

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármai Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. 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

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Jármai Károly

KEDVES OLVASÓ!

A Gép folyóirat első számában a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló azon kutatásokat ismerteti, melyek a 4-es Kiválósági Központ keretében Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák címmel folynak a Miskolci Egyetemen. A Kiválósági Központ a kutatás, a fejlesztés, az innováció és az oktatás szolgálatában áll. A központ célja a kutatási potenciál fejlesztése olyan kutatásokkal, amelyek innovatív modellezést, tervezést és technológiai folyamatokat valósítanak meg. Ez összhangban van az Európai Unió azon törekvéssel, amely az innováció serkentésére, a leghatékonyabb környezetbarát technológiák alkalmazására, fejlesztésére irányul.

A Kiválósági Központ hét tudományos műhelyre tagozódik, melyek egy-egy tanszék köré szerveződnek. Ezek a következők: Mechanikai Technológiák, Gépgyártástechnológiák, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek, Vegyipari Gépek, Mechanikai, Gép- és Terméktervezési, valamint az Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék. Az itt dolgozó oktatók BSc, MSc és doktorandusz hallgatókat is bevonnak a kutatásokba, amelyek így jó lehetőséget biztosítanak arra, hogy a fiatalok megismerkedjenek a tudományos munkával. A háromnegyed éve működő központ programjához kapcsolódva nem egy hallgató nyújtott már kiemelkedő teljesítményt, illetve készített színvonalas TDK dolgozatot.

Hogy milyen témákkal foglalkoznak a tudományos műhelyek? A kutatás sokrétű, interdiszciplináris jellegű. A tervezés témakörében olyan újgenerációs végelelemes-modelleket és eljárásokat fejlesztenek, amelyek hatékonyabban és megbízhatóbban modellezik a szerkezeteket és jelenségeket. Foglalkoznak szerkezetek és rendszerek optimalizálásával. Vizsgálják a termékéletpályát, a műszaki rendszerek hajtáslánc felépítését, a környezettudatos elvekhez és az alternatív üzemanyag használatához is kapcsolódnak kutatások, valamint áramlás és hőtechnikai laboratóriumi és numerikus modellezéshez is számos kutatás kötődik. A gépészeti technológiák területén a környezetbarát, szerves vegyipari, illetve a folyamatos technológiák vizsgálata és energiaraionalizálás történik. Jelentősek a professzionális mechanikai anyagvizsgálatok, valamint a számítógéppel segített technológiai folyamat-tervezés és modellezés is, valamint a befejező precíziós megmunkálások, és a nagyszilárdságú acélok hegesztése. Ha csak néhányat szeretnénk kiemelni a különböző tudományterületeken átívelő kutatások közül. Ez a cikkgyűjtemény is ezt a célt szolgálja, bemutatva a Kiválósági Központ Tudományos Műhelyeinek legújabb tudományos eredményeit.

Prof. Dr. Jármai Károly

egyetemi tanár, a Kiválósági Központ vezetője

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

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

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

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

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

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

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

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

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

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.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Tisza M., Török I., Kocsisné Baán M.
Innovatív anyagtechnológiák3
A szerzők a Miskolci Egyetem TÁMOP projektje keretében az Innovatív anyagtechnológiák Tudományos Műhelyében folyó kutatásokról számolnak be. A kutatások négy K+F témában folynak, nevezetesen a Hegesztés, a Hőkezelés és a Képlékenyalakítás, valamint e témakörök Számítógépes technológiai tervezése. Ebben a cikkben e kutatási témák fő célkitűzéseiről, valamint a projekt eddigi futamideje alatt elért eredményekről számolnak be röviden.
2. Meilinger Á., Török I.
A lineáris dörzshegesztés alkalmazása alumíniumötvözetek hegesztésénél7
A lineáris dörzshegesztés egy új és szokatlan hegesztő eljárás, mely egyre jobban elterjedőben van az ipar különböző területein. Jelen állapot szerint, igazán gazdaságosan az alumínium és ötvözetei illetve réz és ötvözetei hegesztésénél használható, bár a jelenlegi kutatások nagyon biztatóak az acélok területén is. Az ismertetett kutatás arra mutat rá, hogy a technológiai paraméterek pontos beállításával jó minőségű varratot lehet létrehozni.
3. Kovács A., Varga Gy.
Kopásálló acél minimálkenéses fúrásának kísérleti eredményei11
A tanulmány bemutatja, hogy a kopásálló acél (HARDOX 450) minimálkenéses fúrása során végzett kísérletben miként változik az előtolás irányú erő, a forgácsolási nyomaték, a szerszám sarok- illetve hátkopása és a felületi érdessége.
4. Kundrák J., Pálmai Z., Gyáni K.
Fehér réteg technológiai feltételei keményeszetergálásnál15
A keményeszetergálás az edzett alkatrészek befejező megmunkálására egyre szélesebb körben használatos. A szakirodalmi adatok ellenőrzése céljából forgácsolási kísérleteket végeztek betétben edzhető ötvözött, edzett fogaskerekek belső hengeres felületének eszetergálásával. Az erőméréseink eredményeinek felhasználásával kialakították egy olyan empirikus képletet, amellyel a technológiai adatok ismeretében külön erőmérés nélkül is eldönthető, kell-e számítani fehér réteg kialakulására.
5. Maros Zs.
Alumínium ötvözet abrazív vízugaras vágásának vizsgálata19
A vágási folyamatok vizsgálatakor a vágás hatékonyságát, a megmunkált felület érdességi jellemzőit és a vágási rés alakját szokás vizsgálni, leginkább azon vonatkozásban, hogy hogyan befolyásolhatók ezek a jellemzők a jellegzetes technológiai paraméterek változtatásával. Az ezzel kapcsolatos kísérleti eredményeket ismerteti a cikk egy alumínium ötvözet vágása esetén.
6. Pálmai Z.
A gépmerevség és a szerszámtartósság kapcsolata forgácsolásnál23
A szerszámkopás sebességénél tapasztalható jelentős szórás okainak tanulmányozása közben arra a megállapításra jutott, hogy a forgácsleválasztásnál gyakran megjelenő rezgés gerjesztésnek az éltartamra komoly hatása lehet. Megállapítható volt, hogy a vibráció, annak frekvenciájától lényegében függetlenül, a szerszám kopását számottevően gyorsítja, amely a szerkezet merevségének növelésével mérsékelhető.
7. Bencs P., Szabó Sz.
Instacionárius léghőmérsékletmező mérési lehetőségének fejlesztése27
A cikk bemutatja azt a kutatómunkát, ami fűtött henger körül kialakuló sebesség- és hőmérsékletméréssel való meghatározására szolgál. Jelen cikkben a hőmérsékletmező meghatározására tett kísérleteinket foglalták össze. Ennek során a Schlieren technika több változata került kipróbálásra. A fejlesztő munka eredményeképpen jelenleg már megfelelő minőségű hőmérsékletterképek felvételét sikerült megoldaniuk.
8. Bolló B.
Fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata31
Fűtött henger körüli áramlás esetén megvizsgálta az áramló levegő állapotjelzőinek hőmérsékletfüggését. A numerikus szimulációval jól kimutatható az állapotjelzőnként eltérő hatás az örvényleválás áramlási jellemzőire. A szerző számításai alapján megállapította, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése jelentős mértékben befolyásolja az egyenletes áramlásba helyezett fűtött hengernél kialakuló áramlási jellemzőket.
9. Hajdú S., Lakatos K.
Állítható lapátózású keresztáramú turbinák35
A keresztáramú turbináknál jellemző a kerületi erő erős ingadozása, amely biztosítja a tengely teljesítményt, mert a lapátok és az áramló közeg kölcsönhatása nem állandó. A cikk témája az, hogy hogyan lehet javítani a turbina hatékonyságát állítható lapátózással.
10. Kalmár L., Janiga G., Fodor B., Varga Z., Soltész L.
Egyfokozatú turbófuvar numerikus modellezése39
A cikk egy egyfokozatú és radiális átömlésű ventilátor-aggregátumban kialakuló áramlási viszonyok numerikus vizsgálatával foglalkozik. A numerikus vizsgálat elsőrendű célja egyrészt a ventilátor aggregát működése szempontjából alapvetően fontos üzemi paraméterek számítása, valamint az áramlás aggregáton belüli jellemzőinek részletes meghatározása.
11. Kalmár L., Hellmann R., Réger T., Varga Z.
Nagyteljesítményű LED modulban kialakuló instacionárius hőátviteli folyamat numerikus modellezése43
A nagyteljesítményű UV LED modulok működtetése során jelentős hő fejlődik, amelyet hatékonyan kell eltávolítani annak érdekében, hogy a LED modul kimenő teljesítménye és élettartama ne csökkenjen. A kutatási tevékenység a nagy teljesítményű UV LED modulban kialakuló hőátviteli folyamatok numerikus szimulációját jelenti az alkalmazott léghűtés figyelembe vételével.
12. Tollár S., Lakatos K.
Modell dízelmotor kísérleti rezgésvizsgálata47
A szerzők elkezdtek egy kísérleti tesztet egy modell dízel motorral. A hagyományos nyomaték-fordulatszám görbén kívül mérték a tényleges rezgési sebességi (vRMS) görbéket is. A fojtószelep pozícióját mint paramétert használták a a motorjellemzők meghatározásánál.

Dr. Tisza Miklós^{}, Dr. Török Imre^{**}, Kocsisné dr. Baán Mária^{**}*

ABSTRACT

In the framework of the TÁMOP project entitled „Improvement of the quality of higher education based on the Centres of Excellence on strategic research fields of the University of Miskolc, Innovative materials processing is regarded as one of the research fields within the 4th Centre of Excellence. Research in this group is performed in the following topics: Welding, Heat-treatment and Surface Engineering, as well as Metal Forming. In this paper, the main objectives of these research activities, as well as the results achieved during the first period of the project will be shortly introduced.

1. HEGESZTÉS TERÜLETÉN VÉGZETT KUTATÁSOK

A hegesztés szakmai területéhez kötődő kutatások célja a könnyűszerkezetes gyártásban nélkülözhetetlen vékonylemezek – nagyszilárdságú acélok, alumíniumötvözetek – hegesztésére alkalmas olyan új szakaszos energia-beviteli eljárásokra alapozott technológiai variánsok kidolgozása, amelyek közvetlenül adaptálhatók a szerkezetgyártásban. A kidolgozott hegesztési körülmények javíthatják a hegesztett szerkezetek minőségét, megbízhatóságát és terhelhetőségét. E cikk terjedelmi korlátait is figyelembe véve az ellenállás-ponthegesztés területén végzett kutatásokhoz kapcsolódóan kívánunk két területen elért eredményekről röviden beszámolni.

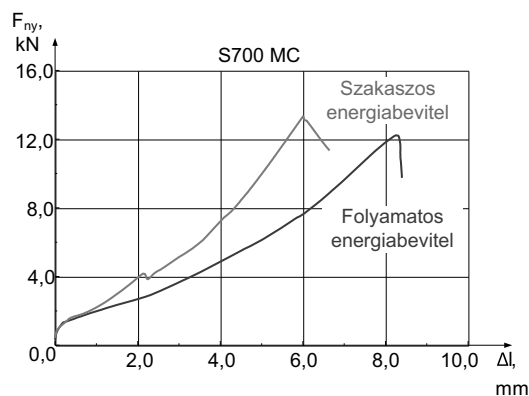
1.1. Nagyszilárdságú acélok ellenállás-ponthegesztése

A többciklusú energia-bevitel előnye, hogy a hegesztés során az anyagba bevitt hőenergia mennyisége pontosan tervezhető és szabályozható. Ellenállás-ponthegesztéskor a kvantumokban történő energia-bevitel, a szünetek közötti hőelvezetés hatását kihasználva, a folyamatos hőbeviteli (egy ciklusú) ponthegesztéshez képest, a hegesztendő anyagba anélkül tud több energiát bejutatni, hogy a hegesztés során az anyagot helyileg túlhevítene. Ennek eredménye a hegesztési munkatartomány (welding lobe) bővülésében és/vagy stabilizálódásában jelentkezik [1]. A kísérletekhez két, az ipari gyakorlatban járatos nagyszilárdságú acéltípust használtunk, az S700 MC jelű, különleges hidegalakíthatósággal rendelkező, termo-mechanikusan hengerelt acélt, valamint a WELDOX 960E jelű finomszemcsés, nemesített szerkezeti acélt.

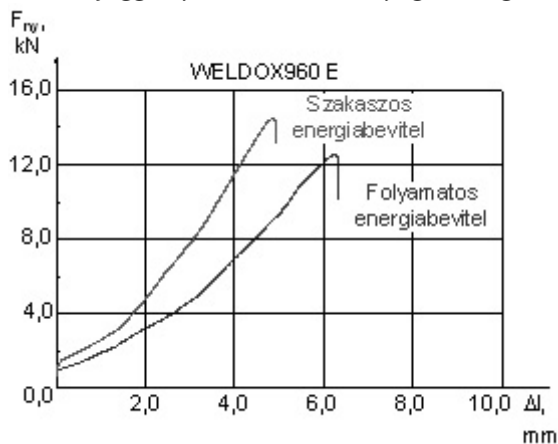
^{*}egyetemi tanár, tanszékvezető, Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék

^{**}egyetemi docens, Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék

E két acéltípuson folyamatos és szakaszos energia-bevitel mellett jelentős számú hegesztési kísérletet hajtottunk végre. Vizsgáltuk a szakaszos és folyamatos energia-bevitel hatását, továbbá a pontkötések roncsolásos nyíró-szakító vizsgálatára eredményeinek alakulását. Egy ilyen nyíró-szakító vizsgálat eredményét szemlélteti az 1. és 2. ábra.



1. ábra. A nyíró-szakító erő változása az elmozdulás függvényében S700 MC anyagminőségénél



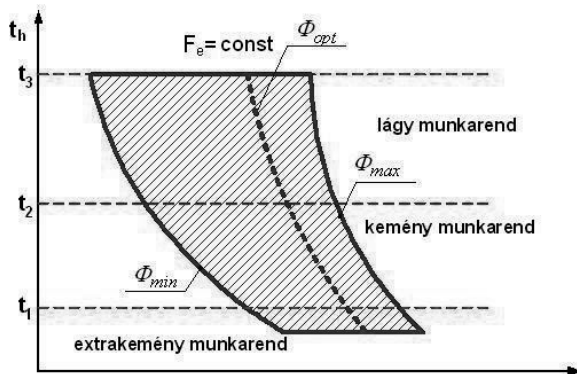
2. ábra. A nyíró-szakító erő változása az elmozdulás függvényében WELDOX 960E anyagminőségénél

A nagyszámú kísérlet igazolta, hogy a kötések teherbíró képessége az S700 MC acélnál 15%-kal, míg a WELDOX 960E acélnál 7,3%-kal haladta meg a folyamatos energia-beviteli hegesztett kötés terhelhetőségi szintjét. A kísérletek igazolták továbbá, hogy a növekvő impulzusszám növeli a kialakuló ponttátmérőket, szakaszos energia-bevitelt alkalmazva a ponthegesztés munkatartománya (welding lobe) bővül [1].

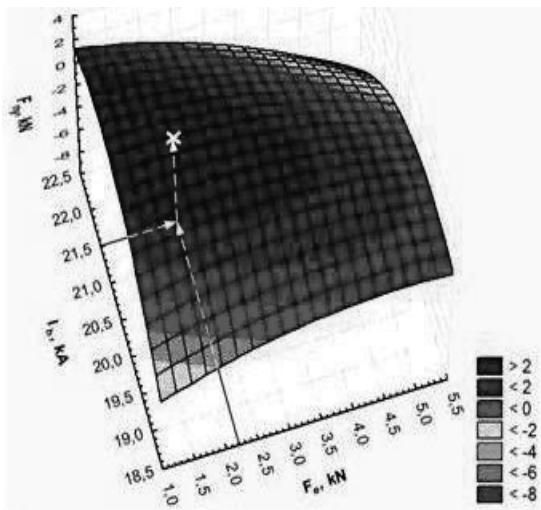
1.2. Alumíniumötvözetek ellenállás-ponthegesztése

Az alumínium és ötvözeteinek ellenállás-hegesztését, annak sikerességét a hegesztendő alapanyag sajátosságai határozzák meg, mint a kis fajlagos ellenállás, a nagy hővezető-képesség, az oxidhártya magas olvadáspontja, a jó alakváltozó képesség.

A folyadék fázisú ellenállás-hegesztésnél a hőt az átlapolt munkadarabokon átvezetett, nagy áramerősség az átmeneti- és anyagellenálláson fejlesztett hője (a Joule-hő) biztosítja. A kötést a hőhatás és a hegesztés során alkalmazott erőhatás együttes fellépése eredményezi. A kis fajlagos ellenálláson fejlődő hőt a nagy hővezető-képességű alapanyag gyorsan elvezeti, ezért a hegesztésnél nagy áramerősséget és rövid hegesztési időt célszerű alkalmazni, amely kemény (vagy extra kemény) munkarendet igényel, amint az a 4. ábrán is látható.



4. ábra. Különböző – lágymunkarend, kemény és extra kemény munkarendek alumínium ötvözetek ellenállás-ponthegesztésénél



3. ábra. A hegesztőáram (I_h) és elektródaerő (F_e) hatása a nyiróerőre

Ez a munkarend a jól szabályozható kis-, valamint középfrekvenciás és kondenzátoros hegesztőgépekkel biztosítható, kemény munkarend biztosította rövid ideig

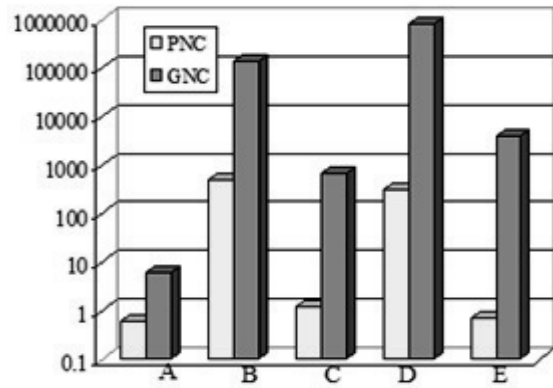
tartó hőhatással. Egy ilyen jól szabályozható berendezéssel folytatottunk hegesztési kísérleteket. A kísérletekhez 1+1 mm-es AlMg3 alapanyagot használtunk változó paraméterekkel (I_h , t_h , F_e), amelyeknél az optimalizálást a kötés nyiró-szakító szilárdságra végeztük el: ezt szemlélteti a 3. ábra [2], [3].

A hegesztések során nemcsak a kemény munkarend technológiai előnyei, hanem a hegesztőáram időbeni változtatása következtében az oxidhártya feltörése is sikeresen megvalósítható [3].

2. A HŐ- ÉS FELÜLETKEZELÉS A 21. SZÁZADBAN

Az Innovatív anyagtechnológiák Tudományos Műhely Hőkezelés K+F témájában fő célkitűzésünk, hogy az ipari szektorral és a szakmai szervezetekkel kialakult korábbi kapcsolatrendszerünkre és eredményeinkre alapozva tovább bővítsük a tanszék szerepét a régió gazdasági fejlődésében meghatározó jelentőségű technológia- és tudástransfer folyamatokban és sokoldalúbbá váljon az eddig főként oktatásfejlesztésre irányuló nemzetközi kapcsolatrendszerünk.

E célkitűzések megvalósítása érdekében első lépésként mélyrehatóan elemeztük a hő- és felületkezelés fejlődési trendjeit, nemzetközi együttműködésben kísérletsorozatot indítottunk a hagyományos gáznitridálás és karbonitridálás, valamint a plazmanitridálás összehasonlító elemzésére (5. ábra), körvonalaztuk elképzeléseinket kutatási infrastruktúránk fejlesztése vonatkozásában.



5. ábra. Plazma- és gázkarbonitridálás összehasonlítása az energia-felhasználás és környezetvédelmi szempontok szerint [5]:

(A) felhasznált gáz mennyiség, m^3/h ;

(B) teljes karbon-emisszió, mg/m^3 ;

(C) NO_x kibocsátás, mg/h ;

(D) maradék karbon-tartalmú gázok kibocsátása, mg/h ;

(E) maradék NO_2 gáz-kibocsátás, mg/h .

Kutatás-fejlesztési stratégiánk kialakításában meszesemenően támaszkodunk az International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering szakmai világ-

szervezete által közel egy évtizede megvalósuló Global 21 projekt [4] elemzéseire, előrejelzéseire, amely szerint a fejlesztési irányokat az energia-megtakarítás és a környezetvédelem fokozódó igényei határozzák meg. A felülettechnológiák legjelentősebb innovációjának tekintett plazmatechnológiák fokozottabb elterjedése épp ezeknek a szempontoknak az előtérbe kerülése miatt lenne kívánatos hazánkban is.

Tanszékünk az elmúlt másfél évtizedben számos, egymást követő és egymásra épülő nemzetközi projektben vállalt aktív szerepet, ezek döntően korszerű tananyagok és oktatási programok fejlesztését célozták [6], de lehetőséget teremtettek új vizsgálati módszerek megismerésére is a felületi tulajdonságok kutatásában. Így valósult meg elsőként a felületi rétegek adhéziós kötés-erősségének mérésére alkalmas karcvizsgáló berendezésünk fejlesztése. Az elmúlt évben vizsgálattechnikai lehetőségeink egy újabb, rendkívül sokoldalú és korszerű berendezéssel bővültek.



6. ábra. Az UNMT-1 moduláris mikro-nano felületvizsgáló berendezés körmozgást megvalósító tribológiai vizsgálatokhoz alkalmas modulja 350 °C-ig fűthető kamrával felszerelve

A felülettechnológiai vizsgálatok iránya, a vizsgálóberendezések és vizsgálatok alkalmazhatósági köre a felülettechnológiai eljárások sokoldalú céljának megfelelően sokféle, amelyek legfontosabb csoportjait az alábbiak képviselik:

- tribológiai,
- felületgeometriai,
- mechanikai vizsgálatok, valamint
- a felületeken bekövetkező károsodási folyamatok elemzése.

Az UNMT-1 berendezés különböző moduljainak alkalmazásával lehetőségünk nyílik a különféle hőkezelési és felülettechnológiai eljárásokkal célszerűen módosított anyagszerkezeti jellemzők és anyagtulajdonságok fel-

térképezésére, az alkalmazott technológiák hatásának komplex jellemzésére.

Valamennyi műszaki anyagcsoportra és azok vékony rétegeire alkalmazható az anyag tribológiai viselkedésének elemzésére, komplex vizsgálatára, miközben a mikrométertől a nanométerig terjedő nagyságrendű jellemzők mérésével vizsgálhatjuk a felületi sajátosságokat.

3. KÉPLÉKENYALAKÍTÁS

A képlékenyalakítás a Tudományos Műhely harmadik fő kutatási területe, amelynek keretében fő célkitűzés-ként az állapoténevezők (feszültségi állapot, hőmérséklet és alakváltozási sebesség) hatását hasznosító képlékenyalakító eljárások, valamint a gyors prototípusgyártás és az egyedi, illetve kis sorozatgyártás terén alkalmazható új eljárások kutatását fogalmazzuk meg. E kutatási téma területén egy további kiemelt témája a különféle korszerű anyagok – elsősorban az autópárházban alkalmazott nagy-szilárdságú lemezanyagok – alakíthatóságának vizsgálata, valamint az alakíthatósági vizsgálatok tovább fejlesztése. A terjedelmi korlátok miatt e kutatásokból egy területen, az inkrementális lemezalakítás témakörében elért eredményekből mutatunk be egy rövid elemzést.

A hagyományos képlékenyalakító eljárások általában egyszerű, merev szerszámokat alkalmaznak: a munkadarab alakját rendszerint a munkadarab alakjának megfelelően kiképzett alakító bélyeggel és matricával határozzuk meg, alakítjuk ki. Azonban különösen olyan esetekben, amikor a szerszámok költségeinek csökkentése fontos szempont, a szerszám nélküli (matrica nélküli), rugalmas alakító eljárások alkalmazása különösen előnyös lehet. Ezen a területen – a gyors prototípusgyártásban, valamint a kissorozatgyártásban – ígéretes alternatíva az inkrementális alakítás.

Az inkrementális lemezalakításnál rendszerint egy egyszerű gömbvégződésű alakító szerszámmal (bélyeggel), matrica nélkül, az alakító szerszámelem mozgásának térbeli vezérlésével, elemi alakítási lépések sorozatával, bonyolult, nagymértékű alakváltozást igénylő alkatrészek viszonylag egyszerűen, költséghatékonyan gyárthatók. Ennek megfelelően az inkrementális lemezalakítás rendszerint négy alapelemmel jellemezhető, nevezetesen az alakítandó lemez; a ránc tartó; az alakító bélyeg és az alakító bélyeg mozgását meghatározó CNC vezérlés.

Az inkrementális alakítás technológiai változatait elemezve két alapvető csoportot különböztethetünk meg, nevezetesen szimmetrikus és aszimmetrikus inkrementális lemezalakítást (7. ábra). Mindkét esetben az alakítást egy viszonylag egyszerű kialakítású, sokcélúan felhasználható alakító bélyeggel végezzük, amelynek derékszögű koordinátákban meghatározott mozgását a megmunkáló gép CNC vezérlése biztosítja.



7. ábra. Az inkrementális lemezalakítás négy alapesete

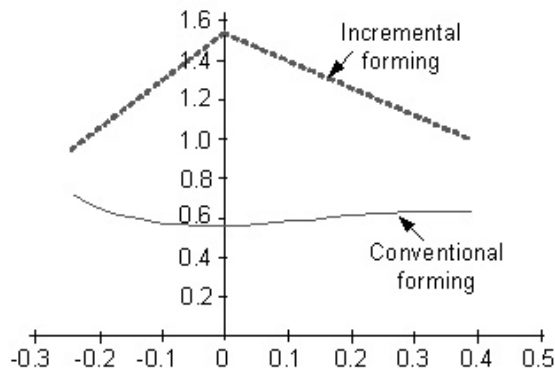
Az eddigi vizsgálatokból közismert, hogy az inkrementális alakítással a hagyományos alakításhoz képest lényegesen nagyobb alakváltozások valósíthatók meg. Ennek megfelelően kutatásaink egyik fő területét ezen a területen az inkrementális alakítás alakváltozási határainak a meghatározása képezi.

A képlékeny lemezalakításban az alakítás határállapotait legátfogóbban az ún. alakítási határdiagramokkal (Forming Limit Diagram – FLD) jellemezhetjük. A hagyományos alakítási határdiagramok jellegzetes, V-alakkal jellemezhetők.

Az alakíthatósági vizsgálatokhoz rendelkezünk egy korszerű, komplex alakíthatósági vizsgálóberendezéssel, amely egy elektrohidraulikus vezérlésű alakíthatósági vizsgáló berendezésből és egy optikai alakváltozás mérő rendszerből áll. Ezzel a berendezéssel gyorsan és megbízhatóan reprodukálható módon meg tudjuk határozni különböző anyagok alakítási határdiagramjait. A vizsgálat lényege, hogy az alakítandó munkadarab előgyártmányának a felületére alakítás előtt egy 2 mm-es osztású négyzetrácsos hálózatot viszünk fel, majd elvégezve az alakítást, a rács hálózati torzulását az optikai alakváltozás mérő rendszerrel mérjük. E mérési eredményekből az erre a célra kifejlesztett szoftverrel (a Vialux cég AutoGrid szoftverével) kiértékelve, az alakítási határdiagramot nagy pontossággal meg tudjuk határozni.

A 8. ábra alumínium ötvözet hagyományos alakításra és inkrementális alakításra meghatározott alakítási határdiagramját mutatja. A diagramon is jól látható, hogy inkrementális alakításnál ugyanazon anyagminőségénél – különösen az $\epsilon_2 = 0$ síkalakváltozási állapotban – a megvalósítható alakváltozás jelentősen nagyobb, mint hagyományos alakításnál.

Ebből következően az is megállapítható, hogy ezzel az eljárással lényegesen összetettebb, bonyolultabb munkadarabok állíthatók elő, egyszerű, olcsó szerszámokkal. Az alkatrészek közvetlenül a gyártmány CAD modelljéből előállított szerszámforma vezérlő programmal egy hagyományos CNC marógépen gyárthatók.



8. ábra. Al 3030 ötvözet alakítási határdiagramja hagyományos és inkrementális alakításra [7]

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutatások a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010 projekt támogatásával valósultak meg, amely támogatásért a szerzők köszönetüket fejezik ki.

IRODALOM

- [1] JUHÁSZ D., BALOGH A.: Szakaszos hőbevitel következményeinek vizsgálata ellenállás-ponthegesztéskor GÉP, LXII. évfolyam (2011) 1-2. szám, p.:32-37
- [2] JUHÁSZ K., TÖRÖK I.: Alumíniumötvözetek ellenállás-ponthegesztése, RHEM Kft. Ellenálláshegesztési Szimpózium 2011. október 20.
- [3] JUHÁSZ K.: Alumínium ötvözetek ellenállás-ponthegesztése, Hegesztő szakmérnöki diplomatervezés p. 1 - 69, Miskolc 2011
- [4] KOLOZSVÁRY Z., R. B. WOOD: IFHTSE Global 21: Heat treatment and surface engineering in the first decades of the twenty-first century. A synthesis report as at December 2009 Proceedings of the 1st Mediterranean Conference on HT Sharm El Sheikh, Dec.1-3 2009 p.26
- [5] SUN Y.: Influence of materials science on heat treatment and surface engineering International Heat Treatment and Surface Engineering, 2009/3
- [6] M. K. BAÁN: International projects in Surface Engineering in collaboration with Professor Tom Bell, Surface Engineering 2010 vol.26 No 1-2. pp.12-14.
- [7] TISZA, M., KOVÁCS, P. Z., LUKÁCS, ZS.: Inkrementális lemezalakítás, Multidiszciplináris tudományok, 2011. 1.k. 1.sz. 43-52. pp.

A LINEÁRIS DÖRZSHEGESZTÉS ALKALMAZÁSA ALUMÍNIUMÖTVÖZETEK HEGESZTÉSÉNÉL

THE APPLICATION OF FRICTION STIR WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS

Meilinger Ákos*, Dr. Török Imre**

ABSTRACT

The technology of friction stir welding (FSW) was developed in 1991 by The Welding Institute (TWI) in England. It is similar to the original friction welding because it is a solid-phase welding process too and uses the friction heat as a heat source. However we mostly can join rotationally symmetrical workpieces with the original friction welding, while we can create butt joints with friction stir welding. In our days this technology is spreading rapidly especially at the welding of aluminium and its alloys.

1. BEVEZETÉS

A lineáris dörzshegesztés (FSW) technológiáját 1991-ben fejlesztette ki az angol hegesztés technológiai intézet (TWI). Rokonságot mutat az klasszikus dörzshegesztéssel, hiszen ez az eljárás is egy szilárd fázisú hegesztő eljárás, és itt is a súrlódás hője hasznosul, mint hőforrás. Viszont a klasszikus dörzshegesztés döntően forgásszimmetrikus munkadarabokat egyesít, míg a lineáris dörzshegesztés a tompán illesztett lemezek hegesztésére is alkalmas. Napjainkban ez a technológia terjedőben van, különösen az alumínium és ötvözetek hegesztésénél.

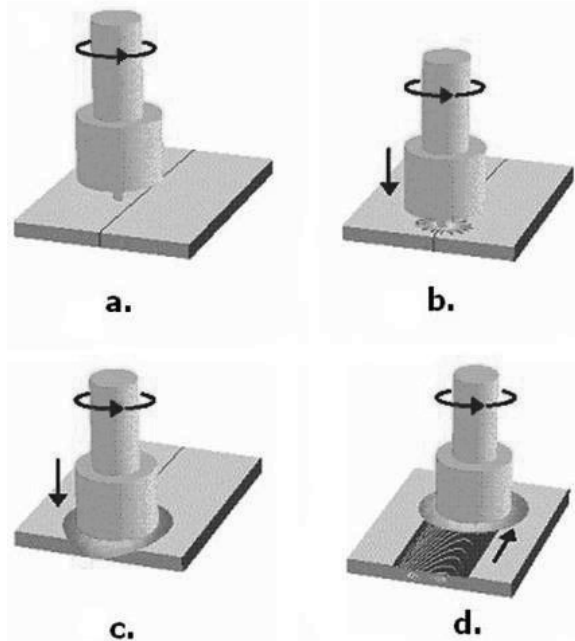
2. AZ ELJÁRÁS ELVE ÉS FOLYAMATA

Az alap elgondolás meglehetősen egyszerű: egy jó kopásállósággal, hőállósággal és speciális kialakítással rendelkező forgó szerszámot becsúsztatunk az egyesítendő anyagok illesztési vonalába, majd adott fordulatszámmal és előtolási sebességgel mozgatjuk az illesztés vonalában. A súrlódás által generált hő helyi felhívítéssel lágyítja az alapanyagot, így lehetővé teszi a szilárd fázisú hegesztést. Az eredmény egy minőségileg kifogástalan varrat, amit gyorsabban és egyszerűbben létre lehet hozni, mint ívhegesztéssel [1].

A szerszám speciálisan kialakított, 2 fő részét különböztetjük meg:

- tű (pin): ez hatol be, súrlódással hőt kelt és kavarja az alapanyagot,
- váll (shoulder): előállítja a megfelelő súrlódási hőt és kedvező feltételeket biztosít,

Az eljárás elvét az 1. ábra szemlélteti:



1. ábra. A lineáris dörzshegesztés elve
- a. az alapanyag rögzítése, a berendezés indítása,
 - b. a szerszám besüllyesztése az illesztési vonalba,
 - c. az anyag helyi felhevítése,
 - d. az előtoló mozgás végzése.

A hegesztés három paramétere:

- fordulatszám (n , 1/min),
- előtolási sebesség (v_b , mm/min),
- szerszám pozíciója.

A felsorolt paraméterek kisebb változtatása is érzékenyen hat a varrat minőségére, így szükséges a pontos technológia kidolgozása.

* mérnöktanár, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

3. AZ ELJÁRÁS ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

Az eljárás rendelkezik mindazon előnyökkel, amelyek a szilárd fázisú eljárásokra jellemzőek, ugyanakkor az alapanyag méretbeli és geometriai jellemzői kevésbé korlátozottak. A legfontosabb előnyök a következők [2]:

- viszonylag egyszerű hegesztő berendezés,
- jóval nagyobb hegesztési sebesség, mint az ömlesztő hegesztő eljárásoknál,
- nincs szükség hozaganyagra,
- külön hegfürdő védelmet nem igényel,
- nem szükséges élélőkészítés,
- gépesíthető, automatizálható,
- nincs szükség képzett hegesztőre,
- minden hegesztési pozícióban használható,
- olyan anyagok is egyesíthetők, amelyek ömlesztő hegesztéssel nem,
- nagy szilárdságú és jó minőségű a kötés,
- nincs porozitás, kevés a varrathiba,
- jó reprodukálhatóság,
- különböző anyagminőségek is hegeszthetők,
- kisebb hőbevitel, kisebb hőhatásövezet, mint ömlesztő hegesztésnél,
- kisebb maradó feszültség,
- nincs füst és gázképződés.

Az előnyök mellett természetesen vannak hátrányai is a lineáris dörzshegesztésnek:

- teljes szelvényméretben végzett hegesztés esetén alátétlemez szükséges,
- a hegesztés kezdeténél és befejezésénél nem megfelelő az összeolvadás, ezért kezdő- és kifutó lemezek használata javasolt,
- a berendezés helyhez kötött,
- a munkadarab megfogása szükséges a hegesztéskor fellépő jelentős erőhatások miatt.

4. AZ ALKALMAZÁS TERÜLETEI

A hegeszthető anyagok tekintetében a kezdeti időszakban csak az alacsony olvadáspontú anyagok hegesztésére alkalmazták, de mára egyre bővült a hegeszthető anyagok palettája. A teljesség igénye nélkül az alábbi anyagok jól hegeszthetőek az eljárással [2]:

- alumínium és ötvözetek,
- réz és ötvözetek,
- nikkel és ötvözetek,
- magnézium és ötvözetek,
- titán és ötvözetek,
- korrózió- és saválló acélok,
- ötvöztelen szerkezeti acélok,
- fémhabok,
- különböző fémmátrixú kompozitok.

Mivel egy szilárd fázisú hegesztő eljárásról van szó, így nem meglepő, hogy használható vegyes kötések készítéséhez is, például alumínium-réz, alumínium-

magnézium, vagy korrózióálló acél-szénacél vegyes kötéséhez is. Az iparban leginkább alumínium-ötvözetek hegesztéséhez terjedt el.

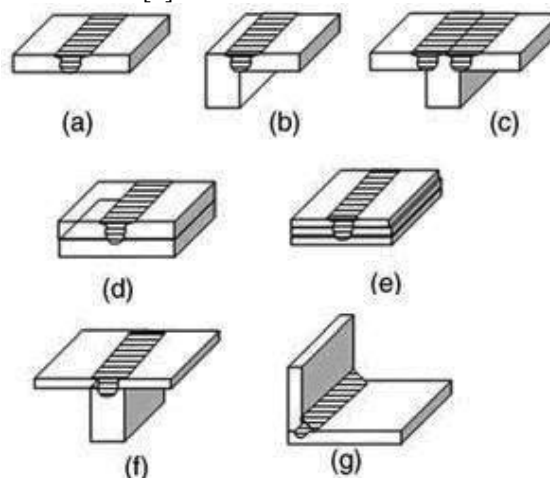
Az eljárás alkalmazhatóságának falvastagság tartománya a hegesztendő anyag minőségétől függ. Az 1. táblázat szemlélteti a gazdaságosan hegeszthető falvastagságokat anyagminőségek szerint [3]:

| Alapanyag | Falvastagság (mm) |
|----------------------------|---|
| Alumínium és ötvözetek | 3...50 mm (1 oldalról), 75 mm (2 oldalról) |
| Réz és ötvözetek | 3...50 mm |
| Nikkel és ötvözetek | 3...12 mm |
| Magnézium és ötvözetek | 3...12 mm |
| Titán és ötvözetek | 3...12 mm |
| Korrózióálló acél | 3...12 mm |
| Ötvöztelen szerkezeti acél | 3...12 mm |

1. táblázat. Gazdaságosan hegeszthető falvastagságok

Az eljárást egyre szélesebb körben alkalmazzák az alábbi területeken: hajógyártás, repülőgép ipar, vasúti szerelvénygyártás, autóipar, építőipar.

A lineáris dörzshegesztéssel számos varratalak típus készíthető, attól függően, hogy milyen igénybevételnek van kitéve a varrat. A 2. ábra az elterjedt varrat típusokat szemlélteti [4]:



2. ábra. Az eljárásnál leggyakrabban használatos varrat- és kötéstípusok

5. A HEGESZTÉS SZERSZÁMA

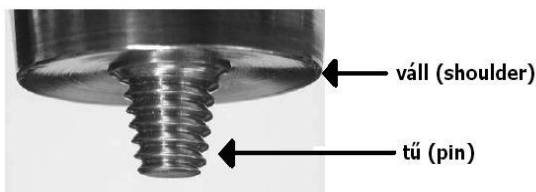
A lineáris dörzshegesztés sikerét leginkább az alkalmazott szerszám befolyásolja. A hegesztés során a szerszám, az anyag teljes falvastagságán áthatol és egy forgó, illetve egy hosszanti mozgást végez. Ebből adódóan meglehetősen nagy erőhatások érik. Másrésztől a forgó mozgás következtében súrlódási hő keletkezik, ami elérheti akár az 1100 °C-ot is a hegesztendő anyagminőségétől függően. Emellett a súrlódás követ-

keztében nagy koptató igénybevételnek van kitéve a szerszám. Tehát a szerszám főbb igénybevételei a következők:

- dinamikus erőhatások,
- nagy hőterhelés,
- nagy koptató igénybevétel.

A megfelelő szerszám tehát szívós, melegszilárd és jó kopásállósággal rendelkezik. Természetesen minden attól függ, hogy milyen anyagot hegesztünk vele, például alumíniumötvözeteknél alacsonyabb, míg korrózióálló acél esetén már a nagyobb igénybevételű szerszám használata a javasolt.

A szerszám másik fontos tulajdonsága az anyagán kívül, a kialakítása [6]. Két lényeges része van a szerszámnak: a váll (shoulder) és a tű (pin). Mindkét rész kialakítása alapvetően befolyásolja az anyagáramot. A 3. ábra egy egyszerű kialakítású szerszámot mutat be:



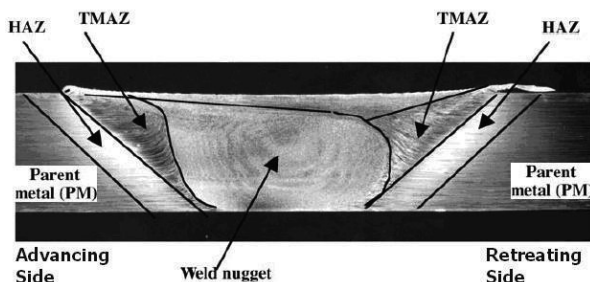
3. ábra. A szerszám 2 fő része

6. A KÖTÉS FELÉPÍTÉSE

A lineáris dörzshegesztéssel készült kötés felépítése alapvetően különbözik a villamos ívvel készült kötésétől. Több övezet különböztethető meg, az alapanyagtól a varrat felé haladva [5]:

- alapanyag (Parent metal, PM),
- hőhatásövezet (Heat affected zone, HAZ),
- termomechanikus hatásnak kitett övezet (Thermomechanically affected zone, TMAZ),
- varrat (Weld nugget, WN).

Ezen övezetek elhelyezkedését a 4. ábra szemlélteti:



4. ábra. A hegesztett kötés részei [5]

Az ábrán látható, hogy a szerszám forgásirányának megfelelően van egy „előre (advancing)” oldala és van egy „hátra (retreating)” oldala a kötésnek. A varrat szövetszerkezete finomszemcsés, feltéve, ha jól beállított paraméterekkel dolgozunk. A TMAZ részek általában durvaszemcsésék, így mechanikai tulajdonságokban

elmaradnak a varrattól. Az ívhegesztéssel készült varratokhoz hasonlóan a kötés leggyengébb része a hőhatásövezet, azon belül is a „hátra” oldalon lévőben a legrosszabbak a mechanikai tulajdonságok. Mindemellett megjegyezhető, hogy így is hasonló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik a kötés, mint az alapanyag.

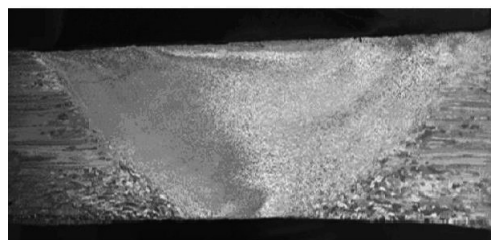
7. KÍSÉRLETI HEGESZTÉSEK

A Tanszékén kísérleti hegesztéseket folytatunk a lineáris dörzshegesztés jellemzőinek meghatározására 6 mm falvastagságú, 99,5 tisztaságú alumínium lemezen. A jelenleg is folyó kutatás célja a hegesztési paraméterek összehangolása a kiváló minőségű kötés elérése érdekében. A paraméterek kismértékű eltérése is nagyban befolyásolja a hegesztés sikerességét. Ebből a megfontolásból a kísérleteket különböző fordulatszámmal, előtolási sebességgel és szerszám dőlésszöggel végeztük. Az elkészült varratokon makroszkópos vizsgálatokat végeztünk, amelyből az összeolvadást, illetve a szemcsedurvulást tudtuk elemezni, vizsgálni.

Néhány, a kísérletek során nyert tapasztalatokról az alábbiakat mutatjuk be. Az 5. ábra a.) részén összeolvadási hiba látható, a kötés egyes részei nem olvadtak össze, a kis fordulatszámmal túlságosan kevés a hőbevitel. A nagy fordulatszám és a kis hegesztési sebesség viszont túl nagy hőbevitelt eredményez, így a gyökoldalán szemcsedurvulás látható az 5. ábra b.) részén:



a.



b.

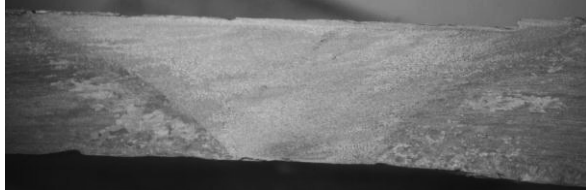
5. ábra. A hegesztési paraméterek megváltoztatásának hatása:

$$a. n = 500 \text{ ford/min}, v_h = 125 \text{ mm/min},$$

$$b. n = 800 \text{ ford/min}, v_h = 63 \text{ mm/min}.$$

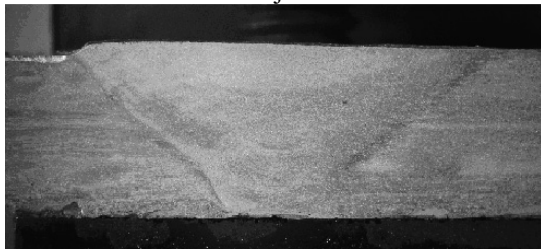
További paraméter változtatási lehetőség a szerszám dőlésszöge. A 6. ábrán egy olyan varrat csiszolata látha-

tó, amelyik hegesztésénél 1°-os szerszám dőlésszöveget állítottunk be:



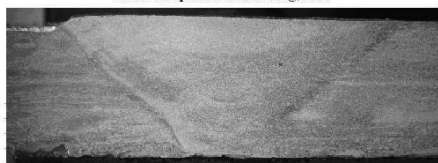
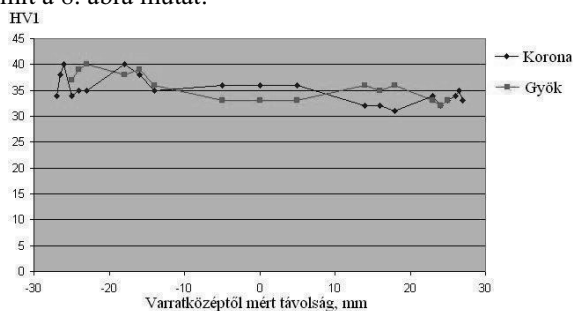
6. ábra. A szerszám dőlésszög hatása
($n = 1000 \text{ ford/min}$, $v_h = 250 \text{ mm/min}$, $\varphi = 1^\circ$)

A varrat gyökoldalán szemcsedurvulást láthatunk, amely abból adódik, hogy az 1°-os szerszám dőlésszög nagy sajtolóerőt eredményez, így nagyobb lesz a hőbevitel is. Emellett megfigyelhető, hogy a varrat szélessége jóval nagyobb, mint az előzőeké, ami szintén ennek köszönhető. Jól szemlélteti a dőlésszög fontosságát az, hogy ha nem döntjük meg a szerszámot, akkor a többi paraméter mellett nagyon jó minőségű varratot tudunk létrehozni. Ezt mutatja a 7. ábra:



7. ábra. Jó minőségű varrat
($n = 1000 \text{ ford/min}$, $v_h = 250 \text{ mm/min}$, $\varphi = 0^\circ$)

Ez utóbbi kötésből kimunkált próbatesteken szakítóvizsgálatot, hajlítóvizsgálatot és keménységmérést is végeztünk. Az alapanyag szakítószilárdsága 90 MPa, míg a hegesztett kötés szakítószilárdsága 87 MPa-ra adódott három-három próbatestnél. A hajlítóvizsgálat is pozitív eredményt adott, mind a három próbatest megfelelt. A keménységmérés szintén jó eredménnyel zárult, amit a 8. ábra mutat:



8. ábra. A keménységértékek változása a varrat keresztmetszete mentén

A keménységvizsgálatból is látszik, hogy a mért keménységértékek nagyon kis intervallumban mozognak, ívhegesztéssel jóval nagyobb eltérések figyelhetők meg.

ÖSSZEFOGLALÁS

A lineáris dörzshegesztés egy új és szokatlan hegesztő eljárás, mely egyre jobban elterjedőben van az ipar különböző területein. Jelen állapot szerint, igazán gazdaságosan az alumínium és ötvözetei illetve réz és ötvözetei hegesztésénél használható, bár a jelenlegi kutatások nagyon biztatóak az acélok területén is. A ritkábban előforduló, drága anyagok (Pl. titán, magnézium) hegesztésénél nagyobb biztonsággal használható, mint az ívhegesztések. Az utolsó pontban ismertetett kutatás arra mutat rá, hogy a technológiai paraméterek pontos beállításával jó minőségű varratot lehet létrehozni.

SUMMARY

The friction stir welding is a new and unusual welding process, which is spreading more and more in different fields of industry. It economically usable for welding of aluminium and its alloys, copper and its alloys, although current researches are very promising for steel as well. It can be used safely of welding of special and expensive materials (e. g. titanium, magnesium) than arc welding. In the last section the research points out high quality welds can be made by the correct selection of technological parameters.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] J. H. Record: A Look at the Statistical Identification of Critical Process Parameters in Friction Stir Welding, *Welding Journal*, 2007. p.: 97-98.
- [2] Roy Woodward: Friction Stir Welding, TALAT Lecture 4410, 1999. p.: 7-12.
- [3] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney: Friction stir welding and processing, 2007.p.: 8-11.
- [4] www.fswelding.com/Application of friction stir welding in aircraft structures
- [5] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney: Friction stir welding and processing, 2007. p.: 40-43.
- [6] W. M. Thomas: Friction Stir Welding Developments, *Hegesztéstechnika*, 2003/3, p.: 5-8.

KOPÁSÁLLÓ ACÉL MINIMÁLKENÉSES FÚRÁSÁNAK KÍSÉRLETI EREDMÉNYEI

EXPERIMENTAL RESULTS OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION DRILLING OF WEAR RESISTANT STEEL

Kovács Attila*, Dr. Varga Gyula**

ABSTRACT

Nowadays, human caused adverse impacts on the environment are increasing which urges engineers to make their production planning activities more environmentally conscious. Also, during the realization and manufacturing process of goods, the usage of environmentally demanding and polluting materials has to be reduced and these materials have to be properly disposed of. It could represent an efficient method for the reduction of environmental impacts to apply the increasingly popular minimal lubrication method or even dry cutting. The drawbacks of these procedures are shortened tool life, more significant cutting tool wear and increase in friction. As a result, the tool and the work place temperature rise. This article aims to give an overview about how during the cutting procedure a) the feed direction force that is the thrust, b) the cutting torque, c) the tool wear, d) the change of surface roughness, if the cutting is done under near dry conditions using different cutting speeds and feed rate parameters.

1. BEVEZETÉS

A korszerű technológiának számos, egymásnak sok tekintetben ellentmondó kihívásnak kell megfelelnie: forgácsolással egyre bonyolultabb alkatrészeket kell létrehozni egyre nehezebben megmunkálható anyagokból, növekvő termelékenységgel kell előállítani az egyre nagyobb pontosságú alkatrészeket, a műveletek költséghatékonyságához drága, többfunkciós szerszámgépekre és szerszámokra van szükség stb [1], [5]. A nagyobb termelékenységre való törekvés az anyagleválasztási sebesség (cm³/min) emelését teszi szükségessé, amely a fő- és mellékmozgások sebességének növelésével jár együtt. Az előtolás mértékének fokozása, de különösen a forgácsolósebesség növelése a forgácsleválasztási zóna hőmérsékletének drasztikus emelkedését okozza [4].

*főiskolai tanársegéd, Nyíregyházi Főiskola MMK-MAGT
** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék

A megmunkáló közegek (olajok, emulziók, szintetikus folyadékok) nemcsak a gépi idő csökkenését befolyásolták jótékonyan, hanem a szerszámok kopását is, ráadásul az elért méretpontosság és felületi érdesség is megfelelő [1]. Az 1990-es évektől kezdve tovább erősödő kételyek egyrészt a hűtő-kenőfolyadékkal (HKF) kapcsolatos költségek egyre emelkedő mértékével, másrészt az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásokkal voltak kapcsolatosak [6]. A forgácsolás hőmérsékletén a HKF-ből keletkező mérgező gőzök, kellemetlen szagú füst keletkezik, mely belélegzése allergiát, tartós munka esetén légzőszervi betegséget, bakteriológiai hatásként pedig bőrirritációt okoz.

A másik, a változást kikényszerítő erő ökológiai természetű: a dolgozó érdekében megfogalmazott egyre szigorodó környezetvédelmi előírások voltak. Jelen cikkben un. HARDOX acél környezettudatos forgácsolásánál elért kísérleti eredményeinkről számolunk be.

A HARDOX kopásálló lemezeknek nagyon szigorú olyan követelményeket kell kielégíteniük, mint állandó minőség és felületi állapot. Nagy keménység, nagy szilárdság és kiváló ütésállóság teszi a HARDOX kopásálló acéllemezeket széles felhasználási területen alkalmazhatónak. Vegyi összetétele az 1. Táblázatban található [2].

1. táblázat: A HARDOX 450 acél ötvözőinek vegyi összetétele (lemezvastagság $x=20-40$ mm)

| C | Si | Mn | P | S |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| max % | max % | max % | max % | max % |
| 0,23 | 0,70 | 1,60 | 0,025 | 0,010 |
| Cr | Ni | Mo | B | |
| max % | max % | max % | max % | |
| 1,00 | 0,25 | 0,60 | 0,004 | |

A HARDOX acélok az 1970-es évektől vannak a piacon, és fejlesztésük folyamatos a vásárlói kívánalmak kielégítése érdekében. A lemezeket 3mm-től 130mm vastagságig gyártják. A HARDOX lemezek nagy keménysége és kopásállósága jelentősen megnöveli a végtermékek hasznos élettartamát. A

HARDOX acélok növelt szilárdságuk következtében nagyon jól bírják az alacsony hőmérsékletet is. Viszonylagosan jól forgácsolhatók, egyszerű a gyártás és a felújítás használatukkal [3].

2. CÉLKITŰZÉS

A kísérletek célja a forgácsolás technológiai paramétereit forgácsolási folyamatra gyakorolt hatásának vizsgálata HARDOX 450 kopásálló acél szárazmegmunkálással, illetve minimál kenéssel történő furatmegmunkálásánál. Ennek során mértük a szerszám előtolásának és az alkalmazott forgácsoló sebességnek a hatását:

- az előtoló erő és a fúrási nyomaték szükségletre,
- a forgácsolt furat átlagos felületi érdességére.

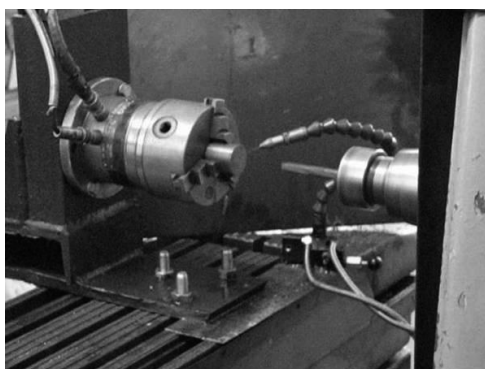
A furat-megmunkálási kísérletek eredményeinek kiértékelését matematikai statisztikai módszerekkel végeztük el.

3. A KÍSÉRLET KÖRÜLMÉNYEI

A fúrási kísérletekhez (1. ábra) használt csigafűrő: Ø10,2 L102/55 jelű Sirius 210 típusú (nagy termelékenységű, méretpontos és biztonságos fúrára alkalmas, HELICA (AlCrN alapú) bevonatú keményfém fűrő). A próbatest anyaga: HARDOX 450, ($R_m = 1400$ MPa) amelybe 30 mm hosszúságú átmenő furatokat készítettünk a sorozatkísérletek alkalmával. A minimálkenés megvalósítása külső hűtéssel, a hűtő-kenő folyadéknek a fűrő külső palástjára való hozzávezetésével történt, „NOGA MINI COOL” típusú porlasztó berendezéssel. A forgácsolási kísérletekhez „OMV cut XU” típusú, klórmentes olajat használtunk.

A kísérletek végrehajtása az alábbi paraméterekkel történt:

| | |
|------------------------|------------------------|
| Forgácsolási sebesség: | $v_{c1} = 28,82$ m/min |
| | $v_{c2} = 44,83$ m/min |
| Előtolás | $f_1 = 0,08$ mm/ford |
| | $f_2 = 0,14$ mm/ford |
| Furat hossza: | $l_w = 30$ mm |
| Felhasznált kenőanyag: | $V_0 = 50$ ml/h |



1. ábra. Kísérleti beállítás

3.1. Az előtolóerő és fúrónyomaték mérése

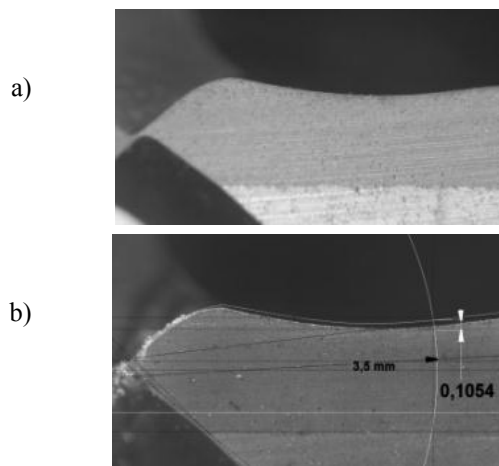
Az axiális fúróerő (F_f) és csavaró nyomaték (M_c) mérése egy KISTLER 9271A típusú kétkomponensű kompakt dinamométerrel történt, amelynek magas a sajátfrekvenciája. Ez lehetővé teszi a kisebb dinamikus erőhatások mérését magas alapterheléseknél is.

3.2. A felületi érdesség mérése

Az elkészített furatok átlagos felületi érdességének (R_a) meghatározásához SJ-201 (Mitutoyo) típusú készüléket használtunk. A felületi érdesség értékek mérése 30 mm hosszúságú próbatesteken furatonként 5 kontúr vonal mentén történt. A mért átlagértékeket a fúrási út függvényében ábrázoltuk, majd regresszió analízissel meghatároztuk a mérési pontokra legjobban illeszkedő közelítő egyenes egyenletét.

3.3. A szerszámkopás mérése

A fűrőkopás jellemzésére a sarokkopást (VB_c) és hátkopást ($VB_{3,5}$) választottuk, melynek értelmezését a [7] irodalomban megtalálható. A hátkopást 3,5 mm sugarú körön mértük, a kopás szélessége a főéltől a hátlapon. A szerszámkopást minden 30 mm után mértük fűrő a mindkét oldalán, majd a mért értékeket átlagoltuk. A szerszámról jó minőségű digitális képeket készítettünk. A képek CorelDraw szoftver segítségével dolgoztuk fel. A képen referencia élt vettünk fel, majd ehhez viszonyítottuk a kopás értékét (2. ábra).



2. ábra. Az éles a) és kopott b) szerszám (Nagyítás: 300x)

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A kísérletek során minden 300 mm fúrási úthossz (L) út után mértük az előtolás irányú forgácsolóerőt, a fúrási nyomatékot, a hátkopást, a sarokkopást és az átlagos felületi érdességet. A kísérlet eredményeit a 2 - 5. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A kísérlet eredménye ($v_{c1}=28,82$ m/min, $f_1=0,08$ mm/ford)

| L, mm | M _C , Nm | F _r , kN | VB _{3,5} , mm | VB _C , mm | Ra, μm |
|-------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------|
| 0 | 3,49 | 0,7600 | 0,0000 | 0,0000 | 1,9200 |
| 600 | 3,91 | 0,8874 | 0,0202 | 0,0329 | 0,8674 |
| 1200 | 4,25 | 0,9001 | 0,0414 | 0,0624 | 1,8915 |
| 1800 | 4,53 | 1,0102 | 0,0614 | 0,0924 | 1,9316 |
| 2400 | 5,08 | 0,9928 | 0,0847 | 0,1320 | 1,9227 |
| 3600 | 5,61 | 1,0991 | 0,1258 | 0,1901 | 1,9270 |
| 4800 | 6,46 | 1,2542 | 0,1617 | 0,2576 | 1,9992 |
| 6000 | 7,40 | 1,3348 | 0,2040 | 0,3292 | 1,9780 |
| 7200 | 7,98 | 1,3955 | 0,22456 | 0,3824 | 1,9174 |

3. táblázat: A kísérlet eredménye ($v_{c1}=28,82$ m/min, $f_2=0,14$ mm/ford)

| L, mm | M _C , Nm | F _r , kN | VB _{3,5} , mm | VB _C , mm | Ra, μm |
|-------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------|
| 0 | 4,69 | 1,0720 | 0,0000 | 0,0000 | 2,0400 |
| 300 | 5,12 | 0,9896 | 0,0155 | 0,0301 | 1,9732 |
| 600 | 5,85 | 1,0317 | 0,0317 | 0,0618 | 2,0012 |
| 900 | 6,29 | 1,0843 | 0,0468 | 0,0944 | 1,8909 |
| 1200 | 6,82 | 1,1605 | 0,0624 | 0,1223 | 1,8544 |
| 1500 | 7,26 | 1,0643 | 0,0792 | 0,1561 | 1,8098 |
| 1800 | 7,77 | 1,2504 | 0,0957 | 0,1922 | 1,7545 |

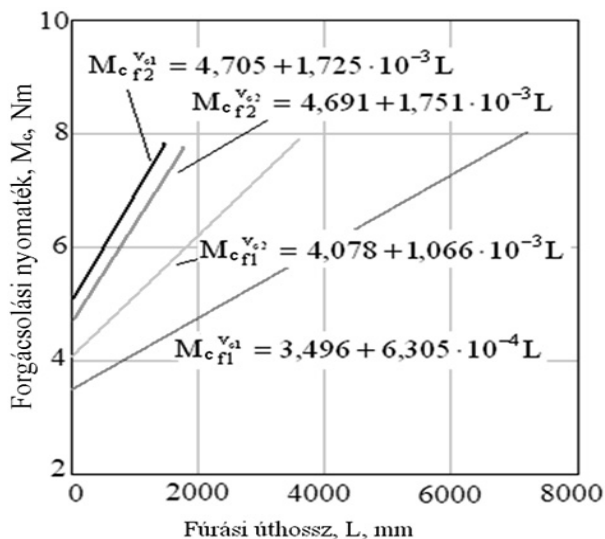
4. táblázat: A kísérlet eredménye ($v_{c2}=44,83$ m/min, $f_1=0,08$ mm/ford)

| L, mm | M _C , Nm | F _r , kN | VB _{3,5} , mm | VB _C , mm | Ra, μm |
|-------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------|
| 0 | 4,05 | 0,8100 | 0,0000 | 0,0000 | 2,3800 |
| 300 | 4,25 | 0,8128 | 0,0103 | 0,0220 | 2,4134 |
| 600 | 4,88 | 0,8669 | 0,0215 | 0,0434 | 2,3511 |
| 1200 | 5,38 | 0,9437 | 0,0435 | 0,0880 | 2,2376 |
| 1500 | 5,86 | 1,0026 | 0,0537 | 0,1103 | 2,2261 |
| 2100 | 6,19 | 1,0374 | 0,0743 | 0,1539 | 2,2538 |
| 2700 | 6,68 | 1,1281 | 0,0938 | 0,1972 | 2,2054 |
| 3600 | 7,92 | 1,2748 | 0,1321 | 0,2691 | 2,0786 |

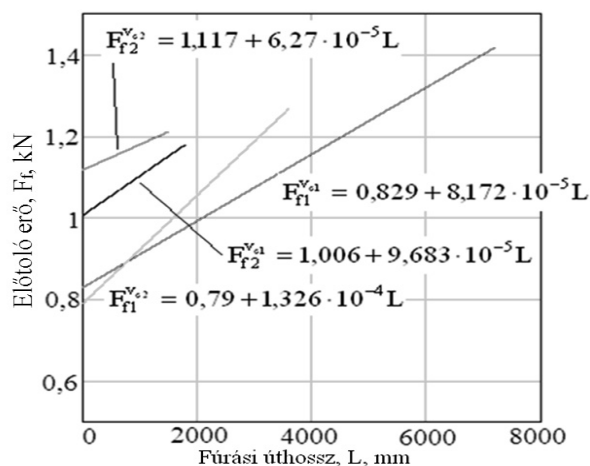
5. táblázat: A kísérlet eredménye ($v_{c2}=44,83$ m/min, $f_2=0,14$ mm/ford)

| L, mm | M _C , Nm | F _r , kN | VB _{3,5} , mm | VB _C , mm | Ra, μm |
|-------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|--------|
| 0 | 5,77 | 1,1320 | 0,0000 | 0,0000 | 1,8600 |
| 300 | 6,15 | 1,1438 | 0,0231 | 0,0486 | 1,4134 |
| 600 | 5,51 | 1,1353 | 0,0479 | 0,0971 | 1,3511 |
| 900 | 6,73 | 1,1580 | 0,0698 | 0,1393 | 1,3564 |
| 1200 | 7,62 | 1,1760 | 0,0976 | 0,1857 | 1,2376 |
| 1500 | 7,69 | 1,2398 | 0,1155 | 0,2429 | 1,2261 |

A mért nyomatéki értékekből látható (3. ábra), hogy a nyomaték a fúrási úthossz függvényében emelkedést mutat. A legnagyobb kezdeti érték 44,83 m/min forgácsolási sebesség és 0,14 mm/ford előtolási érték mellett található (5,77 Nm), míg a várakozásoknak megfelelően a legalacsonyabb forgácsolási sebesség és előtolás mellett mutatta a legkisebb értéket (3,49 Nm). A használt szerszám törése akkor következett be, amikor az átlagos forgácsolási nyomaték értéke 8 Nm közelébe ért.



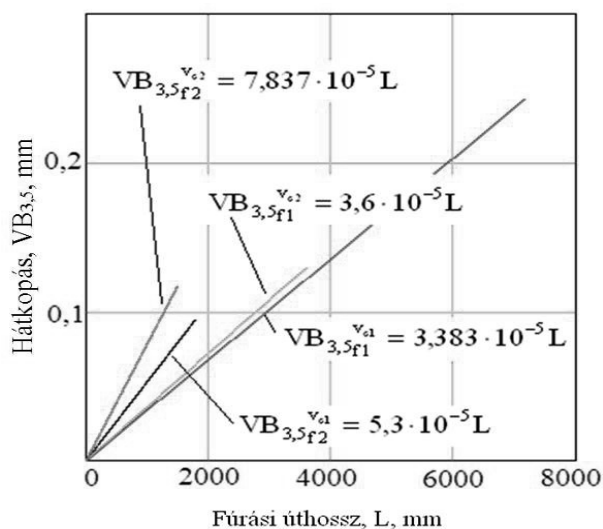
3. ábra. A forgácsoló nyomaték változása a fúrási úthossz függvényében



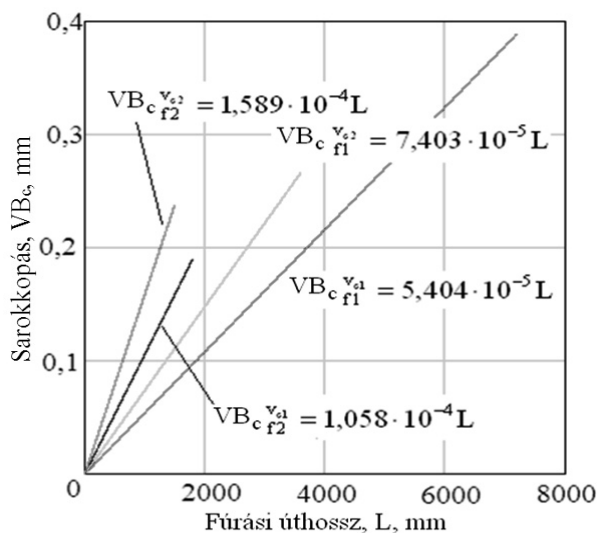
4. ábra. Az előtolóerő változása a fúrási úthossz függvényében

Hasonló megállapítások tehetők az 4. ábra kapcsán is, tehát az előtolás és a forgácsoló sebesség növelésének hatására az előtoló erő jelentősen emelkedik. A görbe meredeksége itt is nő, f_1 előtolásnál a v_c emelésével.

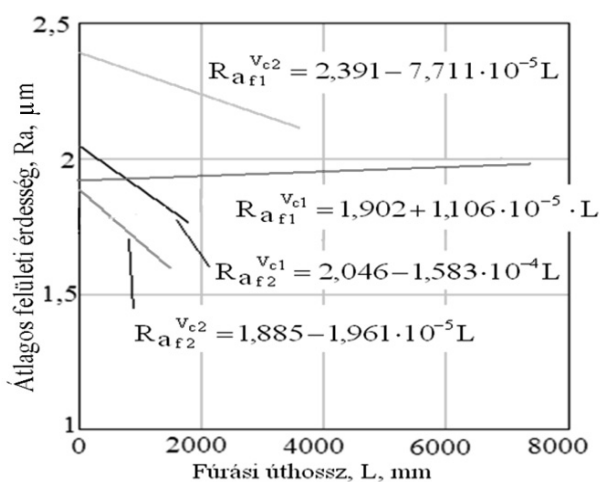
A szerszámkopás mérésének eredményei (5, 6. ábra) összhangban vannak az előtoló erő és a fúrónyomaték mérés eredményeivel. A sarokkopást és a hátkopást bemutató görbékre egyaránt igaz, hogy mind az előtolás, mind a forgácsoló sebesség növelésével a görbék meredeksége nő, ennek megfelelően a leggyorsabb szerszámkopást v_{c2} és f_2 paraméterek mellett mértük, ekkor a szerszám már 1,5 m fúrási út után tönkrement. A kopás sebessége v_{c1} és f_1 paraméterek esetén volt a legkisebb, így a szerszám tönkremenetele a legnagyobb hátkopás ($VB_{3,5}=0,246$ mm) és sarokkopás ($VB_C=0,38$ mm) mellett $L=7,2$ m forgácsolási útnál következett be. Megfigyelhető továbbá, hogy a sarokkopás átlagosan 1,5-2-szerese a hátkopásnak.



5. ábra. A hátkopás változása a fúrási úthossz függvényében



6. ábra. A sarokkopás változása a fúrási úthossz függvényében



7. ábra. Az átlagos felületi érdesség változása fúrási úthossz függvényében

A forgácsolt furat átlagos felületi érdessége (7. ábra) v_{c1} és f_1 paramétereknél közel állandónak tekinthető, míg v_{c2} és f_2 beállításánál a felületi érdesség számottevően javul. A jelenség magyarázatát a szerszám forgácsolt felületet vasaló hatásában kereshetjük, amely nagyobb előtolás és forgácsoló sebesség esetén erőteljesebben érvényesül.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány bemutatta, hogy a kopásálló acél (HARDOX 450) minimálkenéses fúrása során végzett kísérletben miként változik az előtolás irányú erő, a forgácsolási nyomaték, a szerszám sarok- illetve hátkopása és a felületi érdessége.

Vizsgálataink legfontosabb következtetéseit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- A hűtő- kenő anyag mennyiségének jelentős csökkentése mellett, 50 ml/h külső minimálkenéssel sikerült megfelelő forgácsolási feltételeket biztosítani HARDOX 450 típusú acél furatmegmunkálásánál.
- Mind az előtolás, mind a forgácsoló sebesség növelésével a fúrási nyomaték és az előtoló erő egyre nagyobb mértékben emelkedik, illetve nő a hát- és sarokkopás sebessége is, azonban a forgácsolt furat felületi érdessége javul.

6. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] WEINERT, K.: Trockenbearbeitung und Minimal-mengenschmierung. Springer Verlag 2000
- [2] http://www.ssab.com/Global/HARDOX/Datasheets/en/168_HARDOX_450_UK_Data%20Sheet.pdf
- [3] <http://www.winfo.sk/pdf/hardox007.pdf>
- [4] KUNDRÁK, J., MAMALIS, A.G., GYANI, K., et al.: Environmentally friendly precision machining, *Mater. Manuf. Process* 21 (1): 29-37 Jan 2006
- [5] ČEP, R., NESLUŠAN, M.; BARIŠIČ, B.: Chip Formation Analysis During Hard Turning. *Strojstvo*, 2008, vol 50, No. 6, pp.: 337 – 345.
- [6] DUDÁS, I., VARGA Gy., SZIGETI, F., PÉTER, L., SZÁZVAI, A.: Furatmegmunkálás minimálkenéssel, MTÉAR konferencia (DAB), Nyíregyháza, 2006. 11. 16. Műszaki Füzetek, 2. kötet, pp.: 77-92
- [7] DUDÁS, I., LIERATH, F., VARGA Gy.: Környezetbarát technológiák a gépgyártásban, Műszaki kiadó, Budapest, 2010, p.: 308

FEHÉR RÉTEG TECHNOLÓGIAI FELTÉTELEI KEMÉNYESZTERGÁLÁSNÁL

THE TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF WHITE ETCHING AREA IN HARD TURNING

Dr. Kundrák János^{*}, Dr. Pálmai Zoltán^{**}, Dr. Gyáni Károly^{**}

ABSTRACT

Hard turning is widely used to complete the machining of the hardened surfaces of machine parts that are exposed to a high bearing force and an increased risk. Occasionally a hard, so-called white etching area (WEA) that may not be etched and is usually harmful develops. In this paper we deal with the technological conditions of the development of this white etching area on the surface of the bore hole of cogwheels made of 20MnCr5 (W.Nr. 1.7147) steel. We conducted experiments with various technological parameters. As a result of these experiments, we elaborated an empirical formula by which we can decide if a white etching area can be expected to develop in a particular case.

1. BEVEZETÉS

Közel három évtizede, hogy az edzett acélok forgácsolhatóságának vizsgálata a megmunkálások kutatásának kiemelkedő iránya lett. Az edzett felületeket korábban abrazív szerszámokkal, elsősorban köszörüléssel munkálták meg. A bórnitrid alapú szerszámok megjelenésével azonban lehetővé vált, hogy az abrazív eljárások mellett más forgácsoló eljárásokkal – határozott élű szerszámokkal – is megmunkáljuk az edzett acélokat. E fejlődési szakasz kezdetén az egyélű szerszámokkal végzett forgácsolás elméleti és technikai lehetőségeit vizsgálták. Ekkor az alkatrészekre vonatkozó követelmények még többnyire extrémnek minősülő feltételek (kis forgácskeresztmetszet, nagy forgácsoló sebesség, különleges anyagok, újszerű kopásviszonyok, stb.) mellett voltak elérhetők.

A fejlesztések eredménye, hogy ma már rendelkezésre állnak azok a forgácsoló gépek, szerszámok és technológiák, amelyekkel ezek a feltételek a precíziós megmunkálásokban megszokottá váltak.

A köbös bórnitrid (CBN) szerszámok hozzáférhetőségének (konstrukció, ár, stb.) javulása ezt a megmunkálást, – a keményforgácsolást – iparilag jelentős eljárássá tette. A technológia fejlesztését nemcsak a bonyolultabb felületkombinációk megmunkálásának lehetősége ösztönözte, hanem a keményfelületek számának és/vagy keménységének állandó növekedése, mert ezáltal is növelhető azok tartóssága, és ezen keresztül a termékek megbízhatósága. Megfigyelhető, hogy egyre gyakrabban edzenek be felületeket a technológiai folyamat egyszerűsítéséhez is (pl. fogaskerékgyártás, ahol a fogaskeréktest valamennyi felületét edzik).

A keményfelületek befejező megmunkálása során jelentős mechanikai és termikus hatások lépnek fel, az igen nagy, gyors deformáció akár 10^6 °C/s nagyságrendű lokális felmelegedéssel, majd 10^4 °C/s sebességű lehüléssel párosul. Ez meghatározza a keletkezett felületi réteg állapotát, tulajdonságait, tehát az alkatrészek funkcionális viselkedését, kopásállóságát, kifáradási határát is. A megmunkálás után létrejött felületi rétegnek leggyakrabban maradó feszültségi állapotát, mikrokeménységét és az esetleges szövetszerkezeti változásait, egyszóval *integritását* elemzik a kutatók [1, 2]. A felszínen jelentős szövetszerkezeti változások következnek be, amelynek tipikus esete a több mint fél évszázadai ismert, úgynevezett fehér réteg kialakulása (angol betűszóval WEA: White Etching Area). Rendkívüli keménysége és finomszemcsés mikroszerkezete miatt a szokásos maratószerek hatástalanok, és a csiszolatokon maratlan marad. A fehér réteg alatt gyakran található egy sötétebb színű lágy, túlmaratott réteg is (angol betűszóval DEA: Dark Etching Area), amely nagyhőmérsékletű megeresztési folyamatra utal.

Keményesztergálásnál a forgácsleválasztás körülményei a köszörüléshez hasonlítanak. A fellépő rövid idejű termomechanikus hatások miatt keményesztergálásnál is számítani kell fehér réteg kialakulására. A köszörüléssel való hasonlóság ellenére azonban említésre méltó különbségek is vannak. Köszörülésnél a nagyoló fokozatban alakul ki fehér réteg, amelyet a simító és kiszikráztató fokozatban leköszörülnek. Keményesztergálásnál viszont a simító fokozatban is lehetnek olyan technológiai körülmények,

^{*} egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gépjáratstechnológiai Tanszék
^{**} ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépjáratstechnológiai Tanszék

hogy fehér réteg keletkezik. Kőszőrülésnél a munkadarabot érő hőimpulzus szakaszos, és a sok forgácsoló szemcse miatt megosztott, keménysztergálásnál viszont az egyélű szerszám miatt folyamatos és koncentrált. Ezért a hőhatás intenzívebb, amelynek hatását fokozza az igen rövid érintkezési idő is. A szakirodalom szerint jellemző adatként el lehet fogadni, hogy míg kőszőrülésnél az érintkezési idő 28 ms, addig keménysztergálásnál csak 0,08 ms [1, 3]. Az extrém nagy felmelegedési és lehülési sebességéből is lehet következtetni arra, hogy a felszíni rétegben jelentős szövetszerkezeti változások történnek, és megjelenik a fehér réteg is. Ez a körülmény a kutatók fehér réteg iránti érdeklődését jelentősen fokozta. Az utóbbi tíz éven több cikk jelent meg a keménysztergálás fehér rétegről, mint 50 év alatt a kőszőrülésről [4].

A fehér réteg jelenléte többnyire káros, mert rontja az alkatrészek megbízhatóságát, az ilyen alkatrészek beszerelése kockázattal jár. Ennek oka, hogy a maradófeszültséggel terhelt és rideg, igen kemény anyagréteg az igénybevételekből származó alakváltozást csak korlátozott mértékben képes elviselni. A húzó-, hajlító- és csavaró igénybevételek hatására hajszállrepedések keletkezhetnek. Ezen kívül fennáll a lepattozás veszélye is, amely berágódásokhoz vezet. A fehér réteg kedvezőtlenül befolyásolja a kifáradási határt, és csökkenti a feszültségkorróziós repedésekkel szembeni ellenállást. Egyetlen kedvező tulajdonsága, hogy csúszó súrlódásnál javíthatja a kopásállóságot [5, 6, 7]. E munka célja segítséget adni annak megítéléséhez, hogy egy megtervezett, vagy már alkalmazásba vett keménysztergálási technológia előidézheti-e a felületi fehér réteg kialakulását.

2. ÖSSZEFÜGGÉSEK A FEHÉR RÉTEG KIALAKULÁSA ÉS A FORGÁCSOLÁSI PARAMÉTEREK KÖZÖTT

A szakirodalom áttanulmányozásával összegyűjtöttük azokat a legfontosabb tapasztalatokat, amelyek a fehér réteg kialakulásáról fellelhetők.

Első közelítésben szinte minden kutató a szerszámkopást tette felelőssé, ugyanis új szerszámnál sohasem alakult ki fehér réteg. Erősíti a kopás főszerepét, hogy vannak esetek, amikor függetlenül az anyagleválasztási sebességtől ($Q'_{w,elm}$, mm³/s, tehát nem forgácsolósebesség), ugyanakkora hátkopásnál képződött fehér réteg. Azért az anyagleválasztás sebességének is lehet hatása, mert előfordul, hogy nagyobb anyagleválasztási sebességnél kisebb hátkopásnál jelentkezik fehér réteg. Tény az is, hogy egészen csekély, vagyis simítási értékeknél is megjelenhet fehér réteg, azonban nem lehet korrelációt felfedezni a Q'_w nagysága és a fehér réteg megjelenése között.

Igen fontos szerepe van az r_β élsugárnak, sajnálatos módon azonban kevés szakirodalom közli r_β értékét.

Schmidt részletesen foglalkozik vele [8]. Például $r_\beta=35 \mu\text{m}$ -nél még nincs fehér réteg, de teljesen azonos technológiai körülmények között és $VB_c=15 \mu\text{m}$ hátkopás esetében $r_\beta=75 \mu\text{m}$ -nél már van. Ez azért fontos megfigyelés, mert az r_β élsugár a kereskedelmi szerszámokon eléggé változatos, Schmidt szerint $3 \mu\text{m}$ és $120 \mu\text{m}$ között váltakozik. Rendkívül fontosnak tartják az élgeometria pontos rögzítését Jeffrey D. és társai is. Ők az élsugár alapján három csoportba sorolják a CBN szerszámokat [9]:

- fazetta nélkül Up-Sharp Edge; $r_\beta < 25 \mu\text{m}$,
- fazettás UP-Sharp Edge; $r_\beta < 50 \mu\text{m}$,
- nagy élsugarú (Honed Edge) szerszámok $r_\beta = 100 \dots 150 \mu\text{m}$.

Néhány kutató a forgácsolósebesség fontosságát hangsúlyozza. Akcan és társai azt állítják, hogy nem a hátkopás, hanem a forgácsolósebesség emelése okozza a fehér réteg kialakulását: 100 m/min-ről 200 m/min-ra emelve a forgácsolósebességet, már egyharmadnyi hátkopásnál megjelenik a fehér réteg [5].

Természetesen a megmunkált anyagnak is jelentős hatása lehet, mert bizonyított tény, a fehér réteg kialakulásának egyik feltétele, hogy a forgács leválasztásának pillanatában az anyag hőmérséklete haladja meg az A_{C3} átalakulási hőmérsékletet, és így közel homogén ausztenit alakulhasson ki [5, 10]. Pl. két karbidokban gazdag anyag, az ISIM2 [5] és a VIMVAR M50 [11] esetében, amelyeknél elég nagy volt az anyagleválasztási sebessége ($Q'_{w,elm}=50$ ill. $30 \text{ mm}^3/\text{s}$) és a hátkopás ($VB_c=0,2 \text{ mm}$ ill. $0,3 \text{ mm}$) is, még sincs fehér réteg. Ennek egyértelmű oka, hogy a homogén ausztenites szerkezet kialakulásához a karbidok lassú oldódása miatt $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, illetve $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ szükséges, amelyet nem ér el a forgácstő hőfoka.

Amikor a kutatók figyelme a fellépő erőhatások felé fordult, azt az érdekes megállapítást tették, hogy a fehér réteg keletkezését a szerszám hátfelületén a súrlódási teljesítménnyel lehet kapcsolatba hozni. Brandt [7] szerint ez a P'_α hátfelületi fajlagos súrlódási teljesítmény a

$$P'_\alpha = \frac{\mu \sqrt{F_p^2 + F_f^2} v_c}{l_c} \quad (\text{W/mm}) \quad (1)$$

képlettel számítható, ahol F_p passzív erő, az F_f előtolóerő, v_c forgácsolósebesség, $\mu=0,26$ súrlódási tényező, l_c a szerszámél érintkezési hossza:

$$l_c = r_e \arccos \left(1 - \frac{a_p}{r_e} \right) + \frac{f^2}{8r_e}, \quad (2)$$

és itt r_e szerszám csúcsgugár, a_p a fogásmélység és f az előtolás. Ezekkel Brandt azt az érdekes, azóta mások által is megerősített megállapítást tette, hogy fehér réteg akkor keletkezik, ha $P'_\alpha \geq 150 \text{ W/mm}$.

3. KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK

A kísérleti fogaskerekek anyaga DIN szabvány szerinti 20MnCr5 (W.Nr. 1.7147) betétben edzhető ötvözött acél volt, amelynek fő ötvözői: 0,2% C, 1,2% Mn és 1,2% Cr. Betétdzés után a külső réteg kemény és kopásálló, a belső magrészt pedig szívós marad, miáltal az alkatrész jelentős terheléseket képes elviselni. A 900...950 °C-on végzett cementáláskor a felszíni réteg előírás szerint 0,6 mm mélyen C_{be} -ben feldúsul 0,5...0,6 %-ra, de elérheti a 0,9...1,0 %-ot is. Edzés és megeresztés után a keménység 59...63 HRC.

A fogaskerekek furatátmérője: $d_w=48$ mm, a szerszám gép EEN 400 eszterga ($P=11$ kW). A forgácsolószerszám: PCBN CNGA 120408 7020 bevonatos; a forgácsoló szerszám élgeometriája: $\gamma_n=-6^\circ$; $\alpha_n=6^\circ$; $\kappa_r=95^\circ$; $\epsilon_r=80^\circ$; $r_e=0,8$ mm; fazetta: $0,1x(-20^\circ)$. Technológiai adatok: $v_c=90, 120$ m/min, $f=0,05-0,20$ mm/ford., $a_p=0,1-0,4$ mm.

Az eredmények egy részét az 1., 2. és 3. ábra foglalja össze. Megállapítható, hogy a fehér réteg nem egyenletes vastagsága és nem is teljesen összefüggő [12]. Ez viszont még azt az előnyét is megkérdőjelezi, hogy a felületet kopásállóra teszi. Az viszont beigazolódott, hogy valóban érvényes szabályként fogadható el: a szerszámon mérhető nagyságú hátkopás kialakulásakor akkor képződik fehér réteg, ha $P'_\alpha \geq 150$ W/mm.

4. TECHNOLÓGIAI SZABÁLY A FEHÉR RÉTEG KELETKEZÉSÉNEK ELKERÜLÉSÉHEZ

Az erőmérések adataiból meghatározható a keménysztergáláshoz egy $F_d=C_F \cdot v^x \cdot f^y \cdot a_p^z$ alakú empirikus függvény. Esetünkben $C_F=244,4$ N, $x=0,3$, $y=0,59$ és $z=0,31$. Ez azzal az előnnyel jár, hogy a fajlagos hátkopási súrlódási teljesítmény számítására is lehet egy empirikus képletet kialakítani, amely az ilyen keménységűre edzett anyagoknál szélesebb körben is erőmérések nélkül alkalmazható:

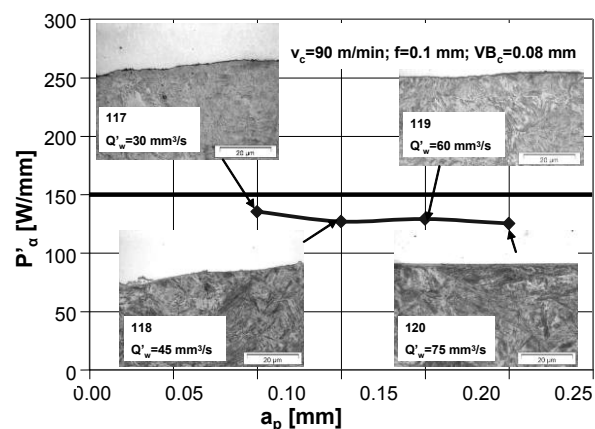
$$P'_\alpha \cong 1,06 \frac{v^{1,3} f^{0,31} a_p^{0,59}}{l_c}, \quad (3)$$

ahol l_c a (2) képlettel számítható.

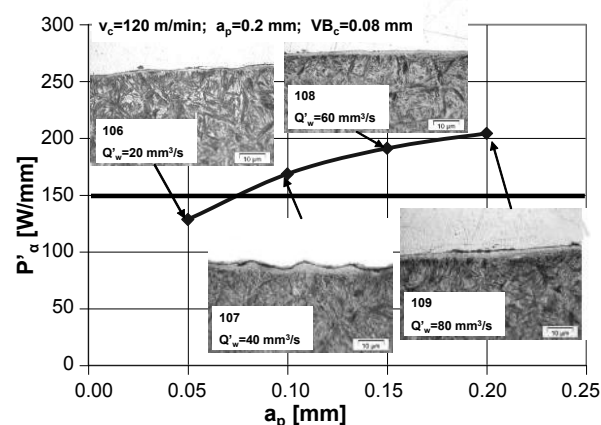
Összehasonlítottuk P'_α mért és a (3)-mal számított értékeit, amelyet a 4. ábra mutat be. A mért és számított értékek illeszkedése a forgácsolásnál megszokott nagy szórások figyelembevételével jónak mondható, és világosan látszik a szabály, amely szerint fehér réteg keletkezése valóban akkor várható, ha $P'_\alpha \geq 150$ W/mm.

Ilyen módon egy olyan empirikus képlet birtokába jutottunk, amelynek segítségével már előre, a technológiai adatok birtokában eldönthető, hogy várható-e fehér réteg képződése. Itt a hátkopást

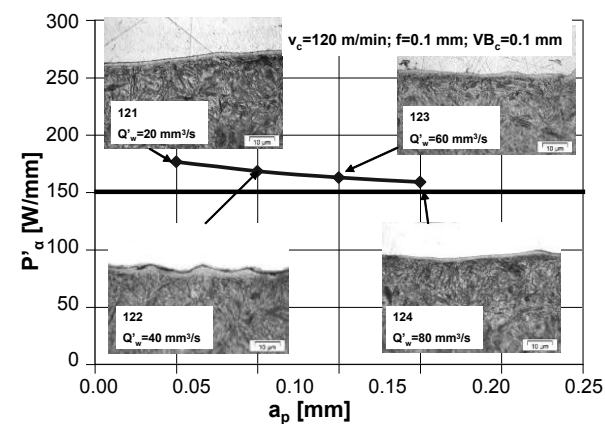
főleg külön figyelembe venni, mert a szerszám a gyártás során természetesen kopik, tehát az a feltétel, hogy a fehér réteg csak a hátkopási megjelenségek várható, előbb-utóbb feltétlenül teljesül.



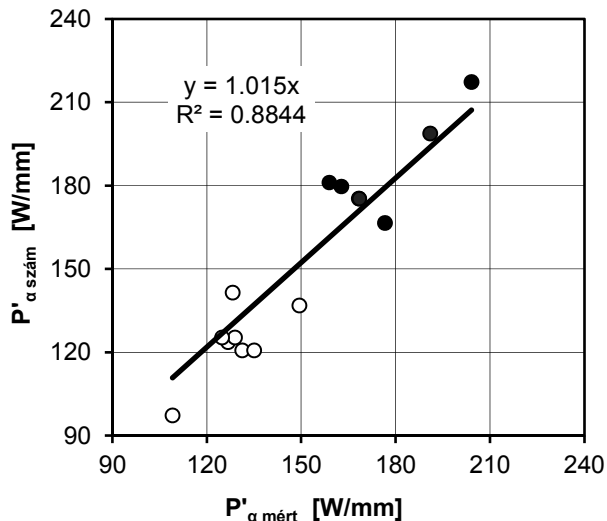
1. ábra. Fehér réteg nem keletkezett ($P'_\alpha < 150$ W/mm).



2. ábra. Három felületen fehér réteg van, ahol $P'_\alpha > 150$ W/mm.



3. ábra. Minden felületen fehér réteg van ($P'_\alpha > 150$ W/mm).



4. ábra. A P'_α értékek illeszkedése
(a felt köröknél van fehér réteg).

ÖSSZEFOGLALÁS

A keménysztergálás az edzett alkatrészek befejező megmunkálására egyre szélesebb körben használatos. E technológiai műveletnél gyakran kialakul az ún. fehér réteg, amely a köszörülésnél már évtizedek óta ismeretes, és megjelenését általában kedvezőtlennek tartják. A szakirodalmi adatok ellenőrzése céljából forgácsolási kísérleteket végeztünk betétben edzhető ötvözött, edzett fogaskerekek belső hengeres felületének esztergálásával. Megállapítottuk, hogy a fehér réteg nem egyenletes vastagságú és nem is teljesen összefüggő. Ez még azt az előnyt is megkérdőjelezi, hogy a felületet kopásállóvá teszi. Az viszont beigazolódott, hogy valóban érvényes szabályként fogadható el: a szerszámon mérhető nagyságú hátkopás kialakulásakor akkor képződik fehér réteg, ha $P'_\alpha \geq 150$ W/mm. Az erőméréseink eredményeinek felhasználásával kialakítottunk egy olyan empirikus képletet, amellyel a technológiai adatok ismeretében külön erőmérés nélkül is eldönthető, kell-e számítani fehér réteg kialakulására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Köszönet a lektoroknak

A GÉP jelen számában szereplő cikkek lektoráltak. Ezúton is köszönetet mondunk a lektoroknak a szakmai segítségükért.
Dr. Bányai Tamás, Bokros István, Bordás Róbert, Dr. Csernák Gábor, Dr. Döbröczöni Ádám, Dr. Dömötör

- ## IRODALOM
- [1] KLOCKE F. – BRINKSMEIER E. – WEINERT K.: Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Process. *Annals of the CIRP* (2005), Vol. 54/1. pp.22-45
 - [2] BARBACKI A, KAWALEC M, HAMROL A.: Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 133/1-2, 2003, pp.21-25
 - [3] TÖNSHOFF HK, KARPUSCHEWIKI B, BORBE C: Comparison of Basic Mechanisms in Cutting and Grinding of Hardened Steel. *Prod. Eng.* Vol IV/2, 1997, pp.5-8
 - [4] BRINKSMEIER E, BROCKHOFF T: White Layers in Machining Steels, 2. *Int. Conf. On High Speed Machining*, PTW TV, Darmstadt, 1999, pp.7-13
 - [5] AKCAN S, SHAH S, MOYLAN SP, CHABRA PN, CHANDRASEKAR S, FARRIS TN: Characteristics of white layers formed in steels by machining. *ASME Med.* Vol. 10. Manufacturing Science and Engineering, Nashville TN, 1999, pp.789-795
 - [6] BARRY J, BYRNE G: TEM study on the surface white layer in two turned hardened steels. *Materials Science and Engineering*, Vol. 325/1,2, 2002, pp.356-364
 - [7] BRANDT D.: Randzonenbeeinflussung beim Hartdrehen, *Dr. Ing. Dissertation*, Institute for Production Engineering and Machine Tools, Universität Hannover, 1995.
 - [8] SCHMIDT, J.: Mechanische und Thermische Wirkungen beim Drehen Gehärteter Stähle. *Dr.-Ing. Dissertation*, Universität Hannover, 1999.
 - [9] JEFFREY DT, SHREYES NM, ROBERTA AP, THOMAS RW: Effect of Cutting-Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Residual Stresses in Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 122/4 2000, pp.642-649.
 - [10] RECH J, MOISON A: Surface Integrity in Finish Hard Turning of Case Hardened Steels Application to Gear Cone Brakes. *Proc. Of the Int. Conf. On Manufacturing Engineering (ICME)* 3-4 Oct, 2002. Haikidiki, Greece. pp.195-203
 - [11] Y KEVIN CHOU, C. J. EVANS: White layers and thermal modelling of hard turned surfaces. *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture* Vol. 39/12, 1999, pp.1863-1881.
 - [12] J. KUNDRÁK, Z. GÁCSI, K. GYÁNI, V. BANA and G. TOMOLYA: X-ray diffraction investigation of white layer development in hard-turned surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, DOI 10.1007/s00170-011-3811-7

Ferenc, Dr. Farkas József, Dr. Fáy Árpád, Dr. Gyulai László, Dr. Hornyák Margit, Dr. Kovács Béla, Dr. Kovács György, Dr. Kovács Miklós, Dr. Mikó Balázs, Dr. Molnár András, Dr. Orbán Ferenc, Dr. Rác Pál, Dr. Szabó Ferenc, Dr. Szemmelweisné Dr. Hodvogner Katalin, Dr. Szirbik Sándor, Dr. Varga Gyula

ALUMÍNIUMÖTVÖZET ABRAZÍV VÍZSUGARAS VÁGÁSÁNAK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF ABRASIVE WATERJET CUTTING OF AN ALUMINIUM ALLOY

Dr. Maros Zsolt*

ABSTRACT

Abrasive waterjet cutting has for the last few years become a competitor to various procedures that generate heat. The new technique has become popular because the heat of cutting does not deform the material and the cut surface has high quality. Main advantage of this method is that almost every kind of material from stones to polymers can be cut. Efficiency and quality of the waterjet cutting process can be characterised by different output parameters, like surface roughness of the machined surface, geometry of cutting kerf (depth, width, tapering). Some results of experiments carried out for investigation of efficiency and quality of cutting of aluminium alloy surfaces are summarised in the paper

1. BEVEZETÉS

A vízsugaras vágás ipari felhasználása a 80-as évek elejére vált igazán lehetőséggé, amikor is kifejlesztették azokat a nyomásfokozó rendszereket, amelyek képesek voltak 3000 bar fölötti víznyomást is előállítani. Ekkor kezdődtek meg azok a kísérletek, amelyekben az addig tiszta vízsugárhoz már abrazív port adagoltak. Az első ipari vízsugaras vágógépek megjelenése a 80-as évek közepére tehető. Ma világszerte egyre szélesebb körben alkalmazzák ezt a technológiát többek között különböző alumíniumötvözetekből készült lemez előgyártmányok elsődleges megmunkálására.

A vízsugaras vágás előnyei illetve hátrányai alapján jól kiegészíti a hőhatást hasznosító vágási eljárásokat. Ott alkalmazható sikerrel, ahol a hőhatással működő eljárások technikai vagy gazdaságossági korlátokba ütköznek.

Abrazív vízsugaras vágásnál az anyagleválasztás erózióval történik. Ekkor a szilárd és folyékony részecskékkel való ütközés következtében jön létre anyagleválasztás [1]

A folyadékban lévő részecskék és a munkadarab ütközésekor az ütközés és az anyag jellemzőitől függően különféle jelenségek játszódnak le: nyírásos alakváltozás, képlékeny deformáció, repedések keletkezése és növekedése, keményedés, rideg törés, az anyag helyi megolvadása stb.

A vágási folyamatok vizsgálatakor a vágás hatékonyságát, a megmunkált felület érdességi jellemzőit és a vágási rés alakját szokás vizsgálni, leginkább azon vonatkozásban, hogy hogyan befolyásolhatók ezek a jellemzők a jellegzetes technológiai paraméterek változtatásával.

2. A BEVÁGÁSI MÉLYSÉG VIZSGÁLATA

A megmunkáláshoz szükséges energia-, víz- és abrazív anyag mennyisége a szivattyúk és nyomásfokozók teljesítményének növelésével, a fűvókák minőségének javításával és a technológiai paraméterek megfelelő megválasztásával szabályozható. A megmunkálás folyamata számos tényezőtől függ. A vágás hatékonysága különböző módokon növelhető:

- a technológiai paraméterek megfelelő megválasztásával,
- a szivattyúk és nyomásfokozók teljesítőképességének növelésével,
- a vizes és az abrazív fűvókák geometriájának változtatásával,
- az abrazív anyagának és szemcseméretének változtatásával.

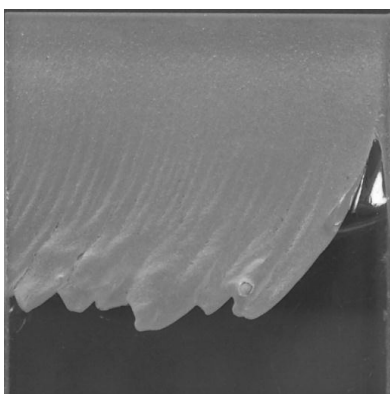
Fenti tényezők közül a technológiai paraméterek kivételével egyik tényező sem vizsgálható, csak egészen rendkívüli anyagi befektetésekkel. Ezért van az, hogy pl. a fűvóka geometriák vizsgálatáról szinte kizárólag a vízsugaras vágóberendezéseket gyártó nagy világcégek kutatói [2] számolnak be.

A vágás minősége és hatékonysága különböző paraméterekkel jellemezhető: így például a megmunkált felület érdessége és pontossága, a vágórés mérete és alakja, szélessége, mélysége és ferdesége. A vízsugaras vágás jellemzésére az irodalomban széles körben elfogadott paraméter az ún. bevágási mélység [3,7].

A bevágási mélység kísérleti vizsgálatok az anyagot nem vágjuk át teljes keresztmetszetében (1. ábra), csak

*egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem,
Gépgyártástechnológiai Tanszék

egy bevágást készítünk, és azt vizsgáljuk milyen mélység érhető el a technológiai paraméterek változtatásával. A bevágási mélység mérésekor a hossz mentén elvégzett több mérés átlaga adja az adott paraméterekkel elérhető maximális bevágási mélységet (h).



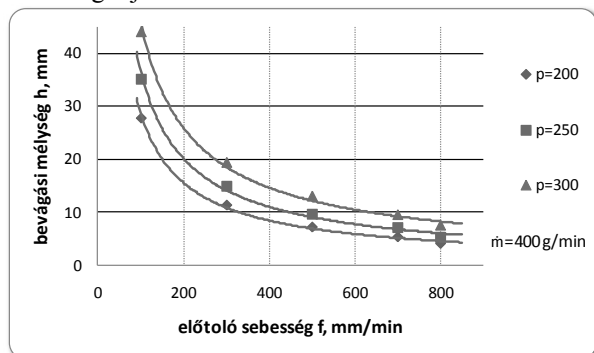
1. ábra. Jellegzetes bevágás tüve anyagban

A kutatási célok elérése érdekében ún. bevágási és átvágási kísérleteket végeztünk különböző anyagokon a felhasználók által állítható technológiai paraméterek, azaz a vágófej előtoló sebessége (f), a víznyomás (p) és az abrazív anyagáram (m_a) változtatása mellett. A bevágási kísérleteknél a bevágás mélységét (h), az átvágási kísérleteknél a felületi érdesség jellemző paramétereit, illetve a vágórés szélességi méreteit és az oldalak ferdeséget vizsgáltuk. A vizsgált anyagminőség AlMgSi0,5 alumínium ötvözet volt, mely viszonylag széles körben alkalmazott az ipari felhasználásokban.

A kísérleteket INNO PUMP-36HD kétdimenziós abrazív vízugaras vágógépen végeztük az alábbi paraméterek alkalmazása mellett:

- az elsődleges fúvóka átmérője: 0,2 mm
- az abrazív fúvóka átmérője: 0,8 mm
- az abrazív fúvóka hossza: 70 mm
- abrazív anyag: BARTON GARNET #80

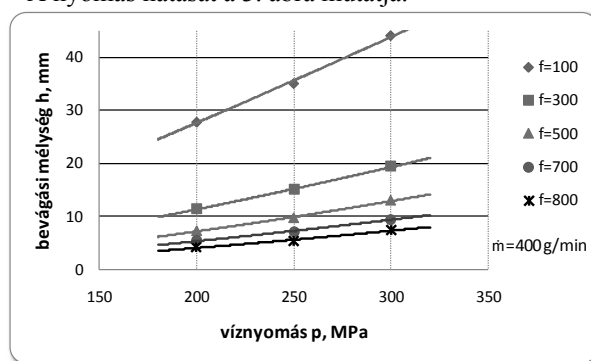
Ezen fix paraméterek mellett változtattuk az alkalmazott víznyomás, az abrazív anyagáram és az előtolás nagyságát. A kísérletek eredményeit a 2-4. ábrák foglalják össze.



2. ábra. Az előtolás hatása a bevágási mélységre különböző nyomásokon

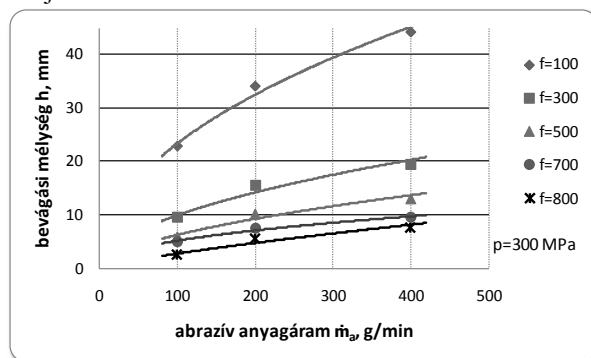
A 2. ábrából megállapítható, az előtolás növelésével a bevágási mélység főleg kis sebességeknél meredeken csökken, a görbék hiperbolikus jellegűek, 200-250 mm/min közötti tartományban a bevágási mélység a felére esik. A bevágási mélység változására az előtolás gyakorolja a legnagyobb befolyást. A megmunkálási költségek alakulására a technológiai paraméterek közül az előtolás nagysága van a legmarkánsabb hatással. Az előtolást ezért mindig a lehető olyan legnagyobb értékre kell megválasztani, mellyel a kellő pontosság és felületminőség még biztosítható.

A nyomás hatását a 3. ábra mutatja.



3. ábra. A víznyomás hatása a bevágási mélységre különböző előtolások esetén

A nyomás változtatásának hatása a 3. ábra alapján lineáris. Érdekes megfigyelni, hogy míg 100 mm/min előtolás esetén a nyomás változtatásának jelentős a szerepe, addig nagyobb előtoló sebességek mellett (pl. 800 mm/min) a nyomásváltoztatás hatása egyre kisebb (a görbék meredeksége nagyobb előtolásokon egyre kisebb). Ez az ún. behatási idő nagyságával magyarázható. Mivel az előtolás növelésével csökken a behatási idő, így a nagyobb nyomásból eredő részecske sebesség növekedés nem képes hatását kellő mértékben kifejteni.



4. ábra. Az abrazív anyagáram nagyságának hatása a bevágási mélységre

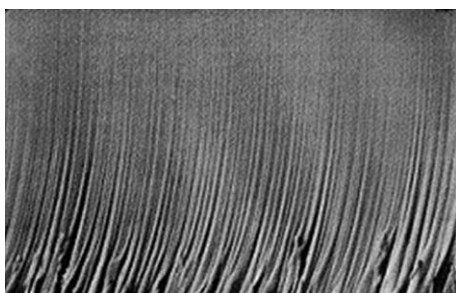
Az abrazív anyagáram mennyisége növeli a bevágási mélység nagyságát (4. ábra), különösen kis abrazív anyagáramok növelésekor. A vizsgált tartományban a bevágási mélység a duplájára nő. Ha az abrazív anyagáram nagysága túllép egy bizonyos értéket, akkor bevágási kísérletek végzésekor a túlságosan sok

„visszacsapódó” abrazív szemcse azonban akár csökkentheti is a bevágási mélységet.

3. A VÁGOTT FELÜLET ÉRDESSÉGI JELLEMZŐI

A megmunkálás hatékonysága mindig hatással van a megmunkált felület minőségére és pontosságára. A költségek csökkentése érdekében minden felhasználó törekszik a vágófej eltolásának értékét a lehető legnagyobbra megválasztani, de az eltolás növelése együtt jár a makro- és mikrogeometriai hibák növekedésével. A vízszaggal vágott felület minőségén elsősorban annak felületi érdességét, míg a pontosságán a vágórés ferdesége miatt kialakuló méreteltéréseket szokták érteni.

Az abrazív vízszaggal vágott felületek topográfiája szinte minden esetben az 5. ábrán látható jellegzetességeket mutatja [4]. A korábban leírtak szerint az átvágott vastagság függvényében a vágott felületet legalább két zónára szokták osztani: finom forgácsolás övezete és durva forgácsolás zónája. Ez utóbbiban jelennek meg az ún. elhajlási vonalak.



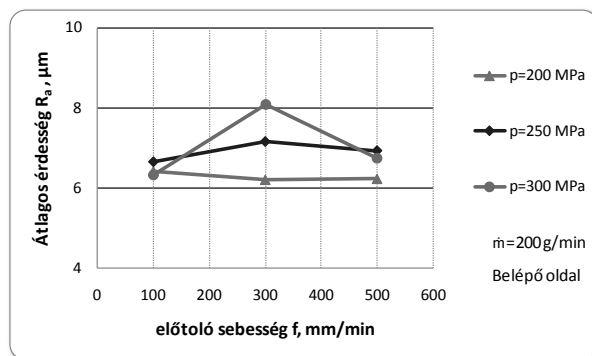
5. ábra. Abrázív vízszaggal vágott fém felülete a jellegzetes elhajlási vonalakkal

A felületet jellemző érdességi paraméterek közül a gépészetben legáltalánosabban használt mérőszám az átlagos érdesség (R_a). Az átlagos érdesség vonatkozásában közölt irodalmi adatok nem egyértelműek.

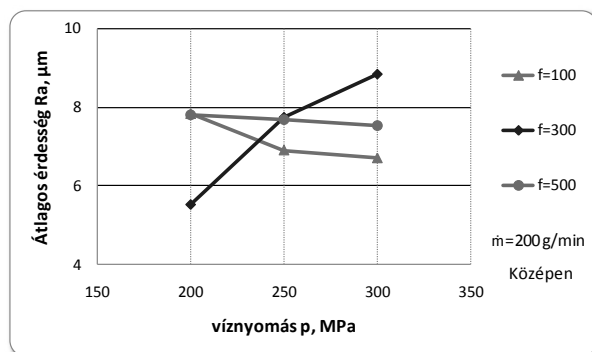
A megmunkált felület pontosságának és felületminőségének vizsgálatára átvágási kísérleteket folytattunk 10 mm vastagságú AlMgSi0,5 alumíniumötvözetben. A kísérletek eredményeit a 6-8. ábrák mutatják.

A 6. ábrából megállapítható, hogy az eltolásnak az átlagos érdességre gyakorolt hatása nem egyértelmű. Ez összhangban van a vonatkozó szakirodalomban megfogalmazott kételyekkel. A különböző nyomásokon és abrazív anyagáramoknál felvett mérési eredmények alapján egyértelmű tendencia nem mutatható ki.

A víznyomás nagysága (7. ábra), hasonlóan az eltoló sebességhez nem mutat egyértelmű összefüggést a megmunkált felület átlagos érdességével. Bizonyos eltolások mellett növeli, máskor csökkenti annak nagyságát. Nem érzékelhetők érdemi különbségek a megmunkált felület belépő oldala és közepe között.

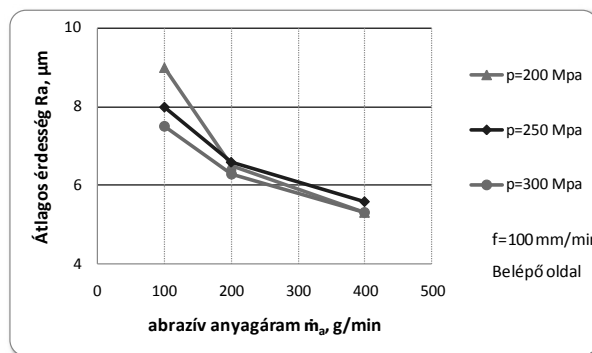


6. ábra. Az átlagos érdesség változása az eltoló sebesség függvényében különböző nyomásokon



7. ábra. Az átlagos érdesség változása a víznyomás függvényében

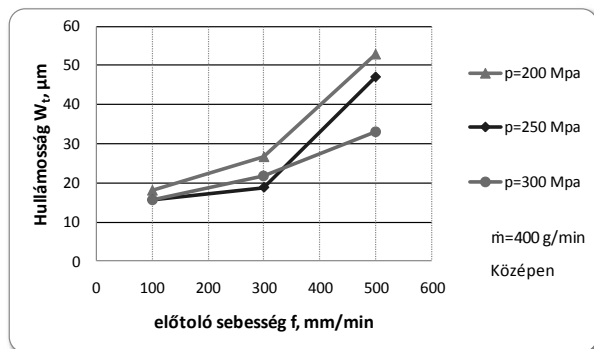
A 8. ábra alapján az abrazív anyagáram nagyságának hatása az átlagos érdességre jóval egyértelműbb az előző két paraméternél. Itt kimutatható, hogy az abrazív anyag mennyisége javítja a megmunkált felület átlagos érdességét.



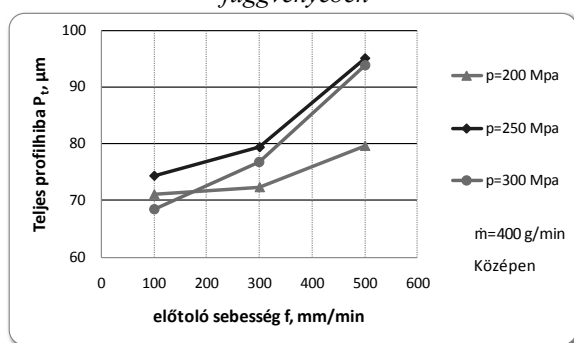
8. ábra. Az átlagos érdesség változása az abrazív anyagáram függvényében

Ennek magyarázata az, hogy az abrazív anyagáram nagyságának növelésekor megnövekszik az időegység alatt a felülettel ütköző részecskék száma, aminek eredményeképp a mikroegyenletlenségek eltávolításának valószínűsége megnő, a nagyobb számban legördülő szemcsék pedig mintegy koptatás által kedvezően befolyásolhatják a felület átlagos érdességét.

Az átlagos érdességgel ellentétben egyértelmű összefüggések mutathatók ki a hullámosság, a teljes profilhiba és a technológiai paraméterek között (9-10. ábrák)



9. ábra. A hullámosság változása az előtolás függvényében



10. ábra. A teljes profilhiba változása az előtolás függvényében

A 9-10. ábrákból megállapítható, hogy az előtolás egyértelműen növeli a megmunkált felület hullámosságát és profilhibáját. Hasonlóan egyértelmű következtetések vonhatók le a víznyomás és az abrazív anyagáram vonatkozásában is. Nevezetesen a víznyomás és az abrazív anyagáram növelése csökkenti a megmunkált felület hullámosságát és teljes profilhibáját.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett technológiai kísérletek alapján alumíniumötvözetek vízsugaras vágásával kapcsolatosan az alábbi összegző megállapítások fogalmazhatók meg:

A bevágási mélység – azaz a hatékonyság vonatkozásában – megállapítható, hogy az előtoló sebesség hatása nagyon karakterisztikus. Növelésével a bevágási mélység főleg kis sebességeknél meredeken csökken. A nyomás növelése növeli a bevágási mélységet. Míg kisebb előtolás esetén a nyomás változtatásának jelentős a szerepe, addig nagyobb előtoló sebességek mellett a nyomásváltoztatásának hatása egyre kisebb. Az abrazív anyagáram mennyisége

növeli a bevágási mélység nagyságát. Kisebb abrazív áramoknál a bevágási mélység közel lineárisan nő. Ha az abrazív anyagáram nagysága túllép egy bizonyos értéket, akkor bevágási kísérleteknél a túlságosan sok „visszacsapódó” abrazív szemcse azonban akár csökkentheti is a bevágási mélységet. Ez a jelenség a teljes keresztmetszetben történő átvágásnál természetesen nem jelentkezik.

A felületi érdesség vonatkozásában megállapítható, hogy az előtoló sebességnek az átlagos érdességre (R_a) gyakorolt hatása nem egyértelmű sem a belépő oldalon, sem a megmunkált felület közepén. A különböző nyomásokon és abrazív anyagáramokon felvett mérési eredmények alapján függvényeszerű kapcsolat nem mutatható ki. Teljesen egyértelmű tendencia mutatható ki a technológiai paraméterek és a megmunkált felület másik két topográfiai mérőszáma a hullámosság (W_t) és a teljes profilhiba (P_t) között. Az előtoló sebesség növeli, a víznyomás és az abrazív anyagáram pedig csökkenti a megmunkált felület hullámosságát és teljes profilhibáját.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] MOMBER A.W. - KOVACEVIC R.: Principles of Abrasive Water Jet Machining, Springer-Verlag London Limited, 1998, p394
- [2] HASHISH M.: Observations on Wear of Abrasive Waterjet Nozzle Materials, *ASME Journal of Tribology* 116, 1994, pp439-444
- [3] BRANDT S. - MAROS Zs. - MONNO, M.: AWJ Parameters Selection - a Technical and Economical Evaluation, *15th International Conference on Jetting Technology*, Ronneby, Sweden, 6-8 September 2000., pp353-366
- [4] Öjmertz C: A Study on Abrasive Waterjet Milling, *Thesis for the Degree of PhD Chalmers University of Technology* Göteborg Sweden, 1997, p81
- [5] HASHISH, M.: Characteristics of Surfaces Machined with Abrasive-Waterjets, *Journal of Engineering and Technology*, Vol113, 1991, pp354-362
- [6] WANG, J. – WONG, W.C.K.: A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(6), pp855-870
- [7] Bodnár K.: Determination of Technological Parameters at Waterjet Cutting, *International tools conference 2009, Zlin, CD Proceedings*, p4

A GÉPMEREVSÉG ÉS A SZERSZÁMTARTÓSSÁG KAPCSOLATA FORGÁCSOLÁSNÁL

THE RELATIONSHIP OF MACHINE RIGIDITY AND TOOL ENDURANCE IN CUTTING

Dr. Pálmai Zoltán*

ABSTRACT

Vibrations play an important role among the reasons for the well-known scatter of tool life in cutting. The model we used for studying flank wear describes wear rate by a non-linear autonomous differential equation that can be handled well by numerical methods. We took into consideration the fluctuation of cutting speed and feed. The results of the numerical simulation clearly show that the wear rate during vibration hardly depends on frequency but intensity a major impact. The unfavourable effect may be mitigated by increasing the rigidity of the machine.

1. BEVEZETÉS

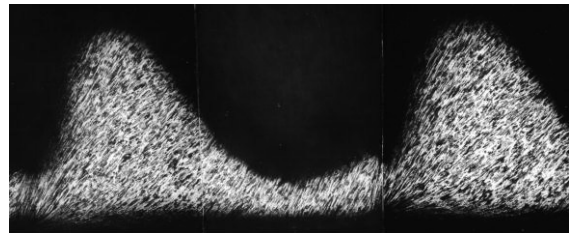
Ismeretes, hogy a forgácsoló szerszámok tartóssága meglehetősen széles határok között szóródik, amely megnehezíti a technológusok dolgát, amikor a drága megmunkáló berendezéseket optimális üzemmódban akarják használni. Ezért hosszú ideje változatlanul a szakmai érdeklődés középpontjában vannak azok az okok, amelyek a szerszámok élettartamának káros szórását előidézik, és azok a lehetőségek, amelyek felhasználásával ez a szórás szűkíthető. A szerszámok idő előtti elhasználódásának olyan nyilvánvaló okai, mint a megmunkálás mechanikai, geometriai körülményeiből eredő rezgések, berezgések, természetesen már régen ismertek (1. ábra).

Lehetnek azonban, és vannak is olyan vibrációt gerjesztő folyamatok, amelyek többnyire rejtve maradnak, ám kedvezőtlen hatásuk azért a szerszámkopásnál mégis megjelenik. Ilyen rezgést gerjesztő hatást fejt ki a forgácsolóerő ingadozása révén az ún. lemezes forgács keletkezése (2. ábra), amelyet máshol már bemutattunk [1].

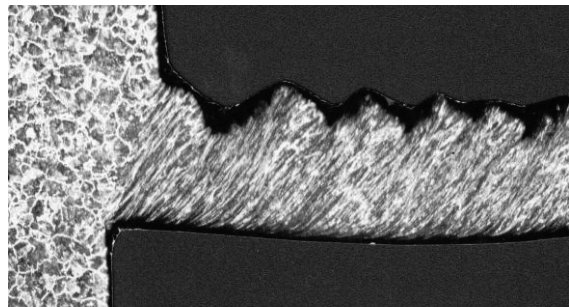
Ahhoz, hogy a vibrációnak a kopásra gyakorolt hatását számszerűsítve is értékelni lehessen, olyan matematikai kopás-modellre van szükség, amely a szerszám elhasználódását a forgácsolás dinamikai viszonyait is figyelembe véve írja le.

*ny. egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépgyártástechnológiai Tanszék, palmayz@t-online.hu

Ehhez dolgoztunk ki egy általános kopási differenciálegyenletet [2], amelynek felhasználásával az itt szükséges elemzések elvégezhetők.



1. ábra. Berezgéskor képződő forgács hosszmetsete

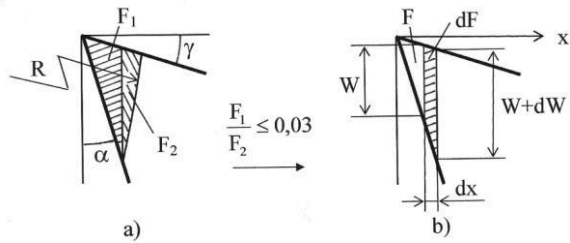


2. ábra. Rezgést gerjesztő lemezes forgács képződése

E tanulmány célja az, hogy a szerszámkopásnak a gyakran rejtett vibrációkra visszavezethető felgyorsulását bemutassa, lehetőséget adva arra, hogy a vibrációt kiváltó okok hatásának csökkentésével az élettartam szórását szűkítsük.

2. A SZERSZÁMKOPÁS KOMPLEX EGYENLETE

A szerszámdegradáció számos folyamat következménye lehet, és geometriai jellemzésére is több paraméter, mint a kráterkopás, szélkopás stb. használatos. Tekintettel azonban arra, hogy a korszerű szerszámanyagok elhasználódása a különösen gyakorivá vált finom forgácsleválasztási műveleteknél főleg a hátkopás növekedésében nyilvánul meg, ebben a munkában a szerszám elhasználódását a hátkopással jellemezzük. A geometriai viszonyokat a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A hátkopás geometriája.

A ténylegesen lekopott anyagterefogat metszetét az a) vázlat mutatja, azonban általában a b) keresztmetszet szerinti egyszerűsített viszonyokat szokás vizsgálni. Ezt tesszük itt is, az ábrán látható megszorítással, ahol a lekopott terfogatot a hátkopás W méretével jellemezzük. Maga a kopás egyrészt abrázió, adhézió következménye, másrészt termikusan aktivált folyamatok révén következik be. Kiterjedt vizsgálatokkal arra a következtetésre jutottunk [2], hogy a felületi degradáció mindkét, lényegében eltérő jelenségcsoportja függ a végigforgácsolt út hosszúságától is, ezért a hátkopás sebességét a részletek mellőzésével a

$$\frac{dW}{dt} = \frac{v}{W} \left[A_a + A_{th} \exp\left(-\frac{B}{v^x + KW}\right) \right] \quad (1)$$

nemlineáris, autonóm differenciálegyenlettel írtuk le. Itt A_a az abrázív, A_{th} a termikusan aktivált kopásra jellemző konstans, v^x helyére több technológiai paraméter is bevonható [2], és

$$B = \frac{Q}{RC_v} \quad (2)$$

hol Q a szerszám hátfelületén a termikusan aktivált kopási komponens aktiválási energiája, $R=8,29\text{kJ/kmol}$ általános gázállandó, C_v pedig a hőmérséklet ismert

$$\theta = C_{v,f} v^{0,27} f^{0,16} \quad (3)$$

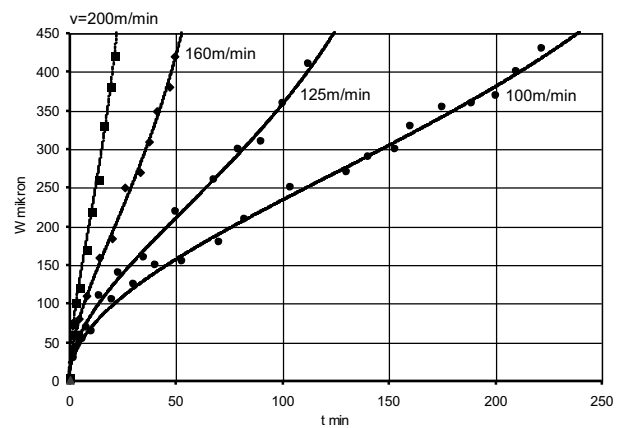
képletének [2] konstansa. A kopásnak a hőmérsékletre gyakorolt hatását a $\Delta\theta \cong C_W W$ lineáris függvénnyel írjuk le, vagyis $K=C_W/C_v$ ($C_v=C_v f^{0,16}$)

Az (1) kopásegyenlet fontos sajátossága, hogy levezetésénél a technológiai paraméterekre, itt a v forgácsolósebességre, de mint utalás történt rá, más technológiai paraméterre, mint pl. az f előtolásra sem tettünk semmilyen megszorítást. Ezek lehetnek a művelet közben konstansok, de szakaszosan vagy folyamatosan változók is. Ilyen módon tehát a kopásegyenlet változó keresztmetszetű forgácsolásra is alkalmazható.

Az egyenlet megoldása numerikus módszerekkel egyszerű, a konstansokat célszerű két csoportban kezelni. Az $x=0,27$, $y=0,16$ és K tekintetében, amint az

előbbieken arra már utaltunk, a forgácsoláselmélet sok vizsgálati eredménnyel rendelkezik. Így az új kopási modellnél az (1) egyenlet felírásához voltaképpen három konstans, az A_a , A_{th} és B meghatározására kell a mérési eredményeket felhasználva célravezető számítási stratégiát kialakítani. Erre különböző, ismert módszerek kínálkoznak.

A részletek mellőzésével egy mérési sorozat eredményét a 4. ábra mutatja [2], amelynél HV 196 keménységű C45 minőségű, hengerelt állapotú acélt esztergáltunk. A (6) egyenlet konstansai $K=0,002$, $A_a=2$, $A_{th}=2,107$, $B=65$, amelyekkel aztán a konkrét technológiai igények szerint előírt éltartamkritériumhoz az éltartamok is meghatározhatók. Ezek birtokában aztán, ha szükséges, egyszerű kiszámítani a Taylor-képleteket is.



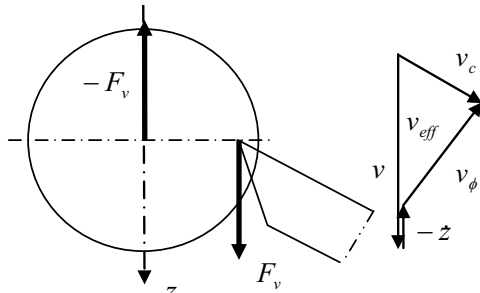
4. ábra. P 20 keménységű szerszám hátkopása különböző forgácsolósebességnél
($f=0,25\text{ mm/ford.}$, $a=2,5\text{ mm}$, $\alpha=8^\circ$, $\gamma=-6^\circ$, $\lambda=0^\circ$,
 $\kappa r=60^\circ$, $\varepsilon r=90^\circ$, $r\varepsilon=0,8\text{ mm}$)

Az egyenlet felhasználásánál a kezdeti feltételre sincs megszorítás. Új szerszám esetén az éllekerekedés sugarát lehet választani, használt szerszám esetében pedig az addigi használat során kialakult kopás értéke a kezdeti feltétel. Ez azt is jelenti, hogy az (1) egyenlet különböző forgácsolási műveleteknél egymásután is felhasználható, ha figyelemmel vagyunk arra az egyszerűsítő feltételezésre, amelyet a 3. ábrán az F_1 és F_2 szegmens viszonyára tettünk. Az új, komplex kopásegyenlet fontos tulajdonsága ez, amely lehetővé teszi, hogy külön kísérletek nélkül, akár az üzemi gyártás közben végzett kopásmérések adatait használjuk fel.

3. A REZGÉS ÉS A SZERSZÁMKOPÁS KAPCSOLATA

A megmunkáló rendszer rezgésének számos forrása lehet, amelynek kiterjedt szakirodalma van. E dolgozatban, amelynek célja az, hogy a rendszer rezgésének a szerszámkopásra gyakorolt hatását

bemutassa, példaként a forgácsképződési folyamatot használjuk fel. A 2. ábra példája jól szemlélteti, hogy azokban a technológiai esetekben, amikor nem folyóforgács keletkezik, a nyírt vagy lemezes forgács oszcillátorként működik [1, 3]. Az ilyen forgácsképződés egyáltalán nem ritka, pl. az ausztenites acélok [4], Ti-ötvözetek [5] és az edzett acél alkatrészek megmunkálásánál [6] és más ötvözetek, pl. bronz feldolgozásánál is előfordul. A rezgés ilyen gerjesztésének vizsgálatához az 5. ábra az egyik lehetséges legegyszerűbb modellt mutatja, amely a szerszám és a munkadarab között olyan elmozdulást tételez fel, amely a forgácsolósebesség irányába esik.



5. ábra. Sebességviszonyok a munkadarab-szerszám rendszerben

Ez a \dot{z} sebességű mozgás befolyásolja a tényleges forgácsolási folyamatot, vagyis az effektív sebesség $v_{eff} = v - \dot{z}$. Az időben változó $F(t)$ forgácsolóerő gerjesztő hatását ebben az egyszerű modellben az ismert

$$m_r \ddot{z} + \frac{z}{k} = F(t) \quad (4)$$

mozgásegyenlet írja le, ahol m_r a szerszám élére redukált tömeg, k (m/N) a rendszer rúgóállandója.

Az időben változó \dot{z} meghatározása külön vizsgálatot igényelne [1]. Megállapítható, hogy a lemezes forgácsképződés körülményei között periodikus, ill. kaotikus rezgés is kialakulhat. Ez határozza meg az $F(t)$ forgácsolóerő időtől függését is, amely tehát kaotikus esetben aperiodikus, periodikus megoldásnál pedig valamely Ω frekvenciával oszcillál. Itt most mellőzhetők a részletek, a lényeg jól megmutatható, ha azzal a feltevéssel élünk, hogy a forgácsolósebesség szinuszos függvény szerint változik, azaz

$$v = v_0 + \Delta v \cdot \sin \omega t \quad (5)$$

A rendszer sajátfrekvenciája, mint az ismeretes, a (4) egyenletből $\omega = 1/\sqrt{m_r k}$. Tudjuk, abban az esetben, ha ω és Ω közel kerül egymáshoz, rendkívül káros rezonanciára számíthatunk, még a (4) egyenletből az egyszerűség miatt kihagyott csillapítás jelentős hatása mellett is. Az 1. ábra ilyen körülmények között leválasztott fogácsot mutat. Itt eltekinthetünk ettől, de a

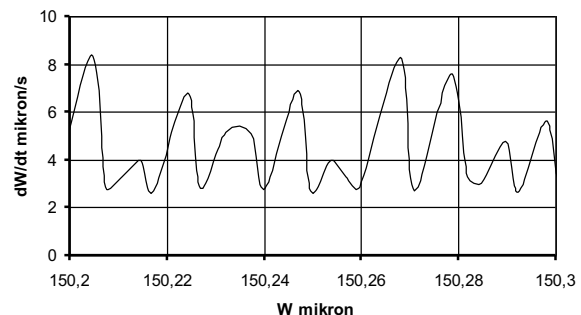
Δv sebesség-ingadozást az (1) egyenlet megoldásánál figyelembe kell venni.

Az $F(t)$ forgácsolóerő azonban az f előtolás irányában is megterheli a megmunkáló rendszert, azaz Δf értékkel az előtolás is módosul. Itt az ún. regeneratív hatás is érvényesül, vagyis a munkadarab minden fordulata után az előzőnél realizált tényleges előtoláshoz kell viszonyítani az elmozdulást. A bonyolult viszonyok egyszerű modellezéseként az időben változó előtolást itt is szinuszos függvénnyel írjuk le, azaz

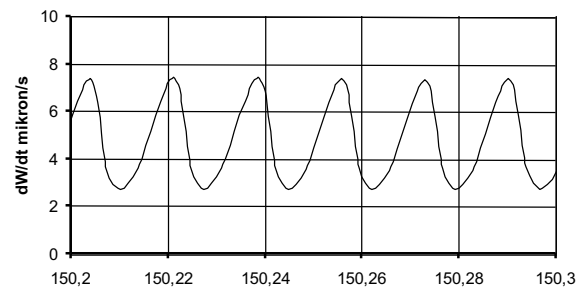
$$f(t) = f + \Delta f [\sin \omega_f t - \sin \omega_f (t - \Delta t)], \quad (6)$$

ahol Δt a munkadarab egy körülfordulásának ideje, ω_f az előtolás irányú rezgés körfrekvenciája. Minthogy a megmunkáló rendszer merevsége az f irányában általában eltér a v sebesség irányában mérhetőtől, $\omega_f \neq \omega_v$.

Az (1) egyenletbe most a (3) képlet felhasználásával az (5) és (6) függvényt kell behelyettesíteni. A lehetséges megoldásokat egy hosszsztergálási példán jól lehet érzékelni. Esztergáljunk $d=30$ mm átmérőjű hengeres munkadarabot $v_0=160$ m/min sebességgel és (ebből $\Delta t=0,0353$ s) $f=0,25$ mm/ford. előtolással. Tételezzük fel továbbá, hogy $\Delta v=100$ m/min, $\Delta f=0,03$ mm. Két tipikus megoldást azonos időintervallumban a 6. ábra mutat. Az a) diagramnál $\omega_v=10000$ s⁻¹, $\omega_f=7000$ s⁻¹, és a dW/dt kopási sebesség kaotikusan változik, a b) diagram szerint pedig, amelyet $\omega_v=11000,14$ s⁻¹, $\omega_f=6580$ s⁻¹ körfrekvenciáknál kaptunk, periodikus.



a) $\omega_v=10000$ s⁻¹, $\omega_f=7000$ s⁻¹

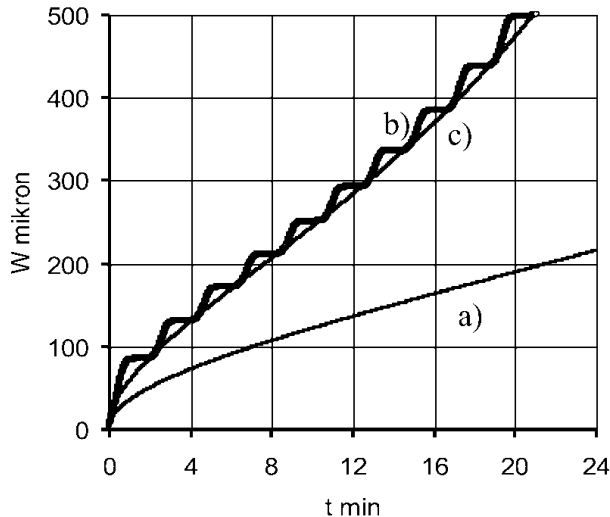


b) $\omega_v=11000,14$ s⁻¹, $\omega_f=6580$ s⁻¹

6. ábra. A (6) egyenlet megoldása a forgácsolósebesség $\Delta v=100$ m/min és az előtolás $\Delta f=0,03$ mm szinuszos ingadozása esetén.

Ezek tehát azok a rezgések, amelyek a szerszám kopását befolyásolják, és a rezgésmentes állapothoz képest vibráció esetén meggyorsítják annak elhasználódását. Az előtolás irányú rezgéstől most eltekintve az eredményeket a 7. ábra foglalja össze.

A kopási egyenlet 4. ábra kapcsán közölt konstansával számolva három kopásgörbe látható. Az $\omega=0$ a rezgésmentes alapeset.



7. ábra. A szerszám hátkopása különböző körfrekvenciájú rezgésnél.
a) rezgés nélkül, b) $\omega=0,05 \text{ s}^{-1}$, c) $\omega=10^4 \text{ s}^{-1}$

Az $\omega=0,05 \text{ s}^{-1}$ gyakorlatilag nem fordulhat elő, csak a kopásgörbe „finom szerkezetének” szemléltetésére szerepel az ábrán. Az $\omega=10^4 \text{ s}^{-1}$ már reális nagyságrend (a frekvencia közel 1600 Hz), de, mint látható, a kopás szinte azonos az előző lassú ingadozással, természetesen finomabb, az ábrán nem is érzékelhető lépcsőzéssel. A lényeg az, hogy a rezgésmentes alapesethez viszonyítva sokkal gyorsabb a kopás. A Δv különböző értékeinél ennek mértéke is különböző.

A 4. és 5. ábra adatai alapján a rezgés közben várható T éltartamnak a rezgésmentes T_0 értékhez viszonyított T/T_0 hányadosa meredeken csökken. Konkrét példákön végzett számítások szerint [1, 3] $\Delta v/v_0 \approx 0,2-0,3$ könnyen előállhat, amely az éltartam jelentős csökkenését vonja maga után.

Ismételten utalni kell arra, hogy a bemutatott rezgő modell erős leegyszerűsítése a valóságos viszonyoknak. Arra mindenesetre alkalmas, hogy érzékeltesse azt a sajátos, többnyire káros hatást, amelyet a megmunkáló rendszerben több okból jelentkező, itt tipikus példaként a lemezes forgácsképződésre visszavezetett vibráció a szerszámok kopására kifejt. Egyik lényeges eleme lehet ez azoknak az okoknak, amelyek a forgácsoló szerszámok éltartamánál gyakran tapasztalt jelentős szórást előidézik, és amelyek a technológusoknak komoly gondokat okoznak. E gondok pedig azáltal enyhíthetők, hogy csökkentjük a Δv , azaz a 3. ábrán a \dot{v}

nagyságát, amely a szerkezet merevségének növelésével valósítható meg.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerszámkopás sebességénél tapasztalható jelentős szórás okainak tanulmányozása közben arra a megállapításra jutottunk, hogy a forgácsleválasztásnál gyakran megjelenő rezgés gerjesztésnek az éltartamra komoly hatása lehet. Felhasználva a szerszámok hátkopására kidolgozott új, kopásmérésekkel is igazolt modellünket, számításokkal alátámasztott elemzést végeztünk a vibráció kopásra gyakorolt hatásának feltárására. Megállapítható volt, hogy a vibráció, annak frekvenciájától lényegében függetlenül, a szerszám kopását számottevően gyorsítja, amely a szerkezet merevségének növelésével mérsékelhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] PÁLMAI Z., CSERNÁK G.: Chip formation as an oscillator during the turning process. Journal of Sound and Vibration 326 (2009) pp.809-820.
- [2] PÁLMAI Z.: A szerszám anyagok kopási folyamatai forgácsoláskor. KL Kohászat 144. évf. (2011) No. 5. pp. 5-9.
- [3] CSERNÁK G., PÁLMAI Z.: A forgácsképződés, mint oszcillátor esztergálásnál. Gépgyártás XLVIII. (2008) No. 3. pp.75-80.
- [4] KOMANDURI R., T. SCHROEDER, J. HAZRA, B. F. von TURKOVICH: On the catastrophic shear instability in high-speed machining of an AISI 4340 steel. Journal Engineering for Industry 104 (1982) pp.121-131.
- [5] KOMANDURI R., Z.-B. HOU: On thermoplastic shear instability in the machining of a titanium alloy (Ti-6Al-V). Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 33A (2002) pp.2995-3010.
- [6] SHAW, M.C., A. VYAS: The Mechanism of Chip Formation with Hard Turning Steel. Annals of the CIRP. Vol. 47/1 (1998) pp.77-82.

INSTACIONÁRIUS LÉGHŐMÉRSÉKLETMEZŐ MÉRÉSI LEHETŐSÉGÉNEK FEJLESZTÉSE

IMPROVEMENT OF MEASUREMENT TECHNIQUES FOR ANALYSIS OF UNSTEADY AIR TEMPERATURE FIELD

Bencs Péter*, dr. Szabó Szilárd**

ABSTRACT

Temperature field measurements around solid bodies (where the temperature of the body is different from the ambient temperature) are particularly difficult when the body is placed in air flow and the velocity and temperature fields are unsteady. The objective of this article is to report on progress made in this research, particularly on our newest results for the two techniques used, standard Schlieren method and Background Oriented Schlieren (BOS) technique.

1. BEVEZETÉS

A termovíziós technika alkalmazásával az utóbbi évtizedben lehetővé vált gépek, berendezések, objektumok (szilárd testek) felületi hőmérséklet-mezejének időben változó nagypontosságú mérésére. A hőforrásként működő testek körüli léghőmérsékletmező mérése viszont e technikával nem lehetséges. A mérés technika egy másik ága a sebességmező mérése már lehetővé teszi e testek körüli akár háromdimenziós időben változó sebességter mérést is (3D PIV (Particle Image Velocimetry)). A léghőmérséklettér mérése azonban sokkal nehezebb feladatnak bizonyult. A pontbeli hőmérséklet időben változó mérése már több évtizede megoldott, például a termoelemes, vagy a CTA technika alkalmazásával. E technika segítségével a stacionárius hőmérséklettér letapogatásos módszerrel jól rekonstruálható. Egy teljes térrész, vagy azon belül egy kiválasztott sík terület – időben változó – hőmérsékletmérésére e technika azonban már nem alkalmas. Az utóbbi évtizedben gyorsult fel e mérés kör megoldásához vezető kísérletek sokasága. Az alapot az optikai elven működő Schlieren technika szolgáltatta, amikor is a léghőmérsékletváltozás okozta sűrűségváltozás mérése a módszer alapja. Az utóbbi évtizedben ötvözve ezt a PIV technika alapjával és szoftverhátterével a BOS eljárás (Background Oriented Schlieren) van terjedőben és hatalmas fejlődésen megy keresztül [1-2].

E cikkünkben légáramlásban elhelyezett hőforrás indukálta hőmérsékletmező megjelenítésére és mérésére végzett fejlesztéseinkről számolunk be.

*egyetemi tanársegéd, **egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
email: *arambp@uni-miskolc.hu, **aram2xsz@uni-miskolc.hu

2. A SCHLIEREN RENDSZER

2.1. A Schlieren rendszer felépítése

Vizsgálataink első szakaszában az alap Schlieren mérési technikát alkalmaztuk légáramba helyezett fűtött hengeres rúd körül kialakuló hőmérsékletmező szélcsatornában való mérésére. A mérőrendszer és annak működési elve az 1. ábrán követhető. Az alap Schlieren rendszer - a megfelelő minőségű felvételek érdekében - pontbeli fényforrást alkalmaz. A fényforrásból induló fénysugarat az 1. számú tükör irányítja a szélcsatorna mérőterében elhelyezett fűtött henger környezetére. A fénysugár különböző méretű eltérülését okozza a hőmérsékletkülönbség miatt kialakuló légsűrűségváltozás, amely pedig a fénytörési index-változását okozza [1]. A mérőterén áthaladó fénysugár a 2. tükör segítségével fókuszálható egy úgynevezett kés élre. Ennek elsődleges feladata a különböző sűrűségű közegen áthaladt sugarak szabályozása (alapbeállítás szerint a pontbeli fénysugarak felét átengedi a késél). A különböző sűrűségű közegen áthaladó sugarak különböző eltérülése miatt eltérő fényerősséggel világítják meg a késél mögött elhelyezett kamera CCD chipjét. A fényesebb és sötétebb pontok jelölik a pozitív és negatív irányban megváltozott sűrűségű közegen áthaladó sugarakat (késélre merőleges irányban). Amikor a Schlieren rendszer kés éllel működik, akkor tehát a sűrűség megváltozását (gradiensét) határozza meg (a késél irányában).

2.2. A Schlieren számítási eljárás

A sűrűségváltozást a mérőszakaszban a Schlieren tárgy (esetünkben a fűtött rúd) okozza [1,7]. A különböző sűrűségű területeken keresztül haladó sugarak ε fénytörési szöggel térülnek el (y komponensük az ε_y). Az 1. ábra jobb oldali képén látható, hogy az eltérült fénysugarak által a forráskép elmozdul a kés élhez viszonyítva. Az eltérülés mértéke:

$$\Delta a = \varepsilon_y \cdot f_2, \quad (1)$$

ahol f_2 a 2. tükör fókusz távolsága. A ΔE fényerősség változás és a fénytörés ε_y szöge közti összefüggés az alábbi:

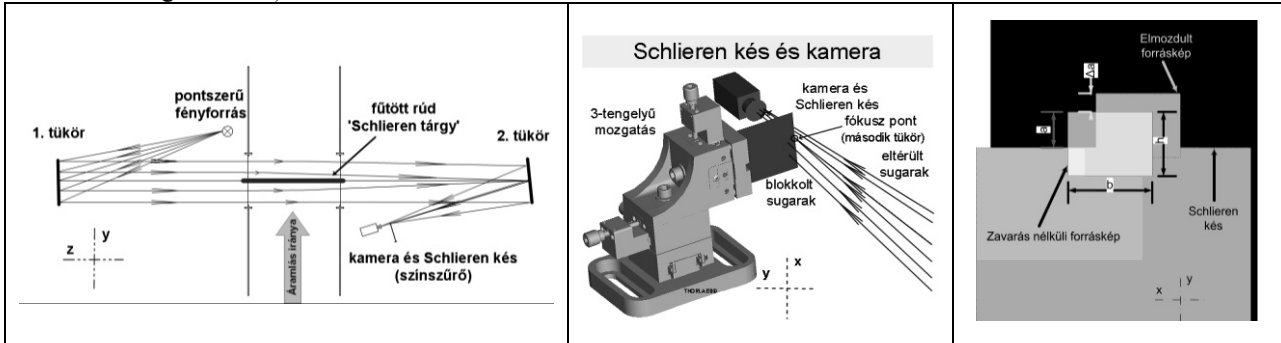
$$\Delta E = \frac{B \cdot b \cdot \varepsilon_y}{m^2 \cdot f_1}, \quad (2)$$

ahol B a fényforrás erőssége, az f_1 az első lencse/tükör fókusztávolsága, az m a nagyítási arány (a mérőtér és a képméret közötti arány) és b a forráskép x irányú szélessége.

A Schlieren képen a kontrasztváltozást meghatározhatjuk a ΔE fényerősség változás és a Schlieren kép háttére E fényerősségének arányával (általában fénytörő közeg nélküli referencia kép készítésével tudják ezt az értéket meghatározni):

$$C = \frac{\Delta E}{E} = \frac{f_2 \cdot \varepsilon_y}{a}, \quad (3)$$

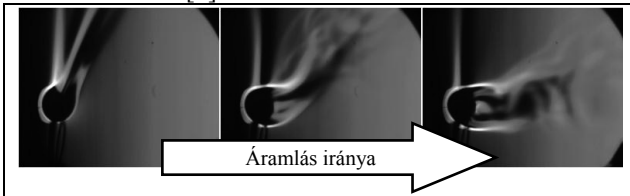
ahol a a forráskép nem blokkolt része, vagyis ami túljut a Schlieren késélen (lásd az 1. ábra jobboldali képén). Schlieren mérés végeredménye egy kontraszt térkép [1]. A mérés bemeneti értékei az eltérült sugarak eltérülési szögei ε , amit a mérőtérben egy átlagos fénysugár fénytörés mutatójának gradiense jellemez.



1. ábra. Z-típusú Schlieren rendszer felépítése és működése

2.3. A Schlieren mérési eredmények

A Z-típusú Schlieren rendszerünk alkalmas hőmérsékletmező megjelenítésére. Megfelelő kalibrálási eljárást alkalmazva a hőmérsékletmező színárnyalataihoz számszerű értékek is rendelhetők. A 2. ábrán a megfűvási sebesség változtatásával ($0 \div 0,3 \text{ m/s}$) jól látható a szabad konvekcióból a kényszerkonvekcióba való átmenet, azaz a fűtött henger körül ennek hatására kialakuló hőmérsékletmező [4].

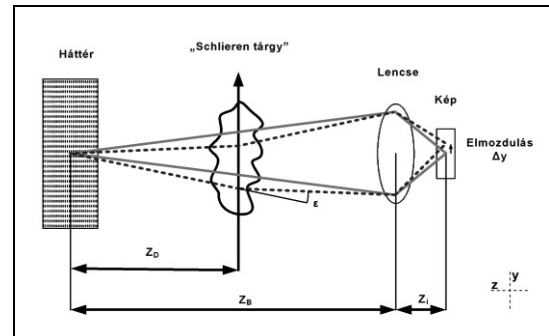


2. ábra. Schlieren kép

3. A BOS MÉRÉSI ELJÁRÁS

3.1. A BOS mérési rendszer felépítése

A BOS technika is a sűrűségváltozás okozta fényelterelésen alapszik, de a mérési módszer alapjaiban más. A BOS mérésekhez szükséges egy, a mérési tér mögé helyezendő megfelelő pontsűrűségű háttér (véletlen eloszlású pontsereg) és egy erre fókuszált kamera [4-6]. A háttér optimalizálása minden feladat első lépése. A cél, hogy a háttéren egy-egy pontra a Schlieren képen 2-3 pixel jusson a CCD kamera chipjén. A mérések során szükség van legalább két kép elkészítésére és tárolására. Az első kép a referenciakép (Schlieren „tárgy” (fénytörést okozó jelenség) nélkül készített felvétel), a második kép pedig a Schlieren „tárggyal” készített, fénytörés melletti felvétel.

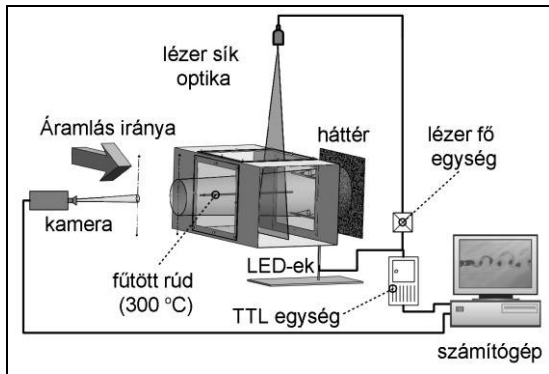


3. ábra. A BOS elv

A 3. ábrán látható a BOS rendszer működése. A fénytörés nélküli esetben a háttér egy pontja az ábrán látható folytonos vonallal megjelenített módon képződik le a kamera CCD chipjén. Fénytörés esetén (Schlieren tárgy) a háttér egy pontja már nem ugyanabba a pontba képződik le a kamera CCD chipjén, mint az előző esetben (pontosított vonal). Amikor a fény keresztülhalad a fénytörést okozó közegen akkor az eredeti irányához képest ε (fénytörési szöggel) eltérül és ennek hatására a kamerában Δy értékkel elmozdulva képződik le. Ebből az elmozdulásból (ami a kamera által készített képen mérhető) meghatározható a sűrűség gradiense. Az elmozdulás mértékét (a kamera által készített képeken) kereszt-korrelációval állapítják meg. A BOS mérés technika általában a PIV (részecske képen alapuló sebesség meghatározás) mérés technikához alkalmazott kereszt-korrelációt használja [6].

A BOS mérések a németországi Magdeburgi Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Intézetében történtek. A vizsgálatokhoz különböző kamerákat, különböző háttereket, azok különböző megvilágítási módszereit és a párhuzamos sebességmérésekhez különböző szinkronizálási technikákat, ködkoncentrációt, stb. próbáltunk ki. A 4.

ábrán a végül alkalmazott mérési felépítés látható, ahol a TTL egység végzi a sebesség és hőmérsékletmérések vezérlését.



4. ábra. A LED-es háttérvilágítást alkalmazó BOS rendszer felépítése

3.2. A BOS számítási eljárás

A számítás alapja az eredeti háttér ponteloszlás és annak a sűrűségváltozás okozta látszólagos elmozdulása. Az ebből – keresztkorreláció segítségével – adódó elmozdulás vektormezőt át kell konvertálni a megfelelő alakba. A számítási eljárás során feltételezzük, hogy az áramlás kétdimenziós, azaz az egész mérési területen a sűrűségváltozás (minden egyes síkban) azonos [6]. Ezen feltevések alapján a sűrűség gradiens két algebrai egyenlet segítségével számítható az elmozdulásból. Az elmozdulás (d) és a fénytörés szöge (ε) közötti kapcsolat:

$$\varepsilon = -(d \cdot h) / z_D, \quad (4)$$

ahol h a pixel fizikai dimenziója a háttér síkján (az elmozdulás pixelben kifejezett értéket alakítjuk át hossz-mértékegységre) és z_D a háttér síkja és a Schlieren tárgy közötti távolság. A sűrűség gradiens és a fénytörés szöge közötti összefüggés:

$$\varepsilon = K \cdot W \cdot \nabla \rho, \quad (5)$$

ahol W a Schlieren tárgy szélessége, K az úgynevezett Gladstone-Dale konstans. A fénytörés mutató (n) és a sűrűség (ρ) közötti kapcsolatot a

$$n = 1 + K \cdot \rho \quad (6)$$

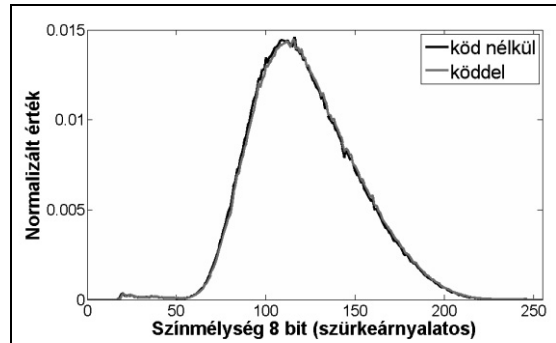
összefüggés írja le.

3.3. A BOS mérés, és annak eredményei

A köd hatása a BOS mérésekre

Fontos meghatározni vajon a BOS mérés technika mennyire érzékeny a PIV mérés során használt olajködre, ha a kettőt párhuzamosan kívánjuk alkalmazni (együttes hőmérséklet- és sebességeloszlás mérés) [6]. Ennek egyik legfontosabb feltétele, hogy a BOS mérés technikát mennyire zavarja meg a PIV technika alkalmazásához a légáramba juttatott olajköd. Az 5. ábrán a 373,15 K hengerhőmérséklet mellett a „nyers” BOS felvételekből készített összehasonlító hisztogramokat lát-

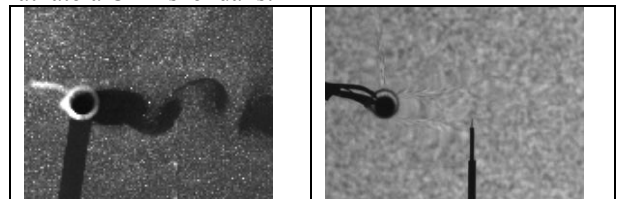
juk köd nélkül és köd alkalmazásakor. A képmérettel normalizált hisztogramok együttfutása jelzi, hogy a ködnek a BOS technikára gyakorlatilag nincs hatása, mert az egyes színárnyalatokhoz tartozó pixelek előfordulási valószínűsége szinte teljesen azonos. Ez azt jelenti, hogy a BOS és a PIV technikák tehát párhuzamosan alkalmazhatók.



5. ábra. A BOS mérések normalizált hisztogramja

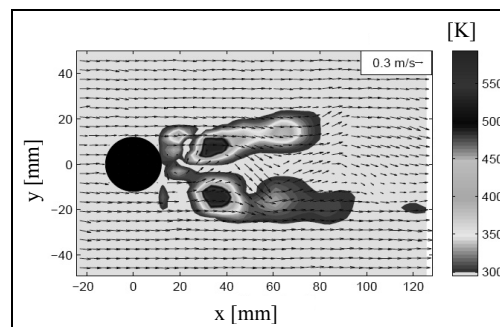
A CTA trigger jel használata

A PIV és BOS mérések egymás után is elvégezhetők. Ekkor valamilyen azonosító jelre van szükség, hogy a henger után leváló örvények azonos pozíciójában készülnjenek a BOS és a PIV felvételek. Erre a henger mögött az örvénysor útjába helyezett CTA szondát alkalmaztunk [6]. Az egymás után, de azonos örvényleválási pozícióban készült nyers sebességmező és hőmérsékletmező képet mutat a 6. ábra. A jobb oldali képen jól látható a CTA szonda is.



6. ábra. PIV és BOS nyers képek

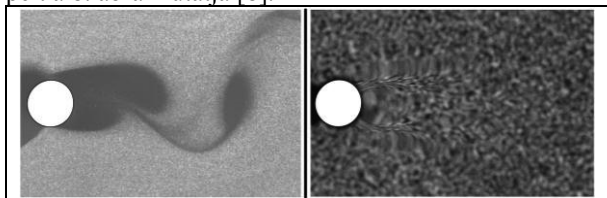
A 6. ábrán látható nyers képek a mérés után feldolgozásra, valamint az eredmények exportálásra (ASCII formátumba) kerülnek. Az exportált eredmények Matlab® programmal történő feldolgozás utáni eredménye a 7. ábrán látható. Ezen az ábrán a sebességmező vektorokkal, a hőmérsékletmező szürkeskálával van ábrázolva [6].



7. ábra. A meghatározott sebesség- és hőmérsékletmező

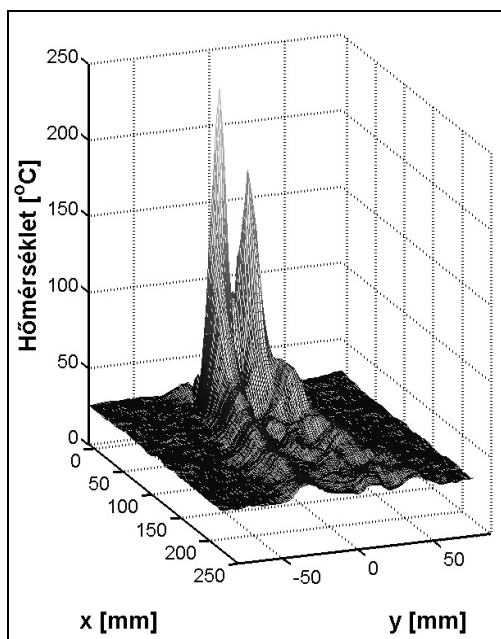
LED háttérmegvilágítás és TTL szinkronizáló elektronika használata

A későbbiekben a technikát finomítottuk és egy szabályozó TTL elektronika használatával a PIV és a BOS felvételek egymás után felváltva készültek igen kis időkülönbséggel. Interpoláció használatával számoltuk ki ezután az azonos időponthoz tartozó sebesség- és hőmérsékletértékeket. A PIV és BOS mérések során meghatározott sebességmező és hőmérsékletmező nyers képeit a 8. ábra mutatja [8].



8. ábra. PIV és BOS képek nyers képek

A 9. ábrán példaként egy meghatározott hőmérsékletmező látható. E képen a henger mögött közvetlenül két nagyhőmérsékletű csúcs látszik. Ezt követően erősen csökkenő mértékben, de egyértelműen látszik az örvénysorral azonos hőmérsékletcsúcs sorozat [8].



9. ábra. A hőmérsékletmező

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi fél évtizedben német-magyar kutatási együttműködés felhasználásával intenzív kutatómunka folyt fűtött henger körül kialakuló sebesség- és hőmérséklettér mérésével való meghatározására. A sebességmező meghatározása már korábban a PIV technika segítségével jól sikerült. Jelen cikkben a hőmérsékletmező meghatározására tett kísérleteinket foglaltuk össze. Ennek során a Schlieren technika több változata került kipróbálásra. A fokozatos fejlesztő munka eredménye-

képpen elmondható, hogy jelenleg már megfelelő minőségű hőmérséklettérképek felvételét sikerült megoldanunk. Mindehhez társult az időben összetartozó sebesség- és hőmérsékletmező meghatározására szolgáló módszerek sikeres kipróbálása és fejlesztése.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA (76085), NKTH-OTKA (68207) és a Magyar-Német együttműködési program P-MÖB/386-nak a kutatás támogatásért. A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

6. IRODALOM

- [1] Settles, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (2001).
- [2] Adrian, R.J.: *Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*. Annual Reviews in Fluid Mechanics, 23(1), pp. 261-304, (1991).
- [3] Venkatakrisnan, L. and Meier, G.E.A.: *Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique*. Experiments in Fluids, 37(2), pp. 237-247, (2004).
- [4] Bencs, P., Bordás, R., Zähringer, K., Szabó, Sz., and Thévenin, D.: *Towards the Application of a Schlieren Measurement Technique in a Wind-Tunnel*. Proceedings, MicroCAD International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, pp. 13-19, (2009).
- [5] Baranyi, L., Szabó, Sz., Bolló, B., and Bordás, R.: *Analysis of Flow Around a Heated Circular Cylinder*. Journal of Mechanical Science and Technology, 23, pp. 1829-1834, (2009).
- [6] Bencs, P., Szabó, Sz., Bordás, R., Thévenin, D., Zähringer, K. and Wunderlich, B.: *Investigation of the Velocity (PIV) and Temperature Field (BOS) of a Heated Cylinder in a Low Re-number Flow*. Proceedings, ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization, EXCO, Daegu, Korea, pp. 234/1-234/8, (2010).
- [7] Bencs, P., Szabó, Sz.: *Application of Z-type Schlieren technique for Flow Visualization around Heated Cylinder*. Proceedings, ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization, EXCO, Daegu, Korea pp. 240/1-240/7, (2010).
- [8] Bencs, P., Szabó, Sz., Bordás, R., Zähringer K., Thévenin, D.: *Synchronization of Particle Image Velocimetry and Background Oriented Schlieren Measurement Techniques*. Proc. The 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Moscow, Russia (2011), on CD ROM, pp. 1-6, Paper No. 003 PSFVIP8.

FŰTÖTT KÖRHENGER KÖRÜLI ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

FLOW AROUND A HEATED CIRCULAR CYLINDER

Bolló Betti*

ABSTRACT

Numerical investigation were carried out to study the effect of cylinder heating on the characteristics of the flow and heat transfer in a two-dimensional laminar flow of air past a heated circular cylinder for Reynolds numbers of 150. The effect of dynamic viscosity, density, thermal conductivity and specific heat variations on the fluid dynamics occurring with the cylinder heating was analyzed separately.

1. BEVEZETÉS

Az áramlásba helyezett testek körül kialakuló örvények mind mechanikai, mind hőtechnikai szempontból való elemzése kihívást jelent a mérnökök számára. Elegendő, ha a rúdszerkezetek illetve kábelek áramlás keltette rezgéseit vagy más nézőpontból a fűtőpatronokkal megoldott hevítés tervezési kérdéseit említjük.

A gyakorlati fontosság miatt sok kutató foglalkozik az álló és mozgó henger körül kialakuló áramlások elméleti, numerikus és kísérleti vizsgálatával. A párhuzamos áramlásba helyezett álló henger körüli áramlásnak igen kiterjedt szakirodalma van [1-3].

A folyadékáramlásba helyezett fűtött körhenger vizsgálatánál legtöbb kutató [4, 5] az áramló közeg viszkozitásának és sűrűségének hőmérséklettől való függését elhanyagolható a hatása, de nagyobb különbség esetén figyelembe kell venni, hogy a közeg tulajdonságai a hőmérséklet hatására megváltoznak, vagyis az alapegyenletek rendszerében a termodinamikai tulajdonságok a hőmérséklettől függővé válnak. Ez jelentős hatással van a közeg jellemzőire és az áramlás jelensége sokkal bonyolultabbá válik, mint izotermikus esetben. Mérésekkel bizonyították [6-8], hogy a henger hőmérsékletének növelésével a folyadék kinematikai viszkozitása megváltozik, ez jelentősen befolyásolja a helyi Reynolds-szám értékét az áramlási térben, különösen a fűtött henger közelében.

Fűtött henger esetén fontos kérdés az áramló közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggése, ezért a numerikus számításaink során megvizsgáljuk, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése hogyan befolyásolja az egyenletes áramlásba helyezett fűtött hengernél kialakuló áramlási jellemzőket. Megállapítjuk, hogy a

henger és a közeg közötti nagy hőmérsékletkülönbség esetén a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése általában nem elhanyagolható, valamint a hőmérsékletkülönbség nagyságának is jelentős hatása van az örvényleválás áramlási jellemzőire.

2. MATEMATIKAI MODELL

Avonatközö alapegyenleteket a kereskedelmi forgalomban kapható Ansys Fluent programcsomaggal végeztük el, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. Kétdimenziós lamináris áramlásra időfüggő számítást végeztünk másodrendű implicit formulációval. A mozgás- és energiaegyenletek számításához másodrendű eljárást alkalmaztunk.

A numerikus vizsgálatokhoz alkalmazott számítási tartomány két koncentrikus körből áll, a belső kör a henger felületét képezi (d), a külső pedig a távoli teret (d_∞). A koordináta-rendszer origója a kör középpontjában van, a leáramlás az x irányában történik.

A számítási tartomány méret, háló és időlépés függetlenségét korábbi tanulmányainkban részletesen vizsgáltuk [9,10], ezek alapján a számítási tartományt $d_\infty/d=220$ nagyságúnak választottuk, ahol 360×310 (kerületi irány \times sugárirány) hálófelbontást alkalmaztunk, valamint a dimenziótlan időlépés nagyságát $\Delta t=0,001$ értékre írtuk elő. A henger közelében sűrűbb a hálózás, mint a hengtől távol.

A külső peremen konstans abszolút hőmérsékletű (T_∞), egyenletes sebességű (u_∞) közegáramot írtunk elő. A hengerfelület abszolút hőmérséklete T_w , itt a sebességkomponensek eltűnnek. Számításainkat többféle

$$T^* = T_w / T_\infty \quad (1)$$

hőmérsékletarányánál végeztük el ($T^*=1; 1,1; 1,5$ és $1,8$).

2.1. Dimenzió nélküli mennyiségek

A numerikus számításból nyert sebesség- és nyomáseloszlás ismeretében kiszámítható az egységnyi hosszúságú hengerre vonatkozó felhajtóerő- (C_L) és ellenállás-tényező (C_D) a következő definíció alapján:

$$C_L = \frac{2 F_L}{\rho u_\infty^2 d}, \quad C_D = \frac{2 F_D}{\rho u_\infty^2 d}, \quad (2)$$

* egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
e-mail: aramzb@uni-miskolc.hu

ahol az F_D és az F_L a d átmérőjű körhenger egységnyi hosszúságú felületére ható erő x irányú, illetve arra merőleges komponense, a ρ pedig a közeg sűrűsége. A henger hátsó pontjában lévő nyomástényezőt (C_{pb}) a következő egyenlet alapján számítjuk ki:

$$C_{pb} = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho u_\infty^2}, \quad (3)$$

ahol p a nyomás a henger hátsó pontjában.

A henger mögött keletkezett teret a dimenzió nélküli örvényleválási frekvenciával, az ún. Strouhal számmal szokták jellemezni

$$St = f d / u_\infty, \quad (4)$$

ahol f az örvényleválás frekvenciája. A hőmérsékletmező jellemzése a henger és a közeg közötti fajlagos hőátadási tényezővel, az ún. Nusselt számmal történik:

$$Nu = \alpha d / \lambda, \quad (5)$$

ahol α a hőátadási tényező, λ a közeg hővezetési tényezője. A szakirodalomban egy tetszőleges periodikus függvény (C) időátlagát és effektív középértékét (továbbiakban az angol rövidítést alkalmazva *rms*: root-mean-square) értékét szokták összehasonlítani, amit a következő numerikus integrálással számolunk ki:

$$C_{\text{átl}} = \frac{1}{n P} \int_{t_1}^{t_1+nP} C(t) dt, \quad (6)$$

$$C_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n P} \int_{t_1}^{t_1+nP} [C(t) - C_{\text{átl}}]^2 dt},$$

ahol a t_1 az integrálás alsó határa, P egy örvény leválási periódusa, n a számításához alapul vett periódusok száma. A C értéke C_L , C_D , C_{pb} és Nu értékeit veheti fel.

2.2. A közeg tulajdonságai

Mérésekkel bizonyították [6, 10], hogy a hőmérséklet hatása miatt a folyadék kinematikai viszkozitása megváltozik, amely jelentősen befolyásolja a helyi Reynolds-szám értékét az áramlási térben, különösen a fűtött henger közelében. (A helyi Reynolds szám: $Re = u_\infty d / \nu_\infty$, ahol ν_∞ a közeg kinematikai viszkozitása a zavartalan áramlás hőmérsékletével számolva.) A közeg kiválasztása fontos kérdés, mert fűtött henger hőmérsékletnövekedését csökkenti vagy teljesen elfojtja a levegőáramlás [8, 12], ugyanakkor vízbe helyezett henger körüli áramlás pontosan ellenkező tendenciát mutat, mivel a hőmérséklet növekedésével a víz kinematikai viszkozitása csökken [6, 7, 11]. Számításainkat levegő áramlását feltételezve végeztük el.

A közeget [13] összenyomhatónak tekintette, míg más szerzők [5,14] azt feltételezték, hogy az áramlási közeg összenyomhatatlan, vagyis a közeg sűrűsége nem függ a nyomástól, és elhanyagolta a helyi sűrűségválto-

zást is a kontinuitási egyenletben ($\partial\rho/\partial t$), miközben a számításaiban a folyadék többi tulajdonsága a hőmérséklettől függ. Az általunk vizsgált levegőáramlásnál kicsi a Mach-szám ($Ma = u_\infty/a < 0,015$, ahol a a hangsebesség levegőben), ebből következik, hogy a nyomásból származó összenyomhatóság elhanyagolható. A kapott eredmények [5,14] jó egyezést mutattak a kísérleti adatokkal, ezért a továbbiakban a számításainknál a kis Mach szám miatt a közeget összenyomhatatlannak tekinthetjük.

A fűtött körhengernél, ahol a környezet és a henger közötti hőmérsékletkülönbség kicsi ($T^* \approx 1$) a közeg állapotjelzőinek hőmérsékletfüggése elhanyagolható [4, 5], azonban nagyobb különbség esetén figyelembe kell venni, hogy a közeg tulajdonságai a hőmérséklet hatására megváltoznak. A hőhatás fizikai összefüggéseire különböző magyarázatok vannak. Számos kutató [11, 14] arra a következtetésre jutott, hogy a sűrűség változása a fűtött henger körüli áramlásnál fontos szerepet játszik az örvényleválás jelenségénél. Más kísérleti tanulmányok [8, 12] azonban úgy találták, hogy a folyadék kinematikai viszkozitásának változása a legfontosabb befolyásoló tényező.

A kutatók [13, 14] többnyire a fűtött hengert körülvevő közeg viszkozitásának és sűrűségének hőmérsékletfüggését vizsgálták meg. Jelen cikkben a dinamikai viszkozitás (μ) és a sűrűség (ρ) mellett a közeg hővezetési tényezőjének (λ) és fajhőjének (c_p) hőmérsékletfüggését is megvizsgáljuk. Az állapotjelzők hőmérsékletfüggését irodalmi adatok alapján vettük fel [15].

3. SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

A számítási eredmények kiértékelésénél összehasonlítjuk a dimenziótlan örvényleválási frekvenciát (St), felhajtóerő tényező rms értékét ($C_{L,rms}$), az ellenállástényező időátlagát (C_D) és a Nusselt szám (Nu) értékeit $Re=150$ Reynolds számnál és $T^*=1,5$ hőmérsékletarányánál. Korábbi vizsgálatainknál fűtetlen henger esetében a dimenzió nélküli mennyiségek jó egyezést mutattak a szakirodalomban található értékekkel [9, 10].

3.1. Közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése

A közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggését vizsgálva hat esetet különböztetünk meg:

- **I. eset** μ konstans,
- **II. eset**: ρ konstans,
- **III. eset**: μ és ρ konstans,
- **IV. eset**: λ konstans,
- **V. eset**: c_p konstans,
- **VI. eset**: a közeg minden tulajdonsága függ a hőmérséklettől.

Az egyszerűség kedvéért a megadott (I – VI) jelöléseket használjuk a továbbiakban. A 1. táblázatban összefoglaltuk a hat különböző esetre vonatkozó Strouhal számot, felhajtóerő-, ellenállás- és nyomástényezőt, illetve a Nusselt számot $Re=150$ és $T^*=1,5$ esetében.

1. Táblázat

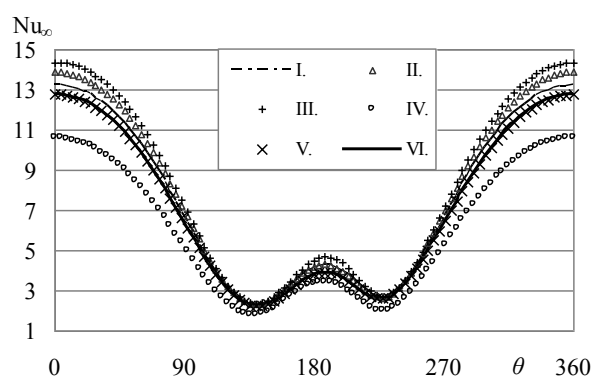
| | St | [%] | C_{Lrms} | [%] | C_D | [%] | $-C_{pb}$ | [%] | Nu_∞ | [%] |
|---|--------|------|------------|-------|--------|-------|-----------|------|-------------|-------|
| I. μ =konst. | 0,1808 | 4,32 | 0,2939 | 17,64 | 1,3173 | -1,49 | 0,8158 | 5,63 | 6,729 | 3,52 |
| II. ρ =konst. | 0,1768 | 2,01 | 0,3078 | 23,21 | 1,3292 | -0,57 | 0,7918 | 2,53 | 7,0473 | 8,41 |
| III. μ =konst. és ρ =konst. | 0,1833 | 5,76 | 0,3613 | 44,62 | 1,3119 | -1,87 | 0,8418 | 9,00 | 7,3063 | 12,40 |
| IV. λ =konst. | 0,1745 | 0,69 | 0,2658 | 6,40 | 1,342 | 0,38 | 0,7864 | 1,83 | 5,8532 | -9,96 |
| V. c_p =konst. | 0,1737 | 0,23 | 0,251 | 0,47 | 1,3387 | 0,14 | 0,7747 | 0,31 | 6,4958 | -0,07 |
| VI. Teljes hőmérséklet-függés | 0,1733 | | 0,2498 | | 1,3369 | | 0,7723 | | 6,5027 | |

Az 1. táblázat tartalmazza a teljes hőmérsékletfüggéstől való százalékos eltérést. A ρ konstans esetben megfigyelhető, hogy a C_{Lrms} 23,21% eltérést mutat a VI. esethez képest, míg a Nusselt szám több mint 8,41%-kal változott meg. Konstans viszkozitás esetén jelentősen változik az örvényleválás frekvenciája és a nyomástényező értéke is. Ebből következik, hogy a III. esetben, ahol a μ és ρ is konstans, a legnagyobb az eltérés a VI. eset dimenziótlan mennyiségeihez képest. A legnagyobb eltérés a C_{Lrms} értékében mutatkozik, ahol 44,64% a különbség. Az is megfigyelhető, hogy konstans fajhőnél szinte ugyanazt az értéket kaptuk, mint a VI. esetben, vagyis a fajhő hőmérsékletváltozása nem befolyásolja a dimenzió nélküli mennyiségek értékeit. Ebből következik, hogy a levegő tulajdonságai közül csak a fajhőt tekinthetjük konstansnak, a közeg többi tulajdonságánál figyelembe kell venni a hőmérsékletfüggést.

3.2. Nusselt szám eloszlása a henger felületén

A henger és a közeg közötti hőátadás jellemzése az adott Reynolds számnál a Nusselt számmal történik. Ezért megvizsgáltuk a henger felületén a helyi Nusselt szám eloszlását (Nu_∞). Az 1. ábra a helyi Nu_∞ eloszlást mutatja az előzőekben felsorolt hat esetben $Re=150$ Reynolds számnál és $T^*=1.5$ hőmérsékletarányánál ugyanabban az időpillanatban. A Nusselt számot leginkább a hővezető képesség befolyásolja, ami a Nusselt szám hengerfelületi eloszlásából még jobban szembetűnik (IV. eset). Ezen kívül a viszkozitásnak és kisebb mértékben a sűrűségnek is hatása van a henger felületén kialakuló hőátadásra. A fajhő nem befolyásolja a kialakuló eloszlást, az V. és a VI. eset értékei egybeesnek. Az ábrán megfigyelhető, hogy a leválási pontban

($\theta \approx 140^\circ$) minden esetben azonos a Nu_∞ értéke, kivéve a konstans hővezető képesség esetét.



1. ábra Nusselt szám eloszlás a henger felületén

3.3. Hőmérséklet növekedésének hatása

A közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggését figyelembe véve (kivéve a fajhőt, aminek értékét konstansnak választottuk) megvizsgáltuk a henger körül kialakuló áramlást $Re=150$ Reynolds számnál és különböző hőmérsékletarányánál $T^*=1; 1,1; 1,5$ és $1,8$ (2. táblázat). A 2. táblázatban jól látszik, hogy a hőmérsékletarány növekedésével a Strouhal szám csökken hasonlóan, mint a szakirodalomban található mérési [6, 8] és számítási [13, 14] eredményekkel. A felhajtóerő- és ellenállás-tényező rms értéke, valamint a henger hátsó pontjában a nyomástényező időátlaga szintén csökken, míg a Nusselt szám és az ellenállás-tényező időátlaga növekszik a hőmérséklet növekedésével.

2. Táblázat

| T^* | St | C_{Lrms} | C_D | C_{Drms} | $-C_{pb}$ | Nu_∞ |
|------------|--------|------------|--------|------------|-----------|-------------|
| 1 | 0,1827 | 0,3553 | 1,3083 | 0,0175 | 0,837 | |
| 1,1 | 0,1811 | 0,3342 | 1,317 | 0,0158 | 0,8254 | 6,3708 |
| 1,5 | 0,1733 | 0,2498 | 1,3368 | 0,00957 | 0,7723 | 6,5004 |
| 1,8 | 0,1673 | 0,1978 | 1,347 | 0,006159 | 0,7358 | 6,6015 |

A vizsgálataink során megfigyeltük, hogy a hengerfal közelében egy határréteg alakul ki, amely a hőmérséklet növekedésével egyre vastagabbá válik. A határrétegben a közeg viszkozitása növekszik, a sűrűsége pedig lecsökken, és ez a kisebb sűrűségű közeg az áramlási irányban továbbterjed.

4. KÖVETKEZTETÉS

Fűtött henger körüli áramlás esetén megvizsgáltuk az áramló levegő állapotjelzőinek hőmérsékletfüggését. A numerikus szimulációval jól kimutatható az állapotjelzőként eltérő hatás az örvényleválás áramlási jellemzőire. Egy jól megalapozott elhanyagolás lehetősége sok-sok óra számítógép futtatás megtakarítását eredményezheti. A számításaink alapján megállapítottuk, hogy a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése jelentős mértékben befolyásolja az egyenletes áramlásba helyezett fűtött hengernél kialakuló áramlási jellemzőket. A henger és a folyadék közötti nagy hőmérsékletkülönbség esetén a közeg tulajdonságainak hőmérsékletfüggése csak a fajhőnél hanyagolható el, a sűrűségnél, viszkozitásnál és a hővezetési tényezőnél figyelembe kell venni.

A hőmérsékletarány nagyságának is jelentős hatása van az örvényleválás áramlási jellemzőire. A hengerről leváló örvények érzékenyek a hőmérséklet növekedésére. A hőmérsékletarány növekedésével a Strouhal szám, a felhajtóerő- és ellenállás-tényező *rms* értéke, valamint a henger hátsó pontjában a nyomástényező időátlaga csökken, míg a Nusselt szám és az ellenállás-tényező időátlaga növekszik.

A közölt eredmények egy hosszú távú kutatási projekt alapjai. A későbbiek során szeretnénk megvizsgálni, hogy nem egyenletes, hanem rezgő folyadékáramlás esetén hogyan változik a hőmérsékletmező a henger környezetében. A további számításokat különböző Reynolds számoknál és hőmérsékletarányánál szeretnénk elvégezni.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét fejezik ki az OTKA (76085), NKTH-OTKA (68207) és a Magyar-Német együttműködési program P-MÖB/386-nak a kutatás támogatásért. A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

6. IRODALOM

[1] ZDRAVKOVICH M.M.: Flow around circular cylinders. Vol.1: Fundamentals. Oxford University Press, Oxford, New York, 1997.
 [2] WILLIAMSON C.H.K.: Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship

for the laminar vortex shedding of a circular cylinder. Physics of Fluids, 1988, vol. 31, no. 10, pp. 2742-2744.

- [3] NORBERG C.: Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift. Journal of Fluids and Structures, 2001, vol. 15, pp. 459-469.
 [4] BARANYI L.: Computation of unsteady momentum and heat transfer from a fixed circular cylinder in laminar flow. Journal of Computational and Applied Mechanics, 2003 vol. 4, no. 1, pp. 13-25.
 [5] LANGE C.F., DURST F., BREUER M.: Momentum and heat transfer from cylinders in laminar crossflow at $10^4 \leq Re \leq 200$. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1998, vol. 41, pp. 3409-3430.
 [6] VÍT T., REN M., TRÁVNÍČEK Z., MARŠÍK F., RINDT C.C.M.: The influence of temperature gradient on the Strouhal-Reynolds number relationship for water and air. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, vol. 31, pp. 751-760.
 [7] LECORDIER J.C., BROWNE L.W.B., LE MASSON S., DUMOUCHEL F., PARANTHOËN P.: Control of vortex shedding by thermal effect at low Reynolds numbers. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, vol. 21 no.4, pp. 227-237.
 [8] WANG A.B., TRÁVNÍČEK Z., CHIA K.C.: On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder. Phys. Fluids, 2000 vol. 12, no. 6, pp. 1401-1410.
 [9] BOLLÓ B.: Grid independence study for flow around a stationary circular cylinder. MicroCAD 2010, International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, Section F, 2010, pp.1-6.
 [10] BOLLÓ B., BARANYI L.: Computation of low-Reynolds number flow around a stationary circular cylinder. Proc. 7th Int. Conf. on Mechanical Engineering Budapest, Hungary 2010, pp. 891-896.
 [11] LECORDIER J.C., DUMOUCHEL F., PARANTHOËN P.: Heat transfer in a Bénard-Kármán vortex street in air and in water. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1999, vol. 42, pp. 3131-3136.
 [12] DUMOUCHEL F., LECORDIER J.C., PARANTHOËN P.: The effective Reynolds number of a heated cylinder. Int. Journal of Heat Mass Transfer, 1998, vol. 41 no.12, pp. 1787-1794.
 [13] SABANCA M., DURST F.: Flows past a tiny circular cylinder at high temperature ratios and slight compressible effects on the vortex shedding. Physics of Fluids, 2003 vol. 15, no. 7, pp. 1821-1829.
 [14] SHI J.M., GERLACH D., BEUER M., BISWAS G., DURST F.: Heating effect on steady and unsteady horizontal laminar flow of air past a circular cylinder. Physics of Fluids, 2004 vol. 16, no. 12, pp. 4331-4345.
 [15] VDI-WÄRMEATLAS, 9th ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-41200-X, 2002.

ÁLLÍTHATÓ LAPÁTOZÁSÚ KERESZTÁRAMÚ TURBINÁK

CROSS-FLOW TURBINES WITH PITCH CONTROLLED BLADES

Hajdú Sándor*, Dr. Lakatos Károly**

ABSTRACT

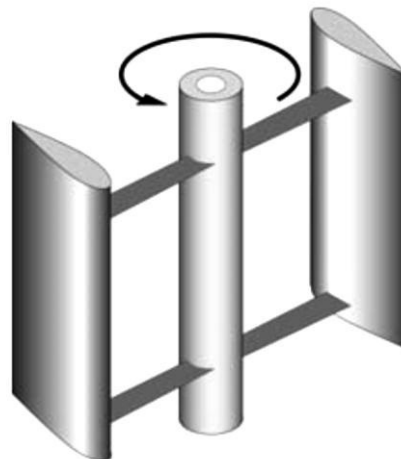
A characteristic feature of cross-flow turbines is a strong fluctuation in the circumferential force that generates axle power, because the interaction between the blades and the medium is not constant. Due to this varying interaction, the force that occurs on one blade (and its tangential component) fluctuate cyclically as the blade changes its position. This paper is about how to improve the efficiency of the turbine using active pitch control.

1. BEVEZETÉS

Az 1. ábrán látható függőleges tengelyű keresztáramú turbina járókereke, ellentétben a vízszintes tengelyűvel, pl. Bánki turbina [5], szabadon áll az áramló közegben. A függőleges tengely-elrendezés a széliránytól való függetlenséget biztosítja, a konstrukció egyszerű. A munkaközeg egyaránt lehet levegő és víz [3].

Korábbi közleményeinkben [1,2] részletesen áttekintettük a kerületi sebességgel párhuzamosan álló, fixen szerelt dúcprofilú lapátozású keresztáramú turbinák működésének sajátosságait. Üzem közben a tengelyteljesítményt előállító kerületi erő ingadozik. A kerületi sebesség és a közegsebesség különböző arányai (λ) mellett a belépő sebességi háromszög és így a kerületi erő a járókerék egy kiszemelt θ elfordulási szög értéke mellett is lényegesen változik. A járókerék forgása következtében azonban a kerületi erő a λ sebességparaméter állandó értéke mellett is a különböző θ elfordulási szöggel jellemezhető lapáthelyzetekben más és más értékű. Az üzemelés szempontjából két egymástól lényegesen eltérő sebességparaméter-tartomány vizsgálata szükséges: az egyik esetben a közegsebesség nagyobb, mint a turbina kerületi sebessége, a másik esetben pedig kisebb.

*tudományos főmunkatárs, hajdu@kti.hu
Közlekedéstudományi Intézet, Budapest
**egyetemi docens, aramlk@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszék



1. ábra. A keresztáramú turbina vázlatja

Értelemszerűen a turbina indulásakor a kerületi sebesség kisebb, mint a közegsebesség ($\lambda < 1$). A kerületi sebességgel párhuzamosan álló, fixen szerelt dúcprofilú lapátok esetén azonban csak a másik tartományban ($\lambda > 1$) kialakuló sebességi háromszögek esetében keletkezik hasznosítható nyomaték. Jelen közleményben a keresztáramú turbina állítható lapátozás mellett várható jellemzőiről kívánunk bevezető jelleggel képet adni.

2. JELÖLÉSEK

- C_x : ellenállás tényező [-]
- C_y : felhajtóerő tényező [-]
- F_y : felhajtóerő [N]
- F_x : ellenállás [N]
- v : abszolút sebesség (pl. szélesebesség) [m/s]
- w : relatív sebesség [m/s]
- u : kerületi sebesség [m/s]
- α : a kerületi- és az abszolút sebesség iránya által bezárt szög [-]
- β : a kerületi- és a relatív sebesség iránya által bezárt szög [-]
- γ : a lapát állásszöge (a lapáthúr és a kerületi sebesség iránya által bezárt szög) [-]
- θ : az elforduló járókerék pozícióját jellemző szög (elfordulási szög) [-]

λ : sebességtényező ($\lambda=u/v$) [-]
 δ : megfúvási szög (a w sebesség iránya és a lapát-húr által bezárt szög) $\delta=\beta-\gamma$ [-]

3. A MEGFÚVÁSI SZÖG ALAKULÁSA ÁLLÍTHATÓ LAPÁTOZÁS ESETÉN

Állítható lapátozás esetén a sebességi háromszögek nem változnak. Továbbra is igaz marad tehát, hogy a sebességtényező növekedésével a járókerék elfordulási szögének (θ) a függvényében ciklikusan változó irányú w relatív sebesség irányváltozásának a mértéke is egyre nagyobb lesz, ugyanakkor a megfúvási szög ingadozása csökkenni fog. Az állítható lapátozás esetén a változás abban jelentkezik, hogy a lapát megfúvási iránya (δ), amely a w sebesség iránya és a lapát-húr által bezárt szög) nem lesz azonos a kerületi- és a relatív sebesség iránya által bezárt szöggel (β), hanem attól a lapát beállítása szerinti $\pm \gamma$ szögértékkel el fog térni [2].

Függőleges tengelyű, a forgástengellyel párhuzamosan, hengerpaláston elhelyezkedő fix lapátozású turbina esetében a megfúvási szög (amely a w sebesség iránya és a lapát-húr által bezárt δ szög) változása a θ szög függvényében (paraméter a λ sebességtényező) :

$$\delta(\Theta) = \arctg \frac{\sin \Theta}{\lambda + \cos \Theta} \quad (1).$$

A lapát-húr párhuzamos a kerületi sebesség irányával, a lapátozás beállítási szöge ekkor $\gamma = 0^\circ$.

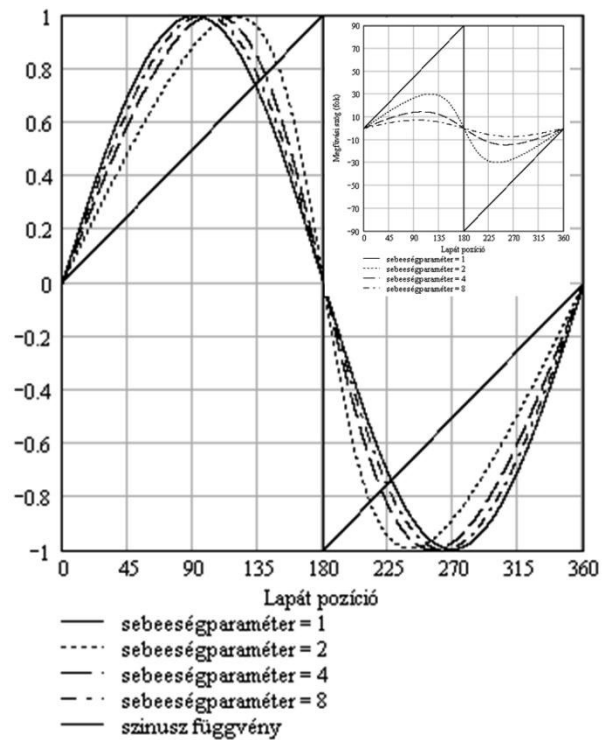
Állítható lapátozás esetében (1) az alábbi alakú lesz:

$$\delta(\Theta) = \arctg \frac{\sin \Theta}{\lambda + \cos \Theta} \pm \gamma(\Theta) \quad (2).$$

Miután a geometriai viszonyok következtében a megfúvási szög (azaz a w sebesség iránya és a lapát-húr által bezárt δ szög) a θ szög függvényében a sebességtényező növekedésével egyre kisebb mértékben fog ingadozni [1], így a λ sebességparaméternek vannak olyan értékei, amelyek mellett a C_y/C_x viszony a θ szög viszonylag tág tartományában az optimális érték körül alakul. Amennyiben tehát a lapátozást állíthatónak gondoljuk, akkor a λ sebességparaméternek a fenti értelemben vett optimális tartománya kiszélesíthető.

Az összefüggésben a lapát $\gamma(\theta)$ állásszögét általános értelemben tekintjük állíthatónak. Ez azt jelenti, hogy az állásszög nem pusztán egy additív állandó, hanem a lapátpozíció függvényében is változhat.

Az (1) szerint a lapát oszcilláló mozgása a relatív áramlásban kvázi szinuszos, a tényleges szinuszos változástól annál kevésbé tér el, minél nagyobb értékű a sebességparaméter (2. ábra).



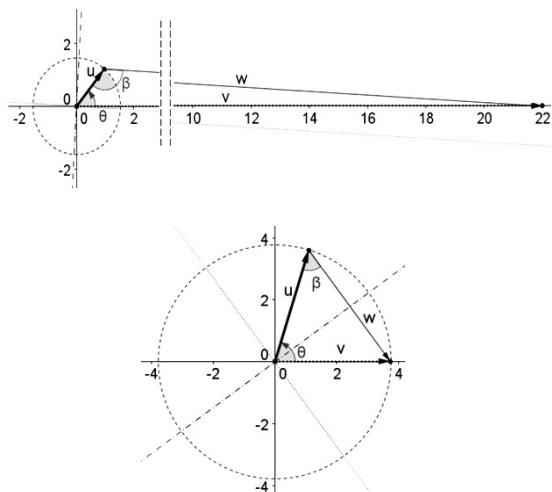
2. ábra. Az (1) összefüggés normalizált grafikonja. Fent a jobb oldali kis ábrán a normalizálás nélküli, valós megfúvási szögek szerepelnek

4. A SEBESSÉGPARAMÉTER ÉRTÉKE KISEBB, MINT 1 ($\lambda < 1$)

4.1. A sebességi háromszög sajátosságai

A sebességparaméter egységénél kisebb tartományában a kerületi sebesség kisebb, mint közegsebesség. Egy igen alacsony $\lambda = u/v$ sebességparaméter érték mellett, illetve a sebességparaméter egységnyi értéke esetére szerkesztett, a kvantitatív viszonyokat szemléltető sebességi háromszöget mutat a 3. ábra.

A belépő sebességi háromszög ábrázolásakor azt a korábban bevezetett [1] konvenciót követjük, hogy a kerületi sebességvektort (u) önmagával párhuzamosan eltoljuk a járókerék tengelyvonalába úgy, hogy a vektor kezdőpontja essen a tengelyvonalra. Ekkor a járókerék elfordulási szögének (θ) a függvényében egy forgó vektor felel meg a kerületi sebesség vektorának. Amennyiben felteszünk, hogy a lapát rögzített, és a lapát-húr párhuzamos a kerületi sebességgel, akkor az ábrázolási konvenció szerint a sebességi háromszög ábráján a lapátot úgy lehet elképzelni, hogy a lapát-húr egybe esik az u vektorral, a belépésnél lévő végpontja pedig az u vektor végpontjával esik egybe.



3. ábra. A belépő sebességi háromszög $\lambda \ll 1$ esetén (felül), illetve $\lambda = 1$ esetén (alul)

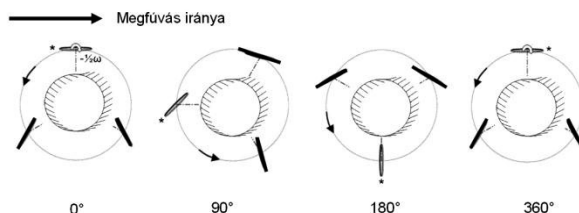
A 3. ábra közvetlenül szemlélteti, hogy $\lambda \ll 1$ esetén a v közegsebesség nagysága és iránya közel azonos a relatív sebesség nagyságával és irányával a lapát teljes körbefordulása során. Ennek megfelelően a lapát megfűvási iránya drasztikusan, közel 360° értékkel változik a lapát körbefordulása során. A kerületi erő is drasztikusan változik az elfordulással, akár előjelet is vált.

Megjegyezzük, hogy a 3. ábra rámutat egy sajnálatos gyakorlati körülményre is: nagy szél esetén (a felső ábra ezt illusztrálja) a meginduló kerék tekintélyes fordulatszámot (magas kerületi sebességet) érhet el a $\lambda < 1$ tartomány elhagyása nélkül, ami keltheti azt a hamis és esetenként akár visszaélésre is alkalmas látszatot, hogy a gép általában jól indul és alkalmas energiatermelésre, holott pusztán egy rossz Savonius-kerék üzemeről van szó. A Savonius-kerék a $\lambda < 1$ tartományban üzemel. A működése azon alapszik, hogy van a megfűvás irányának olyan kitüntetett értéke, amelyben a lapát jelentősen eltérő alakellenállást mutat, mint az ehhez képest 180 fokkal eltérő megfűvási irányhoz tartozó ellenállás érték (erre utal az angolszász terminus: „drag-driven turbine”). Erre a működésmódra közismert példa a jól csapágyazott, terheletlenül forgó, így $\lambda \sim 1$ mellett üzemelő kanalas szélesebbségmérő.

4.2. Az állítható lapátozás szerepe a sebességparaméter egységnyinél kisebb értékei esetén ($\lambda < 1$)

Ha a sebességparaméter az egységnyél kisebb ($\lambda < 1$, a kerületi sebesség alulról közelíti a közeg sebességét) és a lapátozás nem állítható (például $\gamma = 0^\circ$ rögzített beállítási szöggel), akkor a működés gyakorlatilag kizárható. Állítható lapátozás alkalmazásával azonban elérhető, hogy a függőleges tengelyű, a forgástengellyel párhuzamosan, hengerpaláston elhelyezkedő lapátozású turbina Savonius-rotorként üzemeljen akkor is, ha a lapát alakellenállása alig változik a megfűvási irány 180 fokos megváltozása esetén (természetesen azt viszont

kihasználjuk, hogy a megfűvás 90 fokos megváltozása esetén az alakellenállás nagymértékben megváltozik). Tekintsük példaként állíthatónak egy $N=3$ lapáttal rendelkező gép lapátjait. A kerék szögsebessége legyen ω . Az egyes lapátok forogjanak a kerék forgásával ellentétes irányban, $-\frac{1}{2}\omega$ szögsebességgel. Az elrendezés a 4. ábrán látható, egy kiszemelt lapát belépő élét a $\theta=0^\circ$ szerinti pozícióban csillag jelzi. A 4. ábrán a $\lambda=0.6$ értékű sebességparaméter esetén kialakuló relatív sebesség kerület menti irányeloszlását is feltüntettük.



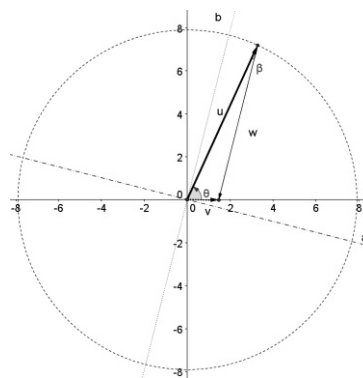
4. ábra. A szöveg szerinti állítható lapátozású gép lapáthelyezetei a járókerék különböző θ elfordulási szöge mellett, valamint a relatív sebesség kerület menti irányeloszlása $\lambda = 0,6$ esetben

A kvalitatív megközelítés is elegendő annak belátására, hogy a függőleges tengelyű, a forgástengellyel párhuzamosan, hengerpaláston elhelyezkedő állítható lapátozású turbina, mint Savonius-rotor üzemelhet.

5. A SEBESSÉGPARAMÉTER ÉRTÉKE NAGYOBB, MINT 1 ($\lambda > 1$)

5.1. A sebességi háromszög sajátosságai

A sebességparaméter egységnyél nagyobb tartományban a közegsebesség kisebb, mint a kerületi sebesség, a fordulatszám a működés lehetséges tartományán belül magas.



5. ábra. A belépő sebességi háromszög $\lambda \gg 1$ esetén. A felhajtóerő iránya w irányára merőleges (a irány), az ellenállás iránya w irányával párhuzamos (b irány)

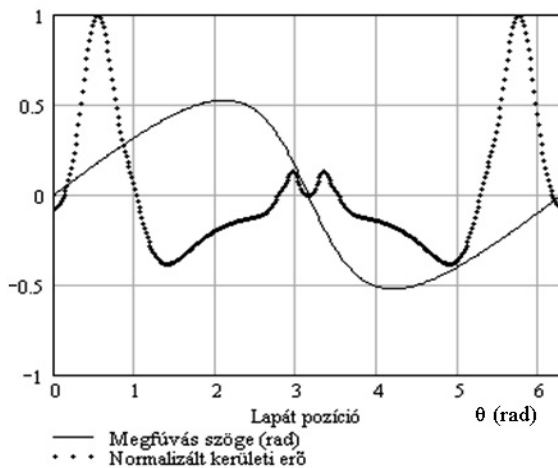
A $\lambda = u/v$ sebességparaméter 1-nél jóval nagyobb értéke mellett szerkesztett, a kvantitatív viszonyokat szemléltető sebességi háromszöget az 5. ábrán mutatjuk be.

Az ábrán szereplő belépő sebességi háromszög arányai mellett a kerületi sebesség iránya és nagysága a relatív sebesség irányától és nagyságától a lapát teljes körbefordulása során csak kicsit tér el. Ennek megfelelően a lapát megfűvási iránya csak kis értékkel változik a lapát körbefordulása során.

5.2. Az állítható lapátozás szerepe a sebességparaméter egységnyinél nagyobb értékei esetén ($\lambda > 1$)

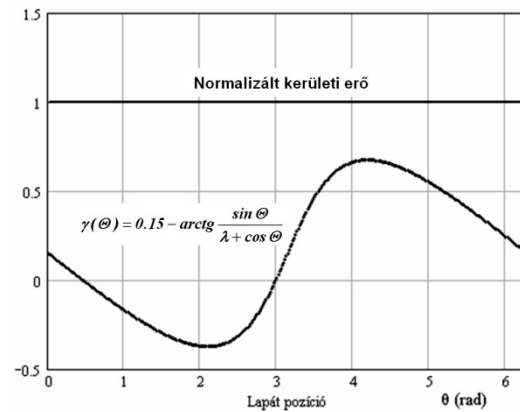
A továbbiakban az [1] szerinti számítási modellt felhasználva egyszerű, csak kvalitatív képet adó elemzés keretében mutatjuk be a kerületi erő optimalizálását változó állásszög esetén.

Tekintsük először a $\gamma(\theta) = 0$ függvény szerinti helyzetet, azaz a lapáthúr párhuzamos a kerületi sebességgel és a lapátozás nem állítható. Ekkor $\lambda = 2$ esetén a normalizált kerületi erő és a megfűvási szög a 6. ábra szerint alakul.



6. ábra. A normalizált kerületi erő és a megfűvási szög $\lambda = 2, \gamma = 0$ esetén

Keressük meg ezek után az optimális $\gamma(\theta)$ függvényt annak a feltételezésével, hogy a sebességparaméter állandó értékű. Optimális esetben a lapát mindig az átesés előtti, nagy felhajtóerő tényezőt eredményező megfűvást kap. Az ezt biztosító $\gamma(\theta)$ függvényt és a függvény grafikonját a 7. ábra mutatja. A kvalitatív példa rámutat az állítható lapátozás valódi jelentőségére: az állítható lapátozás megteremti az adaptív (szabályozott) üzem lehetőségét a $\gamma(\theta)$ függvény paramétereinek dinamikusan változó értékeivel megvalósított szabályozás alkalmazásával.



7. ábra. A lapáton ébredő kerületi erő optimalizálása $\lambda = 2$ esetén

6. TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK

Munkánk folytatásában a szabályozás részletkérdéseivel foglalkozunk. Kiemelt kérdéskör a $\lambda < 1$ tartományból a $\lambda > 1$ tartományba történő átmenet lehetőségének a vizsgálata.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

8. HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Hajdú, S., Lakatos, K.: Keresztáramú turbinák üzemének néhány sajátossága. GÉP Doktorandusz különszám pp 10-16, 2010. ISSN 0016-8572
- [2] Hajdú, S., Lakatos, K.: The Influence of pitch control on working parameters of cross flow turbines, IN-TECH2011 International Conference on Innovative Technologies, Pozsony, Szlovákia, 2011. szeptember 01-02. pp 203-206. ISBN 978-80-904502-6-4
- [3] Gorlov, A.: Hydraulic cross flow turbine http://hydropower.inel.gov/hydrokinetic_wave/pdfs/day1/05_crossflow_turbine.pdf
- [4] Shendal, R. E., Klimas, P.C.: Aerodynamic characteristics of 7 symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamics analysis of vertical axis wind turbine. Sandia National Laboratories SAND-2114
- [5] Fukutomi, J., Sendov, Y., Nakase, Y.: A numerical method of flow trough a cross flow runner; ISME Series II. Vol. 34. No.1.(1991), pp. 44-51.

EGYFOKOZATÚ TURBÓFUVÓ NUMERIKUS MODELLEZÉSE

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE FLOW IN ONE-STAGE BLOWER

Dr. Kalmár László^{*}, Dr. Janiga Gábor^{**}, Fodor Béla^{***}, Varga Zoltán^{****}
Soltész László^{*****}

ABSTRACT

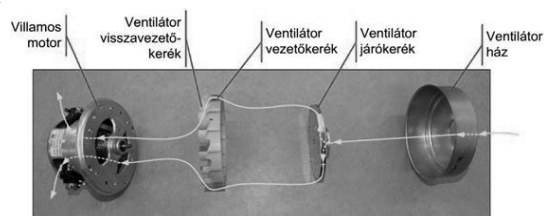
This paper deals with the CFD investigation of the flow in a one-stage radial flow blower-aggregate. The main aim of this numerical study is to compute the relevant operating characteristics of the blower and to determine detailed information about the flow characteristics inside it. The distributions of these flow characteristics in the blower determined by commercial code FLUENT [1] are available to judge whether the elements of the blower are working properly, or not. The calculated characteristics of operating parameters are compared in this paper with measured data given by experimental tests of the blower-aggregate [2] for their validation.

1. BEVEZETÉS

A cikk egy egyfokozatú és radiális átömlésű ventilátor-aggregátban kialakuló áramlási viszonyok numerikus vizsgálatával foglalkozik. A numerikus vizsgálat elsőrendű célja egyrészt a ventilátor aggregát működése szempontjából alapvetően fontos üzemi paraméterek számítása, valamint az áramlás aggregáton belüli jellemzőinek részletes meghatározása. Az aggregáton belüli áramlás FLUENT-ANSYS kereskedelmi szoftver [1] alkalmazásával nyert eloszlási alkalmasak az aggregát egyes részegységei helyes működésének megítélésére. A számított üzemi paraméterek számértékei – azok validálása érdekében – pedig összevethetők a ventilátor-aggregát laboratóriumi mérési eredményeivel [2].

2. A VENTILÁTOR-AGGREGÁT BEMUTATÁSA

A numerikus vizsgálatra került ventilátor-aggregát főbb egységeinek szétszerelt fényképe az 1. ábrán látható.



1. ábra. Ventilátor aggregát főbb egységei

^{*}egyetemi docens, ^{**}egyetemi tanársegéd, ^{***}MsC hallgató, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke, ^{****}egyetemi docens, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, ^{*****}Csoportvezető, Elektrolux Porszívógár

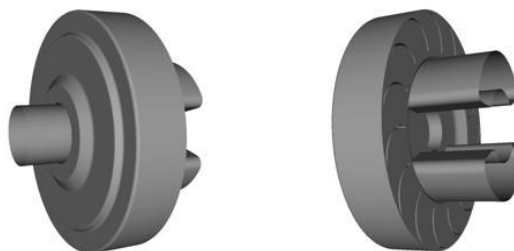
A rendelkezésre álló geometriai jellemzők felhasználásával először a numerikus számítások előkészítéséhez a FLUENT kereskedelmi kód grafikus előkészítő programjával kifejlesztettük a ventilátor-aggregát egyes elemeinek grafikus állományát.

3. A NUMERIKUS MEGOLDÁS ELŐKÉSZÍTÉSE

A fent bemutatott részegységekből összeállított aggregátban kialakuló áramlási folyamat numerikus szimulációja a feladatunk, amit a FLUENT kereskedelmi szoftver alkalmazásával végeztünk el. Először a numerikus szimuláció előkészítéséhez szükséges tennivalókat ismertetjük, majd csak ezt követően mutatjuk be a szimuláció számítási eredményeit.

3.1. A számítási tartomány meghatározása

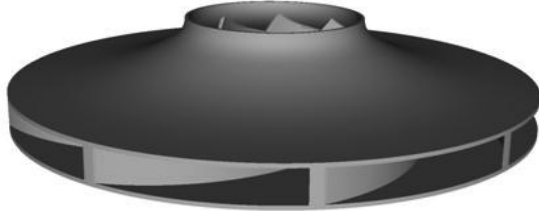
A teljes számítási tartomány két nézetben a 2. ábrán látható. A fényképek és a 3D-s geometriai modell egybevetésével jól látható, hogy a tartomány be- és kilépő keresztmetszeit a valóságos kialakításhoz képest kis mértékben módosítottuk. A belépő keresztmetszetenél – homogén áramlási jellemzők biztosítása érdekében – egy a belépő keresztmetszettel azonos átmérőjű rövid hengeres csőtoldatot illesztettünk, a kilépő keresztmetszet esetében pedig a meghajtó villamos motoron történő nagyon bonyolult átáramlás helyett a ventilátor kilépő oldalán a levegőáramlás irányában a villamos motor házához meglévő két darab un. „piskóta” keresztmetszethez egy-egy rövid kilépő hengeres felületű csőtoldatot illesztettünk.



2. ábra. Ventilátor-aggregát teljes 3D-s számítási tartománya két nézetben

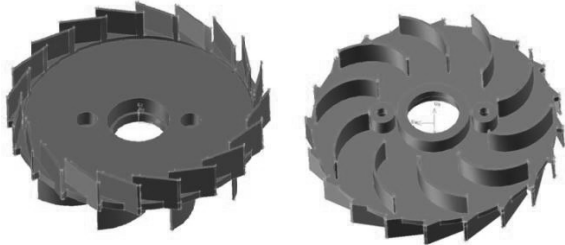
A 2. ábrán látható számítási modell tartalmazza a 3. ábrán látható forgó járókereket és a 4. ábrán két nézetben vázolt vezető-, illetve visszavezető kereket is.

Az áramló levegő a ventilátor szívócsonkján érkezik a járókerékre, mely a folyadék energiáját megnöveli. Ezt követően a levegő a járókerék oldali vezetőkeréken át a nyomóterbe kerül, majd a visszavezető keréken átáramolva a nyomócsonkon távozik el a ventilátor-aggregát egységből.



3. ábra. Járókerék testmodellje

A numerikus vizsgálat elsődleges célja a ventilátor-aggregát belsejében kialakuló áramlási jellemzők számítással történő meghatározása.



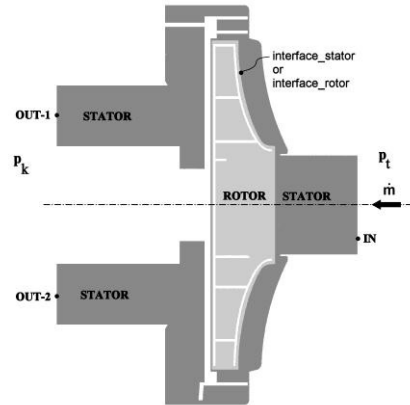
4. ábra. Vezető-, illetve visszavezető kerék testmodellje

3.2. Ventilátor-aggregát számítási résztartományok definiálása és diszkretizációja

A számítás numerikus végrehajthatósága érdekében a teljes számítási tartományt először résztartományokra osztottuk, amelynek térbeli elhelyezkedése és a hozzá tartozó elnevezések az 5. ábrán láthatók. A berendezés működéséből adódóan ugyanis két fontos teret kellett elkülönítenünk: a forgó (**ROTOR**) járókerék-tartományt és az álló (**STATOR**) tartományt, amelyet az aggregát háza és a vezetőkerékek falai határolnak. A numerikus szimuláció előkészítésének talán egyik legfontosabb lépése a számítási tartomány diszkretizációjának, vagyis a tartomány hálózásának sikeres végrehajtása igen nagy hatással van a numerikus számítási eredmények pontosságára.

A FLUENT kereskedelmi szoftver áramlási feladat numerikus megoldása során az ún. véges térfogatok elvét alkalmazza. Ennek érdekében a számítási tartományokat a futtatást megelőzőleg véges térfogatokra kellett felosztani. Ennek során kialakított numerikus háló alkalmazhatóságát a hálóelemek ún. torzultsági paramétereinek értékei alapján tudjuk minősíteni. A kifejlesztett háló végső változata esetében 11.27 millió cella került kialakításra, amelyekre vonatkozóan a legnagyobb torzultsági paraméter értéke 0.87 volt. A járókerék

áramlási terére elkészített numerikus háló felületi képe a 6. ábrán látható.



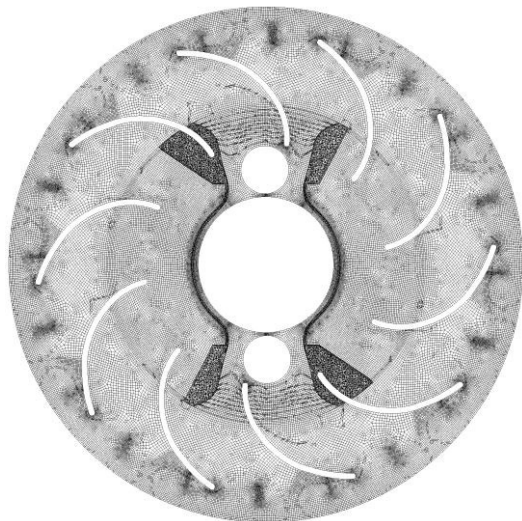
5. ábra. Számítási tartományok felosztása és elnevezései



6. ábra. Járókerék felületén kialakított hálózás képe



7. ábra. A járókerék és a vezetőkerék felületén kialakított hálózás képe

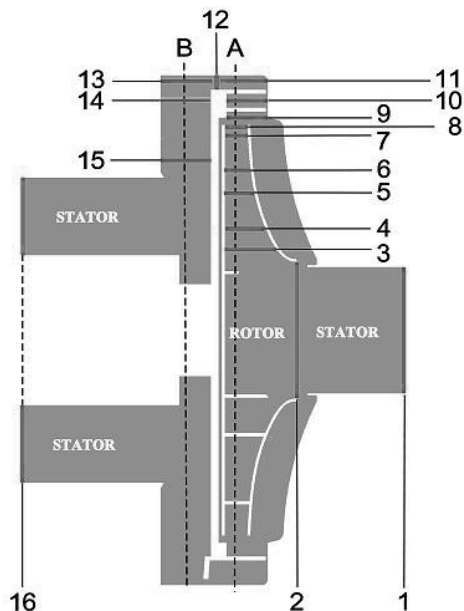


8. ábra. A visszavezető kerék felületén kialakított hálózás képe

4. SZÁMÍTÁSI ÉS KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A diszkrétizált tartomány csomópontjaira vonatkozóan instacionárius áramlás feltételezésével az ún. sűrűség alapú implicit Gauss-Seidel numerikus megoldót használtunk. Az áramló levegőt a berendezés működtetése során kialakuló nagy áramlási sebességek és nagy nyomásviszony miatt viszkózus kompresszibilis gáznak tekintettük. Így a számítás során a standard $k - \epsilon$ turbulencia modellt és az általános gáztörvényt alkalmaztuk.

A futtatás során nyert eredményeket ábrák és diagramok segítségével foglaljuk össze.



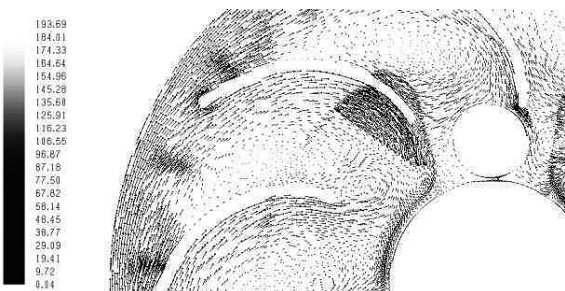
9. ábra. Kijelölt átáramlási keresztmetszetek elhelyezkedése és jelölései

A 9. ábra jelöléseit felhasználva először számított áramlási jellemzők változásait az aggregát forgástengelyére merőleges A és B jelű síkok mentén mutatjuk be.

A 10. ábra a járókerékben és a vezetőkerékben, a 11. ábra pedig a visszavezető kerékben, valamint az ezt követő nyomóterben kialakuló sebességeloszlás változását mutatják be a hátlappal párhuzamosan fekvő és a lapátcsatorna közepén elhelyezkedő A, illetve B jelű síkok mentén (lásd a 9. ábra jelöléseit is).



10. ábra. Sebességeloszlás a járó- és vezetőkerékben az A jelű sík mentén

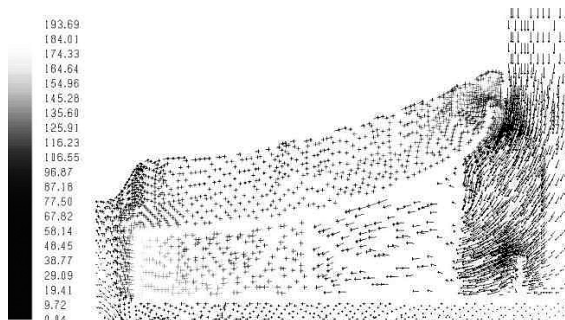


11. ábra. Sebességeloszlás a visszavezető kerékben a B jelű sík mentén

A 12. ábra a vezetőkerékben kialakuló abszolút nyomás eloszlás változását mutatják be a hátlappal párhuzamos és a lapátcsatorna közepén elhelyezkedő B jelű sík mentén (lásd a 9. ábra jelöléseit is).



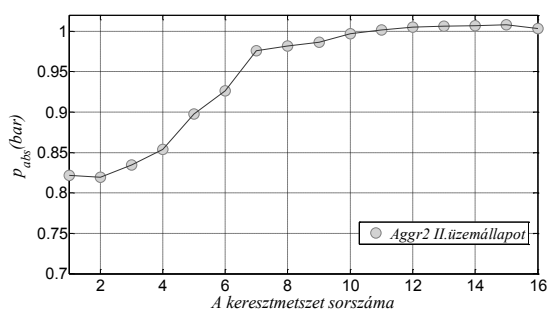
12. ábra. Nyomáseloszlás a visszavezető kerékben a B jelű sík mentén



13. ábra. Sebességeloszlás az aggregát főmetszete mentén

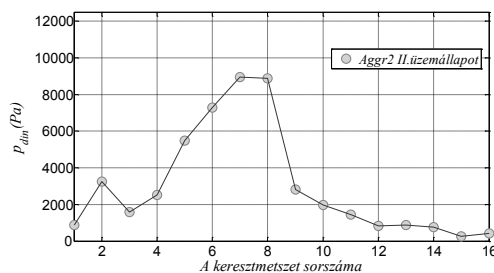
A 13. ábra a sebességeloszlást ábrázolja a ventilátor aggregát főmetszeti síkjában, ahol jól látható a járókerék belépő keresztmetszete környezetében az aggregát szivóoldali fedele és a járókerék előlapja között kialakuló visszaáramlás. Ez a jelenség a járókerék ki- és belépő keresztmetszeteiben működtetés kialakuló jelentős nyomáskülönbség miatt jön létre, amely a ventilátor volumetrikus hatásfokát és így az aggregát teljes hatásfokát is jelentősen leronthatja.

A továbbiakban felületre vonatkozó integrált átlagértékek változásait mutatjuk be. Ezért a számítási eredmények globálisan áttekintő bemutatása érdekében az áramlás irányában 16 darab átáramlási keresztmetszetet jelöltünk ki a ventilátor aggregáton belül, amelyek elhelyezkedését a 9. ábrán lehet megtekinteni. A számítási eredmények jobb áttekinthetősége érdekében kiszámítjuk a szimuláció során részletesen meghatározott áramlási jellemzők fent említett 16 átáramlási keresztmetszetre vonatkozó átlagértékeit és ezek felhasználásával az aggregáton átáramló levegő transzport folyamatában a jellemzők áramlás irányú változása nyomon követhető lesz. Ennek megfelelően a 9. ábrán megjelölt átáramlási keresztmetszetre vonatkozóan kiszámítottuk az abszolút nyomás, a dinamikus nyomás, valamint az átáramló levegő tömegáram átáramlási keresztmetszetre vonatkozó átlagértékét, amelyeket az áramlás irányában kijelölt keresztmetszetekhez tartozóan – a II. üzemiállapotra vonatkozóan – a 15-17. ábrákon lévő diagramokon rajzoltunk fel. Így jó látható a felsorolt mennyiségeknek a ventilátor-aggregáton történő átáramlása során kialakuló változásának jellege. A járókeréken történő átáramlási szakasz (a 2 és 8 jelű keresztmetszetek) mentén az abszolút és dinamikus nyomás értékei folyamatosan nőnek, a vezetőkerék menti keresztmetszet növekedése a dinamikus nyomás csökkenése mellett további növekedést biztosít az abszolút nyomásban (lásd a 8-9 keresztmetszetek közötti szakaszt). A 17. ábrán jól látható a résvesztés miatti tömegáram növekedése az 1-s és 2 jelű keresztmetszetek között.

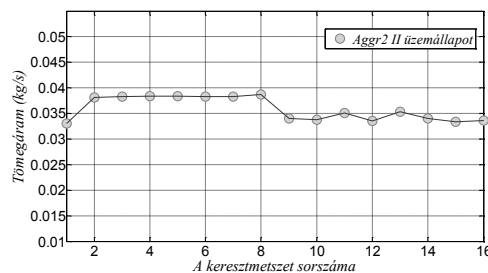


15. ábra. Abszolút nyomás [bar] változása

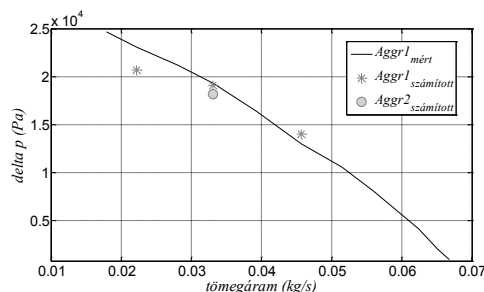
A 18. ábrán a vizsgált aggregát számított munkaponti jellemzőit egy olyan aggregát korábban számított és mért üzemi jellemzőivel hasonlítottuk össze [2], amelynél a vezető- és visszavezető kerék lapátözése kis mértékben eltért a jelenleg alkalmazott kerék geometriájától. A globális összehasonlítás nem mutat nagy különbséget, eltérést csak lokálisan észlelhető.



16. ábra. Dinamikus nyomás változása



17. ábra. Tömegáram változása



18. ábra. Mért jelleggörbe és számított munkapontok

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az aggregát munkapontjának szimuláció által meghatározott jellemzőit összehasonlítottuk mért és számított üzemi jellemzőkkel, amely a gyakorlatnak megfelelő jó egyezést mutat. A kapott eloszlások elemzése a jelenleg is folyó kutatási tevékenység egyik fő komponense. Ennek eredményeiről a közeli jövőben tudunk beszámolni.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Ugyancsak kiemelésre méltó a fenti kutatómunka végzésének és költségeinek a GOP 2008-1.1.2 projekt általi közvetlen támogatása.

7. IRODALOM

- [1] *FLUENT USER GUIDE*, Fluent Inc. Lebanon, (2003)
- [2] Lakatos, K., Szaszák, N., Mátrai Zs., Soltész, L., Szabó, Sz.: *Experimental Development of Guide Vanes and Return Guide Vanes of a Mini Blower*, Proceeding of MicroCAD International Computer Science Conference, Miskolc, (2011)

NAGYTELJESÍTMÉNYŰ LED MODULBAN KIALAKULÓ INSTACIONÁRIUS HŐÁTVITELI FOLYAMAT NUMERIKUS MODELLEZÉSE

NUMERICAL INVESTIGATION OF UNSTEADY HEAT TRANSPORT PROCEDURE IN HIGH POWER LED MODULE

Dr. Kalmár László*, Dr. Ralf Hellmann**, Dr. Réger Tamás***, Varga Zoltán****

ABSTRACT

In many industrial applications the high power UV LED modules in the ultraviolet region of the electromagnetic spectrum are significant opportunity to replace traditional mercury lamps, which have many disadvantages that limit UV applications, and mercury is a notorious pollutant.

However, high power UV LED modules still generate a significant amount of heat that has to be efficiently dissipated in order not to decrease the LED output power and lifetime. UV LED modules overcome these disadvantages, stimulating international R&D efforts to realize LED modules with sufficient optical output power. Therefore, it is highly desirable to investigate the temperature development and distribution on high power UV LED modules and to simulate the unsteady heat transport to the surrounding environment. The scientific task includes the simulation of the temperature development on the high power UV LED module taking into account the environment of the module and also the active air cooling.

1. BEVEZETÉS

Sok ipari alkalmazásban a nagyteljesítményű LED modulok az ultraibolya sugárzási tartományban előnyösen kiválthatják a hagyományos higanygőz lámpákat, amelyeknek alkalmazása sok tekintetben előnytelen. Ezek a hátrányok korlátozzák az UV alkalmazást és a higany pedig komoly szennyezőanyag.

Mivel azonban a nagyteljesítményű UV LED modulok működtetése során jelentős hő fejlődik, amelyet hatékonyan kell eltávolítani annak érdekében, hogy a LED modul kimenő teljesítménye és élettartama ne csökkenjen. A megfelelő optikai kimenő teljesítménnyel rendelkező UV LED modul kifejlesztése egy nemzetközi R&D tevékenység elindítását igényelte. A jelenleg is folyó kutatási tevékenység a nagy teljesítményű UV LED modulban kialakuló hő-átviteli folyamatok numerikus szimulációját jelenti az alkalmazott léghűtés figyelembe vételével.

*egyetemi docens, ****MsC hallgató, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke, **professzor, University of Applied Science, Aschaffenburg, ***vezető kutatómérnök, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels

2. 3x3 LED MODUL BEMUTATÁSA

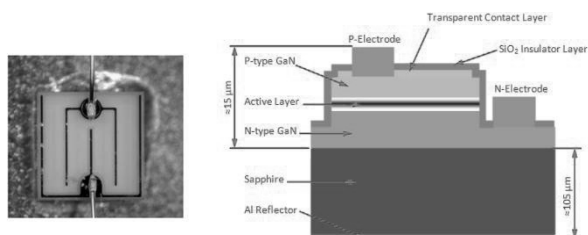
Az említett numerikus vizsgálatot egy, az University of Ashaffenburg kutatói által kifejlesztett és megépített **3x3 UV LED modul** esetére végeztük el, amelynek felülnézeti fényképe az 1. ábrán látható. A felülnézeti képen a 9 darab világos négyzet a LED-ek képe, a 4 sorba és 7 oszlopba rendezett, összesen 28 darab furat pedig az ún. „thermal via”-k elhelyezését mutatja.

Egy „thermal via” valójában a NYAK alsó és felső, rézből kialakított jó hővezető képességű rétegeit összekötő 0,26 mm belső átmérőjű rézcső, amely a két réteg közötti jobb hőcserét biztosítja (lásd a 6. ábrát).



1. ábra. 3x3 LED modul fényképe

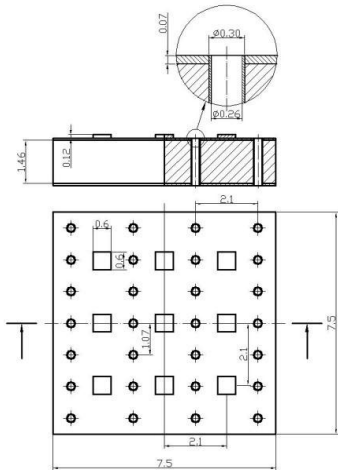
Egy önálló LED képe és szerkezeti felépítése a 2. ábrán látható. Az **3x3 LED modul** műhelyrajzát a 3. ábrán adtuk meg, amelyről leolvashatók a fontosabb geometriai méretek értékei is.



2. ábra. LED felülnézeti fényképe és szerkezeti felépítése

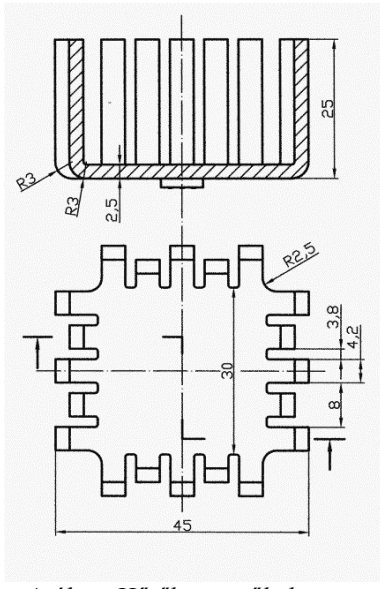
A 2. és 3. ábrákon megadott adatok alapján látható, hogy egy LED mérete 0,6x0,6x0,12 mm, amelynek bemenő villamos teljesítménye 390 mW és ebből az optikai kimenő teljesítmény mindössze 30 mW, vagyis LED-enként kb. 360 mW disszipált teljesítmény fogja

fűteni a **3x3 LED modul**, aminek az elvezetéséről kell gondoskodni.



3. ábra. **3x3 LED modul** műhelyrajza

A **3x3 LED modul** a működtetése közben keletkező hő elvezetése érdekében a 4. ábrán vázolt alumíniumból elkészített hűtőkeretre került felszerelésre.



4. ábra. Hűtőkeret műhelyrajza

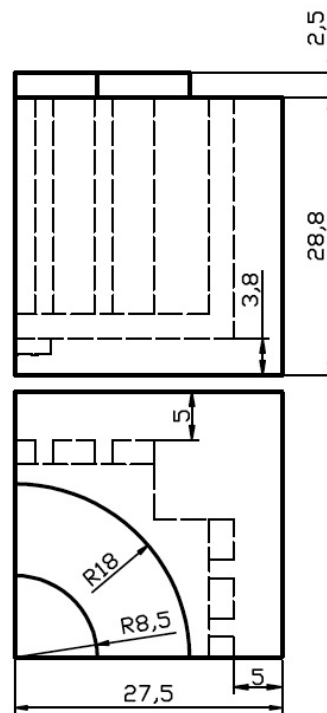
A **3x3 LED modul** a hűtőkeret külső síkfelületének közepére került felerősítésre, aminek a elhelyezése a 4. ábra felső nézetén, az alsó kontúrgörbe alatt látható téglalap formájában látszik. A modul hűtését a hűtőkeret bordáihoz illesztett **FD 6025** típusú ventilátorral biztosítottuk.

3. A NUMERIKUS MEGOLDÁS ELŐKÉSZÍTÉSE

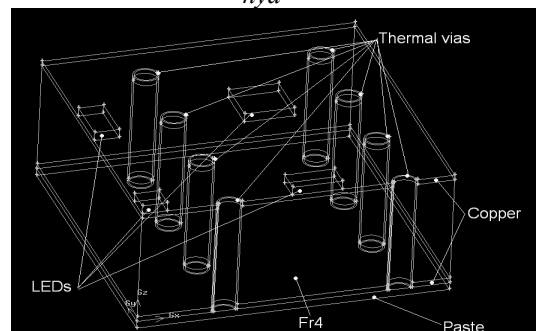
A fent bemutatott részegységekből összeállított be rendezésben kialakuló hő-átviteli folyamat numerikus szimulációja a feladat, amit a FLUENT kereskedelmi szoftver alkalmazásával végeztünk el. Először a numerikus szimuláció előkészítéséhez szükséges tennivalókat ismertetjük, majd ezt követően mutatjuk be a szimuláció számítási eredményeit.

3.1. A számítási tartomány meghatározása

A fenti részegységekből álló **3x3 LED modul** hő-átviteli folyamatának numerikus vizsgálatához az 5. ábrán vázolt számítási tartományt alakítottuk ki. A rendszerben meglévő szimmetria tulajdonságokat felhasználva a **3x3 LED modul**, a hűtőkeret és a befúvó ventilátor által határolt áramlási tér negyedét jelöltük ki a számítási tartományként. Az 5. ábra szerinti elrendezésben a hűtőkeret bordái felfelé helyezkednek el, a befúvó ventilátor pedig az $R=18$ mm és $R=8,5$ mm körgyűrű keresztmetszeten át nyomja be a környezeti levegőt. A felmelegedett levegő a hűtőkeret bordái között áramlik ki a környezetbe. A **3x3 LED modul** pedig ezen az ábrán az alsó síkfelület szimmetria tengelyénél lévő sarkánál alul helyezkedik el.

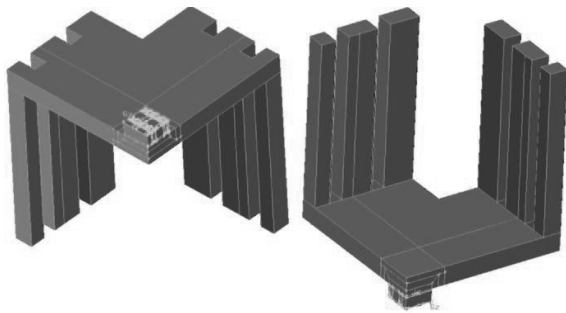


5. ábra. **3x3 LED modul M2** jelű számítási tartománya



6. ábra. **3x3 LED modul M2** jelű testmodellje

A **3x3 LED modul** testmodelljének Gambit-ben kialakított testmodellje a 6. ábrán, a hűtőkeret és a **3x3 LED modul** együttes testmodellje pedig két nézetben a 7. ábrán láthatók.

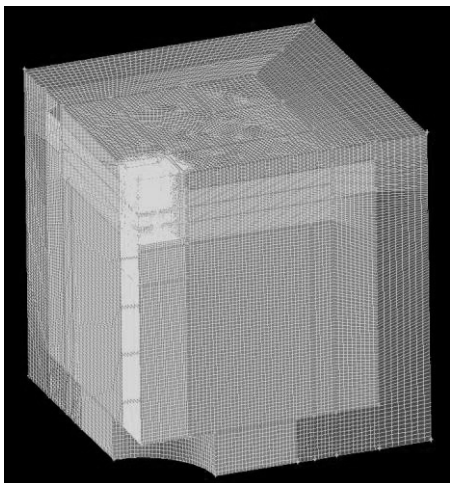


7. ábra. 3x3 LED modul és hűtőkeret M2 jelű testmodellje két nézetben

3.2. A számítási tartomány diszkretizációja

A numerikus szimuláció előkészítésének talán egyik legfontosabb lépése a számítási tartomány diszkretizációjának, vagyis a tartomány hálózásának elvégzése. A hálózási tevékenység nagy figyelmet és gyakorlatot igényel, mivel ennek sikeres végrehajtása igen nagy hatással van a numerikus számítási eredmények pontosságára.

Az 5. ábrán látható M2 jelű számítási modell hálózására vonatkozóan a 8. ábrán láthatunk egy külső képet, ahol a ventilátor elszívó keresztmetszete alul, a 3x3 LED modul pedig a felső síkon, a felénk eső baloldali sarokban helyezkedik el.



8. ábra. M2 jelű teljes számítási tartomány hálózása

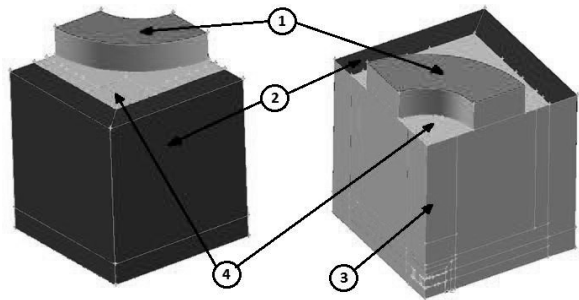
A kialakított numerikus háló elkészítése során 2067563 véges térfogatú elem jött létre, a véges elemek torzultságának maximális értéke pedig 0,8 alatt maradt.

3.3. A feladat peremfeltételei

Az előkészítő tevékenység ugyancsak fontos lépése a számítási tartomány egyes részein előírni a numerikus megoldáshoz feltétlen szükséges peremfeltételeket.

Az ábrán **piros színnel** (1 jelű felület) jelölt negyedkörgyűrűn „massflow inlet” (egy adott tömegáramú beáramlás), a **sötétkék szín** (2 jelű felület): „pressure outlet” (adott nyomású környezetbe történő kiáramlás), a **sárga szín** (3 jelű felület): „symmetry” (szimmetria sík) és **világoskék szín** (4 jelű felület) pedig „wall” (szil-

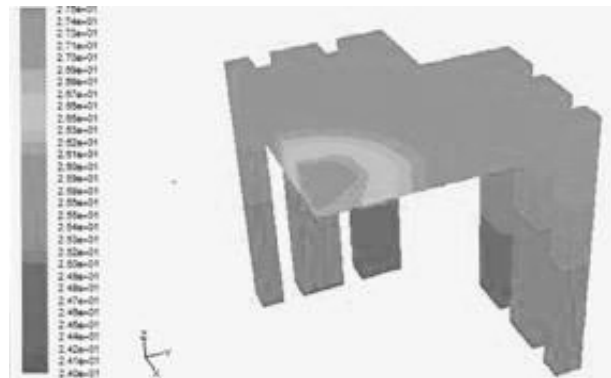
lárd fal) peremfeltételek előírását jelzi. A **3x3 LED modul** minden egyes LED-jénél, azok 0,6x0,6x0,12 mm méretű térfogatába állandó 360 mW fűtőteljesítmény bevitelét írtunk elő.



9. ábra. M2 jelű számítási tartományra vonatkozó peremfeltételek

4. SZÁMÍTÁSI ÉS KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A numerikus futtatás eredményeként elő tudjuk állítani a hőmérséklet eloszlását a teljes számítási tartomány pontjaiban különböző időpontokhoz tartozóan. Egy rögzített időpontra vonatkozó helyszerinti eloszlást a 3x3 LED modul és a hűtőkeret pontjaira a 10. ábra mutat be.

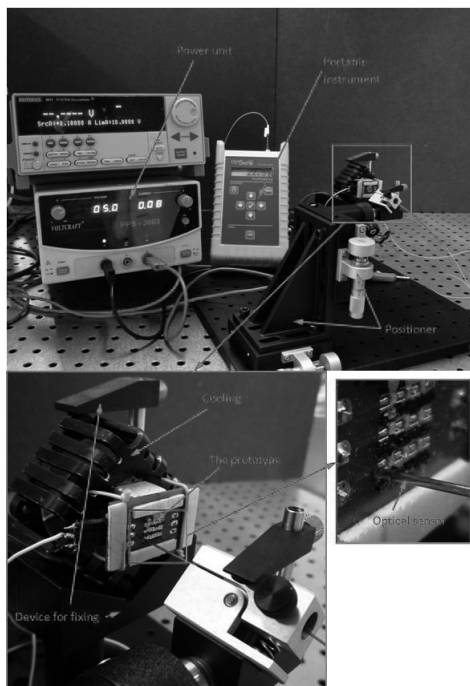


10. ábra. 3x3 LED modulra és a hűtőkeretre vonatkozó hőmérséklet eloszlás a $t=0.2$ s időpillanatban

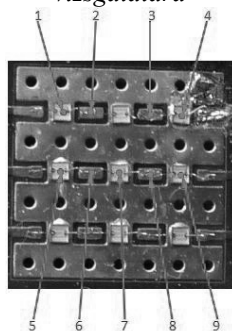
A numerikus szimuláció elvégzésével párhuzamosan laboratóriumi kísérleti vizsgálatok elvégzésére is sor került. Ennek kapcsán a 11. ábrán látható laboratóriumi berendezést alkalmazva a 3x3 LED modul 12. ábrán megjelölt kilenc diszkrét mérési pontjában optikai hőmérséklet érzékelővel meghatározásra került az adott mérési pontban kialakuló felületi hőmérséklet időbeli változása.

A 11. ábrán a tápegység (**Power Unit**), a hordozható hőmérséklet kijelző (**Portable Instrument**) műszerek és az optikai hőmérséklet érzékelő pozicionáló egysége (**Positioner**) láthatók. A baloldali képen a 3x3 LED modul (**The prototype**) és a mögötte lévő hűtőkeret (**Cooling**) képe látszik. A baloldali kép előterében látható az optikai érzékelő és az annak beállítására szolgáló mozgó mechanizmus. A jobboldali fényképen a 3x3 LED modul kismértékben felnagyított képe az optikai hőmérséklet érzékelővel (**Optical sensor**) ismét megje-

lenítésre került. A mérés minden esetben a **3x3 LED modul** szobahőmérsékletű állapotából indul. Először az optikai érzékelő végét a mozgató berendezéssel az adott mérési pontban kontaktusba kell beállítani, majd a **3x3 LED modul** bekapcsolását követően a hőmérséklet időbeli változását regisztrálni. Az új mérés felvétele a **3x3 LED modul** szobahőmérsékletű állapotából indul az előzőekben leírt lépések ismétlésével. A mérés részleteiről itt terjedelmi okok miatt további részleteket nem közlünk. A mért értékeket a szimulációs eredmények validálására kívánjuk itt felhasználni.

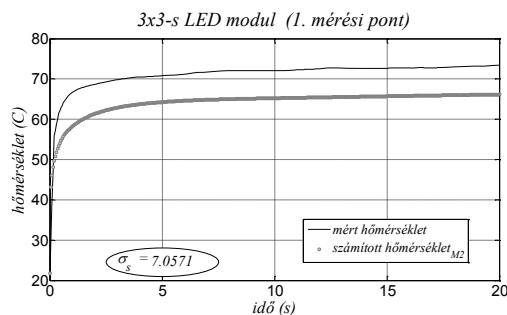


11. ábra. MÉRŐBERENDEZÉS A 3x3 LED MODUL KÍSÉRLETI VIZSGÁLATÁRA

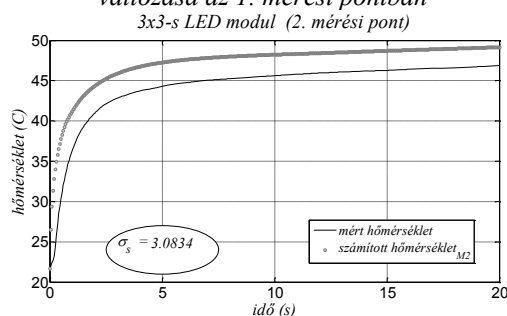


12. ábra. 3x3 LED modul mérési pontok számozása

A kapott számítási és mérési eredményeket az 1. és 2. jelű mérési pontokra vonatkozóan a 13. és 14. ábrákon mutatjuk be. Mindkét ábrán feltüntettük a hőmérséklet mért és a számított időbeli változását és a közöttük kialakuló különbség objektív mérésére azok között meghatározható négyzetes szórás értékeit.



13. ábra. Számított és mért hőmérséklet eloszlás időbeli változása az 1. mérési pontban



14. ábra. Számított és mért hőmérséklet eloszlás időbeli változása a 2. mérési pontban

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A mérés és a szimuláció eredményeinek összehasonlítása minőségileg jó egyezést mutat. A két eloszlás közötti eltérés a mérési módszer és a szimulációs paraméterek megváltoztatása révén javítható. Az összehasonlításból az derül ki, hogy az összes mérési pontra vonatkozóan a LED-ek felületén mért hőmérséklet értékek nagyobbak a szimulált értékeknél. Ez azt valószínűsíti, hogy a tényleges disszipált energia nagyobb a feltételezett értéknél. A LED-ek közötti mérési pontokban a szimulált értékek mindenütt nagyobbak a mért hőmérséklet értékeknél, ami a szimulációnál felvett hőtechnikai anyagparaméterek korrigálásának szükségességét veteti fel.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] Glaab, J.: *Development of UV LED Modules for production technology and water purification*, Ms.C. Thesis, University of Applied Science, (Tutor: Prof. Ralf Hellmann), Ashaffenburg, (2010)
- [2] Varga, Z.: *Numerical Simulation of Heat Transfer Procedure in High Power LED Modules*, Bs.C. Thesis, University of Miskolc & University of Applied Science, (Tutors: Prof. Ralf Hellmann, A. Prof. László Kalmár), Miskolc, (2010).

MODELL DÍZELMOTOR KÍSÉRLETI REZGÉSVIZSGÁLATA

VIBRATION ACCEPTANCE TEST OF A DIESEL ENGINE

Tollár Sándor*, Dr. Lakatos Károly**

ABSTRACT

We started an experimental test of a model diesel engine in Internal Combustion Engine Laboratory of the Department of Fluid and Heat Engineering at the University of Miskolc. Out of the conventional torque-speed curves we recorded the effective vibration velocity (v_{RMS}) – speed curves also. We used the throttle position as parameter for the characteristics. Hopefully we can use our results for example in investigation of the lifetime the rubber mounting of engines.

1. BEVEZETÉS

Belsőégésű motorokat az élet szinte minden területén használnak. E hasznos gépek üzembiztonsága sok külső és belső tényezőtől függ, ezek egy része ma már szabványokban is rögzítve van. A motor konstrukciója a legfontosabb ezek közül, vizsgálatunknak ennek ellenére csak érintőlegesen tárgya ez a körülmény.

Az üzemeltetés során a motor elhasználódik. Jobb esetben csak kopnak a mozgó alkatrészek, és ez a rések megnövekedéséhez, illeszkedési lazasághoz, tömítetlenséghez vezet. Rosszabb esetben lerakódások keletkeznek az égéster és kapcsolt részeinek belső felületén, és ez tovább rontja a kopott motor a mechanikai és a hőtechnikai állapotát. További elhasználódási terület a motortartó bakok fáradása, öregedése, és az ebből következő repedések megjelenése. A felsorolás még hosszasan folytatható volna.

A fantáziánkat meghaladó változatosságú meghibásodások okát képező jelenségek jelentős része lassan következik be, több száz esetleg több ezer üzemóra alatt. A meghibásodások előre megjósolhatók, ha megfelelő diagnosztikai módszerekkel időnként vagy folyamatosan állapotfelügyeleti ellenőrzést végeznek a motoron. Sok ilyen állapotfelügyeleti eszköz van egy-egy gépen: nyomásmérők, hőmérők, volt- és ampermérők, stb.

Nagyon ritka ma még az, hogy az állapotfelügyelet része a rezgésmérés [1], [2]. Pedig még az átlagos gépkocsi tulajdonos is rendelkezik egy nagyon érzékeny műszerrel.

Gyakran halljuk, hogy „de furcsa hangja van ennek a kocsinak”. Ilyenkor legjobb azonnal megkeresni a furcsa hang forrását, mert az előbb utóbb meghibásodás forrása is lehet. Nagy hidegben indított és kellően be nem melegített motorral történő indítás esetén tréfásan mondják, hogy „darabos a benzin”. Ez a motornak a megszokottól eltérő, nagyobb rezgésszintjére utal, amelynek sokféle megnyilvánulása lehet. Például a motor hőtani eredetű torziós lengése esetén rángatva gyorsul a kocsi.

Sokszor nincs különösebb jelentősége annak, hogy szokatlan rezgést érzékelünk a motor működésében [3], [4]. Például bemelegedés után a rések és a kenés szinte maguktól rendbe jönnek. De sokszor a rezgésszint figyelmezteti az üzemeltetőt arra, hogy le kell állni, ha ugyan a motor a megengedhetetlenül kicsi fordulatszám miatt magától „le nem dadog”.

A tanszéki laborban mi egyelőre semmilyen szándékos hibajelenséget nem vizsgáltunk a dízelmotorunk rezgésmérésekor. Egy hitünk szerint jó karban lévő, kifogástalan állapotú motor rezgési jelleggörbéit vettük fel, foglaltuk az össze kagylódiagramon. Erre mindenképpen szükség van annak érdekében, hogy az elhasználódás következtében majd megnövekedő rezgésszintet legyen mivel összehasonlíthatni [5]. [6].

2. A MÉRŐBERENDEZÉS ÉS A VIZSGÁLT DÍZELMOTOR BEMUTATÁSA

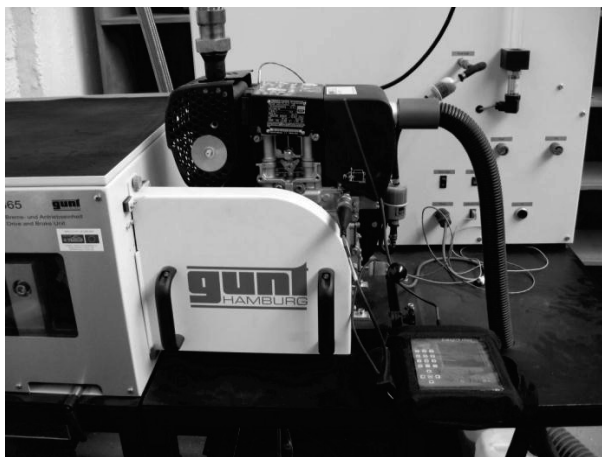
Az 1. ábrán bemutatjuk a Gunt gyártmányú berendezésbe beépített Hatz 1B20-6 típusú dízelmotort, amely vizsgálatunk tárgya. Az egyhengeres négyütemű gép főbb műszaki adatai a következők:

- lökettérfogat $V_f=232 \text{ cm}^3$;
- sűrítési viszony 21:1;
- max. fordulatszám $n=3000 \text{ 1/min}$;
- max. teljesítmény $1,5 \text{ kW}$;
- hajtókarhossz $l=104 \text{ mm}$.

A vizsgált kis stabil motornak szokatlan, fordulatszám-tartó vezérlése van. A korábban elvégzett és itt terjedelmi okok miatt nem ismertethető vizsgálatok eredményei alapján a motor a nyomatéki terhelés elég szélsőséges, 0-100% tartományában $\pm 10 \%$ pontossággal tartja a gázkar által beállított fordulatszámot. Ez azért érdekes, mert a hagyományos, autós szemlélet szerinti jelleggörbe tulajdonképpen nem vehető fel.

*tudományos munkatárs, doktorandusz (aramts@uni-miskolc.hu),

**egyetemi docens (aramlk@uni-miskolc.hu), Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke



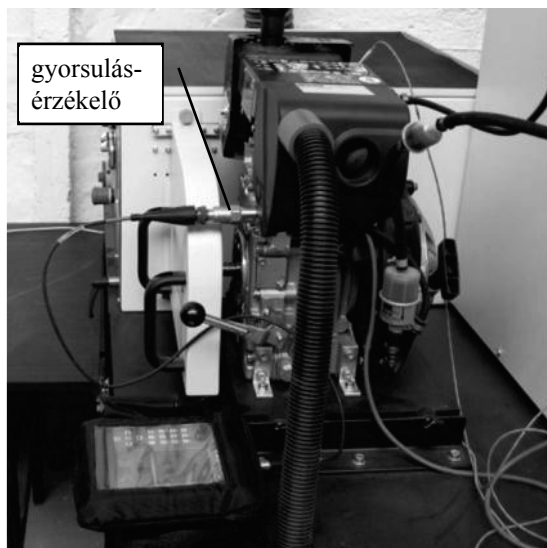
1. ábra. A vizsgált motor és fék előnézeti képe

A motor ékszíjhajtással kapcsolódik az öt fékező egyenáramú generátorhoz. A rendkívül sok mérhető mennyiség közül itt csak a bevezetésben közölt cél érdekében vizsgáltakat soroljuk fel:

- fordulatszám n [1/min];
- nyomaték M [Nm];
- gázkar állása a [osztás];
- effektív rezgésebesség:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T v(t)^2 \cdot dt} \quad [mm/s]. \quad (1)$$

A 2. ábrán látható állapotban a motor hengerfején tengelyirányban áll a piezoelektromos gyorsulásérzékelő.



2. ábra. A motorfékpad oldalnézeti képe

Természetesen mindhárom koordináta irányban végeztünk méréseket, ezek jelölései:

- x tengelyirány;
- y vízszintes síkban az x -re merőleges irány;
- z függőleges irány.

A gyorsulásmérő fej átlagos érzékenysége 100 mV/g . Az itt érvényes fordulatszám értékeknél ennek az alkalmazása célszerű. Nagyobb érzékenységu fejet csak a kis frekvenciatartományokban érdemes használni, ez esetleg egy jövőbeni mérés programja lehet. A 3. fejezetben még érinteni fogjuk e kérdést.

A rezgésmérés eszköze egy EasyViber típusú rezgés adatgyűjtő és analízáló szoftver, amellyel együttműködik a SpectraPro szoftver. A beállított főbb műszaki paraméterek a mérés során:

- felbontás 6400 vonal;
- minimális frekvencia 0,5 Hz;
- maximális frekvencia 3200 Hz;
- ablakfüggvény Hanning.

A műszer kétsatornás, ezt a lehetőséget egyelőre nem vettük igénybe. Két csatorna egyidejű vizsgálatakor ugyanis a felbontás duplájára nő, ezt pedig egyelőre nem akartuk vállalni.

3. RÉSZLETEK A MÉRÉSI EREDMÉNYEKBŐL ÉS AZOK FELDOLGOZÁSÁBÓL

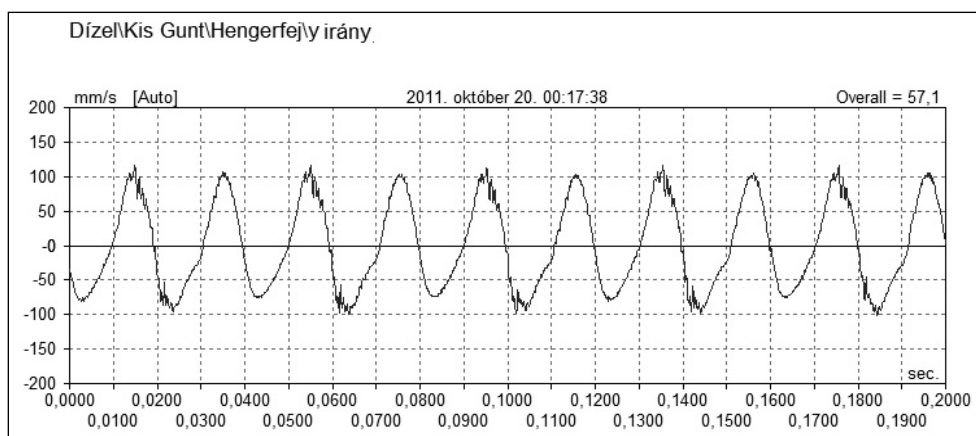
A 2011. év őszen felvett száznál is több időjel közül e dolgozatban csak egyetlen kiválasztottal foglalkozunk, ugyanis annak elemzése képez mintát az összes többinél. A motor mért üzemi jellemzői ebben a mérési pontban:

- $n=3000 \text{ 1/min}$;
- $M=4,5 \text{ Nm}$;
- a gázkar állása $a=1$;
- effektív rezgésebesség $v_{RMS}=57,1 \text{ mm/s}$.

Némi magyarázatra szorul a gázkar állás, mint paraméter értelmezése. Az $a=1$ -es gázkar állás jelentése a mi önkényes definíciónk szerint azt jelenti, hogy a maximális fordulatszámon működő motor maximálisan $4,5 \text{ Nm}$ nyomatékkal fékezhető. E rögzített gázkar állás mellett, természetesen más fékező nyomatékokat is beállítottunk a fékgepen, de terjedelmi okok miatt erre nem tudunk itt kitérni.

A 3. ábrán a vizsgált motor hengerfejére y , tehát a forgástengelyre merőleges vízszintes irányban felerősített gyorsulásmérővel rögzített $a(t)$ gyorsulás-idő függvénynek a t idő szerinti integrálja, a $v(t)$ sebesség-idő függvény látható.

A kapott görbe jellegzetessége, hogy nagyon erősen emlékeztet a szinusz függvényre. A periodikus jelleget persze vártuk, hiszen a belsőégésű motor periodikusan működő gép. Meglepőnek nevezhető az a körülmény, hogy a rezgésjelben tulajdonképpen csak az égési ütem kezdetén és annak végén van egy kis zavar. Az előbbi a befecskendezett tüzelőanyag égése következtében fejlődő forró és nagy nyomású füstgáz által kifejített erő, az utóbbi a kinyíló kipufogószelepen kiáramló gáz hirtelen expanziójának a következménye. Külön érdekesség, hogy befecskendezéskor ez a zavar kisebb, mint a kipufogószelep nyitásakor.

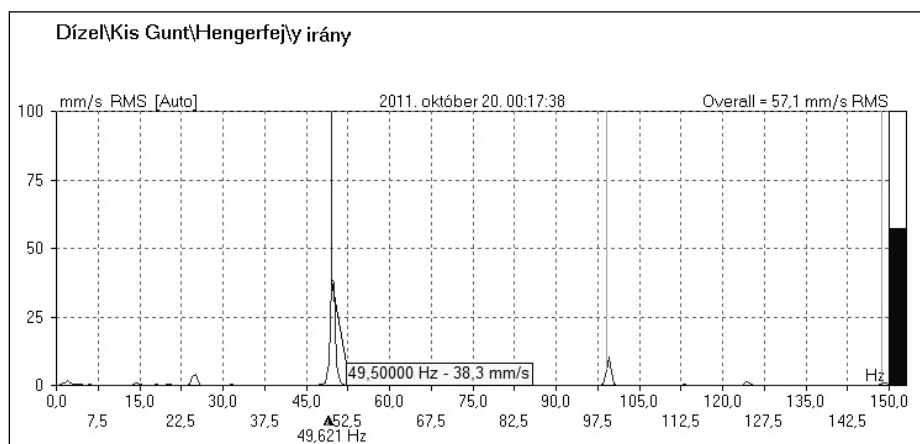


3. ábra. Egy $v(t)$ mért sebesség-idő függvény

A szinusz-szerű görbe 0 értéke körüli torzulásnak oka a forgattyús mechanizmus sajátja. A XIX. század óta ismert, egyszerű számítások alapján adódik, hogy a lökethossz/hajtókarhossz viszonytól függ a dugattyúsebesség időfüggvényének az alakulása. Ezen, ma már publikációra nem érdemes körülmény is érdekessé válhat, ha a

rezgésebbesre gyakorolt hatását vizsgáljuk. Terjedelmi okok miatt itt erre nem térünk ki.

A $v(t)$ sebesség-idő függvény gyors Fourier transzformációjának eredményeképpen adódik a sebességi spektrum, amelyet a 4. ábrán mutatunk be.



4. ábra. A mért $v(t)$ időfüggvényből számított $v(f)$ sebességi spektrum első, leglényegesebb része

A 3. ábrán bemutatott időfüggvény alapvető sajátja, a szinusz függvényre erősen emlékeztető jelleg itt is megjelenik, hiszen a spektrum kimagaslóan legnagyobb csúcsa a forgási frekvencián, $f=49,75$ Hz-en van. A motorfékpad beépített fordulatszám mérő műszere által mutatott 3000 l/min tehát nem pontos, a valós érték $n=60 \cdot f=2977$ l/min . A második legnagyobb spektrumcsúcs a motorfordulatszám kétszeresének megfelelő frekvenciánál van, ennek oka a forgattyús mechanizmus nem végtelen hosszúságú hajtókarja, és ez okozza a $v(t)$ időjel 0 értéke körüli torzulását. A harmadik legnagyobb, és a 4. ábrán még jól látható spektrumcsúcs egy alharmonikus, ez a forgási frekvencia felénél, $24,87$ Hz-nél található. Az alharmonikus frekvencia magyarázata a motorban két fordulatonként bekövetkező robbanásban és kipufogásban, valamint a fél motorfordulatszámmal működő szelepvezérlő mechanizmus működésében található meg.

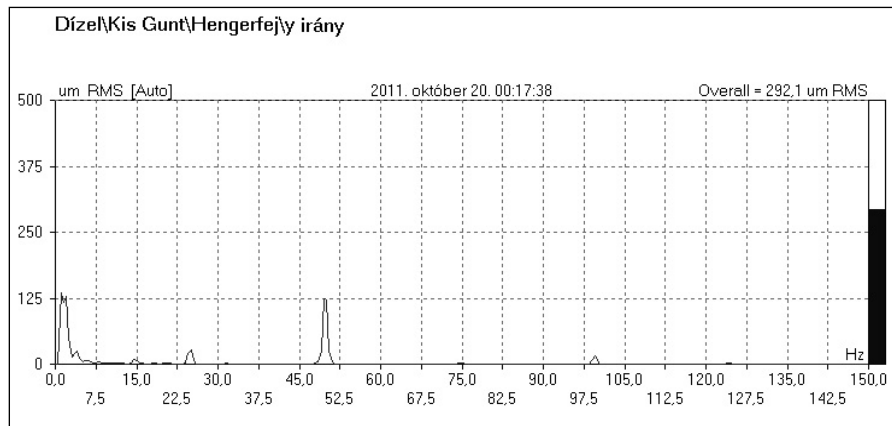
Az eddig említettél kisebb spektrumcsúcsok a 4. ábrán szabad szemmel már alig vagy egyáltalán nem fedezhe-

tők fel. A negyedik legnagyobb spektrumcsúcs a forgási frekvenciához nem köthető, mert $1,89$ Hz-nél van. Ennek a magyarázatát teljes bizonyossággal nem tudjuk megadni, további konzultációra váró kérdés ez. Elképzelhető, hogy a 100 mV/g érzékenységű gyorsulásmérő fej alsó érzékenységi határának közelében van az $1,89$ Hz-es frekvencia érték, ezért a $0-2$ Hz-es tartományt célszerű volna egyszerűen levágni. Az ötödik legnagyobb spektrumcsúcs $193,03$ Hz-nél van, ami a forgási frekvencia negyedik felharmonikusa. A következő meglepetés a hatodik legnagyobb spektrumcsúcs, amely az előző kétszeresével majdnem azonos magasságú, és $74,63$ Hz-nél, tehát a forgási frekvencia másfélszeresénél található. Ez az első alharmonikus frekvencia háromszorosa. Magyarázatunk erre az értékre egyelőre nincs. A hetedik legnagyobb spektrumcsúcs $223,88$ Hz-en, tehát az első alharmonikus kilencszeresénél található. A nyolcadik legnagyobb spektrumcsúcs $124,35$ Hz-en, az első alharmonikus ötszörösénél van. Az itt elemzettél jóval nagyobb frekvencia-

tartományban is vannak fontos spektrum csúcsok, ezek már inkább az égés és a kipufogás, másodsorban a szívás és a sűrítés következtében kialakuló nyomáslengések miatt jelennek meg.

Belsőégésű motorok esetében, különösen a rugalmasan

meztámasztott blokkoknál gyakori az alapjáraton történő igen nagy amplitúdójú lengés. Ezért érdemes nem csak a rezgés szempontból szokásosnak nevezhető $v(f)$ sebesség spektrumon kívül az $X(f)$ kitérés spektrumot is vizsgálni. Az 5. ábrán mutatjuk az eredményt.



5. ábra. A mért $v(t)$ időfüggvényből számított $X(f)$ elmozdulás spektrum

Az elmozdulás spektrum sajátosságai a következők. Két, egymással majdnem egyenlő magasságú nagy spektrumcsúcs látszik. Ezek közül az 1,18-1,76 Hz közötti tulajdonképpen kétpúpú. Az 1,76 Hz már a $v(f)$ sebességi spektrumban, ha nem is teljes pontossággal egyező módon már megjelent. Ott ennek pontos magyarázatát nem sikerült adni, a gyorsulásérzékelő fej alsó mérés határa miatti hiba lehetősége is felmerült. Az e frekvenciákon érvényes $X_{RMS} = 180 \mu\text{m}$ -es effektív kitérés mindenképpen figyelemre méltó. Később esetleg érdemes lesz a kettős amplitúdót is megnézni, mert a gép tényleges kilengésének mértékét ez mutatja pontosabban. A másik ilyen nagyobb, 174,2 μm -es magasságú amplitúdó csúcs 49,74 Hz-en, a forgási frekvencián jelentkezik.

4. TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK

Munkánk folytatásának első részeként a spektrumok alaposabb analizését tervezzük. A bemutatott rezgéspektrumoknak még nem mindegyik csúcsát tudjuk értelmezni, ez megfejtést igényel. Nem tudjuk még, hogyan foglaljuk össze a sok spektrumot annak érdekében, hogy azok egymással összehasonlíthatók legyenek. Nem egyszerűen arról van szó, hogy a szoftverünk nem tud pl. vizesés diagramot készíteni. Kétséges ugyanis, hogy a vizesés diagram alkalmas-e a nem azonos fordulatszámokon elvégzett mérések eredményeinek összehasonlítására. A spektrumanalízis egyik érdekes fejezete lehet a különböző irányú rezgésmérések eredményeinek elemző összehasonlítása. További lehetőség a dinamikai számítások és a mérési eredmények összehasonlítása. Munkánk folytatásának második részeként a vizsgált dízelmotor effektív rezgéssebesség kagylójának publikálása fog megtörténni.

Egy újszerű lehetőség a motorfordulat csökkentésének hatása a rezgés képre. Bizonyos fordulatszám alatt a mo-

tor lefullad. Eszközeink lehetőséget adnak a lefulladás jelenségének vizsgálatára. Ez azért lényeges, mert a lefulladó motor kilengése nagy lehet, és erre méretezni kell a motorteret.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a tanulmány és kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

6. HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] BÁNLAKI, P., KULCSÁR, Sz.: Monitoring the Operation of Internal Combustion Engines Using Order Analysis of Noise and Vibration Data, Journal Of Machine Manufacturing Volume XLIX.2009 Issue E3-E5 pp 142-144
- [2] BRUEL & KJAER: What is order Analysis and What is used for, B&K 1999, www.bksv.com
- [3] DENTON, T.: Advanced Automotive Fault Diagnosis, Butterworth-Heinemann 2006, ISBN 0750669918 pp. 98-121
- [4] DIETSE, H.: Automotive Sensors, Robert Bosch GmbH, 2005, ISBN 978-3-86522-049-3
- [5] DÖMÖTÖR, F. (szerk.): Rezgésdiagnosztika I. Főiskolai Kiadó Dunaújváros 2008, ISBN 978-963-87780-0-0 pp. 249-261
- [6] FANTANA, N. E: Study Regarding Vehicle Noise Analysis, ANNALS of the ORADEA University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VI (XVI), 2007, pp 447-450

CONTENTS

1. Tisza M., Török I., Kocsisné Baán M.
Innovative materials processing technologies.....3
The authors reported their research made in the framework of the TÁMOP project at the University of Miskolc in the research team entitled Innovative materials processing. Research in this group is performed in the following topics: Welding, Heat-treatment and Surface Engineering, as well as Metal Forming. In this paper, the main objectives of these research activities, as well as the results achieved during the first period of the project are shortly introduced.
2. Meilinger Á., Török I.
The application of friction stir welding of aluminium alloys7
The friction stir welding is a new and unusual welding process, which is spreading more and more in different fields of industry. It is economically usable for welding of aluminium and its alloys, copper and its alloys, although current researches are very promising for steel as well. The research points out that high quality welds can be made by the correct selection of technological parameters.
3. Kovács A., Varga Gy.
Experimental results of minimum quantity lubrication drilling of wear resistant steel.....11
This article aims to give an overview about how during the cutting procedure a) the feed direction force that is the thrust, b) the cutting torque, c) the tool wear, d) the change of surface roughness, if the cutting is done under near dry conditions using different cutting speeds and feed rate parameters.
4. Kunderák J., Pálmai Z., Gyáni K.
The technological conditions of white etching area in hard turning.....15
In this paper the authors deal with the technological conditions of the development of this white etching area on the surface of the bore hole of cogwheels made of 20MnCr5 steel. They conducted experiments with various technological parameters. As a result of these experiments, we elaborated an empirical formula by which we can decide if a white etching area can be expected to develop in a particular case.
5. Maros Zs.
Investigation of abrasive waterjet cutting of an aluminium alloy19
Efficiency and quality of the waterjet cutting process can be characterised by different output parameters, like surface roughness of the machined surface, geometry of cutting kerf (depth, width, tapering). Some results of experiments carried out for investigation of efficiency and quality of cutting of aluminium alloy surfaces are summarised in the paper.
6. Pálmai Z.
The relationship of machine rigidity and tool endurance in cutting23
Vibrations play an important role among the reasons for the well-known scatter of tool life in cutting. In vibration, the results of the equation solved by taking fluctuating cutting speed and feed into consideration clearly show that wear rate in vibration hardly depends on frequency but intensity has a major impact. The unfavourable effect may be mitigated by increasing the rigidity of the machine.
7. Bencs P., Szabó Sz.
Improvement of measurement techniques for analysis of unsteady air temperature field.....27
Temperature field measurements around solid bodies (where the temperature of the body is different from the ambient temperature) are particularly difficult when the body is placed in air flow and the velocity and temperature fields are unsteady. The objective of this article is to report on progress made in this research, particularly on our newest results for the two techniques used, standard Schlieren method and Background Oriented Schlieren (BOS) technique.
8. Bolló B.
Flow around a heated circular cylinder.....31
Numerical investigation were carried out to study the effect of cylinder heating on the characteristics of the flow and heat transfer in a two-dimensional laminar flow of air past a heated circular cylinder for Reynolds numbers of 150. The effect of dynamic viscosity, density, thermal conductivity and specific heat variations on the fluid dynamics occurring with the cylinder heating was analyzed separately.
9. Hajdú S., Lakatos K.
Cross-flow turbines with pitch controlled blades35
A characteristic feature of cross-flow turbines is a strong fluctuation in the circumferential force that generates axle power, because the interaction between the blades and the medium is not constant. This paper is about how to improve the efficiency of the turbine using active pitch control.
10. Kalmár L., Janiga G., Fodor B., Varga Z., Soltész L.
Numerical investigation of the flow in one-stage blower.....39
This paper deals with the CFD investigation of the flow in a one-stage radial flow blower-aggregate. The main aim of this numerical study is to compute the relevant operating characteristics of the blower and to determine detailed information about the flow characteristics inside it.
11. Kalmár L., Hellmann R., Rékert T., Varga Z.
Numerical investigation of unsteady heat transport procedure in high power LED module.....43
High power UV LED modules still generate a significant amount of heat that has to be efficiently dissipated in order not to decrease the LED output power and lifetime. The scientific task includes the simulation of the temperature development on the high power UV LED module taking into account the environment of the module and also the active air cooling.
12. Tollár S., Lakatos K.
Vibration acceptance test of a diesel engine47
The authors started an experimental test on a model diesel engine. Out of the conventional torque-speed curves we recorded the effective vibration velocity (vRMS) curves also. They used the throttle position as parameter for the determination of the engine characteristics.

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

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

Dr. Döbröczöni Ádám

President of Editorial Board

Vesza József

General Editor

Dr. Jármai Károly

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

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás 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. Szűcs Edit

Cooperation in the editing:

Dr. Jármai Károly

Dear Reader,

The first issue of the journal Gép contains the research results, which are elaborated in the 4th Centre of Excellence, entitled Innovative Mechanical Engineering Design and Technologies at the University of Miskolc and made within the framework of the TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project supported by the European Union and co-funded by the European Social Fund. The activity of the Centre of Excellence is serving the research, development, innovation and the education. The Centre aim is to develop the research potential by research in which innovative modelling, design and technological processes are implemented. This is in line with the European Union's drive to encourage innovation in the most efficient way, using environmentally friendly technologies and improve them.

The Centre of Excellence is divided into seven Scientific Workshops, which are department related. These are: Mechanical Technology, Production Engineering, Fluid and Heat Engineering, Chemical Machinery, Mechanics, Machine and Product Design and Materials Handling and Logistics Departments. The teachers involved BSc, MSc and PhD students into the research, so that they provide a good opportunity to young people to familiarize themselves with the scientific work. During the three-quarter-year of operation of the Centre of Excellence several students already provided outstanding performance and quality of so called TDK (Science Student Team) works.

What kind of scientific topics are covered by the Scientific Workshops? The research has a complex and interdisciplinary nature. Within the design themes a new generation of finite element models and procedures can be found, which are developed to model the structures more efficiently and reliably. Dealing with optimization of structures and systems several optimization techniques are employed. To examine the product life cycle, technical systems, powertrain architecture, principles of environmental and alternative fuel use is related to research, as well as flow and thermal laboratory and numerical modelling is linked to a number of studies. The engineering of environmentally friendly technologies, organic chemistry, as well as continued testing technologies and Energy rationalization occurs. Mechanical material tests and modelling are significant for the professional and technical computer-aided process design, as well as the precision finishing manufacturing of high strength steels. We have highlighted only some of the research topics from the different disciplines. These articles in this journal serve the purpose to show the Scientific Workshops' latest scientific results in the Centre of Excellence.

Prof. Dr. Károly Jármai
leader of the Center of Excellence

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.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

Responsible Publisher: Dr. Igaz Jenő Managing Director

<http://www.gepujsag.hu>

Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67.

Price per month: 1260 Ft.

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.