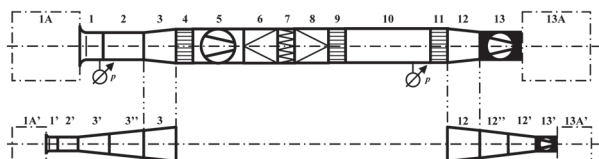
A gépek háza acéllemezből hengerelt; mindkét végén saját anyagából kihajtott, lyukasztott peremmel rendelkezik. Az utóterelő lapátsor és a motortartó konstrukció hegesztett. A járókerék acél agyra hegesztett acéllemezzel készült lapátokkal készül; hőálló villanymotorral szerelt. Az acél felületek utólagos tűzihorganyzott felületvédelmet kapnak. Az MSZ EN-12101-3 szabványban leírt F400-as hőállóság (400 °C / 120 perc) szerinti tesztelés és tanúsítás megtörtént [9].

A cikkben az adat- és információszolgáltatás az ipari titoktartási szempontok figyelembe vételével korlátozott.

MÉRŐBERENDEZÉS ÉS MÉRÉSI ELJÁRÁS

Az Air-Technik Légtechnikai Kft. által gyártott ventilátorok légtechnikai jellemzőinek mérése érdekében a vállalat megbízásából „csőből szívó – szabadba kifúvó” konfigurációnak megfelelő ventilátor-

mérőberendezést terveztem. A mérőberendezés moduláris elemekből épül fel, amelyek révén különféle mérési konfigurációk építhetők össze. Egy lehetséges összeállítás sémáját mutatja – nem méretarányosan – a **3. ábra**.



3. ábra: A csőventilátor-mérőberendezés elvi vázlata

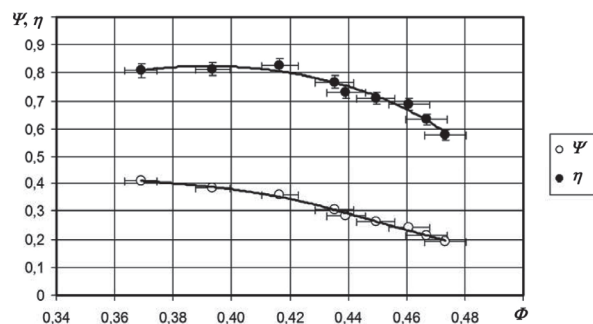
A levegő a környezetből a mérőberendezésbe az (1) beszívó tölcserén keresztül jut, amely manométerrel ellátva a légmennyiség mérésére szolgál. A levegő az igény szerint beépíthető (2) és (3) hengeres valamint diffúzoros átmeneti idomokon halad tovább. Szükség szerint alkalmazható az (5) segédventilátor, melynek előrehatását a (4) áramlásrendezővel küszöböljük ki. A (6) és (8) átmeneti idomok által közrefogva építhető be a (7) légmennyiség-állító elem. A (9) áramlásrendező után következik a (10) mérőcső, amelyben a ventilátor szívóoldalán létesített, atmoszféraküszöb képesti depressziót mérjük. A mérendő (13) ventilátor a (12) közdarabral csatlakozik a mérőcsőhöz. A ventilátor előrehatását a (11) áramlásrendező akadályozza meg. A mérések során megfelelő méretű (1A) és (13A) zavartalan rá- és kiáramlási zónát biztosítunk. Ha kisebb (1') beszívó tölcserét és/vagy (13') mérendő ventilátort kívánunk beiktatni, további közdarabokat (2', 3', 3'', 12', 12'') alkalmazunk. A mérések során a légköri nyomás meghatározására barométert, a nyomáskülönbségek mérésére digitális manométereket, a léghőmérséklet mérésére ellenállás-hőmérőt használtunk. A járókerék fordulatszámát digitális stroboszkóppal mértük. A járókerék-tengelyen bevezetett mechanikai teljesítményt a felvett villamos teljesítmény mérése alapján, a hajtó motor jelleggörbéjének ismeretében határoztuk meg. A mérőberendezés többféle méretben megvalósult. Az egyik konfiguráció néhány részletét a **4. ábra** illusztrálja. A mérések során az ISO 5801 szabvány [14] előírásaihoz alkalmazkodtunk.



4. ábra: A kialakított mérőberendezések egyike

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A mért jelleg- és hatásfokgörbékre dimenziótlan formában az **5. ábra** mutat példát. az Air-Technik Légtechnikai Kft. kérésére csak a katalógusban is közreadott üzemi jellemzőknek megfelelő jelleg- és hatásfokgörbe-tartományok kerültek bemutatásra.



5. ábra: Példa a mért jelleg- és hatásfokgörbe-szakaszokra

A hibásávok a mérési bizonytalanságot jelzik. A Ψ és η adatok hibásávjai az alkalmazott jelzőszimbólumok méretének nagyságrendjébe esnek. A legjobb hatásfokú pont közelében megfigyelhető Φ és Ψ értékek az axiálventilátorokra jellemző tartományokon belül – [15], 2.22. ábra adataiból kiindulva $\Phi \approx 0.1 \div 0.6$; $\Psi \approx 0.1 \div 0.4$ – viszonylag magasak, ami a ventilátor fokozott fajlagos teljesítményét jelzi. A háromdimenziós lapátcsatorna-áramlás sajátosságait figyelembe vevő tervezésnek, a határréteg-kiszorítás megfelelő modellezésének, a lapátok túlterhelését elkerülő, de megfelelő kiterheltséget biztosító intézkedéseknek, a lapát-metszetek összehangolt működésének köszönhetően az összhatásfok jónak mondható. $\eta = 0.83$ maximális értéket sikerült megvalósítani. Ez az érték meghaladja azon hatásfokokat, amelyeket egyszerű geometriájú, egyenes felfűzési vonalú lemezlapátoszással, szabályozott örvény tervezéssel korábban sikerült elérnünk fokozott teljesítményű ventilátorok esetén – pl. $\eta = 0.80$ mért érték a [16] publikációban –, sőt közelíti a profilos lapátoszással korábban elért hatásfok-értékeket. Utóbbira a mért maximális hatásfok $\eta = 0.86$ volt [17].

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk bemutatja az axiális átömlésű ventilátorok „szabályozott örvény” tervezési módszerének fő vonásait, gyakorlati előnyeit. A tervezési módszer alkalmazását ipari utóterelő ventilátor-prototípus tervezésének példáján mutatja be. E tervezés alapját képezte egy új, jelenleg már piaci forgalomban elérhető füstgázelszívó axiálventilátor termékesaládnak. Az új ventilátorok légtechnikai vizsgálata érdekében „csőből-szabadba” elrendezésű mérőhelyek kerültek megtervezésre és kivitelezésre. A mérési eredmények

tanúsága szerint a ventilátorok fokozott fajlagos légtechnikai teljesítményűek, azaz viszonylag nagy térfogatáramot és össznyomás-növekedést képesek megvalósítani mérsékelt átmérő, fordulatszám és lapátszám révén is. A ventilátorok a körültekintő tervezési módszernek köszönhetően – a viszonylag egyszerű geometriájú lemezlapátmozás és a forszírozott üzemet célzó fokozott lapátterhelés ellenére – energetikailag is kedvező tulajdonságúak: 83 %-ot elérő összhatásfokot sikerült kimérni.

SUMMARY

The main features and practical advantages of controlled vortex design applied for axial flow fans have been presented herein. The application of controlled vortex design has been demonstrated in an example of industrial prototype fan with outlet guide vanes. This design formed the basis of a new, commercially available flue gas extractor axial fan family. For aerodynamic measurements on the new fans, test rigs in „from-duct-to-surroundings” arrangement have been designed and executed. As the measurements indicate, the fans are of high specific performance, i.e. they can realize relatively high volume flow rate and total pressure rise even with moderate diameter, rotor speed, and blade count. Due to the thorough design technique, the fans are of energetically favourable operation, in spite of the relatively simple cambered plate blading and the high prescribed blade load: total efficiencies up to 83 % have been measured.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét nyilvánítja ki az Air-Technik Légtechnikai Kft.-nek és az együttműködő Hungaro-Ventilátor Kft.-nek, a munka támogatásáért, valamint a publikáció engedélyezéséért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A cikk hozzájárul a jelenleg elbírálás alatt álló OTKA K 83807 projekt előkészítéséhez.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] GALLIMORE, S. J., BOLGER, J. J., CUMPSTY, N. A., TAYLOR, M. J., WRIGHT, P. I. AND PLACE, J. M. M. The use of sweep and dihedral in multistage axial flow compressor blading – Parts I and II. *ASME J. Turbomachinery*, 2002, **124**, pp. 521-541.
- [2] LAKSHMINARAYANA, B. *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] SOMLYÓDY, L. Axiális ventilátorok tervezése és jelleggörbeszámítása. Egyetemi doktori értekezés, BME, 1971.
- [4] SZLIVKA, F., MOLNÁR, I. Measured and non-free vortex design results of axial flow fans. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, **22**, pp. 1902-1907.
- [5] VAD, J. RADIAL fluid migration and endwall blockage in axial flow rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2010, **224**, pp. 399-417.
- [6] VAD, J., HORVÁTH, CS., LOHÁSZ, M. M., JESCH, D., MOLNÁR, L., KOSCSÓ, G., NAGY, L., DÁNIEL, I., GULYÁS, A. Redesign of an electric motor cooling fan for reduction of fan noise and absorbed power. *Proc. 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'11)*, 2011, Istanbul, Turkey (benyújtva)
- [7] VAD, J. Application of controlled vortex design concept to axial flow industrial fans. *Proc. GÉPÉSZET'2010 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, 2010, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 978-963-313-007-0), pp. 875-881.
- [8] VAD, J., KWEDIKHA, A. R. A., HORVÁTH, CS., BALCZÓ, M., LOHÁSZ, M. M., RÉGERT, T. Aerodynamic effects of forward blade skew in axial flow rotors of controlled vortex design. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, **221**, pp. 1011-1023.
- [9] HUNGARO-VENTILÁTOR Kft. AIRJET sugárventilátorok. Axiálventilátorok. Füstgázelszívó tetőventilátorok. Termékkatalógus, 2010. info@hungaro-ventilator.hu, info@air-technik.hu
- [10] WALLIS, R. A. *Axial Flow Fans and Ducts*. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [11] VAD, J., BENCZE, F. Three-dimensional flow in axial flow fans of non-free vortex design. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1998, **19**, pp. 601-607.
- [12] LIEBLEIN, S. EXPERIMENTAL flow in two-dimensional cascades. Chapter VI in *Aerodynamic design of axial-flow compressors*. 1965, Report NASA SP-36, Washington D. C.
- [13] CAROLUS, T. *VENTILATOREN*. TEUBNER VERLAG, 2003.
- [14] ISO 5801:2007 (E). Industrial fans – Performance testing using standardized airways.
- [15] DR. GRUBER JÓZSEF és szerzőtársai. *Ventilátorok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- [16] CORSINI, A., RISPOLI, F. Using sweep to extend the stall-free operational range in axial fan rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2004, **218**, pp. 129-139.
- [17] VAD, J., BENCZE, F. Nagy áramlási teljesítményű axiális átömlésű forgógépek fejlesztése. *GÉP*, 2000, **51** (1-2), pp. 23-29.

ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOK EGY NUMERIKUS SZEMLELETŰ ANYAGJELLEMZŐ MÉRÉSI MÓDSZER KIÉRTÉKELÉSÉHEZ

SENSITIVITY ANALYSIS FOR THE EVALUATION OF A THERMOPHYSICAL PROPERTY MEASUREMENT METHOD WITH NUMERICAL APPROACH

Czél Balázs*, Gróf Gyula**

A numerikus szemléletű hőfizikai anyagjellemző mérési módszerekről akkor beszélünk, ha a mérési folyamatot leíró matematikai modell csak numerikus úton oldható meg. Az ilyen mérési módszerek esetén a hővezetés egyenes feladatára nézve elméletileg szinte semmilyen korlát nincsen (tetszőleges geometria, inhomogén kezdeti és peremfeltételek, hőmérsékletfüggő anyagjellemzők), viszont a kiértékelés jóval bonyolultabbá válik az analitikus szemléletű módszerekhez képest. A kiértékelés egy inverz hővezetési feladat megoldását jelenti. Érzékenységi számításokkal megvizsgálható, hogy a kijelölt ismeretlen paraméterek becslése elvégezhető-e az inverz feladat megoldásával.

Thermophysical property measurement methods with numerical approach have a mathematical model which can be solved by numerical methods. Considering such type of measurement methods, the direct problem of heat conduction has no restrictions (any kind geometry, inhomogeneous initial and boundary conditions, temperature dependent thermophysical properties), but the evaluation becomes very difficult compared to the analytical approach. The evaluation requires the solution of an inverse heat conduction problem. With sensitivity analysis, the possibility of the estimation of the unknown parameters through the inverse solution can be examined.

1. BEVEZETÉS

A numerikus szemléletű hőfizikai anyagjellemző mérési módszerek nagy előnye, hogy a mérési módszer tervezésekor előnyben részesíthetők a mérés-technikai szempontok (minél egyszerűbb berendezés, minél pontosabban betartható peremfeltételek, minél pontosabb hőmérsékletmérés, minél kevesebb mérendő mennyiség), továbbá lehetőség nyílik a mérés univerzalizálásának növelésére (több paraméter párhuzamos meghatározása, hőmérsékletfüggés közvetlen meghatározása). Ezáltal

* doktorandusz, BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

** egyetemi docens, BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

egy jól megtervezett berendezés egyszerűbb, pontosabb, gyorsabb és univerzálisabb lehet. A numerikusan kezelhető egyenes feladat¹ nagy hátránya viszont, hogy a kiértékelés egyáltalán nem triviális. Az egyenes feladat megoldását diszkrét pontokban kapjuk meg, nem függvény alakban. Emiatt nincs esély a keresett anyagjellemző(k) képletszerű kifejezésére. A kiértékelés általában egy összetett szélsőérték keresési, optimalizációs feladattá válik. A bonyolult kiértékeléshez általában jelentős számítási idő párosul. Emiatt már a tervezési fázisban érdemes megvizsgálni, hogy a megoldandó inverz hővezetési feladat esetén a mért hőmérsékletgörbék mennyire érzékenyek az ismeretlen paraméterek megváltozására.

Az inverz hővezetési feladatokkal kapcsolatos érzékenységi vizsgálatok részletes, elméleti és gyakorlati összefoglalása [1]-ben található. Garcia [2] az érzékenységi vizsgálatokat hőfizikai anyagjellemző mérő berendezés optimalizálására alkalmazta doktori kutatásai során.

2. AZ INVERZ FELADAT

Az inverz feladatot a Kiss László által javasolt numerikus szemléletű mérési módszer [3] kiértékelési feladatának megfelelően definiáltuk. Az inverz feladat a $\lambda(T)$ és $\rho c_p(T)$ anyagjellemző függvények meghatározása a három rétegű (mag – próbatest – palást) hengeres rendszerben elhelyezett próbatest belső ($r=R_1$) és külső ($r=R_2$) palástfelületénél, egy lehűlési folyamat során tapasztalt tranziens hőmérsékletgörbék alapján. Az inverz feladat megoldásával kapcsolatos eredményeket a [4], [5] cikkekben foglaltuk össze. Ezen cikk célja a fenti inverz feladat esetén elvégzett érzékenységi vizsgálatok eredményeinek bemutatása az anyagjellemzők lineáris hőmérsékletfüggése (4 paraméter) továbbá tetszőleges, függvényenként 11 adatponttal definiált hőmérsékletfüggése (22 paraméter) esetén.

¹Egyenes feladat esetén a differenciálegyenlet megoldását (hőmérséklet eloszlás) keressük az anyagjellemzők, és határfeltételek ismeretében, inverz feladat esetén a hőmérsékleteloszlás ismeretében becsljük a differenciálegyenlet anyagjellemzőit és/vagy határfeltételeit.

3. AZ ÉRZÉKENYSÉGI TÉNYEZŐK MEGHATÁROZÁSA

A kitűzött tranziens inverz hővezetési feladat során P_j , $j=1,2,\dots,J$ paramétert szeretnénk meghatározni $T(\tau,r)=Y_{k,s}$, $\tau=\tau_k$ ($k=1,2,\dots,K$), $r=R_s$ ($s=1,2$) hőmérsékletek ismeretében (két hőmérsékletmérési hely van: $r=R_1$ és $r=R_2$). Az érzékenységi tényező definíció szerint [1] egy adott hőmérséklet adott paraméter szerinti parciális deriváltja (1). Egy adott hőmérsékletmérési helyre vonatkozóan így egy érzékenységi mátrixot kapunk (2). Ha az érzékenységi mátrix oszlopai lineárisan függenek egymástól, akkor a paraméterek inverz meghatározása nehéz, a feladat rosszul kondicionált. Az adott paraméter meghatározása annál könnyebb, minél nagyobb a hozzá tartozó érzékenységi tényező értéke.

$$B_{k,j}^{R_s} = \frac{\partial T(\tau_k, R_s)}{\partial P_j} \quad (1)$$

$$\underset{=R_s}{B}(\bar{P}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial T(\tau_1, R_s)}{\partial P_1} & \frac{\partial T(\tau_1, R_s)}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T(\tau_1, R_s)}{\partial P_j} \\ \frac{\partial T(\tau_2, R_s)}{\partial P_1} & \frac{\partial T(\tau_2, R_s)}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T(\tau_2, R_s)}{\partial P_j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial T(\tau_K, R_s)}{\partial P_1} & \frac{\partial T(\tau_K, R_s)}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T(\tau_K, R_s)}{\partial P_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ha az egyes paraméterek különböző fizikai mennyiségeket takarnak, az összehasonlíthatóság érdekében ajánlott a relatív érzékenységi tényező alkalmazása (3).

$$B_{k,m}^{*R_s} = \frac{\partial T(\tau_k, R_s)}{\partial P_j} \cdot P_j \quad (3)$$

Az érzékenységi tényezők értékét – mivel a megoldandó egyenes feladatnak nem ismert az analitikus megoldása – numerikusan, előrelépő véges differencia sémával határoztuk meg (4).

$$B_{k,j}^{*R_s} = \frac{T(\tau_k, R_s)^{(P_1, \dots, P_j + \varepsilon P_j, \dots, P_j)} - T(\tau_k, R_s)^{(P_1, \dots, P_j, \dots, P_j)}}{\varepsilon P_j} \cdot P_j$$

$$\varepsilon = 10^{-5} \quad (4)$$

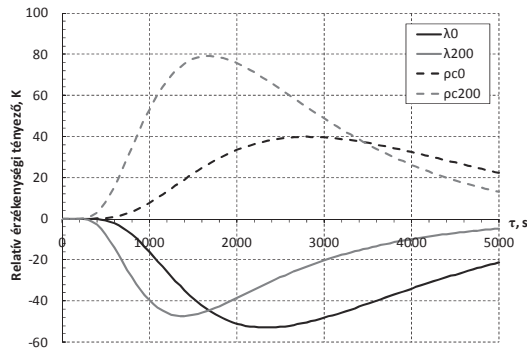
Az érzékenységi vizsgálatokat az 1. táblázatban található adatokkal definiált hővezetési feladat esetén végeztük el. A mag és palást anyagjellemzői konstansak, a próbatest jellemzői lineárisan függenek a hőmérséklettől.

4. EREDMÉNYEK 4 ISMERETLEN PARAMÉTER ESETÉN

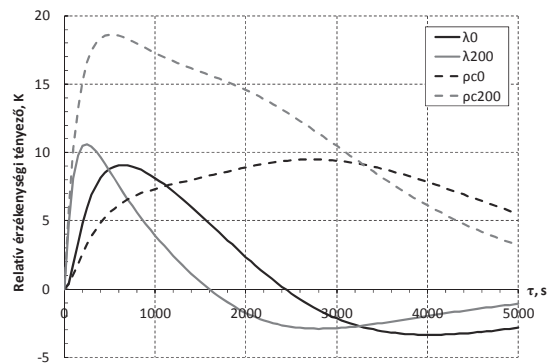
A próbatest anyagjellemzőit összesen $J = 4$ paraméterrel ($M_{\rho c} = 2, M_\lambda = 2, \lambda_0, \lambda_{200}, \rho c_{p0}, \rho c_{p200}$) adtuk meg értéktáblázatos szemléletben az 1. táblázat adatainak megfelelően. (Az értéktáblázatos szemlélet esetén az adatpontok között lineáris interpolációt alkalmazunk. Ez jelen esetben lineáris hőmérsékletfüggést eredményez.) A relatív érzékenységi tényezők értékét $r = R_1$ és $r = R_2$ helyeken, mindkét esetben $K = 101$ hőmérsékleti pontban határoztuk meg. Az érzékenységi mátrix oszlopai az idő függvényében ábrázolva az 1. és 2. ábrákon láthatók. Megállapítható, hogy $r = R_1$ helyen (tehát a magnál lévő határpontban) a hőmérsékletek mind a 4 paraméter változására érzékenyebbek, mint $r = R_2$ helyen (a paláston lévő határpontban). A relatív érzékenységi tényezők mind a négy paraméter esetében 3-5-ször nagyobbak $r = R_1$ helyen, mint $r = R_2$ helyen. A térfogati hőkapacitás változására mindkét helyen érzékenyebbek a hőmérsékletek, mint a hővezetési tényező változására. Mind a négy paraméter hatással van a teljes időtartomány hőmérsékleteire, a folyamat végén mindegyik érzékenysége 0-hoz tart. A kapott függvények a lehűlési folyamat végétől eltekintve lineárisan függetlenek. Ezek alapján jó esély van a keresett 4 paraméter inverz megoldás során történő pontos meghatározására.

1. Táblázat A hővezetési feladat adatai az érzékenységi vizsgálatok során

	mag és palást		próbatest		
	0 °C	200 °C	0 °C	200 °C	
λ	16,2	16,2	0,24	0,18	W/(mK)
c_p	500	500	1833	2350	J/(kgK)
ρ	7917	7917	1200	1200	kg/m ³
T_0			200		°C
T_∞			0		°C
α			47,6		W/(m ² K)
R			25		mm
R_1			3		mm
R_2			23		mm
n_{cs}			26		-
τ_{max}			5000		s



1. ábra
4 paraméteres érzékenységi vizsgálat, $r=R_1$

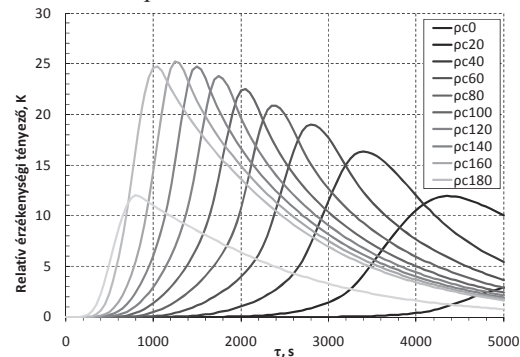


2. ábra
4 paraméteres érzékenységi vizsgálat, $r=R_2$

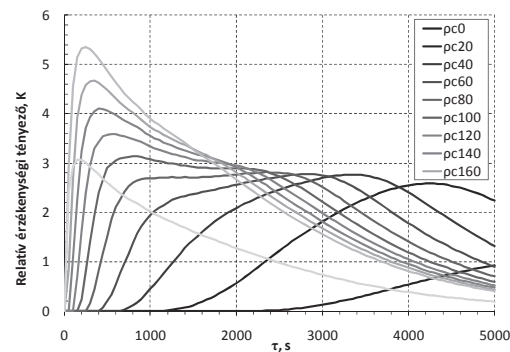
5. EREDMÉNYEK 22 ISMERETLEN PARAMÉTER ESETÉN

Ennél a vizsgálatnál a próbatest anyagjellemzőit összesen $J = 22$ paraméterrel ($M_{\rho c} = 11, M_{\lambda} = 11$ $\lambda_0, \lambda_{20}, \lambda_{40}, \dots, \lambda_{200}, \rho c_{p0}, \rho c_{p20}, \rho c_{p40}, \dots, \rho c_{p200}$) adtuk meg értéktáblázatos szemléletben. Az adatpontok mindkét anyagjellemző esetén az 1. Táblázat adatainak megfelelő egyenesre illeszkednek, tehát a hőmérsékletfüggés jellege itt is lineáris. Az előző vizsgálathoz képest az jelenti a különbséget, hogy itt egy paraméter (adatpont) megváltoztatása az anyagjellemző függvénynek csak egy kis tartományára van hatással (legfeljebb 40 °C). A relatív érzékenységi tényezők értékét $r = R_1$ és $r = R_2$ helyeken, mindkét esetben $K = 101$ hőmérsékleti pontban határoztuk meg. Az érzékenységi mátrix oszlopai az idő függvényében ábrázolva a 3., 4., 5. és 6. ábrákon láthatók. Megállapítható, hogy $r = R_1$ helyen (tehát a magnál lévő határpontban) a hőmérsékletek mind a 22 paraméter változására 3-5-ször érzékenyebbek, mint $r = R_2$ helyen (a palástonál lévő határpontban). A 4 paraméteres vizsgálatallal ellentétben mindkét anyagjellemző esetén azonos nagyságrendű relatív érzékenységi tényezők tapasztalhatók. A folyamat

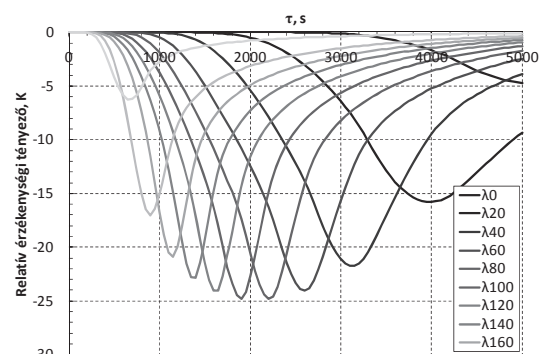
végén mind a 22 paraméter érzékenysége 0-hoz tart. A kapott függvények az adott paraméterre vonatkozó maximum környezetében lineárisan függetlenek, attól távolodva lineárisan nem függetlenek. Ez inverz meghatározásukat jóval nehezebbé teszi, mint a 4 paraméteres feladat esetén. Az egyes paramétereknek, a vártak megfelelően, főként helyi hatása van a hőmérsékleteloszlásra. A kezdeti és környezeti hőmérsékletre tartozó paraméterek megváltozása ($\lambda_0, \lambda_{200}, \rho c_{p0}, \rho c_{p200}$) csekély hatással van a hőmérsékleteloszlásra, a hozzájuk tartozó relatív érzékenységi tényezők maximális értéke kevesebb, mint fele a szomszédos paraméter hasonló értékének.



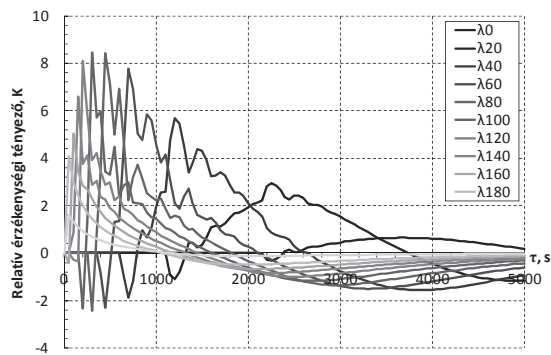
3. ábra
22 paraméteres érzékenységi vizsgálat
($r=R_1$)



4. ábra
22 paraméteres érzékenységi vizsgálat
($r=R_2$)



5. ábra
22 paraméteres érzékenységi vizsgálat ($r=R_1$)



6. ábra

22 paraméteres érzékenységi vizsgálat ($r=R_2$)

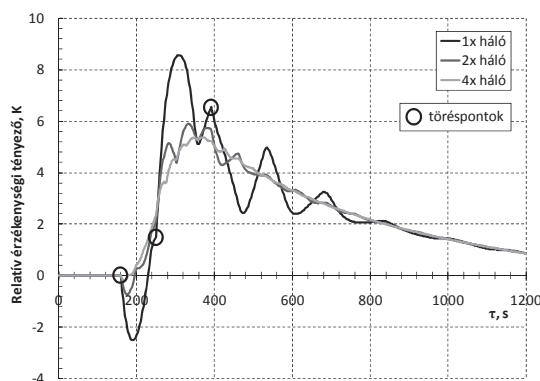
Ez alapján inverz meghatározásuk jóval nehezebb, mint a többi paraméteré. Így egy 0-200 °C-os tartományban elvégzett mérés alapján a 20-180 °C-os tartományban végezhető el megbízhatóan a kiértékelés. (A mérés hőmérséklettartományának alsó és felső 10%-ára vonatkozó becslült anyagjellemzőket figyelmen kívül kell hagyni.)

A 6. ábrán a relatív érzékenységi tényezők oszcilláló viselkedést mutatnak, mely nem felel meg az elvárt fizikai viselkedésnek, ezért itt újabb vizsgálatokra volt szükség. A λ_{100} paraméter érzékenységi vizsgálatát elvégeztük $K = 2016$ hőmérsékleti pontban. (Vegyük észre, hogy λ_{100} értékét $\varepsilon\lambda_{100}$ -zal eltolva a függvény már nem lineáris, 80, 100 és 120 °C-nál a görbében töréspont keletkezik, ahol deriváltja ugrásszerűen megváltozik.) Az eredmény a 7. ábrán látható (1x háló²). Az oszcilláló jelleg itt is megfigyelhető, azonban 3 töréspont van a görbében, azokban az időpillanatokban, amikor a hőmérséklet átlépi az anyagjellemző függvény töréspontjait. Az oszcilláció csak akkor tapasztalható, ha a $\lambda(T)$ függvényben töréspont van (tehát deriváltjában ugrásszerű változás van). Az előző két megállapításból arra következtetünk, hogy az oszcilláció oka a $\lambda(T)$ függvényben lévő töréspont.

Ez azonban a $\lambda(T)$ függvény értéktáblázatos megadása esetén elkerülhetetlen. Az oszcilláció $\tau = 1400$ s környékén lecseng, továbbá $r = R_1$ helyen egyáltalán nem tapasztalható. Az ε értékét nagyobbra választva a függvény jellege nem változik, a függvényértékek a változás mértékével arányosan nőnek. Ebből az következik, hogy bizonyos $\lambda(T)$ függvények esetén a lehülési folyamat során növekvő hőmérséklet is adódhat, ami a helytelen fizikai kép

² Az 1x háló az 1. táblázatban definiált hálót jelenti (26 csomópont), a 2x és 4x háló esetén rendre 51 és 101 csomóponttal végeztük a számítást.

mellett numerikus számítási problémákat is okozhat. Az oszcilláció két módon csökkenthető. Egyrészt a háló sűrítésével, de még négyszeres hálósűrítéssel sem szüntethető meg teljesen (7. ábra). A másik megoldás, hogy az inverz megoldás során a $\lambda(T)$ függvényre bizonyos kritériumokat fogalmazzunk meg. Pontossági vizsgálatokon keresztül megállapítottuk, hogy $\lambda(T)$ függvény abszolút meredekségére és a meredekség változások összegére vonatkozó határérték bevezetésével az oszcillációs hiba megfelelő mértékben csökkenthető. A $\lambda(T)$ függvény értéktáblázatos formában történő megadása tehát pontossági problémát vet fel. A négyszeres hálósűrítés esetén négyszer több csomópontban 16-szor több időpillanatban kell elvégezni a számítást, ami 64-szeres számítási időt eredményez, és a hiba még ebben az esetben sem csökken 0-ra. Mivel az oszcillációs hiba a teljes időtartománynak csak egy részében jelentkezik és a magnál lévő határpontban nem tapasztalható, az inverz megoldás során az oszcillációs hiba alacsony tartása érdekében a $\lambda(T)$ függvényre vonatkozó kritériumok megfogalmazását javasoljuk.



7. ábra

A λ_{100} paraméter érzékenységi vizsgálata különböző hálósűrűség mellett, $r=R_2$

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az érzékenységi vizsgálatok során a $\lambda(T)$ és $\rho c_p(T)$ függvényeket értéktáblázatos szemléletben definiáltuk, egyik esetben 2-2, másik esetben 11-11 adatponttal. A 4 paraméteres vizsgálat kapcsán tett legfontosabb megállapítások:

- a relatív érzékenységi tényezők az összes paraméter esetén 3-5-ször nagyobbak $r = R_1$ helyen, mint $r = R_2$ helyen,
- a kapott függvények a lehülési folyamat végétől eltekintve lineárisan függetlenek. Ezek alapján jó esély van a keresett 4 paraméter inverz megoldás során történő pontos meghatározására.

A 22 paraméteres vizsgálat kapcsán tett legfontosabb megállapítások:

- a paramétereknek főként helyi hatása van a hőmérsékleteloszlásra, egy 0-200 °C-os tartományban elvégzett mérés alapján a 20-180 °C-os tartományban végezhető el megbízhatóan a kiértékelés, tehát a mérés hőmérséklettartományának alsó és felső 10%-ára vonatkozó becsült anyagjellemzőket figyelmen kívül kell hagyni.
- a kapott függvények a maximum környezetében lineárisan függetlenek, attól távolodva lineárisan nem függetlenek, ez inverz meghatározásukat jóval nehezebbé teszi, mint a 4 paraméteres feladat esetén,
- a $\lambda(T)$ függvényben lévő töréspont $r = R_2$ helyen oszcillációt okoz a hőmérsékletben, mely a háló sűrítésével, vagy a $\lambda(T)$ függvényre megfogalmazott kritériumokkal csökkenthető, a gyorsabb számítás érdekében a kritériumok alkalmazását javasoljuk.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

A kutatást az OTKA 82024-es számú pályázata támogatta.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ÖZISIK, M. N., ORLANDE, H. R. B.: Inverse Heat Transfer: fundamentals and applications, Taylor & Francis, New York, 2000.
- [2] GARCIA, S.: Experimental design optimization and thermophysical parameter estimation of composite materials using genetic algorithms, PhD thesis, 1999.
- [3] KISS L.: Hővezetési anyagjellemzők meghatározása, Kandidátusi értekezés, 1983.
- [4] CZÉL, B., GRÓF, GY.: Genetic Algorithm-Based Method for Determination of Temperature-Dependent Thermophysical Properties, International Journal of Thermophysics, 30/6, 2009.
- [5] CZÉL, B., GRÓF, GY.: A térfogati hőkapacitás hőmérsékletfüggésének meghatározása tranziens hőmérsékletmérésből, Energiagazdálkodás, 50/4, 2009.

ANYAGÁTADÁSI TULAJDONSÁGOK VIZSGÁLATA KÉN-DIOXID LEVÁLASZTÁSÁNÁL

MASS TRANSFER PROPERTIES AT SULFUR DIOXIDE CONTROL

Bothné dr. Fehér Kinga*, Dr. Örvös Mária**

ABSTRACT:

In numerous industrial cases absorption process is applied for reducing sulfur-dioxide emission. For calculation the height of the absorber, gas- and liquid side mass transfer coefficients are required, that can be determined by measurements for different packing shape. These mass transfer properties for fluid-spherical-shape packing were compared with dates found in literature.

1. BEVEZETÉS

Gáz halmazállapotú szennyezőanyagok az energiatermelés és felhasználás, különböző ipari tevékenységek, valamint meghibásodások következtében kerülnek a környezetbe.

A levegő legfontosabb gáz-halmazállapotú szennyezőiként említhetők: SO₂, SO₃, H₂S, NO, NO₂, NH₃, HF, HCl, Cl₂, CO, CO₂, egyéb szénhidrogének, aldehidek, ketonok, merkaptánok stb.

A levegőt szennyező gáz komponensek a hordozógázban (levegőben vagy füstgázban) kisebb vagy nagyobb koncentrációban találhatók. A hordozógáztól való elkülönítésük, leválasztásuk, emissziós határértékre történő csökkentésük legtöbbször valamilyen más közeggel történő érintkezéssel valósítható meg. Erre a feladatra például valamilyen nedvesítő közeg alkalmazható. E művelet során különböző fázisokat – könnyű és nehéz fázist - hozunk érintkezésbe egymással. Folyadékban történő elnyeletésnél – abszorpciónál - a könnyű fázist a gázelegy, a nehéz fázist a folyadék alkotja.

A gázabszorpció olyan szétválasztási művelet, amelynél a gázelegyet folyadékkal érintkeztetjük, és ennek következtében a gáz egy vagy több komponense a folyadékba diffundál és ott elnyelődik. Abszorpció során a gáz és a folyadékrészek fizikai kötést vagy kémiai kötést hozhatnak létre, eszerint különböztethetünk meg fizikai abszorpciót vagy kémiai reakcióval kísért abszorpciót: kemisorpciót.

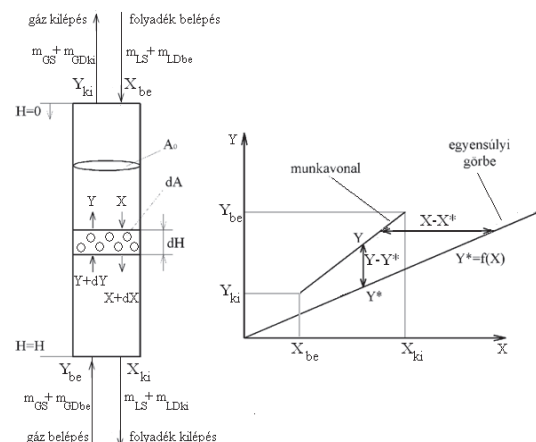
Abszorberek méretezésénél, a tisztítandó gáz koncentráció megkívánt változását biztosító készülék magasság meghatározásához elengedhetetlenül fontos az anyagátadási jellemzők ismerete. Ezek meghatározása különböző-gáz folyadék rendszerekre, valamint töltet típusokra kísérleti módszerekkel lehetséges.

2. ANYAGÁTADÁS ELMÉLETE

Az abszorpció folyamata jól modellezhető és vizsgálható a fázisok közötti anyagátbocsátással. Az átbecsítés során a diffundáló komponens az egyik fázisból a másik fázisba lép át, ott elnyelődik. A diffúzió annál jobban megy végbe, minél jobb érintkezést sikerül biztosítani a fázisok között. A folyadék és a gáz érintkezési felületének növelése érdekében a készülékbe töltetet vagy tányérokat helyeznek el. A töltetes oszlopokban az abszorpció a töltetek felületén folytonos fázisérítkezéssel valósul meg, míg a tálcás/tányéros oszlopokban az érintkezétes fokozatszerű [1,2,3].

Folytonos fázisérítkezétes megvalósító készülékek-nél a könnyű és a nehéz fázis ellenáramban áramlik, folyamatos érintkezés valósul meg a készülékben, azaz működés szempontjából a készülék egyes helyein az időtől függetlenül mindig ugyanaz a koncentráció alakul ki. Az 1. ábrán látható ellenáramú érintkeztető modelljénél a fázisok érintkeztetését a tölteléktestek valósítják meg. A töltet feladata fázisok érintkező felületének megnövelése, amely alkalmazásával az anyagátadás lényegesen javítható. A töltet jellemző tulajdonsága az ún. fajlagos érintkező felület, mely a térfogategységben lévő érintkező felülettel definiálható:

$$a = \frac{dA_{\dot{c}}}{dV} = \frac{dA_{\dot{c}}}{A_0 dH} \quad (1)$$



1. ábra Folytonos fázisérítkezétes modellje, az egyensúlyi görbe és a munkavonal kapcsolata

* egyetemi adjunktus, BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás technika Tanszék

** egyetemi docens, BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás technika Tanszék

A fázisok közötti diffúziós áram - a koncentráció megadásától függően - többféleképpen is értelmezhető. Az anyagáram mólarány koncentrációkkal:

$$N = K'_G(Y - Y^*) = K'_L(X^* - X) \quad (2)$$

ahol

$$Y = \frac{G_D}{G_S} = \frac{\frac{m_{GD}}{M_D}}{\frac{m_G}{M_G}}$$

$$X = \frac{L_D}{L_S} = \frac{\frac{m_{LD}}{M_D}}{\frac{m_L}{M_L}}$$

A vizsgált dA felületen a diffundáló komponens árama felírható a könnyű (gáz) fázis és a nehéz (folyadék) fázis oldaláról is:

$$N \cdot dA = d(G_S \cdot Y) = K'_G(Y - Y^*)dA_\epsilon \quad (3)$$

$$N \cdot dA = d(L_S \cdot X) = K'_L(X^* - X)dA_\epsilon \quad (4)$$

A **gázfázis oldaláról** (2) és (3) egyenletek felhasználásával:

$$G_S dY = K'_G(Y - Y^*)aA_0 dH \quad (5)$$

(5) egyenlet rendezésével, valamint a kijelölt határok között az integrálást elvégezve, az előírt koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság a gázfázis oldaláról értelmezett jellemzők felhasználásával $G_S = \text{áll}, K'_G = \text{áll}, a = \text{áll}, A_0 = \text{áll}$ esetén:

$$H = \int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{G_S}{K'_G a A_0} \int_{Y_{ki}}^{Y_{bc}} \frac{dY}{Y - Y^*} = H_{OG} \cdot N_{OG} \quad (6)$$

az egyesített gázoldali átviteli egységmagasság:

$$H_{OG} = \frac{G_S}{K'_G a A_0} = \frac{\frac{\dot{m}_G}{M_G} \rho_G}{K'_G a A_0 \rho_G} = \frac{\dot{m}_G}{K_G a} \quad (7)$$

az egyesített gázoldali egységszám:

$$N_{OG} = \int_{Y_{ki}}^{Y_{bc}} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (8)$$

Hasonlóképpen a **folyadékfázis oldaláról** is - (2) és (4) egyenlet felhasználásával - meghatározható a koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság:

$$L_S \cdot dX = K'_L(X^* - X)a \cdot A_0 \cdot dH \quad (9)$$

Az előírt koncentráció változáshoz szükséges töltet magasság a folyadékfázis oldaláról értelmezett jellemzők felhasználásával, abban az esetben, ha

$L_S = \text{áll}, K'_L = \text{áll}, a = \text{áll}, A_0 = \text{áll}$:

$$H = \int_{H=0}^{H=H} dH = \frac{L_S}{K'_L a A_0} \int_{X_{bc}}^{X_{ki}} \frac{dX}{X^* - X} = H_{OL} \cdot N_{OL} \quad (10)$$

az egyesített folyadékoldali átviteli egységmagasság:

$$H_{OL} = \frac{L_S}{K'_L a A_0} = \frac{\frac{\dot{m}_L}{M_L} \rho_L}{K'_L a A_0 \rho_L} = \frac{\dot{m}_L}{K_L a} \quad (11)$$

az egyesített folyadékfázis oldali egységszám:

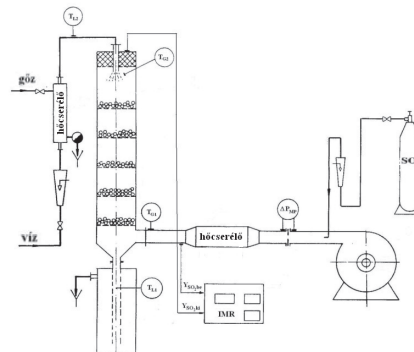
$$N_{OL} = \int_{X_{bc}}^{X_{ki}} \frac{dX}{X^* - X} \quad (12)$$

Az anyagátadás jellemzésére a gáz- és folyadékoldali átviteli egységmagasságokat (H_{OG} , H_{OL}) valamint a térfogati anyagátbocsátási tényezőket (K_{GA} ; K_{LA} illetve K'_G ; K'_L) alkalmazzák.

Folyadékban jól elnyelődő gázok esetén a gázoldali diffúziós ellenállás a meghatározó, ezért a folyamatot a gázoldali jellemzőkkel vizsgálják (H_{OG} , K_{GA}). Folyadékban rosszul elnyelődő gázok esetén a folyadékoldal diffúziós ellenállása a meghatározó, ezért ebben az esetben a folyamat jellemzésére a folyadékoldali jellemzőket alkalmazzák (H_{OL} , K_{LA}). Azokban az esetekben, amikor a gáz- és a folyadékoldal ellenállása összemérhető (ilyen a kén-dioxid vízben történő abszorpciója), a gázoldali és a folyadékoldali diffúziós jellemzők ismerete is szükséges.

3. Kísérleti módszer

A kén-dioxid leválasztás kísérleti vizsgálatához kialakított mérőállomás vázlatát a 2. ábrán látható.



2. ábra Kísérleti berendezés

A fluid diszperz elven működő (FDC) kolonna alkalmazási lehetőségeit és működési jellemzőit [4] és [5] ismerteti. A 130 mm átmérőjű kolonnában 5 tálcán 70 mm-es nyugvó magasságú 14 mm átmérőjű polipropilén golyótöltet került elhelyezésre. A készülékben a folyadék- és a gázfázis ellenáramú érintkeztetés történik. A ventilátor által szállított levegőáram hatására a töltet fluid állapotba került, mely következtében jó fázisérítkezés valósul meg.

A légmennyiség mérésére szabványos kialakítású mérőperem, a betáplált folyadékmennyiség mérésére rotaméter szolgált. A SO₂ gáz egyenletes beadagolása gázpalackból történt, a be- és kilépő gázáram SO₂ tartalmát IMR komputeres gázkoncentráció mérő műszer mérte. A mérések során állandó gáz tömegáram és SO₂ koncentráció mellett, a folyadék tömegáramának változtatásával vizsgáltuk a leválasztási tulajdonságokat. A gázabszorpciós tulajdonságok hőmérsékletfüggésének megállapítása érdekében gáz- és folyadékoldali hőcserélők kerültek beépítésre.

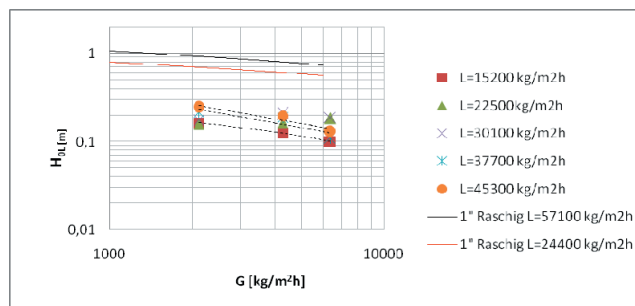
4. EREDMÉNYEK

A fluid állapotban lévő, gömb alakú töltet anyagátadási tulajdonságait a gáz- és a folyadékterhelés függvényében tüntettük fel. Kísérleteink során a toronykeresztmetszetre vonatkoztatott fajlagos folyadékterhelés $L=15\,000 - 45\,000 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ tartományban, míg a gázterhelés $G=2100 - 6400 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ tartományban változott.

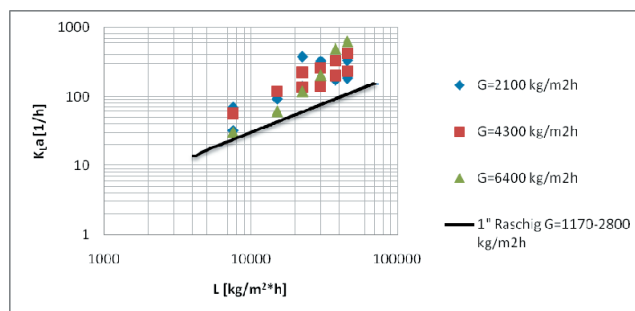
A 3. ábra a folyadékoldali átviteli egységmagasság H_{OL} változását mutatja a gázterhelés függvényében, állandó folyadékterhelések esetén. Az ábrán feltüntettük [6] irodalom 1"-os kerámia Raschig töltet $L=24400-57000 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ folyadékterhelés tartományára vonatkozó adatokat is. A 4. ábrán a folyadékoldali anyagátbocsátási tényező változása látható a folyadékterhelés függvényében, 2100-6400 $\text{kg/m}^2/\text{h}$ gázterhelés tartományban. Az összehasonlításként feltüntetett 1"-os kerámia Raschig töltetre a gázterhelési tartomány $G=1170 - 2800 \text{ kg/m}^2/\text{h}$. Megállapítható, hogy a kísérleteknél alkalmazott fluid állapotban lévő töltet lényegesen nagyobb gázterhelésnél működőképes, jobb anyagátadási tulajdonságok mellett.

5. és 6. ábrán a gázoldali átadási tulajdonságokat vizsgáltuk a gázterhelés illetve a folyadékterhelés függvényében. Kéndioxid vízben történő abszorpciójára vonatkozó gázoldali átviteli egységmagasság (H_{OG}) adatok [6] irodalomban M-Spirax töltetre találhatók $L=21200 - 46000 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ folyadékterhelés esetén.

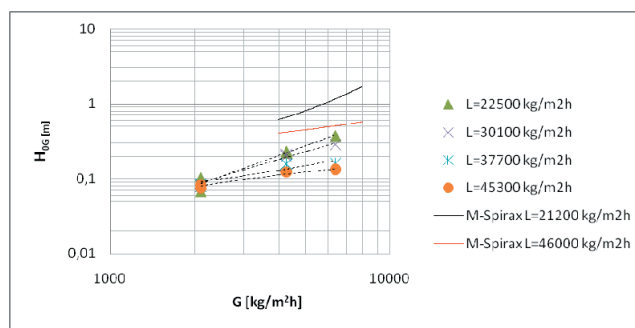
Az előírt kéndioxid koncentráció csökkentéséhez szükséges töltet magasságot meghatározó (6) és (10) összefüggések alapján látható, hogy a töltet anyagátadási tulajdonságai kis átviteli egységmagasság (H_{OG} , H_{OL}) és nagy anyagátbocsátási tényezők (K_{GA} , K_{LA}) esetén kedvezőek.



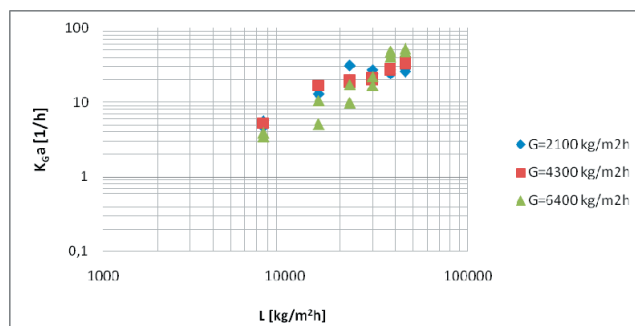
3. ábra Folyadékoldali átviteli egységmagasság a gázterhelés függvényében



4. ábra Folyadékoldali anyagátbocsátási tényező a folyadékterhelés függvényében



5. ábra Gázoldali átviteli egységmagasság a gázterhelés függvényében



6. ábra Gázoldali anyagátbocsátási tényező a folyadékterhelés függvényében

ÖSSZEFOGLALÁS

Kísérleti mérések alapján gáz- és folyadékoldali anyagátbocsátási jellemzőket (H_{OG} , H_{OL} , $K_G a$, $K_L a$) határoztunk meg, melyek lehetővé teszik a kéndioxid tartalmú gázok leválasztására szolgáló készülékek méretezését. Az eredményeket az irodalomban található más típusú töltetek anyagátadási jellemzőivel hasonlítottuk össze, mely alapján megállapítható, hogy a kísérleteknél alkalmazott fluid állapotban lévő töltet lényegesen nagyobb gázterhelési tartományban működőképes, jobb anyagátadási tulajdonságok mellett.

Jelölésjegyzék

a	- fajlagos érintkező felület	$[m^2/m^3]$
A_0	- a készülék üres keresztmetszet	$[m^2]$
dA_ϵ	- az elemi érintkező felület	$[m^2]$
dV	- az elemi térfogat	$[m^3]$
dH	- az elemi magasság	$[m]$
G	- fajlagos gázterhelés	$[kg/m^2/h]$
G_S	- gázfázis móláram	$[kmol/s]$
K'_G	- gázoldali anyagátbocsátási tényező	$[kmol/m^2/s]$
$K_G a$	- gázoldali térfogati anyagátbocsátási tényező	$[1/s]$
K'_L	- folyadékoldali anyagátbocsátási tényező	$[kmol/m^2/s]$
$K_L a$	- folyadékoldali térfogati anyagátbocsátási tényező	$[1/s]$

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] MCCABE W.L.-SMITH J.C.- HARRIOTT P.: Unit Operation of Chemical Engineering, McGraw Hill, 2005
- [2] PERRY R.H: Chemical Engineers' Handbook, McGraw Hill, 8th ed. 2008.
- [3] ÖRVÖS M.- BALÁZS T.- BOTH K.F.: Wastewater Treatment with Ammonia Recovery System; Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.34. 2008. (p. 562-566) ISSN 2070-3740
- [4] MOLNÁR K.: Three Phase Fluid Disperse Systems for Gas/Liquid Phase Countercurrent Contacting 4th World Congress of Chemical Engineering, Strategies 2000, Karlsruhe, Germany Preprints III. 8.2-13. (1991)

SUMMARY

Gas and liquid side mass transfer coefficients were determined by experiment that makes possible dimensioning of equipment for reducing SO_2 emission. Results were compared with different packing based on literature.

L	- fajlagos folyadékterhelés	$[kg/m^2/h]$
L_S	- folyadékfázis móláram	$[kmol/s]$
H	- töltetmagasság	$[m]$
\dot{m}_G	- gázfázis tömegárama	$[kg/s]$
\dot{m}_L	- folyadékfázis tömegárama	$[kg/s]$
M	- móltömeg	$[kg/kmol]$
N	- anyagáram sűrűség	$[kmol/m^2/s]$
X	- folyadék mól arány koncentráció	$[kmol SO_2/kmol víz]$
Y	- gázfázis mól arány koncentráció	$[kmol SO_2/kmol levegő]$
Indexek		
D	- diffundáló komponens	
G	- gázfázisra utaló	
ϵ	- érintkező	
L	- folyadékfázisra utaló	
S	- nem diffundáló komponens	
*	- egyensúlyra utaló	

- [5] MOLNÁR K. - SZENTGYÖRGYI S. - SZABÓ L. - ALMÁDI J. Eljárás és berendezés gázok abszorpciójára, deszorpciójára és egyidejű gáz és porleválasztásra. Magyar szabadalom Lajstromszám: 187 187
A bejelentés napja: 1982. november 25.
- [6] GAS ABSORPTION MANUAL, NCE Nittetu Chemical Engineering Ltd. Tokyo, 1991.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

FÉKTUSKÓ-KERÉKABRONCS KAPCSOLAT KOPÁSI VISELKEDÉSE

WEAR BEHAVIOR OF A BRAKE BLOCK-WHEEL CONNECTION

Szücs János^{*}, Dr. Váradi Károly^{**}, Dr. Zobory István^{***}, Dr. Szabó András^{****}

ABSTRACT:

This manuscript presents the braking process experimental examination and simulation obtained from the 1:4 scale test bench of the Railway Vehicle and Vehicle-system Analysis Department, BME. The aim of the examination was to determine the wear propagation in the brake block during sequential brake processes. For modeling the wear process the Pödra type linear wear equation was applied. During the Finite Element simulation the test cycle was modeled in 100s time intervals while the thermal behavior and the effect of heat expansion were neglected. The completed values approximate well the measured values of wear during the tests.

1. BEVEZETÉS

A Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszéken telepített görgős súrlódásvizsgáló próbapad alkalmas 1:4 méretarányú kerék-féktuskó, valamint kerék-sín kapcsolat kísérleti vizsgálatára, akár a kerék futási szög változtatása mellett is. A kerék és a futási görgő (sín) egymáson való legördülését, a kerék tengelyére kifejtett, állandó függőleges kerékterhelés által létrehozott tangenciális súrlódó erő biztosítja.

A vizsgálat során egyoldali fékezést alkalmaztunk, ami azt jelenti, hogy a modell kereket egy oldalról, egy féktuskóval fékeztük. A tuskó kopását kívántuk kísérletileg meghatározni.

A laboratóriumi mérésekkel párhuzamosan véges-elemes számításokat is végeztünk a kopás szimuláció módszerének fejlesztése érdekében.

2. A MÉRÉSI FOLYAMAT LEÍRÁSA

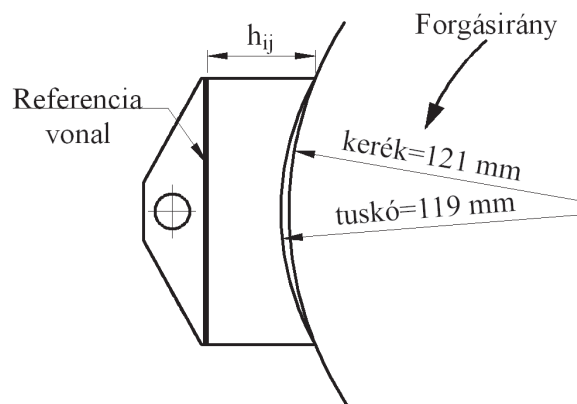
A vizsgálatok során egy a napjainkban is használt P10-es anyagú, 1:4-es léptékű féktuskó kopását határoztuk meg. A kapcsolódó kerék anyaga S235JR általános acél, melynek geometriája annyiban eltér a valós méretű keréktől, hogy felülete hengeres, nem pedig kúpos kialakítású. A féktuskó és a modellkerék anyagtulajdonságait az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A tuskó és a kerék anyagjellemzői

Féktuskó	P10	MÁV SZ 2650-2:2008
Jelölés	Tulajdonság	Érték
E_t	Rugalmassági modulus	$1,023 \times 10^5$ MPa
ν_t	Poisson tényező	0,25
Kerék	S235JR	MSZ EN 10025/99
E_k	Rugalmassági modulus	$2,1 \times 10^5$ MPa
ν_k	Poisson tényező	0,3

A kopás vizsgálatok során a kerék hengerfelületének sugara és a féktuskó kerékhez kapcsolódó hengeres felületének sugara eltérő volt a kiinduló állapotban (1. ábra), így a fékezés kezdeti pillanatában a féktuskónak csak a két szélső éle (belépő és kifutó él) kapcsolódott a kerék felületével. A féktuskó felületét a mérések előtt megmunkáltuk (10. ábra), így annak felületén később jól láthatóvá váltak a kialakult kopásnyomok. A modell kerék felülete, az előző mérések miatt, már némiképp kopott volt, de ez a féktuskó kopás szempontjából elhanyagolható.

A féktuskó koptatás futamának időtartama 100 s volt. A kezdeti szakaszban, a már fentebb említett érintkezés geometriai viszonyainak következtében, a kopási folyamat intenzívebb volt, melynek oka a súrlódó erő kis területre koncentrált fellépése a féktuskó kerékkel vett érintkezési felületén.



1. ábra Tuskó és kerék kezdeti geometriai viszonyai

* tanszéki mérnök, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék

** egyetemi tanár, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék

*** egyetemi tanár, BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék

**** egyetemi docens, BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék

A tuskó kopását alapvetően két paraméter befolyásolja fékezés közben, a két elem közötti relatív csúszási sebesség (modellkerék kerületi sebessége), valamint a fékezőerő (tuskóerő), melyek beállítására a próbapad alkalmas volt, az alábbiak szerint:

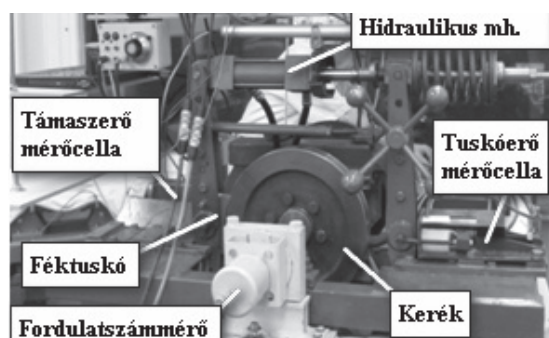
- a kerék kerületi sebessége (a hajtásrendszeren keresztül, egy fordulatszám-szabályozott egyenáramú motorral), amelynek értéke: 11,6 m/s.
- a tuskóerő (hidraulikus munkahengerrel egy nyomó rugón át), amelynek nagysága: 500 N.

A mérések során az alábbi mennyiségeket mértük:

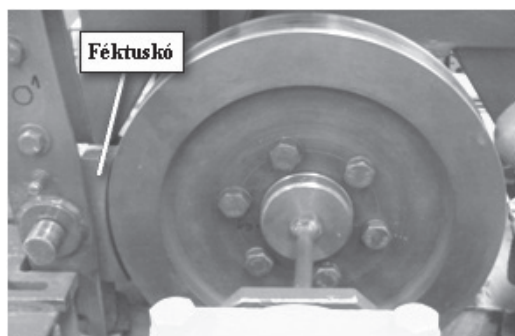
- a féktuskóerőt (erőmérőcella),
- kar áttételen keresztül kifejtett „támaszerőt” (erőmérőcella), amiből számítható a súrlódó erő és a súrlódási tényező értéke.

A mérésekből meghatároztuk a súrlódási tényező átlagos értékét, amely $\mu=0,34$ adódott, amelyet a későbbi végelelemes kopásszimuláció során felhasználtunk.

A mérési elrendezést a 2. ábra és a 3. ábra mutatja be.



2. ábra. Mérési elrendezés



3. ábra. Féktuskó és a modellkerék az 1:4 léptékű mérőpadon

3. FÉKTUSKÓ KOPÁSA

A féktuskó kezdeti alakjából adódóan várható volt a féktuskó gyors bekopása, amelyet a későbbi eredmények igazoltak is. Fékezéskor a kerék forgásának következtében, a tuskó felületének terhelése eltolódik a felület kb. felső kétharmadába, így ezen a tartományon a felület igénybevétele kb. 20%-kal megnövekszik az álló állapothoz képest, ezáltal ennek kopása nagyobb lesz, ez a későbbi mérésekből és számításokból is jól látható. A

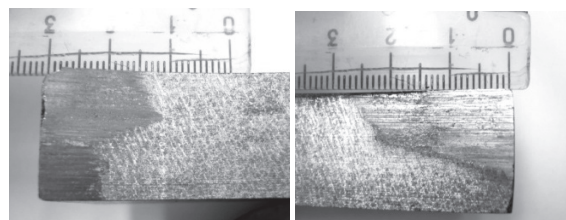
terhelésnek ez a változása a tuskó magassága mentén, a súrlódó erő visszahatásából adódik. A tuskó belépő éle, ami egyben a nagyobb terhelésű él is, (az 1. ábra alapján a felső éle a féktuskónak) lép először kapcsolatba a kerék felület „beérkező” pontjával, így a tuskó felső harmada, az ily módon kialakuló erőrendszer következtében, nagyobb erővel nyomódik a modellkerék felületéhez.

A féktuskó koptatási futama után szabad szemmel is jól láthatóan megkülönböztethetőek voltak egymástól a tuskó kopott felületei, és a kapcsolódásban még részt nem vevő felület rész. A féktuskón az első lépést követően kialakult kopási felületeket a 4. ábra és az 5. ábra mutatja.

A kopás nyomokból látható (5. ábra), hogy a tuskó és a modellkerék tengelyei nem voltak párhuzamosak egymással, vagy a féktuskó megmunkálása volt pontatlan a mérés előtt, így kissé ferde kopáskép alakult ki a kapcsolódási felületen.



4. ábra. Kopott felületek 100 s után



5. ábra. Kopott felületek 100 s után a két kopási terület kinagyításával

A későbbi koptatási futamok során, a tuskó teljes bekopásakor, a hibákból adódó kezdeti ferde kopási kép eltűnt, mivel a tuskó teljes felülete bekopott.

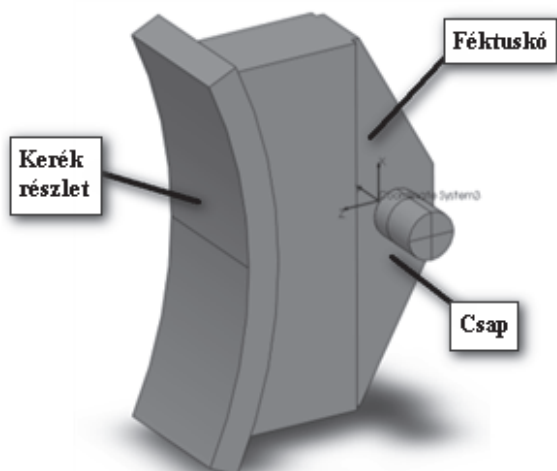
4. FÉKTUSKÓ KOPÁS MEGHATÁROZÁSA VÉGESELEMES MÓDSZERREL

1.1. A kopásszámításhoz használt geometriai és végelelemes modell

A végelelemes számításokhoz geometria modelleket készítettünk, valamint ezekből egy összeállítást, amelyek méretei megegyeznek a mérőpad elemeinek méretével. A végelelemes számításokhoz felhasználtuk a mérés során mért adatokat, a súrlódási tényezőt, tuskóerőt, valamint a korábban már említett anyagjellemzőket (1. táblázat).

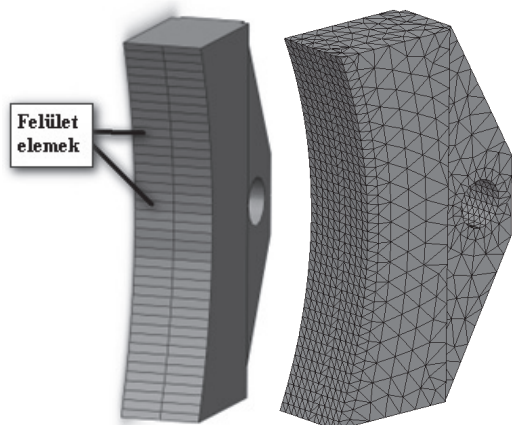
Az összeállítási modell tartalmazza a kerék egy részletét, a féktuskót, és a féktuskó pozícióját meghatározó csapszeget, amely az erőbevezetés módját könnyíti meg

a végeselemes peremfeltételek definiálásakor. A geometriai modellt a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A számíthatóhoz használt összeállítási modell

A tuskó felületének diszkrétizálása során, annak 119 mm sugarú kerékkel kapcsolódó felületét (1. ábra), 40 db egyenlő felület elemre osztottuk, ezek magassága 2,3 mm, ez megfelel a végeselemes számításokhoz készült háló (7. ábra) elemméretével, a kapcsolódási felületen. Szélessége a féktuskó szélességével megegyező nagyságú.



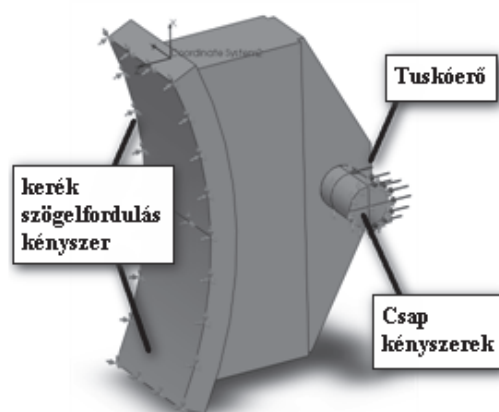
7. ábra. Féktuskó geometriai modell, a felosztott felülettel, és a tuskó hálózott modellje

2. táblázat. Végeselemes háló adatai

Elemméret	Globális:	5 mm
	Kerék, kapcsolódási felületén:	1 mm
	Tuskó, kapcsolódási felületén:	2,3 mm
	Csap, kapcsolódási felületén:	2 mm
	Tuskó furatában:	1 mm
	Csomópontok száma:	6732
	Elemek típusa:	4 csp. tetéder

A felosztásra azért volt szükség, hogy olyan felületet készíthessünk, amelynek méretei, a referencia vonalhoz képest, változtathatóak (1. ábra, 9. ábra $h_{i,j}$). Az így definiált méretek változásával a felület változtathatóvá válik a kopás szimuláció során. Így megvalósítható a végeselemes csomópontok mozgása. A modellt minden egyes számítási lépés után a számítási algoritmus újra hálózta (9. ábra), ezzel biztosítja az végelemek szabályosságát, pontosságát.

A modell stabilitása érdekében, a számításokban paraméterként jelen van az érintkező szerkezeti elemek egymáshoz képesti távolsága is (kerék-tuskó). Ez biztosítja, hogy a kopás hatására létrejövő méretkülönbség ellenére, a tuskó mindig érintkezzen a kerékkel, így nem alakul ki a tuskó merevtestszerű mozgása a kerék irányába. Az analízis során a kerékmodell szögelfordulása kvázi statikus ($\varphi=0,01^\circ$), de ez elegendő a fékezés során létrejövő terhelés eloszlás kialakulásához, ahhoz, hogy a súrlódó erő fellépjen (8. ábra). A kerék radiális irányban nem mozdulhat el. A féktuskó vízszintes irányban a nyomódik a kerék felé, miközben a csap függőlegesen rögzítve van.



8. ábra. A végeselemes számítás terhelései és peremfeltételei

1.2. Kopás számítása a Pödra modellel

A kopás számítás során csak a tuskó kopását számítjuk, mivel modellkerék anyagának keménysége jóval nagyobb, így a számítás időtartama alatt annak kopása elhanyagolhatóan kicsi.

A kopás mennyiségi meghatározására használt Pödra-féle lineáris kopás egyenletet az alábbi összefüggés írja le [1][2][4]:

$$\Delta h_{i,j} = w_s p_{i,j} v \Delta t, \quad (1)$$

ahol:

$\Delta h_{i,j}$ az i-edik csomópontban, a j-edik lépésben kialakult kopási növekmény [mm],

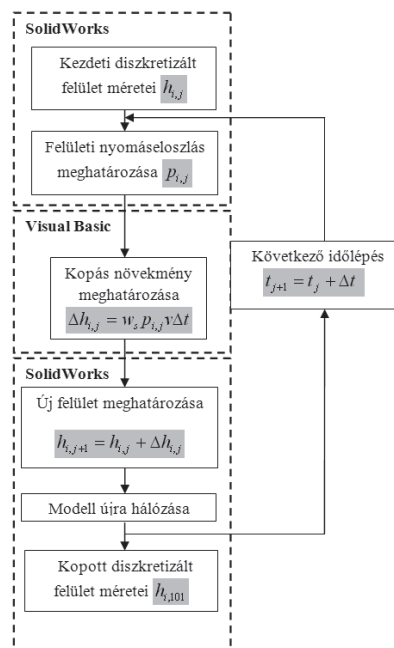
- $p_{i,j}$ az i-edik csomópontban, a j-edik lépésben ébredő normál feszültség értéke [MPa],
- w_s a mérésekből származtatott fajlagos kopási tényező $[1] \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$, melynek a számítások során felvett értéke $w_s = 0,129 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right]$ [3].
- Δt az időlépés, értéke 1 s,
- v a modellkerék kerületi sebessége $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.

A csomópontokhoz tartozó méretek változtatása egy a SolidWorks Simulation 2009 rendszerhez írt Visual Basic alkalmazással történt [5].

A program a beolvasott koordináta pontok, valamint a méretek alapján azonosítja a diszkrétizált felületek élére eső végeleemes csomópontokat. A csomópontokban ébredő érintkezési feszültségek alapján, meghatározza a kopásnövekményt az egyes időlépésekben, majd a növekmény értékével módosítja az adott csomóponthoz tartozó geometriai méretet (9. ábra). A számított geometriai méretek alapján módosítja a tuskó felületét, majd ezután újra hálózza a modellt.

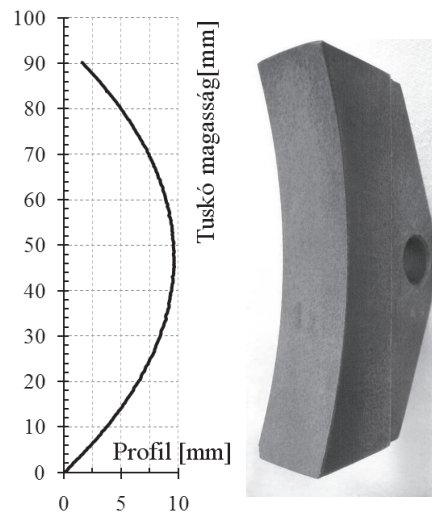
A 9. ábra jelölései az alábbiak:

- $h_{i,j}$ az i-edik csomópontban, a j-edik lépésben az adott felület elem élének aktuális mérete a referencia vonaltól [mm],
- t_j a j-edik időlépés [s],
- t_{j+1} a következő időlépés.



9. ábra. A kopászámítás elvi folyamatábrája

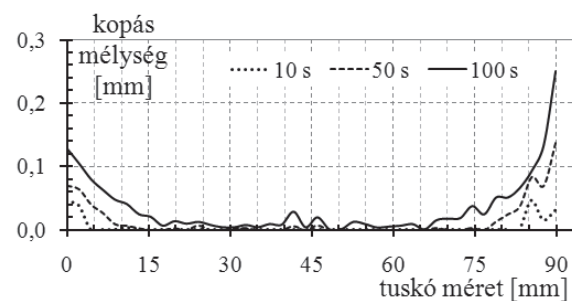
A kopásmélység szemléltetésére a tuskó kiinduló profiljának (10. ábra) és a számításból kapott profiljának különbségét határoztuk meg.



10. ábra. A tuskó kiinduló profilgörbéje és a kiinduló megmunkált felülete

Az ily módon végzett számítások eredményei a 11. ábra mutatja. A diagram a számítás 10-dik, 50-dik, és 100-dik időpillanataiban meghatározott kopásmélységet mutatja, (az eredeti profilhoz képest) a féktuskó hossza mentén, a tuskó közep vonalán.

Az ábra alapján látható, hogyan növekszik a kopási terület, valamint kopás mélység változása a fékezés során. A kopási kép a terhelés eloszlás eltolódása miatt aszimmetrikus lett, így a tuskó felső élének környezetében (diagram jobb oldala) annak kiterjedése nagyobb. Az aszimmetrikus kép egyben igazolja a végeleemes modell helyességét is, mivel az jól leírja a fékezés közben kialakult terheléseloszlásból adódó nagyobb kopás mértékét a tuskó felső kétharmadában.

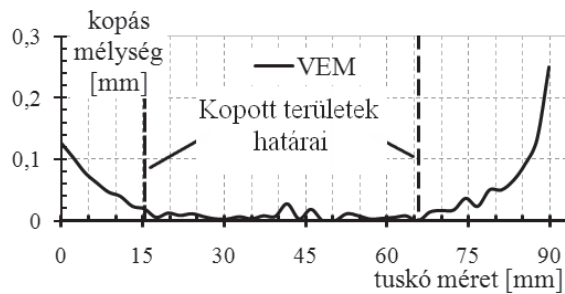


11. ábra. VEM-el számított kopásmélység 10 s, 50 s, és 100 s elteltével

5. MÉRÉSI ÉS SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZELETÉSE

A 12. ábra a futamra vonatkozó próbapadi és koptatási mérés eredmények összevetését mutatja a végeleemes számítás eredményeivel. Az ábra a számítással kapott

kopási mélységet mutatja folytonos vonallal, valamint a mérésből kapott kopott felület átlagos hosszmeretét, szaggatott vonallal.



12. ábra. Véges elemes számításokkal kapott, és mért értékek összehasonlítása 100 s esetén

A kapott eredményekről elmondható, hogy a számított és a mért értékek jól közelítik egymást, annak ellenére is, hogy a mérés maga nem elegendően pontos. A tuskó alsó felén, itt féktuskó kopásterület hosszirányú mérete kb. 15 mm. A nagyobb terhelésű oldalon, a tuskó felső kétharmadában a kopásterület hosszirányú mérete kb. 25 mm. A két számított kopásterület mértékből is látható a méréseknél tapasztalt terheléssel eltolódás, mely a mérési konfigurációban felvett állapotból adódik, és a súrlódó erő felléptével magyarázható.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A féktuskó kopásának meghatározása érdekében elvégzett mérések és számítások alapján meghatározható a tuskó fékezés hatására kialakuló kopott felületének nagysága. A számítások során alkalmazott Pödra-féle lineáris kopás modell alkalmas a nagy igénybe vételnek kitett alkatrészek kopásának számítására a modell újra hálózása mellett is. A továbbiakban, célszerű, olyan vizsgálatokat végezni, melyek figyelembe veszik a szerkezeti elemek hőmérséklet változását és hőtágulását is.

7. SUMMARY

Based on the tests and the computations regarding the wear of the brake block during steady braking the area of the worn surface of the brake block can be determined. The applied Pödra-type linear model –used during calculations - is suitable for wear calculation of machine elements receiving extreme loading with a remeshed mesh. Furthermore it is advisable to carry out such examination where the temperature change and the heat expansion of the element of the machine structure are considered.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

9. IRODALOM

- [1] P. PÖDRA, S. ANDERSSON: Simulating sliding wear with finite element method, Tribology International, Vol. 32, pp. 71-81, 1999
- [2] KÓNYA, L. – VÁRADI, K. – FRIEDRICH, K. – FLÖCK, J., Finite element modelling of wear process of a Peek-steel sliding pair at elevated temperature, Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Vol. 49, No. 1, Pp. 25-38 (2005)
- [3] ZOBORY I.: Vasúti féktuskó-kerékabroncs hőtani és kopási állapotának kapcsolt vizsgálata, BME Vasúti Járművek Tanszék kutatási zárójelentés, Budapest, 2008
- [4] KÓNYA LÁSZLÓ: PEEK / acél, csúszó pár kopásának szimulációja a hőfejlődés figyelembevételével, PhD értekezés, Budapest, 2004
- [5] CZABALAY LÁSZLÓ: Optimáló környezet fejlesztése és illesztése CAE környezetben, Diplomaterv, Budapest, 2009

KERÉKABRONCS-FÉKTUSKÓ KAPCSOLAT SÚRLÓDÁSI ÁLLAPOTÁNAK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA

FE ANALYSIS OF THE FRICTIONAL STATE OF A WHEEL-BRAKE BLOCK CONNECTION

Zwierczyk Péter*, Prof. Dr. Váradi Károly**

ABSTRACT

The FE analysis models the state when the brake system fails and the braking force exists in the time when the train departs. The FE model shows the brake block's displacements and the stress distribution in the initial sticking state and the transition onto the slip state.

1. BEVEZETÉS

A vasúti közlekedésben alkalmazott tuskós fékrendszer meghibásodása következtében előfordul, hogy a fékhatás a szerelvény elindulása után is fennáll. Ekkor a súrlódásból adódóan, a megcsúszás határhelyzetéig a tuskó-abroncs kapcsolat között tapadás figyelhető meg, melynek hatására a gördülő kerékkel a tuskó együtt mozdul el. A határhelyzet elérését követően, azaz azt a pontot meghaladóan ahol a súrlódásból származó tangenciális irányú feszültség eléri a megcsúszás határállapotához tartozó feszültség mértékét [1], a tuskó megcsúszik az abroncs felületén.

A készített modell segítségével feltárható az M1:4 méretarányú tuskó kisminta viselkedése, a kialakult feszültségeloszlás az egyes állapotok esetében valamint az elmozdulások.

2. A VEM MODELL

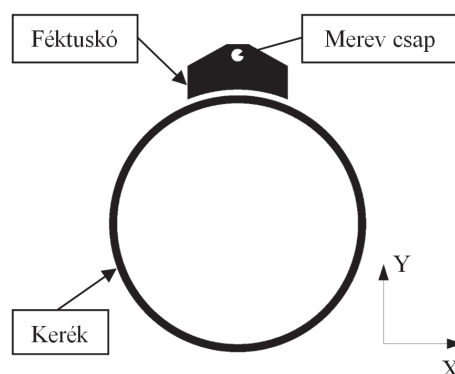
Az analízis során egy 235,9 mm átmérőjű, 30 mm széles abroncsot, valamint egy 121,5 mm ívsugarú 20 mm széles féktuskót nyomtunk egymásnak. A felmerült problémát 2D-s modell segítségével vizsgáltuk. A rövidebb számítási idő érdekében az abroncsot egy egyszerű körgyűrűként modelleztük, az elhanyagolásokat, a valóság közelítése érdekében peremfeltételekkel helyettesítettük.

*M.Sc. Gépészmérnök hallgató, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék
** egyetemi tanár, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék

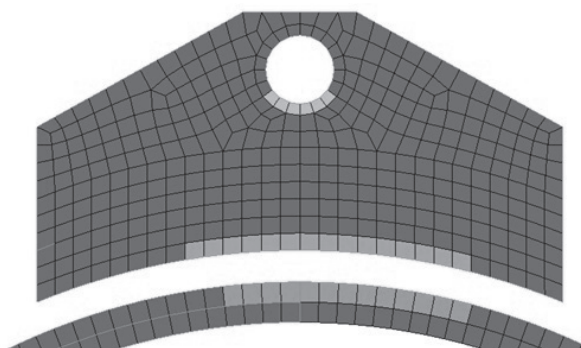
2.1. A 2D-s háló felépítése

A kiinduló szerkezeti modellt az 1. ábra szemlélteti. A modellezés során 3,4 mm globális elemméretű hálót alkalmaztunk. A számítás pontosságának fokozása érdekében az érintkezési tartomány környezetében adaptív háló került kialakításra a 2. ábrán jelölt helyeken. Ennek köszönhetően lokálisan az elemméret 0,0265 mm-re csökkent, amely 7. szintű adaptív hálót jelent. Mind az abroncs, mind pedig a féktuskóhoz négy csomópontos négyszög elemeket használtunk.

Az analízis során, a tuskót tartó csap tökéletesen merev testként került lemodellezésre.



1. ábra. A kiinduló szerkezeti modell



2. ábra. A végeselemes háló felépítése az adaptív hálósűrítés tartományaival

2.2 Az anyagjellemzők meghatározása

A modellezés során figyelembe vettük, hogy a valóságban az egyes alkatrészek milyen anyagból készülnek. Az abroncs anyaga A38-as szénacél, míg a féktuskót P14-es öntöttvasból készítik. Az egyes anyagokra vonatkozó mechanikai tulajdonságokat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Anyagok mechanikai tulajdonságai

Anyagtulajdonságok (abroncs – A38 szénacél)	
Rugalmassági mod.:	200000 MPa (25°C-on)
Poisson tényező:	0,3
Sűrűség:	7860 kg/m ³ (25°C-on)
Anyagtulajdonságok (tuskó – P14 öntöttvas)	
Rugalmassági mod.:	102310 MPa (25°C-on)
Poisson tényező:	0,25
Sűrűség:	7150 kg/m ³ (25°C-on)

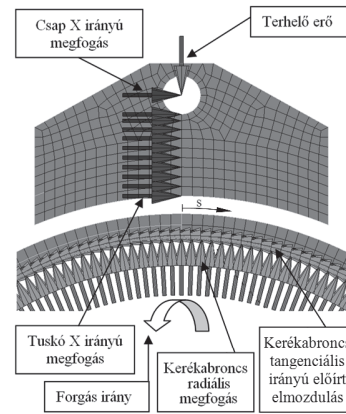
A vizsgálat során két érintkező test között definiált súrlódási tényező értéke $\mu=0,384$, amely a hőmérséklet, valamint a forgási sebesség függvényében nem változik, konstans érték.

2.3 Peremfeltételek és terhelések

A vizsgálat során a terhelő erő mértéke 500 N volt. Az előírt terhelést – mint Y irányú erőt - egy kontrollpont segítségével közvetlenül a terhelést átadó csapra adtuk rá. A csapot, vízszintes irányú elmozdulás ellen egy X irányú, fix megfogással rögzítettük. A vizsgálat időtartama 280 másodperc volt. A felterhelés a vizsgálati idő első 2 másodpercében történik, ezt követően a terhelés az analízis végéig állandó maradt.

Az abroncs esetében a belső felületen radiális irányú megfogást alkalmaztunk. A tuskó esetében a középső csomópontsört X irányban rögzítettük elmozdulás ellen a statikus felterhelés folyamán a modell stabilizálása érdekében. Ez a megfogás a forgás megindulását követően deaktiválódik.

A második másodperc után a kerék elkezd igen lassan forogni. A forgást az abroncs belső felületén alkalmazott tangenciális irányú megfogások előírt elmozdulása biztosítja. Ezt követően 2. másodperctől a 280. másodpercig lineárisan növekszik a forgási sebesség. Ezzel a vizsgálat végére eléri a $1,857 \cdot 10^{-3}$ mm/s-ot, amely összesen $\sim 0,27$ mm elmozdulást, valamint $2,171 \cdot 10^{-3}$ rad-os elfordulást eredményez a keréken. A peremfeltételek az 3. ábrán láthatóak.



3. ábra. Az alkalmazott peremfeltételek

3. A VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

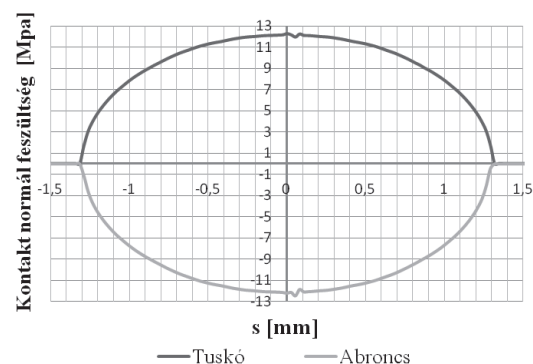
3.1 A vizsgálati eredmények 0-2 másodpercig terjedő intervallumban

A statikus felterhelés szakaszában megvizsgáltuk a két érintkező felület között ébredő, Y irányú kontakt normál feszültséget. A feszültség eloszlást a 4. ábra szemlélteti. A vártak megfelelően a feszültség a Hertz elméletnek megfelelő eloszlás szerint alakult. A maximális érintkezési feszültség 12,27 MPa-ra adódott.

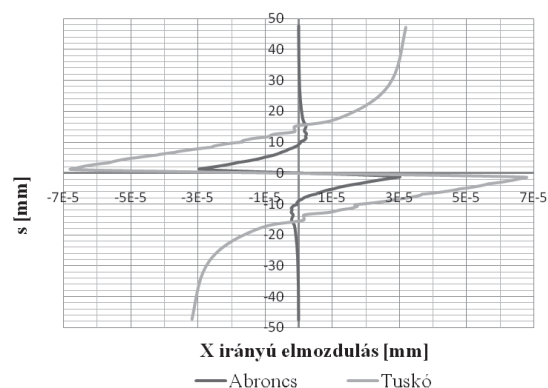
A 5. ábra a tuskó abroncs kapcsolat érintkezési tartományában közelében található csomópontok X irányú elmozdulását szemlélteti. Az ábrából kiolvasható, hogy az érintkezési tartományban mind a tuskó, mind pedig az abroncs csomópontjainak elmozdulása azonos mértékű. A diagramok segítségével könnyen belátható a kezdeti tapadás a két test között.

A 6. ábra a tuskó, valamint a féktuskó Y irányú elmozdulását szemlélteti.

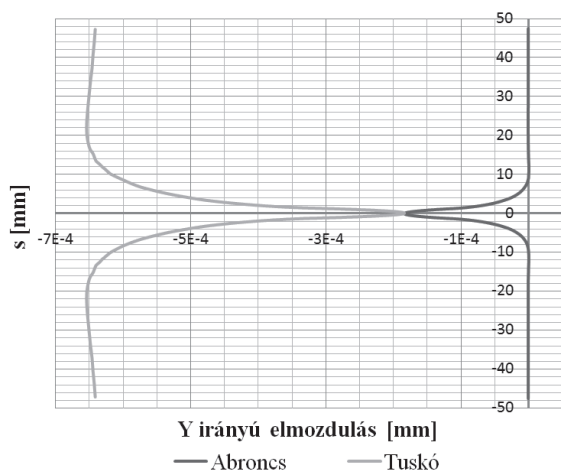
A modell eredményeinek validálása céljából analitikus számításokat végeztünk. Ennek eredményeit a 2. és 3. táblázatok foglalják össze. Az eltérés csupán $\sim 2,3\%$ az érintkezési feszültség, illetve $\sim 2\%$ az érintkezési tartomány esetén, így a végeelem modell kellően pontosnak tekinthető.



4. ábra. A kontakt normál feszültség eloszlása az s körív mentén (lásd 3. ábra)



5. ábra. Az érintkezési tartomány környéki csomópontok X irányú elmozdulása



6. ábra. Az érintkezési tartomány környéki csomópontok Y irányú elmozdulása

2. táblázat. Számítások eredményei I.

Abroncs - tuskó érintkezési feszültség (MPa)	
2D VEM vizsgálat	Analitikus számítás
12,27	11,989
Eltérés mértéke:	~2.3 %

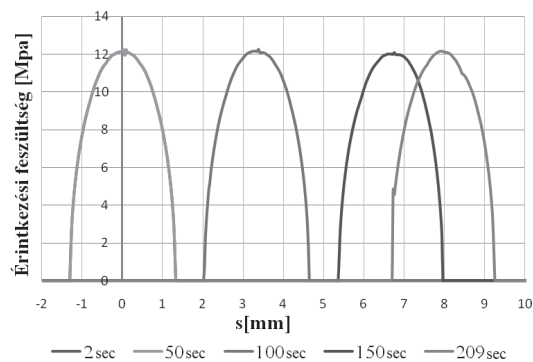
3. táblázat. Számítások eredményei II.

Abroncs - tuskó érintkezési tartomány (mm)	
2D VEM vizsgálat	Analitikus számítás
2,6	2,654
Eltérés mértéke:	~2 %

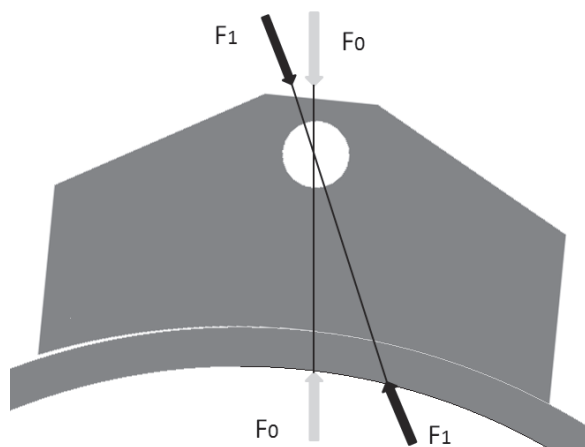
3.2. A vizsgálati eredmények a 2-280 másodpercig terjedő intervallumban

A második másodpercet követően az abroncs elkezd forogni. A vizsgálat során a forgás megkezdésétől a megcsúszás pillanatáig 50 másodpercenként, valamint a 209. másodpercben lekérdezésre került a feszültség eloszlás az érintkezési tartományban. Az így kapott görbéket a 7. ábra szemlélteti. Látható, hogy az érintkezési nyomáseloszlás görbék jelentős mértékben eltolódnak a forgásiránnyal ellentétes irányba.

A feszültség maximális értéke közel azonos a felterhelési szakaszban számított értékkel. A 209. másodpercben bekövetkezik a kerék megcsúszása, így az azt követő időtartományban, a nyomáseloszlás már nem tolódik tovább a féktuskóhoz viszonyítva. A 8. ábrán látható a tuskó-abroncs kapcsolat deformált alakja 100x-os nagyításban. Látható, hogy a nagymértékű nyomáseloszlás vándorlás oka a tuskó elfordulása a kezdeti pozícióhoz képest, amelynek hatására a három érintkező test kezdeti erőegyensúlya (F_0) az elfordulás mértékének megfelelően elmozdul (F_1).



7. ábra. Feszültség eloszlása a forgás megkezdése után



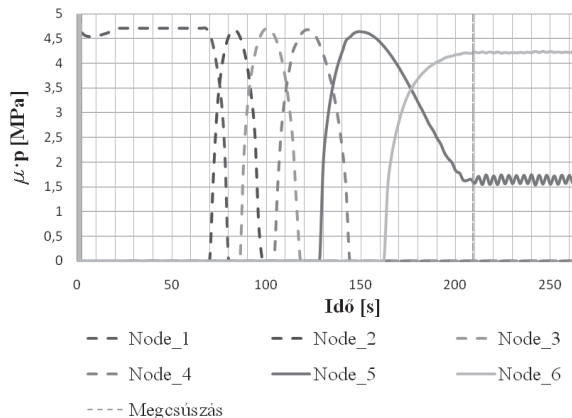
8. ábra. Erőegyensúlyok a deformált alakon

A megcsúszás szemléltetésére lekérdezésre került a tuskó kezdeti érintkezési tartományának közepontjában található csomópont X irányú elmozdulása (9. ábra). A kerék forgásának megindulását követően látható, hogy a csomópont elmozdul, majd a 209. másodperc környezetében, bekövetkezik a tuskó megcsúszása. Ezt követően a csomópont egy helyben marad, az elmozdulás konstans értéket vesz fel.

Az abroncs-tuskó átmérőkülönbségéből adódóan, a kezdetben érintkezésben lévő csomópontok a megcsúszás időpillanatában már az érintkezési tartományon kívül esnek, ezzel egy időben azonban újabb csomópontok lépnek be a kontaktba. Ezt a folyamatot szemlélteti a normális irányú feszültség (10. ábra), valamint a súrlódásból származó, tangenciális irányú feszültség az idő függvényében (11. ábra).



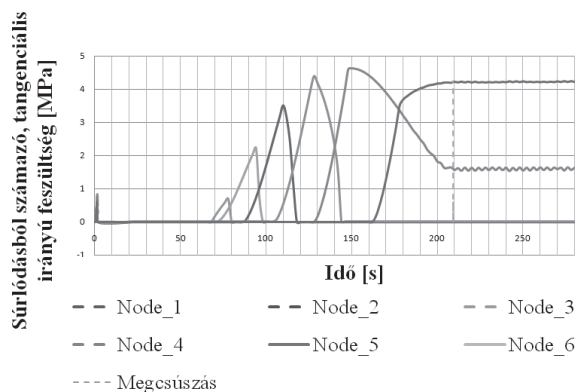
9. ábra. A tuskó kezdeti érintkezési tartományának, középső csomópontjának elmozdulása



10. ábra. A $\mu \cdot p$ feszültség értékének alakulása az idő függvényében

Az ábrából kiolvasható, hogy az egyes belépő csomópontokban egyre nagyobb feszültség ébred. Azonban ez a feszültség érték még nem elegendő a csúszás megindításához. A megcsúszást követően a súrlódásból származó feszültség értéke konstans értéket vesz fel.

Az imént bemutatott jelenség a $\mu \cdot p$ feszültségeloszlás esetén is megfigyelhető. Látható, hogy az egyes csomópontok érintkezésbe kerülnek majd az idő múlásával kilépnek a kontaktból. A megcsúszást követően a $\mu \cdot p$ érték is konstans értéket vesz fel.



11. ábra. A súrlódásból származó, tangenciális irányú feszültség az idő függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredményekből látható, hogy a megalkotott modell alkalmas a vasúti kerékbroncs-féktuskó kapcsolat súrlódási állapotának vizsgálatára. A kidolgozott modell a megcsúszás kialakulását foglalja össze az MSC.MARC szoftver elmozdulás vezérelt Coulomb súrlódási törvénye szerint. A feladat igényesebb megoldását, amely tartalmazza a stick-slip jelenségének vizsgálatát is a következő időszakban tervezzük kidolgozni.

5. SUMMARY

It can be seen from the results that the this way created model is suitable for the analysis of frictional state of the brake block-wheel connection. The established model involves the formations of slip according to the MSC. Marc software's displacement controlled Coulomb frictional law. In the future we are planning to work out the solution of the task including the examination of the stick-slip phenomenon in a more sophisticated way.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

7. IRODALOMJEGYZÉK

[1] K.L. JOHNSON: Contact mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1984

EGY KORSZERŰ GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA: A LÉZERES MIKROMEKGUNKÁLÁS

A MODERN MANUFACTURING TECHNOLOGY: LASER MICROPROCESSING

Dr. Samu Krisztián*, Góz Attila**

1. ABSTRACT

Today laser processing is gaining ground in industrial applications, specially the micro-processing. Lasers can be used in several processing tasks - mainly in cutting - because they offer many advantage compared to other manufacturing methods. It allows us to produce high precision parts, with a small size-tolerance, thanks to the small beam radius. This method is reliable, precise, and safe. Heat and energy input is well controlled. There are no tools with great load, or abrasion. Complex contours can be cut fast and simply, processing time is short. The procedure can be automated, so we can reach economic manufacturing. Special products - stents for example - can be manufactured effectively with this technology.

2. BEVEZETÉS

A lézer szó hallatán nagyon sok különböző műszaki felhasználás juthat eszünkbe. A széles alkalmazási területeken belül egyre jobban kiemelkedik a gyártástechnológia. Ezzel a területtel kapcsolatban kicsit nagy a távolságtartás, ezért cikkünkben szeretnénk feltárni a technológia főbb vonásait: Milyen egy működő megmunkáló állomás? Melyek az előnyei más gyártástechnológiákhoz képest és mitől speciális a mikromegmunkálás területe? Cikkünk a fenti kérdések megválaszolására törekszik, különös tekintettel a gépészmérnököket érintő témakörökre.

3. TÖRTÉNET ÉS FIZIKAI ALAPOK

A lézerek működését lehetővé tevő kvantumfizikai jelenségek felfedezése Albert Einstein nevéhez fűződik. Az első üzemképes szilárdtest lézert - egy rubinlézert - 1960-ban építették meg az USA-ban. Rövidesen több működőképes típus készült el, például a manapság széles körben használt CO₂ és Nd:YAG lézerek első példánya. Ezután ugrásszerű fejlődésnek indult a technológia, napjainkra mindenhol találkozhatunk vele az iparban, a telekommunikációban, az orvostudományban, vagy akár a saját háztartásunkban.

Hogyan működik ez a rendkívül sokrétű technológia? A választ az eredeti angol betűszó jelentése adja meg. LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of the Radiation, azaz fényerősítés a sugárzás stimulált emissiójával. A létrejövő lézertér fontos jellemzői és

tulajdonságai: monokromatikus, koherens, kis széttartású, jól irányítható és jól fókuszálható. Alkalmas nagy energiasűrűség létrehozására.

A stimulált anyag fajtája alapján léteznek gázüzemű-, folyadék-, szilárdtest- és félvezető lézerek. A gerjesztés lehet elektromos (kisülés, rádiófrekvenciás tér vagy átfolyó áram), kémiai vagy optikai (villanólámpa, dióda, másik lézer). Ezen kívül feloszthatjuk lézerforrásainkat folytonos üzemű és impulzus-üzemű berendezésekre. [2]

4. IPARI ALKALMAZÁS

A lézereket különböző feladatokra használják: adatrögzítés, adatolvasás, távolságmérés, optikai érzékelés, nyomtatás, gyógyászat, haditechnika, szórakoztatóipar, telekommunikáció és a számunkra legfontosabb felhasználás: az anyagmegmunkálás. Ezen a területen legelterjedtebb a lézeres vágás, de a technológia, különösen a mikromegmunkálás, kiválóan alkalmas gravírozásra, rétegfelrakásra, hőkezelésre, hegesztésre és nanotechnikai alkalmazások előkészítésére is.

A terület számos előnyt kínál más gyártási formákkal összehasonlítva: Nagypontosságú, mére szabatos alkatrészek elkészítését teszi lehetővé, köszönhetően a kis foltátmérőnek, mely keskeny vágási rést biztosít. Az adott kis megmunkálási területen nagy energiasűrűség érhető el, emiatt az anyag csekély hőterhelést szenved, nem vetemedik, nem olvad. Az eljárás megbízható és nagy méretpontosságú. Az anyagok széles skálája megmunkálható. A lézertér optikai kábelben is vezethető (pl. Nd:YAG), így nagy távolságokra eljuttatható, gyakorlatilag veszteségmentesen. A lézerforrásnak tehát nem kell a megmunkálás közvetlen közelében lennie. Az energia-bevitel és a leadott teljesítmény precízen szabályozható. Nincsenek nagy terhelésnek, kopásnak kitett szerszámok, a technológia érintkezésmentes. Bonyolult kontúrok is gyorsan és egyszerűen vágathatók, a megmunkálási idő rövid, a sebesség széles intervallumban állítható. A folyamat nagymértékben automatizálható, ezért gazdaságos gyártást érhetünk el. A technológia környezetbarát. [1, 2]

5. MIKROMEKGUNKÁLÁS

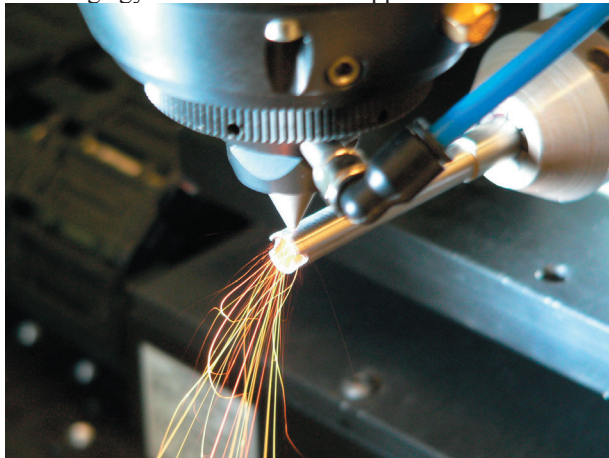
A mikromegmunkálás ágazata egészen újszerű filozófiát képvisel: kis energiákat és teljesítményeket használ, jellemző rá a magas frekvencia és a rövid impulzus-

* egyetemi adjunktus, BME Mechatronika Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

** fejlesztőmérnök, BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék

hossz, aminek következtében jó minőségű a vágási felület, és kicsi a hőhatászóna. Ennek a technológiának kisebb az energiaigénye. Maximum néhányszor 10 W átlagteljesítmény elegendő a megmunkáláshoz. Acélok esetén ezzel körülbelül 1 mm vastagságú lemez vágható. A vágási rés mikrométeres tartományba esik, így alkalmas finomstruktúrák létrehozására. Előnyös tulajdonságok miatt a technológia jól használható például precíziós orvosi eszközök, implantátumok gyártására. Az 1. ábrán működés közben látható a folyamat.

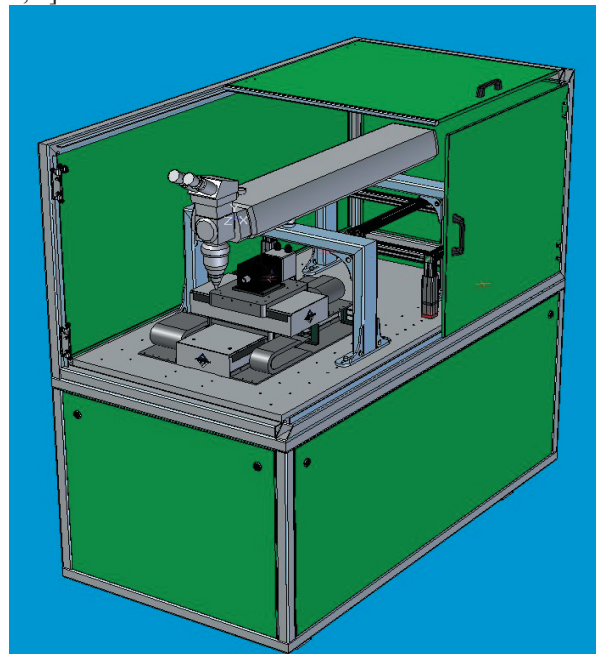
A következőkben bemutatjuk egy korszerű megmunkáló állomás felépítését. A berendezés egy LASAG KLS 246-040 FC impulzusüzemű, lámpával gerjesztett lézerhez épült. Célzottan precíziós vágásra került kifejlesztésre, mivel nagyjából 0,03 mm-es foltátmérőt képes produkálni. A berendezés vezérelhető CNC, PLC vagy számítógépes program segítségével és támogatja a hatékony diagnosztikát és hibakeresést. A megmunkálásra javasolt anyagok: szénacél és rozsdamentes acél, könnyűfémek, nikkel és kobalt ötvözetek, kerámiák és félvezetők, kompozitok, gyémánt. A KLS 246 lézer két fő egységből áll: a tápegységből és az optikai egységből, melyek közül a táp látja el feszültséggel a lézerforrást, valamint ezzel kommunikál a vezérlés is - soros kimeneten keresztül. Szintén itt található a vízhűtés hőcserélője. Az optikai egység része a rezonátor, emellett helyezkedik el a nyalábtágító, melynek feladata a vágófejbe jutó nyaláb szélességének szabályozása. A nyalábtágítóból továbbhaladó fény 90 fokos irányváltás után a vágófejbe kerül, mely fókuszálja, majd kivezeti a lézernyalábot a fűvoka nyílásán keresztül. A szerkezet kiegészül még egy ellenőrző mikroszkóppal is.



1. ábra: A megmunkáló lézer működés közben

A lézer egy állványzat segítségével van az rezgésmentes asztalra rögzítve. Ezen helyezkedik el a kéttengelyű XY pozicionáló asztal (a vágófej alatt), amely két darab mikronos pontosságú, lineáris léptetőmotorból áll. Az alapanyagokat csavaros alátámasztó paletta rögzíti az XY asztalhoz. Az állomást szekrény veszi körül, mely véd a szemre ártalmas sugárzástól. A vágógáz palackokból vagy kompresszorból érkezik pneumatikus vezetékeken keresztül. A vezérlés PC-ről történik, melyen futtatható a profilok létrehozására szolgáló CAM program, a motorok vezérlése, és a lézer diagnosztikai prog-

ramja. Az összeállítás felépítését a 2. ábra mutatja. [1, 3, 5, 6]



2. ábra: Lasag KLS 246 mikromegmunkáló állomás

6. PARAMÉTEREK

Mivel különböző szerkezeti anyagokat vághatunk eltérő vastagságban, a lézer paramétereit optimalizálni kell. A paraméterek beállítása próbavágások, tesztek sorozatával történhet. A paraméterek között vannak szabadon megadhatóak és összefüggők. Először célszerűen a frekvenciát, az impulzushosszt, és a gerjesztőfeszültséget kell beállítani. Ezek hatása leginkább a leadott teljesítményben és az anyaggal közölt energiában jelentkezik. A frekvencia azt jelzi, hogy időegység alatt hány impulzus hagyja el a lézerforrást. Mikromegmunkáláshoz célszerű a 100-5000 Hz-es tartományt beállítani. Finom szerkezetekhez ezen belül is a magasabb értékek választása a célszerű. Az impulzushossz egy gerjesztő villanás hosszát adja meg. Ennek értékét a frekvencia korlátozza. Fontos még a vágás sebességének és gyorsulásának beállítása. A sebesség növelésével romlik a vágási felület minősége. A gyorsulásnak legfőképp az ívek vágásánál van szerepe.

A frekvenciából és a sebességből kiadódó érték az impulzusok követési távolsága, a lövéstáv. Minél kisebb, annál jobb lesz a vágási él felületi minősége. Ha nagyobb frekvenciát választunk, nagyobb sebességgel érhetjük el ugyanazt a követési távolságot, így gazdaságosabbá tehetjük a gyártási folyamatot. A lézernyaláb egy nyalábtágítón is áthalad. Ez javítja a lézernyaláb párhuzamosságát és meghatározza az átmérőjét, mielőtt a vágófejbe jutna. A nyaláb szélességével fordított arányban változik a foltátmérő és a fókuszmélység. Finom struktúrák vágásakor előnyösebb nagyobb értéket beállítani a nyalábtágítón, viszont ettől érzékenyebb lesz a rendszer a fókusz-távolság változására. A vágásokat mindig valamilyen gáz bevezetésével végezzük. Anyagtól függően leggyakrabban oxigént, nitrogént,

argont, sűrített levegőt használunk, melyek nyomását külön-külön szükséges beállítani. A munkadarab felett a vágógáz terelését úgy kell megoldani, hogy az áramlás lamináris legyen. A sugár fókuszálását a vágófejen tudjuk beállítani az aktuálisan adott fűvókátávhöz. (A fűvókátáv a lemez és a fűvóka közötti távolság). [1, 3]

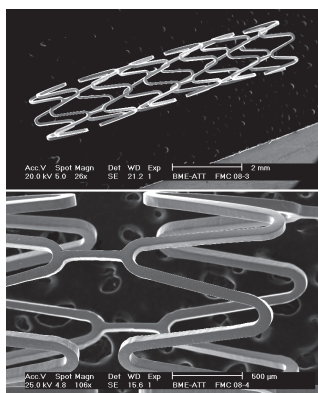
7. MIKROMEKGUNKÁLÁS A GYAKORLATBAN

A mikromegmunkálás fontosságát remekül szemlélteti egy ballonnal tágitott szívkoszorúér sztent gyártásának bemutatása. Kiindulásként el kell készíteni a feladat 3D-s modelljét, melyből terítéket képezve rajzként rendelkezésünkre áll a kívánt mintázat. Ezután el kell készítenünk a berendezés számára az NC kódot. Ennek során számos gyártástechnológiai elgondolást figyelembe kell vennünk. Mivel bonyolult kontúrokat alakítunk ki, sok bordával, hengeres felületen, segédvágásokat is terveznünk kell. A lézernek minden egyes kódsornál újra be kell kapcsolnia, ezért tranzienst folyamatok is lehetnek. Hogy ezek a vágáson ne legyenek érzékelhetők, előfúratolást, illetve ahol lehet, megfelelő hosszúságú ráfutást kell alkalmazni. A minél rövidebb ciklusidő érdekében minimalizálni kell az átmozgások hosszát. Ez úgy érhető el, ha nagyjából spirális vonalban haladunk végig a hengerpaláston. Az erre a célra kifejlesztett szoftverrel beállítjuk a profilozást, majd adott átmérőjű csőre G-kódot generálunk.

feszültség	340 V	vágógáz	oxigén
frekvencia	3000 Hz	gáznyomás	5 bar
impulzushossz	0,02 ms	fűvókátáv	0,2 mm
sebesség	8 mm/s	fókusz	5,25 mm
gyorsulás	4 mm/s ²	teljesítmény	7 W
lövéstáv	0,002 mm	energia	1,8 mJ

1. táblázat: Szentet vágási paraméterek

Az implantátumot 316 LVM SS korrózióálló acélcsőből készítjük el, ami egy biokompatibilis anyag. Csak nagyon jó felületi minőségű, kis méret- és alakúterésű csövet használhatunk. Miután az átmérőhöz választott patronnal a csövet rögzítettük a forgatómotorhoz, vágási pozícióba kell állni.



3. ábra: Szentet elektronmikroszkópos képe

Fontos, hogy a motor és a cső végén lévő befogó pofák egy szintben legyenek, és hogy a vágófej a cső gerincére legyen pozicionálva. Szentek esetén olyan beállításokat kell keresnünk, melyek hiba nélkül átvágják a cső falát, de az ehhez szükséges minimumnál nem adnak nagyobb energiát. Csak nagyon kis hőhatászóna engedhető meg. Itt is a nagy frekvenciát részesítjük előnyben, hiszen jó minőségű vágási élt kell produkálnunk. A tesztek során kapott optimális paramétereket az 1. táblázat tartalmazza. Mindössze 1,8 mJ a használt energia nagysága, és 3000 Hz-en vágunk, ezek tipikusan mikromegmunkálási paraméterek. Miután birtokában vagyunk a paramétereknek, meg kell tervezni az anyagtovábbítást, és biztosítanunk kell a biztonságos munkavégzés feltételeit. A kész sztenteket több lépésben utókezeljük. Az élek lekerekítését és a tükörsima felületet elektropolírozással tudjuk elérni. A termék elektronmikroszkópos képe a 3. ábrán látható. [4, 6]

SUMMARY

The description of stent manufacturing shows that laser technology can ensure the quality of precise, high standard products. Some of the requirements can be reached by precision turnery, but an effectively operated laser can do it cheaper, faster and with less energy. Because of the many parameters affecting the cutting, laser microprocessing is a challenging, good task for an engineer. This area includes many development opportunities, and they probably can stand even higher standards in the future.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A sztent gyártás példáján látható, hogy lézeres megmunkálással lehetséges precíz és minőségi termékek elkészítése. Igaz, hogy egyes követelmények elérhetők – például precíziós esztergálással is, de egy hatékonyan üzemeltetett lézer gazdaságosan használható, kisebb energiaigénnyel, gyorsabban képes a lemeztávadási feladatok ellátására. Talán éppen a vágást befolyásoló rengeteg tényező és a paraméterek bonyolult összefüggése miatt ilyen összetett és szép mérnöki feladat a lézeres mikromegmunkálás megvalósítása. A terület ezen kívül számos fejlesztési lehetőséget rejt magában, melyekkel az elérhető minőségi követelmények tovább fokozhatók.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. Köszönjük az Exasol Kutató, Fejlesztő Kft. és Puskás Zsolt segítségét.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] PUSKÁS ZS., ANTALFI Z., DOBRÁNSZKY J.: Lézeres mikromegmunkálás. Műszaki Szemle, pp. 335-339., 2009.
- [2] GERETOVSZKY ZS., SZÖRÉNYI T.: Szentől szemben a lézerekkel. Magyar Tudomány, 2005/12 pp. 1525., 2005.
- [3] LASAG KLS 246-040 FC, Technical Data Sheet, www.lasag.com
- [4] BOGNÁR E., RING GY., DOBRÁNSZKY J.: Koszorúerszentek vizsgálata. Anyagvizsgálók Lapja, 4: pp. 127-132., 2004.
- [5] BEDÉCS R.: A lézer technológia diktálja az iramot – LaserSystems, www.lasersystems.hu, 2008.
- [6] LASAG INDUSTRIAL LASERS, www.lasag.com

VONTATMÁNYOK OLDALIRÁNYÚ STABILITÁSVESZTÉSE

LATERAL INSTABILITY OF TOWED STRUCTURES

Takács Dénes* és Stépán Gábor**

ABSTRACT

A low degree-of-freedom mechanical model of towed rolling systems is considered. The linear stability boundary is determined in the parameter plane of the dimensionless towing speed and caster length. A necessary (but not sufficient) condition of the stable stationary rolling is presented that gives important information about the proper loading of trailers, caravans, etc. The sense of the Hopf bifurcation at the linear stability boundary is calculated analytically and estimation is given for a critical damping ratio, which characterizes the parameter setup, where subcritical Hopf bifurcation changes to supercritical.

1. BEVEZETÉS

Járműveink biztonságos irányításában kulcsfontosságú szerepet játszik a megfelelő oldalirányú stabilitás [1]. A laterális stabilitás vizsgálata különösen fontos vontatmányok, például utánfutók, lakókocsik, csuklós buszok, tehergépjárművek esetén [2,3]. Ennek oka, hogy a vontatmánnyal rendelkező járművek által elszenvedett balesetek gyakran éppen a vontatmány stabilitásvesztésére vezethetők vissza. A mindennapi közlekedésben is sokszor megfigyelhető a vontatmányok úgynevezett kígyózó mozgása, amely megjelenésével veszélyhelyzeteket teremt a közúton.

A vontatmányok lineáris stabilitásvizsgálatát nagyban nehezíti, hogy járműveink számos szabadsági fokkal rendelkező komplex rendszerek [4], melyek modellezése az esetek többségében bonyolult feladat. Egy összetett rendszer azonban gyakran egyszerűsíthető, amennyiben a meghatározó lengésképek megfelelően kerülnek kiválasztásra. Ilyenkor a rendszer leírható egy egyszerű, általában analitikusan is kezelhető kis szabadságfokú mechanikai modellel, amely képes lényegileg megragadni és megmagyarázni a gyakorlatban megfigyelt releváns rezgéseket.

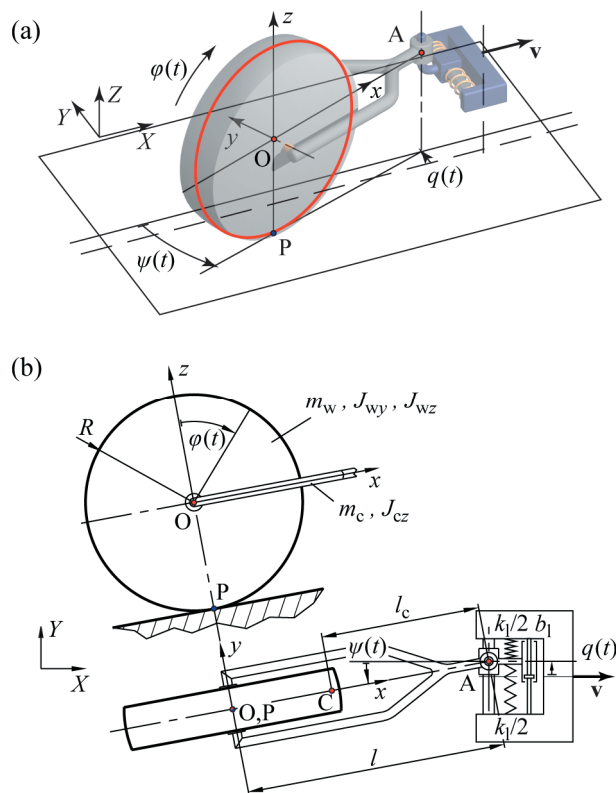
2. MECHANIKAI MODELL

A vontatmányok stabilitásának vizsgálatához tekintünk az 1. ábrán látható mechanikai modellt, amely egy tökéletesen merev R sugarú kerékből és a hozzá kapcsolódó l hosszúságú vontatórúdból áll.

* tudományos segédmunkatárs, MTA-BME Gépek és Járművek Dinamikája Kutatócsoport

** egyetemi tanár, BME Műszaki Mechanikai Tanszék

A vonórúd az A pontban lévő királycsapnál kapcsolódik az v állandó sebességgel vontató szerkezethez, melyet oldalirányban kitérít. Az oldalirányú kitérés hatására létrejövő reakcióerőket a k_1 laterális irányú merevséggel és b_1 csillapítási tényezővel vesszük figyelembe a modellben, mint a kitérés nagyságával és sebességével arányos mennyiségeket. A vontatórúd tömege m_c , súlypontjának távolsága a királycsaptól l_c és a C súlypontján átmenő vett z tengelyre számított tehetetlenségi nyomatéka J_{cz} . Utóbbi paraméterek változtatásával vizsgálható a vontatmányon elhelyezett rakomány hatása a stabilitásra. A kerék tömege m_w és a súlypontján átmenő forgás- és keresztengelyére számított tehetetlenségi nyomatékok J_{wy} és J_{wz} .



1. ábra: A mechanikai modell: (a) axonometrikus nézet, (b) felül- és oldalnézet.

Az így megalkotott mechanikai modell szabadsági foka a gördülés kinematikai kényszerének figyelembe vétele nélkül három, azaz három független általános

koordináta választható. Legyenek ezek a vonórúd függőleges tengely körüli szögelfordulása ψ , a királycsap laterális elmozdulása q és a kerék forgástengely körüli elfordulása φ .

Amennyiben a vontatmány stabilitásvesztését kívánjuk vizsgálni, azaz a egyenesen való stacionárius gördülés lineáris stabilitását, joggal tételezhetjük fel, hogy a kerék gördül. Ez esetben a kerék talajjal érintkező P pontjának sebessége zérus. Ezen kinematikai feltétel két elsőrendű skalár differenciálegyenletet ad az általános koordinátákra:

$$\begin{aligned} l\dot{\psi} \sin \psi - R\dot{\varphi} \cos \psi + v &= 0, \\ \dot{q} - l\dot{\psi} \cos \psi - R\dot{\varphi} \sin \psi &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

amelyek egyenként fél szabadsági fokkal csökkentik a rendszer szabadsági fokainak számát. Így végül egy 2 szabadsági fokú anholonóm reonóm rendszert kapunk, melynek mozgásegyenleteit Appell-Gibbs egyenletek segítségével adhatjuk meg a legegyszerűbb alakban [5]:

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \beta, \\ \dot{\beta} &= -\frac{N(\psi, \beta, q)}{D(\psi)}, \\ \dot{q} &= v \tan \psi + \frac{l}{\cos \psi} \beta, \\ \dot{\varphi} &= \frac{v + l\dot{\psi} \sin \psi}{R \cos \psi}, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol:

$$\begin{aligned} N(\psi, \beta, q) &= \\ & \left(-(m_w l + m_c l_c) v + \frac{l v}{R^2} J_{wy} \tan^2 \psi + \frac{(m_w + m_c) l v}{\cos^2 \psi} + \frac{k_1 l^2}{\cos \psi} \right) \beta \\ & + \left((m_w + m_c) l^2 + \frac{l^2}{R^2} J_{wy} \right) \frac{\sin \psi}{\cos^2 \psi} \beta^2 + k_1 l q + b_1 l v \tan \psi, \end{aligned} \quad (3)$$

és

$$\begin{aligned} D(\psi) &= (m_c l_c (l_c - 2l) - m_w l^2 + J_{wz} + J_{cz}) \cos \psi \\ & + \frac{(m_w + m_c) l^2}{\cos \psi} + \frac{l^2}{R^2} J_{wy} \frac{\sin^2 \psi}{\cos \psi}. \end{aligned} \quad (4)$$

A négy közönséges geometriai nemlinearitásokat tartalmazó differenciálegyenlet által alkotott egyenletrendszerben csak az utolsó egyenletben szerepel a kerék saját tengely körüli szögelfordulása, azaz a $\varphi(t)$ ciklikus koordináta. A negyedik differenciálegyenlet ebből következően leválasztható az egyenletrendszerrel és a vontatmány stabilitása vizsgálható az első három differenciálegyenlet segítségével háromdimenziós fázistérben.

3. STABILITÁSI VIZSGÁLAT

A (2) mozgásegyenletek triviális megoldása a vontatmány egyenes vonalú stacionárius gördülésének felel meg:

$$\psi(t) \equiv 0, \quad \beta(t) \equiv 0, \quad q(t) \equiv 0 \quad \text{és} \quad \dot{\varphi}(t) \equiv v / R. \quad (5)$$

A vontatmány zérus vontatási sebesség esetén egy 1 szabadságfokú mechanikai rendszert alkot, melynek csillapítatlan sajátkörfrekvenciája és relatív csillapítása:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1 l^2}{J_{wz} + J_{cz} + m_c (l - l_c)^2}}, \quad \zeta = \frac{b_1}{2k_1} \omega_n. \quad (6)$$

Az analitikus stabilitás vizsgálat illetve a következő fejezetben ismertetett analitikus nemlineáris számítások egyszerűsítése céljából vezessük be a dimenziótlan vontatási hosszt és vontatási sebességet:

$$L = \frac{l}{l_c}, \quad V = \frac{v}{\omega_n l_c}, \quad (7)$$

valamint a vontatmány geometriáját és tehetetlenségét leíró dimenziótlan paramétereket:

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{m_c l_c (l - l_c)}{J_{wz} + J_{cz} + m_c (l - l_c)^2}, \\ \chi &= \frac{(m_c + m_w) l^2 + J_{wy} l^2 / R^2}{J_{wz} + J_{cz} + m_c (l - l_c)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

A bevezetett dimenziótlan paraméterek segítségével a triviális megoldás körül harmadfokig sorfejlesztett mozgásegyenletek:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\beta} \\ \dot{q} / l_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -2\zeta V \omega_n^2 / L & -(2\zeta + \kappa V) \omega_n & -\omega_n^2 / L \\ \omega_n V & L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \beta \\ q / l_c \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_n \left((2\zeta + \kappa V)(1 - \chi) + V \left(\frac{\chi}{L} - \frac{\kappa}{2} \right) \right) \psi^2 \beta \\ \frac{\omega_n V}{3} \psi^3 + \frac{L}{2} \psi^2 \beta \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ -\chi \psi \beta^2 - \frac{\omega_n^2}{L} \left(\frac{1}{2} - \chi \right) \psi^2 \frac{q}{l_c} - \frac{2\zeta V \omega_n^2}{L} \left(\frac{5}{6} - \chi \right) \psi^3 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

A $\mathbf{K}e^{\lambda t}$ megoldást behelyettesítve a rendszer karakterisztikus egyenlete a lineáris együttható mátrix segítségével meghatározható:

$$\lambda^3 + (2\zeta + \kappa V)\omega_n \lambda^2 + \left(1 + \frac{2\zeta V}{L}\right)\omega_n^2 \lambda + \frac{V}{L}\omega_n^3 = 0. \quad (10)$$

A Routh–Hurwitz-feltételnek [6] megfelelően a stacionárius gördülés aszimptotikusan stabilis, ha:

$$V/L > 0, \quad (11)$$

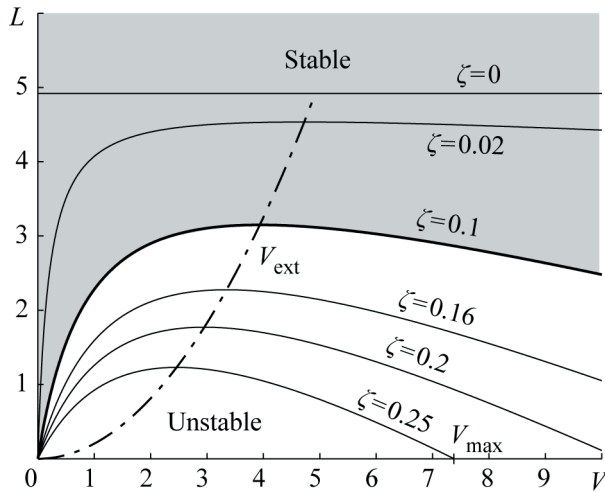
és

$$L > L_{cr}(V) = \frac{V(1 - 4\zeta^2 - 2\zeta\kappa V)}{2\zeta + \kappa V}, \quad (12)$$

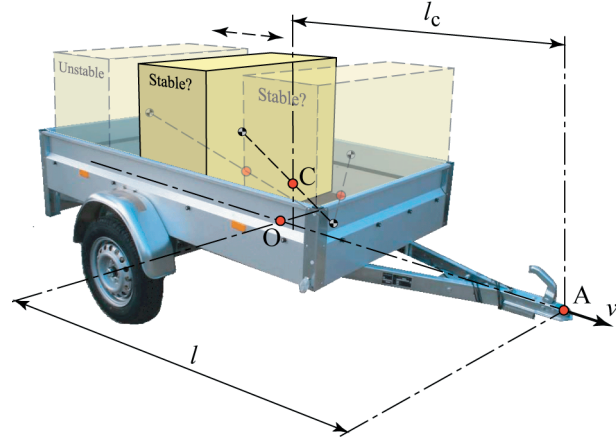
amennyiben $\kappa > \kappa_{cr} = 2\zeta/V$. A stabilitási feltétel által meghatározott stabilitási határokat a 2. ábra mutatja különböző csillapítás értékekre, $\kappa = 0.203$ és $\chi = 5.67$ műszakilag reális paraméterek esetén. A stabilitási görbe maximum helye és zérus helye szintén bejelölésre került az ábrán, amely jellegzetes pontok értékei számíthatók a következő formulákkal:

$$V_{ext} = \frac{1 - 2\zeta}{\kappa} \quad \text{és} \quad V_{max} = \frac{1 - 4\zeta^2}{2\zeta\kappa}. \quad (13)$$

A formulák segítségével egyszerűbb alakban megadhatók azon paramétertartományok, amelyekben az egyenes vonalú gördülés aszimptotikusan stabilis. Tehát, a rendszer lineárisan stabilis, ha $L > L_{cr}(V_{ext})$ vagy $V > V_{max}$.



2. ábra: Lineáris stabilitási térkép



3. ábra: Utánfutóra helyezett teher hatása a stabilitásra.

A meghatározott stabilitási feltételekből látható, hogy amennyiben $\zeta = 0$, azaz csillapítatlan rendszerrel van szó, vagy a vontatási sebesség tart a végtelenhez $V \rightarrow \infty$, akkor $\kappa_{cr} = 0$. Mindez azt jelenti, hogy csak pozitív κ paraméter esetén létezik a stabil stacionárius gördülés. A dimenziós paraméterekkel ez az $l_c < l$ feltételnek felel meg, azaz a stabilitás szükséges (de nem elégséges) feltétele, hogy a vontatmány súlypontja a kerekek tengelye előtt helyezkedjen el. Ezen állítás rendkívüli fontossággal bír gyakorlati szempontból, különösen a teher szállító vontatmányok megrakodásához nyújt segítséget, hiszen az $l_c < l$ feltétel teljesülése könnyen ellenőrizhető a gyakorlatban. Ezt kívánja szemléltetni a 3. ábra, amin az utánfutóra túlságosan hátul elhelyezett rakomány a vontatmány súlypontját úgy mozdítja el, hogy nem teljesül az $l_c < l$ feltétel, amiből következően biztosan létezik olyan vontatási sebesség, amelyre a stacionárius gördülés instabillá válik. Ezzel szemben az $l_c < l$ feltétel teljesül, amennyiben a rakomány a kerekek tengelye elé kerül elhelyezésre, bár mint tudjuk, ez még mindig nem garancia a lineáris stabilitásra.

4. ÖNGERJESZTETT REZGÉSEK

A (9) mozgásegyenletben szereplő lineáris együttható mátrix sajátértékeit meghatározva az $L = L_{cr}$ feltétel teljesülése mellett, egy tisztán képzetes komplex konjugált gyökkpárt és egy valós karakterisztikus gyököt kaptunk eredményül:

$$\lambda_{1,2} = \pm i\omega, \quad \lambda_3 = -(2\zeta + \kappa V)\omega_n, \quad (14)$$

ahol

$$\omega = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - 4\zeta^2 - 2\zeta\kappa V}}. \quad (15)$$

Ennek megfelelően Hopf bifurkáció van a stabilitási határon, és ω a kialakuló öngerjesztett rezgés körfrekvenciája. A sajátértékekhez tartozó sajátvektorok szintén meghatározhatók:

$$\mathbf{s}_1 = \bar{\mathbf{s}}_2 = \begin{bmatrix} (2\zeta + \kappa V) \left(1 + i(2\zeta + \kappa V) \frac{\omega}{\omega_n} \right) \\ -(2\zeta + \kappa V) \omega \left((2\zeta + \kappa V) \frac{\omega}{\omega_n} - i \right) \\ V \left((2\zeta + \kappa V)^2 + \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}_3 = \begin{bmatrix} -1 \\ (2\zeta + \kappa V) \omega_n \\ 2\zeta V \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Az úgynevezett Központi Sokaság redukció [7] elvégzéséhez a sajátvektorokból az alábbi transzformációs mátrixot állítjuk elő:

$$\mathbf{T} = [\text{Re} \mathbf{s}_1 \quad \text{Im} \mathbf{s}_1 \quad \mathbf{s}_3], \quad (17)$$

melynek segítségével vezessünk be új változókat:

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \beta \\ q/l_c \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Amennyiben ezt behelyettesítjük (9)-be, majd megszo-
rozzuk azt a transzformációs mátrix inverzével, megkap-
juk az úgynevezett Jordan normál alakot:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(2\zeta + \kappa V)\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j,k>0}^{j+k=3} a_{jk} x_1^j x_2^k + \dots \\ \sum_{j,k>0}^{j+k=3} b_{jk} x_1^j x_2^k + \dots \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (19)$$

A rendszerben lévő nemlinearitások szimmetrikusak (azaz, nincsenek másodfokú tagok a Jordan normál alak nemlineáris tagjaiban), miközben a Központi Sokaság másodfokú felülettel közelíthető. Ebből adódóan az x_3 változót tartalmazó tagok elhanyagolhatók, hiszen azokból csak harmadfoknál magasabb fokszámú tagok származnának a közelítés végrehajtása után. A Hopf bifurkáció típusa meghatározható a Poincaré-Lyapunov paraméter szimmetrikus esetekre érvényes formulájával:

$$\Delta = \frac{1}{8} (3a_{30} + a_{12} + b_{21} + 3b_{03}). \quad (20)$$

A hosszadalmas számítás részletezésétől itt eltekintünk. A Poincaré-Lyapunov paraméterre eredményül kapott összefüggés:

$$\Delta = \frac{(2\zeta + \kappa V)^2 \omega_n^2}{8V^2} \frac{\zeta + \kappa V - (2\zeta + \kappa V) \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \left(2 - \zeta \kappa V + \chi \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2} - 2 \right) \right)}{\left(1 + (2\zeta + \kappa V)^2 \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right) \left((2\zeta + \kappa V)^2 + \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right)}. \quad (21)$$

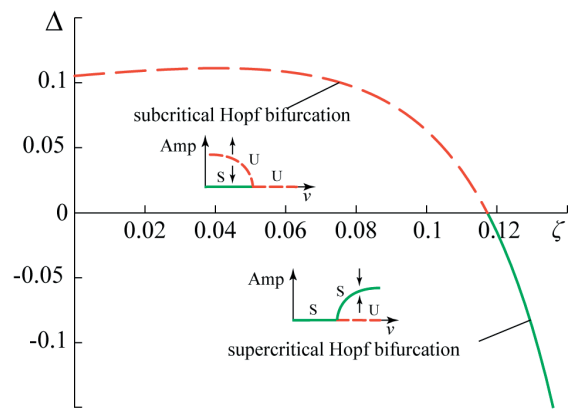
Amennyiben Δ pozitív/negatív, a Hopf bifurkációs ponthoz kapcsolódó periodikus pályák instabilak/stabilak, más néven a Hopf bifurkáció szubkritikus/szuperkritikus.

A $\kappa = 0.203$ és $\chi = 5.67$ paraméterek esetén $V = 8$ vontatási sebesség mellett a Hopf bifurkáció típusának csillapítás növelés hatására bekövetkező megváltozását a 4. ábra mutatja. A vizsgált esetben $\zeta_{cr} = 0.117$ relatív csillapítás értéknél a szubkritikus Hopf bifurkáció szuperkritikussá válik, azaz a lineárisan stabil tartományt körülölelő instabil határciklus helyett, a lineárisan instabil tartomány felett jelenik meg stabilis határciklus.

Általános esetben a kritikus csillapítás értéke nem határozható meg analitikus úton. Azonban egy műszaki szempontból elfogadható analitikus felső becslés adható $\kappa > 0$ esetén, ami amúgy is szükséges feltétele a stacionárius gördülés stabilitásának nagy vontatási sebességek esetén. A felső becslés eredménye:

$$\zeta_{cr} < \zeta_{cr,est} = \frac{\sqrt{\kappa^2 V^2 + 2} - \kappa V}{4}, \quad (22)$$

amely alapján kijelenthető, hogy a Hopf bifurkáció biztosan szuperkritikus minden $\zeta > \zeta_{cr,est}$ esetén. A bemutatott paraméterek mellett a kritikus csillapítás becsült értéke $\zeta_{cr,est} = 0.132$, ami 13 % relatív hibát jelent a numerikusan meghatározott pontos $\zeta_{cr} = 0.117$ értékhez képest.



4. ábra: A Hopf bifurkáció típusának változása a csillapítás függvényében.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vontatmányok oldalirányú stabilitásának vizsgálatához egy kis szabadságfokú mechanikai modell került alkalmazásra. A modellben szereplő kevés paraméter ellenére műszaki szempontból hasznosítható, a gyakorlatban is könnyen ellenőrizhető stabilitási feltétel került levezetésre. A feltétel értelmében a vontatmányon a rakományt mindig a kerek tengelye elé javasolt elhelyezni, elkerülendő a sebességnövelés hatására biztosan bekövetkező stabilitásvesztést.

A stabilitási határhoz tartozó Hopf bifurkáció típusa analitikus úton meghatározásra került. Egy használható pontosságú analitikus becslést adtunk azon kritikus csillapításra, amelynél nagyobb csillapítást alkalmazva biztosítható, hogy kis amplitúdójú rezgések jelezzék az

egyenes vonalú gördülés lineáris stabilitásvesztését, és egyúttal elkerüljük, hogy az egyébként stabil vontatás nagyobb zavarások hatására „váratlanul” instabillá váljon.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Pacejka, H. B.: Tyre and Vehicle Dynamics, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [2] Sharp, R. S. and Fernández, M. A. A.: Car-caravan snaking - part 1: the influence of pintle pin friction, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C - Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 216 of 7, pp. 707–722., 2002.
- [3] Troger, H. and Zeman, K.: A nonlinear-analysis of the generic types of loss of stability of the steady-state motion of a tractor-semitrailer, *Vehicle System Dynamics* 13(4), 161–172., 1984.
- [4] Schwab, A. L. and Meijaard, J. P.: Dynamics of flexible multibody systems having rolling contact: application of the wheel element to the dynamics of road vehicles, *Vehicle System Dynamics* 33(Supplement), 338–349., 1999.
- [5] Stépan, G.: Appell-Gibbs equation for classical wheel shimmy - an energy view, *Journal of Computational and Applied Mechanics* 3(1), 85–92., 2002.
- [6] Gantmacher, F.: Lectures in analytical mechanics, MIR Publishers, Moscow, 1975.
- [7] Guckenheimer, J. and Holmes, P.: Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields, Springer-Verlag, New York., 1983.

Dudás Illés, Friedhelm Lierath, Varga Gyula: Környezetbarát technológiák a gépgyártásban Forgácsolás szárazon, minimális hűtéssel-kenéssel Műszaki Kiadó, 2010



A szerzőhármas tagjai magyar és német földön hosszú ideje foglalkoznak ezzel a témával, és számos publikációt jegyeznek. Legújabb könyvük – amely a Műszaki Kiadónál jelent meg – hiánypótló mű, nem csak összefoglalja a környezetbarát technológiák eddigi fejlődését, jelenlegi helyzetét, de új forgácsoláselméleti megközelítést is ad, és számos saját kísérlettel alátámasztott eredményt is közöl.

Az ember felelősségteljes életében egyre fontosabb szerepet tölt be a környeze-

tének védelme. A termékek tervezése teljes életciklusra történik, az elhasznált termékek újrahasznosítása a komplex folyamat része. Tudatos tervezői magatartás, hogy a teljeskörű műszaki és gazdasági megoldással egyidőben az ökológiai szempontok is megvalósuljanak. A termékek életciklusa rövidül, az erkölcsi kopás felgyorsul, és ezért az előállítási technológia jelentősége igencsak magas.

A szerzők könyve a gépgyártástechnológiai eljárások ökológiai szempontú vizsgálatára irányul. A kutatások fő célja annak vizsgálata, hogy a különböző típusú szerszámok, a bevonatok, a hűtés-kenés fajtája, a különböző technológiai paraméterek milyen hatással vannak a forgácsoló élék kopásviszonyaira, a megmunkált felület minőségére, a szerszám gép terhelésére és a megmunkálás hatékonyságára.

A környezetbarát gyártási eljárások világszerte új szakterületnek számítanak. Az új technológia birtokosa lépéselőnybe kerül. A szerzők választ keresnek a minimális mennyiségű hűtés-kenés alkalmazásakor jelentkező hőtani kérdésekre, tribológiai szempontból elemezték a forgácsolást.

A könyv 10 fejezetből áll, amely a szárazmegmunkálás és minimálkenés alapjait, fejlesztési irányokat, kapcsolódó gyakorlati alkalmazásokat, befejező megmunkálásokat tárgyalja.

Jól és hasznosan illeszkedik a fejezetek sorába a saját kísérletek ismertetése, a tapasztalatok bemutatása, levonható következtetések és költséglemezek.

Az első két fejezet áttekintést ad a környezetbarát megmunkálás jellemzőiről, a szerszám gépek, szerszám tartók konstrukciós módosulásairól.

A harmadik fejezet a fémforgácsolás elméletének fejlesztése száraz megmunkálásra. Ez a könyv legértékesebb része. Közérthetően megfogalmazott, tudományos igényű mű. A Szerzők igényesen, a mechanikai, termikus változások feltárásával elemezték a komplex forgácsoláselméleti folyamatot.

A negyedik fejezet a szárazmegmunkálás gyakorlati elemeiről szól, ismerteti a szárazmegmunkálásra alkalmas anyagokat, a felhasználható szerszámokat, és az alkalmazható forgácsolási eljárásokat. Napi gyártástervezésben használható ismeretanyagot túl általánosan érvényes elveket fogalmaz meg.

Az ötödik fejezet a befejező szárazmegmunkálásokat tárgyalja, a szárazkőszőrülés jelenlegi és jövőbeli alkalmazási lehetőségeit mutatja be. Tudományos igénnyel tárgyalja a tengelymetszetben körív profilú helikoid felületek képzését, egyenleteit, kőszőrülési megmunkálását.

A hatodik fejezetben a szerzők a saját kísérleti eredményeiken alapulva a szárazmegmunkálás egyik legnehezebben megvalósítható esetét, a fúrás technológiáját ismertetik. Számos mérési eredmény és következtetés teszi izgalmasá ezt a fejezetet.

A jövőbeni kutatásokat és a kutatók munkáját segíti a hetedik fejezet, ahol a környezetkímélő megmunkálási folyamatok modellezéséről, az alkalmazható faktorális kísérlettervezésről írnak a szerzők.

Az új technológia ipari bevezetése nagymértékben függ attól, hogy az elkészült felületek, a munkadarab minősége mellett hogyan alakulnak a gyártási tevékenység költségei. Erről szól a nyolcadik fejezet.

A kilencedik fejezetben összefoglalják a környezetbarát technológia műszaki megvalósíthatóságának eredményeit, hatásait.

A tizedik fejezet melléklet, szimulációs modelleredményeket mutat be.

A könyv hiánypótló mű, segíti a gyakorlati gyártástervező mérnökök munkáját, támpont a kutatóknak, és nélkülözhetetlen a BSc, MSc, PhD képzésben résztvevő mérnökhallgatóknak.

A Gépgyártás-technológia sorozat további tagjairól a www.muszakikiado.hu oldalon találnak bővebb információt.

Dr. Mátyási Gyula

AZ MMB TÖRÉSI TESZT ALKALMAZÁSA HOSSZÚ REPEDÉSEK ESETÉN

APPLICATION OF THE MMB FRACTURE TEST WITH LONG CRACK LENGTHS

Székrenyes András*

ABSZTRAKT

Az ún. mixed-mode bending, azaz vegyes módusú hajlító tesztet 1988-ban fejlesztették ki kompozit anyagok rétegekőzi szilárdságának vizsgálatára. Azóta számos tudományos közlemény jelent meg a tesztől. Mindössze néhány éve jöttek rá, hogy a berendezést egy kisebb módosítással az eredetihez képest jóval nagyobb repedési hossz esetén is alkalmazhatjuk. Ebben a közleményben ennek részleteit mutatjuk be.

ABSTRACT

The mixed-mode bending system was developed in 1988 to measure the interlaminar fracture toughness of composite materials. Since then large number of scientific paper was published on that test. It was discovered only few years ago, that with a small modification of the system it is possible to apply much larger crack lengths compared to the original apparatus. This work presents the details of the new setup.

Kulcsszavak: rétegekőzi törés, kompozit anyag, kísérlet, rüdelmélet

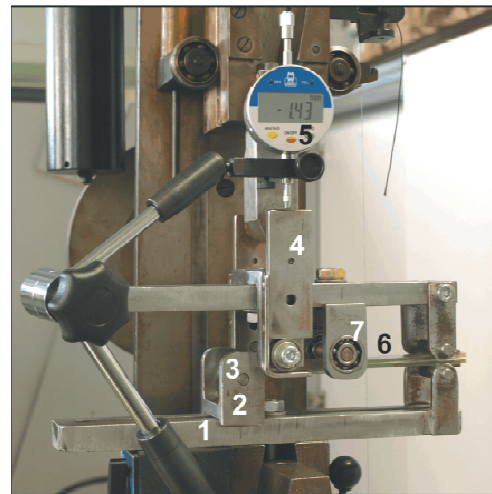
1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok rétegekőzi szilárdságának mérésére számos eszközt fejlesztettek ki az elmúlt évtizedekben. A rétegekőzi törés három alapvető módja: I-es vagy más néven nyitó módus, II-es vagy más néven párhuzamos elcsúszási módus és végül a III-as, vagy más néven keresztirányú elcsúszási módus [1]. Az alapvető módusok kombinációja is igen gyakori a műszaki életben. Az ASME szabvány [2] az ún. mixed-mode bending (MMB) típusú rendszert javasolja a vegyes I/II-es rétegekőzi szilárdság méréséhez. A módszert 1988-ban fejlesztette ki Reeder és Crews [3]. Az MMB tesztel kapcsolatban rengeteg tudományos közlemény fellelhető és számos módosított változata létezik. Tenchev és Falzon 2006-ban publikált művében [4] bemutatták, hogyan lehet alkalmazni az MMB tesztet olyan próbatestekre, amelyekben a repedési hossz jóval nagyobb az eredeti rendszerben megszokotthoz képest. Munkájukban azonban számos hibát vettek, valamint nem mutatták be, hogyan lehet pontosítani a kísérleti

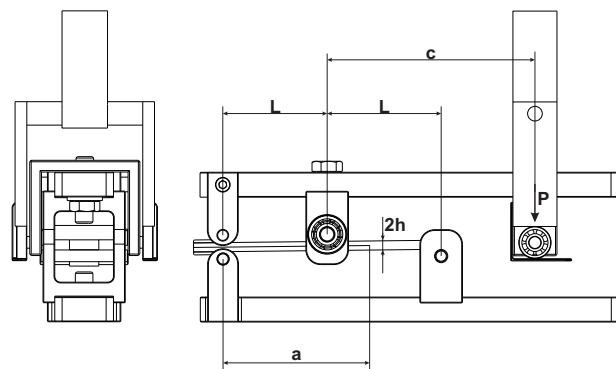
adatok feldolgozásához szükséges képleteket, illetve, hogyan lehet a teszt geometriai paramétereit megfelelően beállítani.

A jelenlegi cikk célja bemutatni a pontosított számításokat, valamint azt, hogy hogyan célszerű a módosított berendezést gyakorlatban is alkalmazni. Az MMB teszt a BME Gépészmérőki Kar Műszaki Mechanikai Tanszékén is elérhető, a laboratóriumban készült berendezést mutatja az 1.a ábra, illetve legfontosabb részleteit az 1.b ábra.

a.



b.



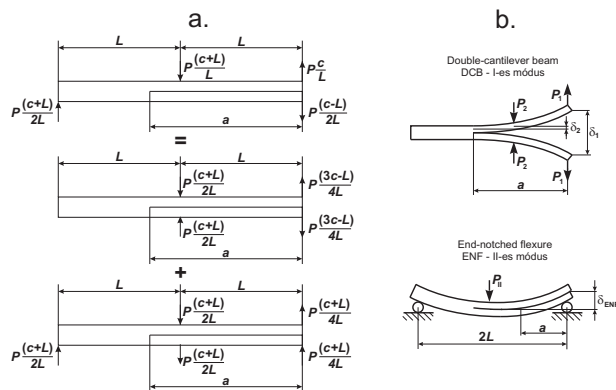
1. ábra. Az MMB teszt részletei (a: 1 – alap, 2 – támaszték, 3 – acélgörgő, 4 – erőbevezetés, 5 – digitális mérőóra, 6 – próbatest, 7 – golyóscsapágy) és geometriai paramétereit (b).

* egyetemi adjunktus, BME Műszaki Mechanikai Tanszék

2. AZ ANALITIKUS MEGOLDÁS ÁTTEKINTÉSE

Az MMB teszt a jól ismert double-cantilever beam (DCB) és az end-notched flexure (ENF) típusú próbatetek kombinációja [2]. A 2.a és b ábrán látható szuperpozíciós séma alapján a terhelések:

$$\begin{aligned} P_I &= P \frac{3c-L}{4L}, & P_2 &= P \frac{c+L}{2L}, \\ P_{II} &= P \frac{c+L}{L} \end{aligned} \quad (1)$$



2. ábra. Az MMB próbatest terhelésének szétosztása a szuperpozíció elve alapján (a), a DCB és ENF próbatetek deformációja (b).

2.1 A DCB rész analízise

A DCB próbatest (2.b ábra, felső rajz) hajlításból és nyírásból adódó deformációja a Timoshenko-féle rúdelméletből számolható [5]. A 2.a ábrán látható DCB model 1 és 2 pontjaiban az elmozdulások:

$$\delta_{TIM1} = \frac{P[a^2(ac - 3aL + 3Lc + 3L^2) - L^3(c+L)]}{Lbh^3E_{11}} + \frac{P(3ac - 9aL + 6Lc + 6L^2)}{12LbhG_{12}} \quad (2)$$

$$\delta_{TIM2} = \frac{P(a-L)^2(2ac - 6aL + 7Lc + 3L^2)}{Lbh^3E_{11}} + \frac{P(a-L)(6c - 18L)}{24LbhG_{12}}$$

ahol P a külső terhelés (ld 1.b ábra), a a repedés hossza, L a teljes hossz fele, c a terhelésbevezetés pozíciója, b a próbatest szélessége, h a próbatest félvastagsága, $k = 5/6$ nyírási korrekciós tényező, E_{11} a próbatest anyagának hajlítómódulusa, G_{12} pedig a csúsztató rugalmassági modulusz. A tartó elmozdulása tovább pontosítható a Winkler-Pasternak-féle kétparaméteres rugalmas ágyazás alkalmazásával. A 3.ábrán látható tartó elmozdulásfüggvényére a következő differenciálegyenlet írható fel [6]:

$$w^{IV} - 2\eta^2 w'' + 4\beta^4 w = 0, \quad (3)$$

ahol:

$$2\eta^2 = \frac{k_G}{I_z E_{11}}, \quad 4\beta^4 = \frac{k_e}{I_z E_{11}}, \quad (4)$$

$$I_z = \frac{bh^3}{3}, \quad k_e = 2\frac{b}{h}E_{33}, \quad k_G = 4.08bh\sqrt{E_{11}E_{33}}.$$

Az 1 és 2 terhelési pontokban a kétparaméteres ágyazásból adódó elmozdulásnövekmények a v_0 és θ_0 repedéscsúcsban számolt elmozdulás, illetve szögelfordulás segítségével fejezhetők ki:

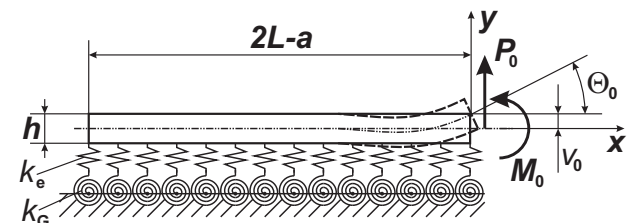
$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{M_0(3m_{32}^2 - m_{31}^2) + 2P_0m_{32}}{(m_{32}^2 + m_{31}^2)^2 I_z E_{11}}, \\ \theta_0 &= \frac{2M_0m_{32} + P_0}{(m_{32}^2 + m_{31}^2) I_z E_{11}}. \end{aligned} \quad (5)$$

ahol m_{31} és m_{32} a differenciálegyenlet karakterisztikus gyökei:

$$m_{31} = \frac{1}{2}\sqrt{4\beta^2 - 2\eta^4}, \quad m_{32} = \frac{1}{2}\sqrt{4\beta^2 + 2\eta^4}. \quad (6)$$

Az elmozdulások a terhelési pontokban így:

$$\delta_{WP1} = v_0 + \theta_0 a, \quad \delta_{WP2} = v_0 + \theta_0(a-L). \quad (7)$$



3. ábra. Kétparaméteres, rugalmas ágyazású tartó az MMB próbatest modellezéséhez.

Az ún. Saint-Venant-féle deformációt több cikkben is bemutatották [7]. Ehhez szükség van a repedéscsúcsban ébredő hajlítónyomaték számítására:

$$M = P_1 a - P_2(a-L) = P \frac{a(c-3L) + 2L(c+L)}{4L}. \quad (8)$$

Ennek segítségével számolható ki a keresztmetszet szögelfordulása [7]:

$$\vartheta = \frac{6M}{bh^2 E_{11} \pi} \left(\frac{E_{11}}{G_{12}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{6P[a(c-3L) + 2L(c+L)]}{4Lbh^2 E_{11} \pi} \left(\frac{E_{11}}{G_{12}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Az ebből származó elmozdulásnövekmények a P_1 és P_2 erők támadáspontjában:

$$\delta_{SV1} = \vartheta a, \quad \delta_{SV2} = \vartheta(a-L). \quad (10)$$

Végül, mindkét pontban összegezve az elmozdulásokat kapjuk, hogy:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \delta_{TIM1} + \delta_{WP1} + \delta_{SV1}, \\ \delta_2 &= \delta_{TIM2} + \delta_{WP2} + \delta_{SV2}.\end{aligned}\quad (11)$$

2.2 Az ENF rész analízise

Az ENF típusú próbatétel rugóállandója a hajlítási deformáció alapján [4]:

$$C_{ENF1} = \frac{(3a^2 - 18a^2L + 36aL^2 - 16L^3)}{8bh^3E_{11}}. \quad (12)$$

Ebben a próbatételben a repedéscsúcs nyírási deformációját is figyelembe lehet venni [8]. A nyírási deformációt a következő differenciálegyenlet írja le:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \rho^2\tau = 0, \quad \rho = \left(\frac{21G_{12}}{4E_{11}h^2}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Az egyenlet egyszerűen megoldható, majd abból a rugóállandót növelő tag is kifejezhető:

$$C_{ENF2} = \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} f_{SH}, \quad (14)$$

ahol:

$$f_{SH} = 0.98 \left(\frac{c}{a}\right) \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E_{11}}{G_{12}}\right)^{\frac{1}{2}} - 0.43 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E_{11}}{G_{12}}\right). \quad (15)$$

A teljes rugóállandó pedig:

$$C = C_{ENF1} + C_{ENF2}. \quad (16)$$

2.3 MMB teszt – szuperpozíció elve

Az MMB teszt teljes rugóállandója az eredmények szuperpozíciója alapján számolható ki. Az erők által végzett munka egyenlőségéből kapjuk, hogy:

$$P\delta = P_1 2\delta_1 - P_2 2\delta_2 + P_{II} \delta_{ENF}, \quad (17)$$

ahol δ az 1.b ábrán látható P erő támadáspontjában számolt elmozdulás. Mivel $2\delta_1 = C_1 P_1$, $2\delta_2 = C_2 P_2$ és $\delta_{ENF} = C_{ENF} P_{II}$, így azt kapjuk, hogy:

$$C = \left(\frac{3c-L}{4L}\right)^2 C_1 - \left(\frac{c+L}{2L}\right)^2 C_2 + \left(\frac{c+L}{L}\right)^2 C_{ENF}. \quad (18)$$

A repedésfeszítő erőt célszerű külön az I-es és II-es módusra is kiszámítani [2] alapján:

$$\begin{aligned}G_I &= \frac{12P^2}{b^3h^3E_{11}} \left(\frac{ac-3aL+2Lc+2L^2}{4L}\right)^2 + \frac{P^2}{b^2hkG_{12}} \left(\frac{c-3L}{4L}\right)^2 + \\ &+ \frac{12P^2}{b^2h^2E_{11}} \frac{(ac-3aL+2Lc+2L^2)(c-3L)}{16L^2\pi} \left(\frac{E_{11}}{G_{12}}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{12P^2a^2}{b^2h^2E_{11}} \left(\frac{c-3L}{4L}\right)^2 f_{WP},\end{aligned}\quad (19)$$

ahol:

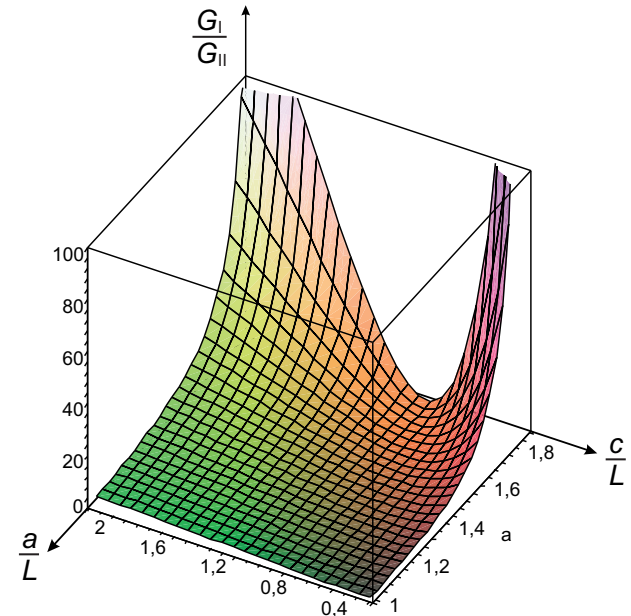
$$f_{WP} = 0.85 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E_{11}}{E_{22}}\right)^{\frac{1}{4}} + 0.71 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{22}}\right)^{\frac{1}{2}} - 1.69 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{L}{a}\right) \left(\frac{c+L}{3L-c}\right) \left(\frac{E_{11}}{E_{22}}\right)^{\frac{1}{4}}. \quad (20)$$

A II-es módusú repedésfeszítő erő [8] alapján:

$$G_{II} = \frac{9P^2(2L-a)^2}{16b^2h^3E_{11}} + \frac{P^2a^2}{16b^2h^2E_{11}} f_{SH}. \quad (21)$$

3. A GEOMETRIAI PARAMÉTEREK BEÁLLÍTÁSA

Az eredeti MMB próbatétel egyik fontos tulajdonsága, hogy a G_I/G_{II} módarány változtatható a c távolság változtatásával. A módosított változatban ez szintén igaz, viszont a módarány a repedési hosszról is függ. A 4. ábrán láthatjuk, hogy hogyan változik a módarány az a/L és c/L arányokkal. A számításokat egy a BME Műszaki Mechanikai Tanszéken is többször vizsgált üvegszál erősítésű poliészter próbatestekre végeztük el, melynek rugalmas tulajdonságai: $E_{11} = 33$ GPa, $E_{22} = 7.2$ GPa, $G_{12} = 3$ GPa.

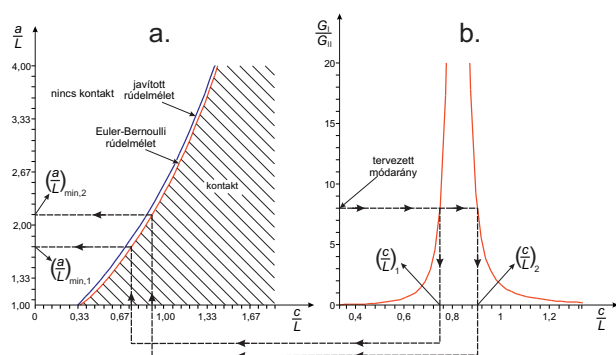


4. ábra. A módusok arányának változása az MMB próbatestnél az a/L és c/L viszonyok függvényében.

Az MMB teszt geometria paramétereit nem tetszőlegesen. A próbatestben csak akkor tudunk létrehozni repedésnyílást, ha a DCB rész felső és alsó próbatestkarjai a középső erőbevezetéstől balra haladva nem érintkeznek (ld. 1.b ábra). A mechanikai modell alapján a feltétel: $\delta_2 \geq 0$. A (2) képlet második tagja alapján, a következőt kapjuk az a/L viszonyra:

$$\frac{a}{L} \geq -\frac{7c/L+3}{2(c/L-3)} \quad (22)$$

Megjegyezzük, hogy a (22) képletben csak az Euler-Bernoulli rúdelmélet eredményét vettük figyelembe, ami a (2) képletekben az első tagok. Az 5.a ábrán látható, hogy a pontosított megoldás ettől nem sokban tér el. A (22) képletet visszatéve a módarány képletébe (a (19) és (21) képletekből számolható) kapjuk az 5.b ábrán látható függvényt. Az 5.b ábra alapján a kísérlet megtervezésekor a kívánt módarány értékéből indulunk ki. Ez után ki kell számítani, hogy ehhez a módarányhoz milyen c/L viszony szükséges. Az 5.b ábra alapján látható, hogy minden módarány esetén két megoldásunk van. A megoldások és az 5.a ábra alapján visszaszámolható a minimálisan szükséges repedési hosszak a kontakt elkerülése érdekében. Ebből az is következik, hogy a módarány változtatásához nem elég a c/L viszony (azaz tulajdonképpen a c paraméter) változtatása, hanem a repedési hosszt is változtatni kell. Mivel a pontosított megoldás egy kicsit nagyobb repedési hosszt írna elő a kontakt elkerüléséhez (ld. 5.a ábra), ezért a kísérlet tervezésekor célszerű a számított minimálisan szükséges repedési hosszt 5 %-al megnövelni.



5. ábra. A minimálisan szükséges a/L viszony ábrázolása a c/L viszony függvényében a kontakt elkerülése érdekében (a). A módarány változása a c/L viszony függvényében kontakt nélkül (b).

ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben az MMB próbatest módosított változatát elemeztük és megmutattuk, hogy a rendszer geometriai paramétereit hogyan kell beállítani ahhoz, hogy a tervezett módarányt meg tudjuk valósítani. Az eredmények alapján a kívánt módarány eléréséhez a c/L viszony mellett a kontakt elkerüléséhez szükséges a/L

viszonyt is meg kell állapítani. E két paraméter megfelelő beállításával az MMB teszt sikeresen alkalmazható hosszú repedések esetén is.

SUMMARY

In this paper the modified version of the MMB test was analysed and it was shown how to set the geometrical parameters of the system in order to realize the designated mode ratio. To reach the desired mode ratio, it is necessary - apart from setting the c/L ratio - to set the proper a/L ratio eliminating contact between the specimen arms. By the proper adjustment of these two parameters it is possible to successfully apply the MMB test even for long cracks.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja, valamint az OTKA T34040 pályázat és a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatja.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] H. BLUMENAUER, G. PUSCH. Műszaki törésmechanika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [2] J.H. CREWS JR, J.R. REEDER. A mixed-mode bending apparatus for delamination testing. NASA Technical Memorandum 100662, August. 1988; 1-37.
- [3] ASTM D6671 – 01. (2001). Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fibre reinforced polymer matrix composites, *Annual Book of ASTM Standards*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol. **15.03**.
- [4] R.T. TENCHEV, B.G. FALZON. A correction to the analytical solution of the mixed-mode bending (MMB) problem. *Composites Science and Technology* 2007;67:662-668
- [5] F. OZDIL, L.A. CARLSSON. Beam analysis of angle-ply laminate DCB specimens. *Composites Science and Technology* 1999;59:305-315
- [6] ROSA, DE M.A. Free vibrations of Timoshenko beams on two-parameter elastic foundation. *Computers & Structures* 1995;57: 151-156.
- [7] R. OLSSON. A simplified improved beam analysis of the DCB specimen. *Composites Science and Technology* 1992;43: 329-338.
- [8] WANG J, QIAO P. NOVEL beam analysis of the end notched flexure specimen for mode-II fracture. *Engineering Fracture Mechanics* 2004;71: 219-231.

ÜVEG MIKROLENCSEK NANOMÉTER PONTOSSÁGÚ MEGMUNKÁLÁSA

NANOMETER-PRECISION MACHINING OF GLASS MICROLENSSES

Dr. Szalay Tibor, Székely Ferenc***

ABSTRACT

In the EU supported integrated research project Production4 μ the development of mass production technologies for high precision optical parts is realized. In the first part of this paper traditional direct manufacturing of glass lenses is described shortly. The following chapter deals with high precision moulding of glass lenses. The concept of the moulding is the most relevant factor of successful manufacturing of lenses. There are several special problems in high precision micro lens moulding which must be taken in account during the manufacturing process. Some design rules are presented in the paper. Some results of the project are described in the last chapter.

BEVEZETÉS

Az EU által támogatott Production4 μ nevű integrált kutatási projekt nagy pontosságú optikai alkatrészek tömegtermelésére alkalmas technológiák fejlesztésével foglalkozik. A cikk első része a hagyományos direkt üveglencsegyártást ismerteti röviden. A következő fejezet foglalkozik nagy pontosságú fröccsöntött üveg lencsékkel. A szerszám (negatív forma) kialakítása a legfontosabb tényező a sikeres lencsegyártás eléréséhez. Számos speciális probléma létezik nagy pontosságú mikro lencsék direkt gyártásánál, ill. fröccsöntésénél, amelyeket figyelembe kell venni a gyártási folyamat során. A legfontosabb gyártási szabályokat mutatja be a cikk, direkt lencsegyártás és fröccsöntés esetén. Néhány projekt eredményei kerülnek ismertetésre az utolsó fejezetben.

1. A TÉMATARÜLET FONTOSSÁGA

Optikai lencse gyártása nagy jelentőségre tett szert az elmúlt évtizedben, mert egyre jobban terjed az alkalmazásuk a mobil telefonokban, és egyre nagyobb az igény irántuk a digitális fényképezőgépekben és videokamerákban, az orvostechikai eszközök vagy egyéb luxus szolgáltatások terén, mint járművek hátsó kamerája, videotelefon, stb. Egyre nagyobb termelési

volumen jár együtt a csökkenő méretekre és bonyolultabb geometriákra irányuló követelményekkel. A fent említett tendenciák miatt a hagyományos lencsegyártási technológiát bizonyos lépéseknél fejleszteni kell, hogy nagy pontosságú lencsék tömeggyártására alkalmas technológiát kapjunk. Például a mobiltelefonokhoz használt lencsemodul piacában a termelés volumenének értéke több mint kétszeresére bővült az elmúlt 5 évben 2004. [1] (1. ábra). Felismerve ezt a tényt az Európai Unió támogat egy integrált projektet: Gyártási technológiák mikrorendszerekhez (Production4 μ), amely erre a problémára fókuszál. Ebben a kutatásban 20 vállalat és kutatóintézet közösen dolgozik gyártástechnológiák fejlesztésén a mikro-optikaiipar részére, amely lehetővé teszi nagy pontosságú gyártási folyamatok elérését, reagálva az elvárásokra, amelyek a rugalmasság, költséghatékonyság irányába mutatnak, komplex geometriájú, funkcionális mikrolencsék előállításánál. A projekten belül elkészült egy felmérés, amely a Magyarországon meglévő ipari háttérrel szól.

2. DIREKT ÜVEGLENCSE GYÁRTÁS

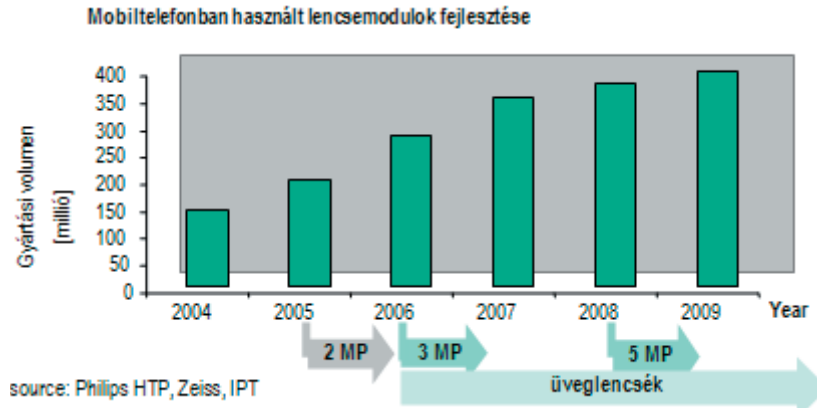
P4 μ projekten belül az optikai elemek gyártásának magyarországi ipari háttere került felmérésre, melynek során különböző cégek és a náluk alkalmazott technológiák kerültek megismerésre [2]. Továbbá elkészült egy tanulmány, amely a lencsék funkció szerinti leírásán alapszik [3].

A hagyományos lencsék gyártásának általános leírása után, összefoglaljuk azokat a legfontosabb technológiákat, amelyeket a magyar cégek alkalmaznak. E jelentés alapján a következőkben egy rövid felmérés kerül bemutatásra a hagyományos direkt lencsegyártásról.

A kilencvenes években történt gazdasági változás után a korábbi MOM és Gamma romjaiból néhány optikai cég kezdett el működni Magyarországon. Ezek közül számos tartozik nemzetközi cégekhez (úgy mint Zeiss vagy Hoya), míg néhány magyar tulajdonban maradt.

* egyetemi docens, BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

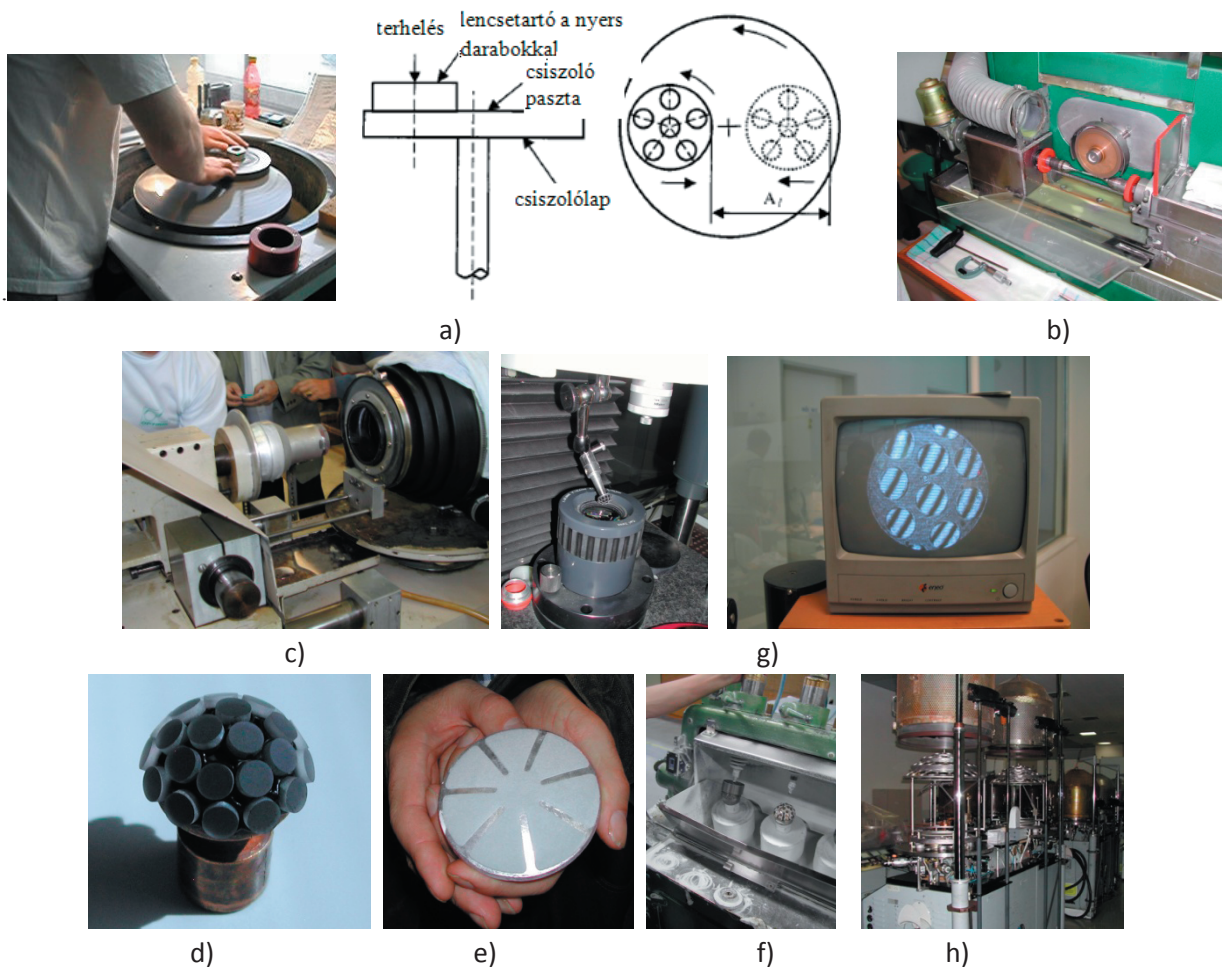
** ügyvivő szakértő, BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék



1. ábra. Mobiltelefonokban használt lencsék gyártási mennyiségének alakulása 2004 óta.

Első lépésben az előgyártmánynak megfelelő geometria kerül kivágásra egy üvegtömbből, amely egy négyzet alakú üveglapot eredményez. A következő lépésben ennek a lapnak az egyik oldalát kell síkba köszörülni, annak érdekében, hogy a referencia felületet hozzunk létre (2. ábra-a). Gyártási szabály, hogy csiszolás a lencsék bizonyos átmérője felett gyémánt simító szerszámok

felhasználásával drágább, mint a szabad szemcsékkel való csiszolás, figyelembe véve a felkészülési időt az eszközöket és anyagokat. A referenciafelület kialakítása után a lap másik oldalát is síkba kell csiszolni és a kívánt vastagságot ki kell alakítani. Egyszerre több lap is megmunkálható egy gépen, de csak akkor, ha azonos vastagságra kell őket megmunkálni.

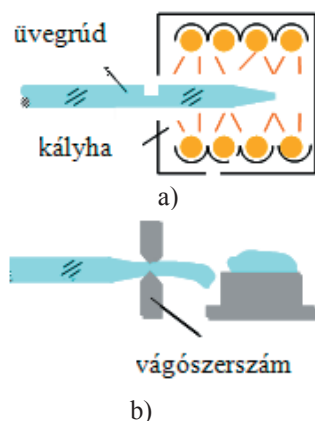


2. ábra. A direct lencsegyártás lépései

A vastagság beállítása után a négyzet alakú blokkokat tömbé fogjuk össze egy speciális készülékben és hengerpalást alakú felületet hozunk létre (2. ábra - b). A hengeres felület kialakítása után gömbfelületet hoznak létre egy NC köszörűgépen (2. ábra - c). Miután nagyolással megmunkálták a felületet a lencsüket egy tartóeszközeire ragasztják (2. ábra - d). Átmérőtől függően több lencse is kerülhet egy hordozóra. A következő lépésben a lencsüket cerium-oxid szemcsékkel csiszolják (2. ábra - e és f). Csiszolás és leppelés után a lencsüket leveszik a hordozóról és megmossák őket. A következő művelet a lencsék paramétereinek mérése az esetleges selejtek kiválogatása céljából (2. ábra - g). Az utolsó lépésben a lencsükre bevonat kerül (2. ábra - h). A fotók Europtic, Optiris and Zeiss cégek jóvoltából kerülhettek felhasználásra.

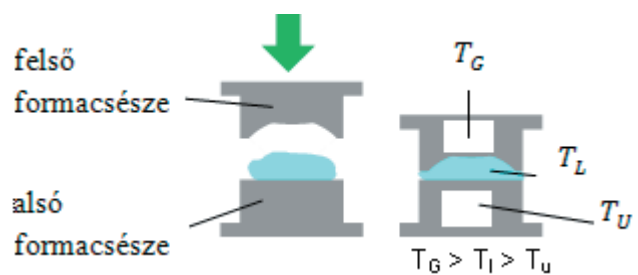
3. ÜVEGLENSÉK PRECÍZIÓS SAJTOLÁSÁNAK KONCEPCIÓJA

Az üvegsajtoltást gyakran alkalmazzák nyers lencsék előállítására. Általában szemüvegek lencsési készülnek ilyen eljárással. Jóllehet a folyamat koncepciója ismert, viszont a kisméretű lencsék gyártásához és a komplex geometriai követelmények miatt további problémákat kell megoldani. A projekt ezekre a speciális körülményekre és követelményekre fókuszál. A sajtolás előtt az üveget egy elektromosan működtetett kemencében melegítik. Ez a kályha általában a sajtoló egység jobb oldalán helyezkedik el. Az előgyártmány előzetesen csiszolt rúd alakú optikai üveg amelyet előmelegítenek. (3. ábra - a). Az üveget közelítőleg 800°C-ra melegítik fel az aktuális üvegfajtától függően. Pozicionáláshoz egy bizonyos mennyiségű képlékeny üveget vágnak le a rúdról és az alsó formacsészébe (szerszámba) helyezik. Általában fémvágó szerszámot használnak erre a célra. (3. ábra - b).



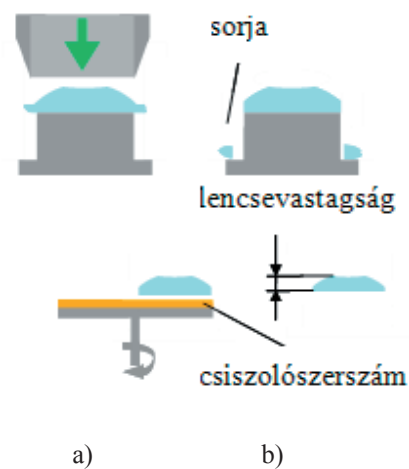
3. ábra. Előmelegítés és vágás

A melegítés fázisában mindkét formacsésze meglehetősen közel helyezkedik el egymáshoz. A pneumatikus berendezés mozgatja a felső egységet lefelé egy meghatározott erővel, mialatt a felső formacsésze érintkezik az üveganyaggal és alakítja azt (erőszabályozás). Ezen folyamat alatt a csésze hőmérséklete sokkal alacsonyabb, mint magának az üvegnek a hőmérséklete. Ezért, a hő az üvegből viszonylag gyorsan a csészébe vezetődik. Továbbá, az alsó csésze magasabb hőmérsékletű, mint a felső, ami azt jelenti, hogy az alsó csészében a hővezetés lassúbb, mint a felsőben. Ez azt jelenti, hogy az üveg és a csésze kontaktzónájában nem izoterm körülmények alakulnak ki. (4. ábra).



4. ábra. Sajtolás

Rögtön a sajtolási művelet után a darabokat kiemelik a csészékből és megkezdik a lehűtést. Figyelembe véve, hogy nem meghatározott mennyiségű üveg kerül a csészébe a darabok szélén sorja jelenik meg, amelyet a következő lépésben el kell távolítani (5. ábra - a). Az üveg magas hőmérséklete miatt nagymértékű zsugorodás megy végbe a hűtési folyamat alatt. A csészék eltérő hőmérséklete miatt a zsugorodás a lencse alsó részében erőteljesebben jelenik meg. Ez azt jelenti, hogy a lencsék alsó felén további műveleteket kell végrehajtani azért, hogy a zsugorodásból adódó különbséget kompenzáljuk és beállítsuk a lencsék pontos vastagságát. (5. ábra - b).



5. ábra. A szükséges utómunkálatok

A legfontosabb előnye ennek az eljárásnak az, hogy a lencse és a szerszám kontaktideje kevesebb, mint egy másodperc. Ez azt jelenti, hogy ez az eljárás nem csak tömegtermelésre alkalmas, hanem azt is, hogy magasan ötvözött acélok használhatók a csészek elkészítéséhez. Ha a kontaktidőt megnöveljük, akkor az a lencse és a szerszám összeragadását eredményezheti.

Az eljárás hátrányai: kevés üvegtípus sajtolható, a zsugorodás korlátozza az elérhető pontosságot; a zsugorodási folyamat csiszoló és polírozó lépéseket von maga után a sík felületeken, melynek következménye, hogy csak egyoldalas funkcionális felület alakul ki. Ezen negatív hatások miatt módosított munkafolyamatot kell kifejleszteni a nagy pontosság eléréséhez [4].

4. A PRECÍZIÓS MIKROLENCSE-SAJTOLÁS SPECIÁLIS PROBLÉMÁI

Makrotermékek gyártástervezésének folyamatában a termék definiálható a geometriából (hossz, tőrés, felületek) és az anyagtulajdonságokból. Bizonyos méretek alatt és nanométeres megmunkálási pontosság esetén további sajátosságokat is figyelembe kell venni.

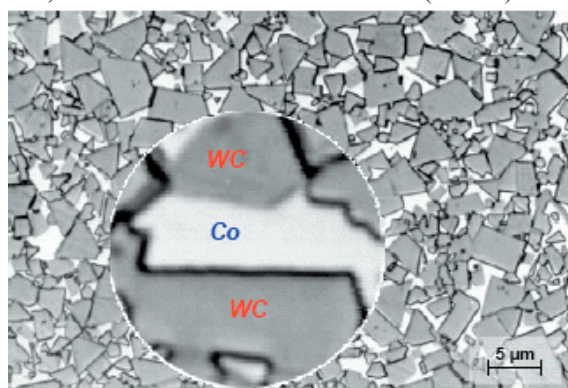
Ezek az új tulajdonságok a következők:

- Izotróp anyageloszlás,
- Adhéziós erők,
- Funkcionalitás,
- Kis gravitációs erő,
- Segédanyagok,
- Szemcseméret és elaszticitás,
- Statikus erők,
- Gőz

A folyamatláncban a gyártó lépéseken keresztül munkadarab kezelés korlátozza a pontosságot. Az automatizált mozgások és gépen belüli folyamatok limitálhatják a kezelési pontatlanságokat, ha a darabok tájolását a készülékben nagy pontosságú mérésekkel végzik, rendszeres beállítást alkalmaznak a gépeken a nanométer pontosságú pozicionáláshoz, előzetes szerszámbeállítást és szerszámkopásból adódó kompenzációt végeznek minden műveleti lépésnél, kiegyensúlyozó és rezgésillapító rendszereket alkalmaznak, és minőségellenőrzést integrálnak a folyamatba, lehetővé téve ismételt ellenőrzést a megkívánt felület és tőrés eléréséhez. Hosszabb szerszám-üveg kontaktus esetén a csésze anyagára és bevonatára nagy hangsúlyt kell fektetni. A formacsészek pontossága és alakhűsége meghatározza a lencse geometriáját, ezért

ezek gyártása kulcsfontosságú tényező üveglencsék préselése esetén [5].

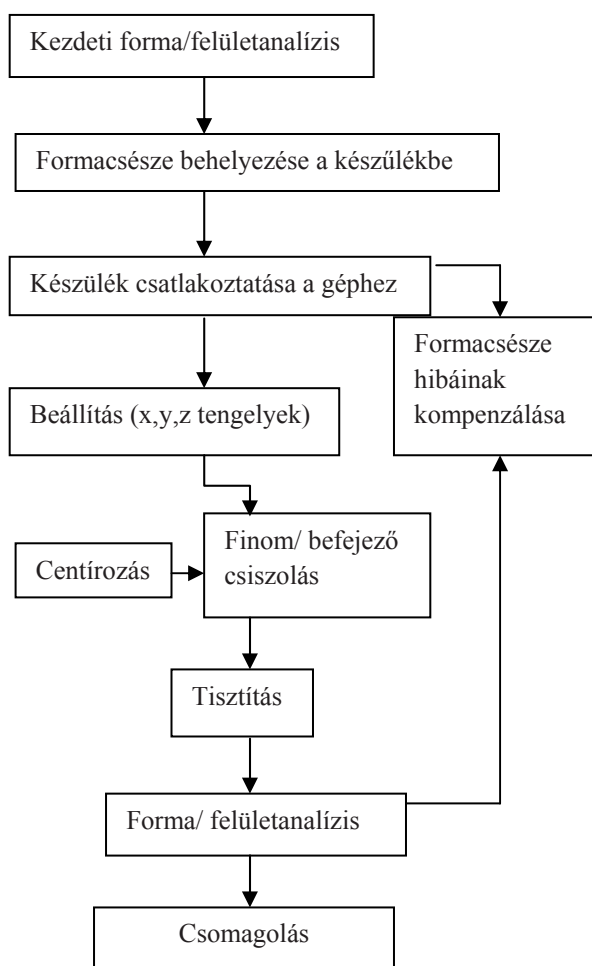
A rendkívül magas hőmérséklet és nyomás miatt, üvegsajtolási folyamatban a szerszámmal szemben támasztott legfontosabb követelmények a következők: keménység, melegszilárdság, hőállóság, korrózióállóság, hővezetés, megfelelő hőtágulás, nagy sűrűség, ill. a lehető legalacsonyabb porozitás, homogenitás, izotrópia és az optikai megmunkálhatósága. Bevont kötőanyag nélküli ultrafinom wolfram-karbid és a modern kerámiák alkalmasak optikai felületek generálására és biztosítják a kívánt tulajdonságokat. Annak érdekében, hogy meghosszabbítsuk a szerszám élettartamát és megakadályozzuk az összetapadást a forma és az üveg között, bevonatot kell felvinni a csésze (6. ábra).



6. ábra. Kötés nélküli ultrafinom volfrámkarbid bevonat nagyított képe

5. SPECIÁLIS SZERSZÁMGYÁRTÁS

A formacsészek speciális finommegmunkálása gyémántesztergálással vagy csiszolással lehetséges. További ultrafinom befejező csiszolás (tükrösítés vagy polírozás) szükséges végső geometria eléréséhez. Annak érdekében, hogy figyelmen kívül hagyassák a formából adódó hibákat, -úgy mint központosító hibák (x, y), szerszámsugar hibája, forgácsolási erők miatt fellépő szerszámelmozdulás, a folyamatos szerszámkopásból adódó alakhiba, hőtágulás miatt bekövetkező hiba, a megmunkáló orsó kiegyensúlyozatlanságából származó felszíni hibák, szerszám / csésze kiegyensúlyozatlanság, géptengely szervóhiba, csorbulási hiba, csiszolókorong állapota- egy iterációs megmunkálási eljárás kerül alkalmazásra. A 7. ábrában a kezdeti forma- és felületanalízis a hőmérsékleteloszlás végeelem programmal végzett vizsgálatát jelenti, a forma származtatása egyrészt az üveg zsugorodása, másrészt a csésze beállítási stratégia figyelembevételével történik [6].



7. ábra. Lencsegyártás iterációval

6. A DIREKT ÉS A SAJTOLT LENCSEGYÁRTÁS ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

A hagyományos aszférikus lencsegyártási technológiák különböző technológiákat használnak, mint például egyponos köszörülés, gyémántesztergálás, kézi csiszolás.

Általános szabály, hogy ezek az eljárásokat utólagos felületkorrekció követi.

Ez gyakran időigényes ismétlődő folyamat még a modern CNC köszörű és polírozó gépek világában is. Nem ritka, hogy a csiszoló és polírozó folyamat lefutási ideje 2-3 óra. Továbbá, a hagyományos módszerek különböző mértékű felszíni eltéréseket eredményezhetnek, amelyek általános hatással lehetnek a lencse minőségére.

Bár ezek a módszerek sikeresnek bizonyultak, ennek ellenére az préselés technológiájának alkalmazása kiváló módszer a nagy mennyiségű objektívek minimális felszíni eltérésekkel való gyártásához.

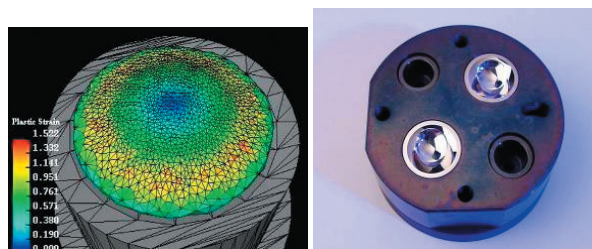
A lencsesajtolás kiváló ismétlési pontosságot eredményez ebből adódóan a darabok egymástól való eltérése minimális.

A normál gyártási idő aszférikus sajtolt lencsék esetén 8-15 perc, ez a rövid ciklusidő nagy termelékenységet tesz lehetővé, amellyel nagy előnyre tesz szert a direkt lencsegyártással szemben.

Továbbá, azzal, hogy egy ciklus alatt sajtolással is tudunk egyszerre több darabot gyártani, ez a technika gyorsan felülemelkedik bármilyen hagyományos aszférikus lencsék gyártó eljárás által előállított mennyiségen.

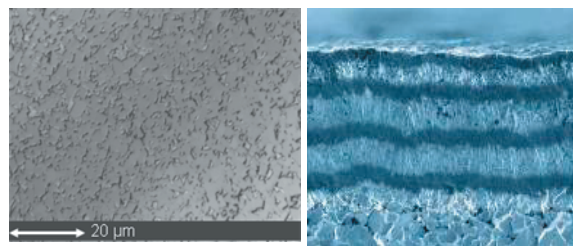
7. MEGOLDANDÓ FELADATOK

- Hőmérsékleti hatások szimulációs vizsgálata (8. ábra)
- A jelenlegi tervezési koncepciók elemzése, fejlesztése
- A formacsészek precíziós pozicionálása és rögzítése
- A formacsésze alakok vizsgálata különböző geometriák esetén



8. ábra. Szimuláció és az elkészült szerszám

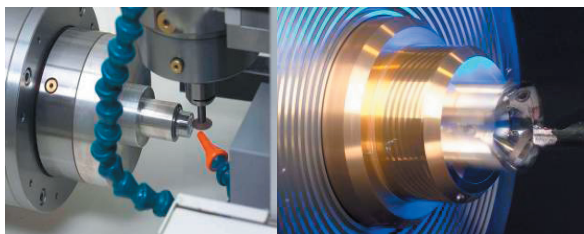
- A jelenleg alkalmazott formacsésze anyagok elemzése
- Szinterelési technológia fejlesztése
- Különböző bevonatolási technológiák és anyagok vizsgálata (mechanikai és termikus viselkedés) (9. ábra)



9. ábra. Formabevonat vizsgálata

- A köszörülés és a gyémántesztergálás folyamatának vizsgálata és optimalítása (10. ábra.)

- Szerszámbeállítási stratégiák
- Számítógépes szerszám-pálya tervező modul fejlesztése a CAM rendszerekhez
- A forma deviációk szisztematikus elemzése és kompenzációs módszerek kidolgozása



10. ábra. Köszörlés és gyémántsztergálás elrendezése

- A formába önthető üvegyanyagok elemzése
- Az optikai üveg mechanikai és optikai tulajdonságainak azonosítása
- A megfelelő üvegösszetételek megtalálása olvasztási kísérletekkel (11. ábra)
- Folyamatelemzés és a befolyásoló paraméterek beazonosítása
- A demonstrátor geometriák kialakításának gyártási stratégiái megfelelő formabevonó anyagokkal



11. ábra. Az üvegyanyag összetevői és az elkészült lencse

ÖSSZEFOGLALÓ

Elemelve a két eljárást azt lehet mondani, hogy direkt lencsegyártásban nagyobb az ipari tapasztalat, mivel lencsepréslés technológiája még nem jutott el végső stádiumába. A projektben 20 együttműködő partner dolgozik a formacsészek vizsgálatán, a kezelési folyamat automatizálásán és egy technológiai útmutatón, az ezzel foglalkozó iparágazat részére. A cikkben a tématerület főbb motivációs tényezői lettek kiemelve, az optikai elemek gyártástechnológiájának jelenlegi szintje lett bemutatva és a projekt néhány eredménye, illetve terve került leírásra. A leírások, ábrák, és az eredmények nagy része nem a szerzők önálló munkája, hanem a többi projektpartnerrel való együttműködés eredménye. A szerzők célja az volt, hogy demonstrálják az ilyen típusú

nemzetközi együttműködés hatékonyságát és, hogy bemutassák ennek a precíziós gyártási terület jelenlegi fejlettségi szintjét.

SUMMARY

After the two methods are analyzed, it can be argued that direct lens manufacturing has more industrial experience as lens moulding technology has not yet reached the final stage of the project. The 20 involved partners are co-operate in mould analysis and development, in automating the handling process and in compiling the appropriate technology guide for supporting the involved industry. In the paper the main motivating issues were emphasized the actual state of the optical part production was introduced and some results and plans of the project were presented. The descriptions, figures and mostly the results are not the invention and work of the authors, but the common achievement of the project partners. The only desire of the authors was to demonstrate the efficiency of this kind of international joint research and illustrate the state of the art in this precision manufacturing field.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az EU FP6 keretében támogatott Production4 μ projekt résztvevőivel együttműködve zajlott. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műgyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Production for micro, Project overview, http://www.production4micro.net/project_overview.htm
- [2] Deliverable 14 Overview of European middle cost level optical manufacturing companies and their capabilities, Production4 μ projekt NMP-CT-2006-026765
- [3] Brecher, C.; Weinzierl, M.; Niehaus, F.; Schmitt, R.; Köllmann, D.: Microscale Mass Production - European researchers develop automated system for mass producing optical devices, *Micro Manufacturing 2* (2009), 1, S. 44 – 47
- [4] Wögerer C, Dickerhoff M, Haidegger, G, Szalay, T.: „Technology platform MINAM: An instrument for micro-and nanomanufacturing in Europe”, *Manufacturing 2008: Biannual 19th International Conference Preprints*. Budapest, Magyarország, 2008.11.06-2008.11.07. pp. 44-53.
- [5] Guido Pongs: “High precision glass moulding of optical components”, *Budapest Workshop on Optics Production*, Sept. 7, 2007, *Proceedings*, P3 pp. 1- 28
- [6] Olaf Dambon, Fei Wang, Fritz Klocke, Guido Pongs, Bernd Bresseler, Yang Chen, Allen Y. Yi: Efficient mold manufacturing for precision glass molding, *Journal of Vacuum Science & Technology B Volume 27 Issue 3*

CONTENTS

1. Orbulov, I.:
Microstructural investigation of metal matrix syntactic foams4
Syntactic foams are composites in which the metal matrix contains hollow micro-spheres as porosity source. According to author's investigation when the matrix is Al, harmful chemical reactions take place at the metal-ceramics phase-boundary. These reactions can be eliminated by use of AlSi12 alloy matrix.
2. Jesch, D., Kristóf, G., Vad, J.:
Execution and application of a side channel pump test facility9
Paper describes the build up an optically accessible model fuel pump, which is a scaled-up version of a real one and shows some characteristic features of the test equipment. The experimental facility seems to be capable for studying various flow phenomena (such as cavitation).
3. Vad, J.:
Design and measurement of axial flow flue gas extractor fans of high specific performance and energetically favourable operation.....15
The main features and practical advantages of 'controlled vortex' design applied for axial flow fans is presented. The application of controlled vortex design is demonstrated in an example of industrial prototype fan with outlet guide one.
4. Czél, B.; Gróf, Gy.:
Sensitivity analysis for the evaluation of a thermophysical property measurement method with numerical approach19
In case of use of numerical approach measurement methods, the direct problem of heat conduction has no restrictions, but the evaluation becomes more difficult. Applying sensitivity analysis the possibility of estimation of the unknown parameters through the inverse solution can be examined.
5. Bothné Fehér, K.; Örvös, M.:
Mass transfer properties at sulphur dioxide control24
Gas and liquid side mass transfer coefficients (HOG, HOL, KGa, KLa) were determined by experiment which make possible dimensioning of equipment used for reducing SO₂ emission. Results were compared with different packing based on literature.
6. Szűcs, J.; Váradi, K.; Zobory, I.; Szabó, A.:
Wear behaviour of a brake block-wheel connection28
Paper presents the experimental investigation of the wear behaviour of a brake block-wheel connection using a test machine installed at the Railway Vehicle and Vehicle-system Analysis Department, BME. Parallel to the laboratory measurement FEM analysis has been carried out in order to develop a wear simulation method.
7. Zwierczyk, P.; Váradi, K.:
FE analysis of the frictional state of a wheel brake block connection33
Paper describes a model in which the brake system fails and the braking force exists in the time when the train departs. The elaborated FEM model is allow to calculate the brake block's displacements and the stress distribution in the initial sticking state and the transition into the slip state.
8. Samu, K.; Góz, A.:
A modern manufacturing technology: laser microprocessing37
In the microprocessing field of mechanical engineers laser beam can be used for different purposes such as cutting, engraving, heat treating, welding and nanotechnology processes. Among the advantages of the laser manufacturing the high accuracy, reliability, safety, controllability, rapidness and automated character can be mentioned.
9. Takács, D.; Stépán, G.:
Lateral instability of towed structures40
Authors constructed a low degree-of-freedom mechanical model for examination of lateral instability of towed structures. In spite of the few parameters involved in the model a new stability condition were deduced, which is easily controllable in practice and well utilisable from engineering aspect.
10. Szekrényes, A.:
Application of the MMB fracture test with long crack lengths45
Author shows the application of the mixed-mode bending (MMB) test developed in 1988 to measure the interlaminar fracture toughness of composite materials. With a small modification the system can be used for examining composites having long crack length.
11. Szalay, T.; Székely, F.:
Nanometer-precision machining of glass microlenses...49
The EU supported integrated research project Production4 μ deals with the development of mass production technologies for high precision optical parts. Illustrating with examples paper describes the characteristics of machining the high precision glass microlenses manufactured by moulding process.

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

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

Dr. Döbröczöni Ádám
President of Editorial Board

Dr. Kálmán András
General Editor

Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczy István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bercsey Tibor
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Dudás Illés
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Dr. Jármái Károly
Kármán Antal
Dr. Kulcsár Béla
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálincás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Rittinger János
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Tímár Imre
Dr. Tóth László
Dr. Varga Emilné Dr. Szücs Edit

Cooperation in editing:
Dr. Szalay Tibor, Dr. Vad János

Dear Reader,

In 2010 the Budapest University of Technology and Economics (BME) won the research university rank and for further development of its research work University got financial subsidy in the frame of the project with title of 'Elaboration of the quality-oriented, harmonised educational R+D+I strategy and operation model at the TechUniversity' henceforward Project - to realise it.

The Project undertook to study five stressed research fields belonging to the Project and to integrate them into the long range research strategy of BME, for promoting the cooperation between faculties, taking into account the research, development and innovation demand of industry. Faculties of TechUniversity responsible for the Project specified the following stressed research fields: Sustainable Energetics (FE); Vehicle engineering, transport and logistics (JKL); Biotechnology, health and environment protection (BEK); Nanophysics, nanotechnology and materials science (NNA); Intelligent environments and e-technologies (IKT). Faculty of Mechanical Engineering is active in all the five areas and leads the field of Sustainable energetics.

The goal of this special number of GÉP is to give sample from the multiple, conformable with the Project, practice oriented research, development and innovation activities of Faculty of Mechanical Engineering through some chosen examples at random. Teachers and researchers of eight departments of the Faculty elaborated papers published in this special number. It is well observable that the stressed research fields are not only the creative cooperation areas between faculties but they mirror the variegation exists inside the Faculty of Mechanical Engineering as well.

The special number covers the works of the following departments in the fields being in brackets: Department of Materials Science and Engineering (NNA), Department of Fluid Mechanics (FE, JKL), Department of Energy Engineering (FE), Department of Building Service Engineering and Process Engineering (BEK), Department of Machine and Industrial Product Design (JKL), Department of Manufacturing Science and Engineering (NNA), Department of Mechatronics, Optics and Information Engineering (NNA), Department of Applied Mechanics (JKL, NNA).

It is a great pleasure for me to commend this special number of GÉP, dedicated to the research university BME in 2010, containing the papers presenting the works of the Faculty of Mechanical Engineering to Dear Reader's attention.



Prof. Dr. Gábor Stépán

Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, BME

Managing Editor: Dr. Kálmán András. Editor's address: 3529 Miskolc, Budai József u. 46.
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (46) 325-504, 20/9358-812. E-mail: kaests@axelero.hu
Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1027 Budapest, Fő u. 68.

Postage-address: 1371, Bp, Pf. 433
Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: a.gaby@gteportal.eu, Internet: www.gte.mtesz.hu
http://members.chello.hu/cokom

Responsible Publisher: Dr. Igaz Jenő Managing Director

Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Managing Director: Vesza József
Price per month: 900 Ft; Subscriptions 2.700 Ft per a quarter, 5.400 Ft per an half a year, 10.800 Ft per year.
Distribution in foreign countries by Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat H-1389
Budapest, Pf. 149. and Magyar Média H-1392 Budapest, Pf. 272.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

All articles are peer reviewed.



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Engineering



EGPR Nemzetközi Hallgatói Projekt 2010

Bosch und Siemens Hausgeräte B/S/H/

KÉZI MIXER TERVEZÉS

**BME Ipari terméktervező mérnök
mesterszakos (MSc)
hallgatók részvételével**

**Global Product
Realization**



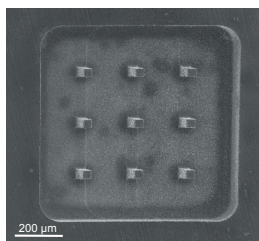
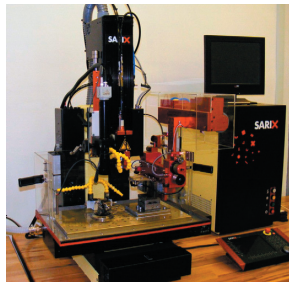
BME GÉP- ÉS TERMÉKTERVEZÉS TANSZÉK
BME DEPARTMENT OF MACHINE AND PRODUCT DESIGN

gt3.bme.hu | GT3 © 2010

Berényi Ágnes, Nagy Csolya, Aswin Halai, Arze Novsak, Gal Letonia, Erto Alcuise, Vidovics Balázs



BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék



ULTRAPRECÍZIÓS ÉS MIKRO-MEGMUNKÁLÓ LABORATÓRIUM

Négytengelyes mikro-EDM berendezés a BME Gyártástudomány és -technológia tanszékén.

Mikro-EDM eljárással készített oszlop-
struktúra (35 µm-es oszlopszélesség)

A SARIX mikro-szikraforgácsológép ötvözi a tömbös és a huzalos szikraforgácsolás (EDM) technikáját. A huzalos egység a folyamatosan adagolható, hengeres tömbelektroda szabályozására szolgál. A hengeres elektróda kiinduló átmérője 300 µm, illetve 100 µm, ebből állítható elő az akár 10 µm átmérőjű „megmunkáló szerszám”, mellyel annak állandó forgása mellett végezhetünk fűrési vagy marási mozgásciklus jellegű megmunkálást. Pozicionálási pontossága ±1 µm, és akár $R_a=0,05$ µm-es felületi érdesség is kialakítható.

Mikroméretű szikraforgácsolással elektromosan vezető anyagok megmunkálása lehetséges. Az „érintésmentes” eljárásnak köszönhetően a munkadarab keménysége nincs hatással a szerszámra. Az eljárás alkalmazási lehetőségei széleskörűek. Néhány konkrét megmunkálási példa: turbinalapátok kisméretű axiális és radiális hűtőfuratai a repüléstechnikai iparban, sebészeti eszközök és implantátumok, textilipari fonófejek, dízel- és benzinüzemű motorok befecskendező fúvókái, valamint nem utolsósorban kisméretű fröccsöntő szerszámok.



Hembrug Mikroturn 50 CNC



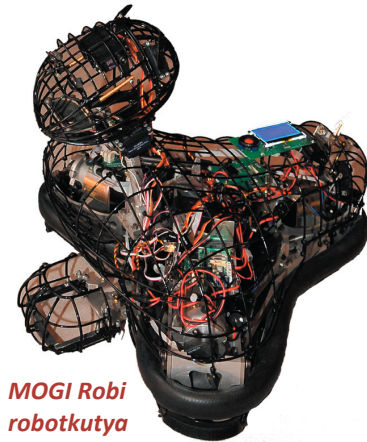
BME

Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

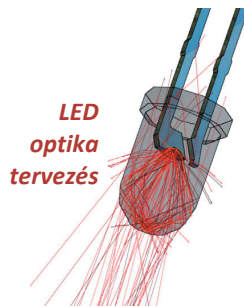
MOGI

A tanszék szakterületei, kompetenciái:

- Mechatronika, robottechnika, rendszer- és irányítástechnika
- Optika
- Mérés- és műszertechnika, finommechanika
- Informatika



MOGI Robi robotkutyá



LED optika tervezés



Gyalogkakukk pneumobil

www.mogi.bme.hu



BME Műszaki Mechanikai Tanszék



www.mm.bme.hu



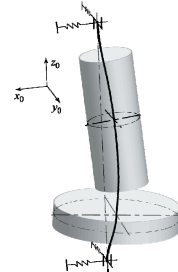
Acrobater szervizrobot

Klasszikus mechanikai alapok elsajátítását segítjük:

- Statika
- Szilárdságtan
- Dinamika
- Rezgésstan
- Végelem módszer

Fejlesztésorientált ipari feladatokra készítünk fel:

- Gépészeti fejlesztőket
- Gépészeti modellezőket
- Alkalmazott mechanikusokat



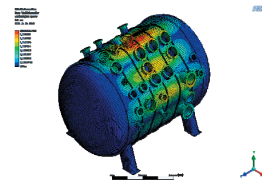
Kritikus fordulatszámok meghatározása



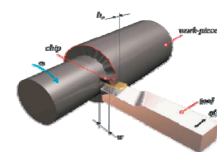
Egyensúlyozó robot



Kerékdinamika kísérletek



Végelem analízis



Szerszámgéprezés vizsgálata