

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK VISSZARUGÓZÁSÁNAK MODELLEZÉSE ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

LUKÁCS ZSOLT

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLOGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

Miskolc, 2014.

Az ismertetett kutató munka a **TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001** projekt eredményeire alapozva a **TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029** jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Ezúton köszönöm meg a kutatómunkámhoz nyújtott támogatást.

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK VISSZARUGÓZÁSÁNAK MODELLEZÉSE ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

LUKÁCS ZSOLT

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK TÉMATERÜLET
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLOGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TÉMACSOPORT VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

DR. TISZA MIKLÓS

A MŰSZAKI TUDOMÁNY DOKTORA, EGYETEMI TANÁR

Miskolc, 2014.

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Dr. Jármai Károly**
DSc, egyetemi tanár, ME Logisztikai Intézet
- titkár: **Dr. Jakab Endre**
CSc, c. egyetemi tanár, ME Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
- tagok: **Dr. Czinege Imre**
CSc, egyetemi tanár, Széchenyi István Egyetem
- Dr. Nándori Frigyes**
PhD, egyetemi docens, ME Műszaki Mechanikai Intézet
- Dr. Rácz Pál**
PhD, egyetemi docens, Óbudai Egyetem

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Dr. Halbritter Ernő**
PhD, egyetemi docens, Széchenyi István Egyetem
- Dr. Szabó Ferenc**
CSc, egyetemi docens, ME Gép- és Terméktervezési Intézet

1. BEVEZETÉS

1.1 ELŐZMÉNYEK

Az utóbbi néhány évtizedben az autóipar, a felhasznált lemezanyagok tekintetében, jelentős változásokon ment át. Ez az átalakulás napjainkban is folyamatos, az egymás után megjelenő új fejlesztésű lemezanyagoknak köszönhetően. A változások egyik fő mozgatórugója a környezettudatos gondolkodásmód kialakulása és ezzel párhuzamosan a környezetvédelmi előírások fokozatos szigorítása.

Az autóipari szereplőket, akik az általuk előállított termékekkel jelentősen hozzájárulnak a káros anyag kibocsátás fokozatos növekedéséhez, különböző nemzetközi egyezmények a kapcsolódó szankciókkal kiegészítve, folyamatosan a gépjárművek légszennyezési mértékének csökkentésére kényszerítik. A gépjárművek káros anyag kibocsátásának csökkentésére két alapvető út áll a rendelkezésre. Az első a szennyezésért leginkább felelős szénhidrogén tüzelőanyaggal működtetett belső égésű motorok fejlesztése, esetleges alternatív üzemanyaggal történő kiváltása.

A másik jelentős fejlesztési irány a gépjárművek tömegének csökkentése. Több – e témakörben készült – tanulmány megállapításaira, eredményeire támaszkodva kijelenthető, hogy a gépjárművek tömegének jelentős részét a karosszéria teszi ki. Önmagában a karosszéria tömegének csökkentése is nagy kihívás elé állítja a tervező mérnököket, hiszen a karosszéria az elsődleges védelmi vonal egy esetleg bekövetkező balesetben. Ezzel párhuzamosan a gépjárművekre vonatkozó biztonsági előírások folyamatos szigorítása is megfigyelhető. Ezért a tömegcsökkentést úgy kell végrehajtani, hogy eközben a fokozott biztonságra törekvést folyamatosan szem előtt kell tartani [1]. Nyilvánvaló, hogy ezeknek a kihívásoknak a hagyományos lemezanyagok nem felelnek meg.

Az utóbbi néhány évtizedben az autóipari alapanyag beszállítók folyamatos kutatásainak eredményeként számos új lemezanyagot fejlesztettek ki, amelyek egyre inkább eleget tesznek a komplex követelmények által támasztott kihívásoknak [2], [3], [4]. Az autóiparban mindennaposá váltak a különféle nagyszilárdságú (*HSLA*), Extra- és Ultra- nagyszilárdságú (*X-AHSS* és *U-AHSS*) acélok és a különféle könnyűfémekből (*Alumínium*, *Magnézium*) készült lemezanyagok. Jelenleg egy alsó közép kategóriás gépjárműben is legalább 10-15 féle anyagminőségű lemezt használnak fel. Felső- és luxus kategóriás gépjárművek esetén, ez meghaladhatja a 20-25 féle anyagminőséget is. A lemezanyag választék növelésével az alkatrész tervezés során kialakult egy olyan tervezési szemlélet, hogy egy adott alkatrész tekintetében azt a lemezanyagot kell az anyamegválasztásnál előnyben részesíteni, ami a tervezhető igénybevételeket a lehető legkisebb tömeg mellett képes elviselni.

A kifejlesztett új anyagok a technológiai folyamatban korábban nem tapasztalt jelenségeket is eredményeztek, vagy ismert jelenségeket nem várt mértékben felnagyítottak, ezzel számos kihívás elé állítva a technológus mérnököket. Jó példa erre a nagyszilárdságú lemezanyagok nagymértékű visszarugózása.

Bonyolult geometriai kialakítású alkatrészek esetén a lemezben kialakuló inhomogén alakváltozási és feszültségi mező a teljes geometria tekintetében, a klasszikus tapasztalati képletek alkalmazásával szinte megbecsülhetetlen visszarugózási elmozdulásokat hozhat létre. A visszarugózás utáni geometria ismerete azért fontos, mert ez alapján lehet az alak- és méretpontos gyártást lehetővé tevő, visszarugózásra kompenzált alakadó szerszámfelületeket megtervezni, elkészíteni.

Napjaink mérnöki tevékenysége elképzelhetetlen az adott célterületekre kifejlesztett számítógépes alkalmazások nélkül. Nincs ez másként a lemezalakítás területén sem. Az autópárhuzban a technológia- és szerszámtervező mérnökök napi szinten alkalmaznak valamilyen, az alakítási folyamatok virtuális térben történő elemzését lehetővé tevő programokat. E programok, amelyek legtöbbször végeeselemes elven működnek, a folyamatok modellezése során célszerűen megválasztott anyagmodelleket használnak. Általános elvként megfogalmazható, hogy a modellalkotás részletességét mindig az eredmények szempontjából legkritikusabb jelenségek határozzák meg.

Az ún. hagyományos lemezanyagoknál a több évtized alatt kidolgozott anyagmodellek a gyakorlat szempontjából kielégítő eredményeket szolgáltattak. Az új fejlesztésű autópárhuz lemezanyagok megjelenésével viszont a gyakorlat számára már nem elfogadható mértékben megnövekedett a végeeselemes vizsgálatok pontatlansága. Szükségessé vált tehát a különféle programrendszerekben alkalmazott anyagmodellek tovább fejlesztése, az új anyagok viselkedését jobban leíró anyagmodellek megalkotása. Az anyagmodellek fejlesztésére irányuló kutatások alapján kiderült, hogy a nagyszilárdságú lemezeknél, a ciklikus igénybevételek során már régóta ismert Bauschinger hatás nem várt mértékben előtérbe került [5].

Az Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézetben több mint egy évtizede használjuk a lemezalakítás numerikus modellezésére az AutoForm nevű szoftvert. Az AutoForm célzottan az autópárhuz lemezalakítási folyamatok végeeselemes elven működő célszoftvere [6]. Alapanyag adatbázisa tartalmazza az autópárhuzban járatos lemezminőségek jelentős részét, köztük a nagyszilárdságú lemezanyagokat is. Széles körben elterjedt az autópárhuzban a mindenki által elismert pozitív referenciái miatt. Alkalmazásával Intézetünk is számos ipari megbízást sikerrel teljesített [7], [8].

A szélesebb körű alkalmazás során azt tapasztaltuk, hogy az AutoForm által felajánlott, a kinematikus keményedéssel összefüggő paraméterek, viszonylag széles alapanyag tartományra vonatkozóan lényegében nem változnak, azaz az anyagszerkezet szempontjából

jelentősen különböző lemezanyagokat is egy tartományon belül ugyanazon anyagparaméterrel kezeli a program.

Joggal merült fel a kérdés, hogy lehet-e szövetszerkezeti szempontból jelentősen különböző anyagok visszarugózását ugyanazon paraméterekkel leírni: e kérdés megválaszolása, tisztázása érdekében alakítástechnikai kutatásaimban ez a terület kiemelt jelentőségre tett szert.

1.2 CÉLKITŰZÉS

Már a kutatómunka elején világossá vált számomra, hogy a terület fokozott specialitása miatt az izotróp-kinematikus anyagmodellek anyagparamétereinek vizsgálatára alkalmas egyetemes vizsgáló berendezést nem fogok találni. Ezért szükségessé vált egy az Intézeten belüli mérések elvégzésére alkalmas mérőkészülék tervezése.

- *Ezért elsődleges célkitűzésként lemezek ciklikus alakváltozási vizsgálatainak megvalósítására alkalmas mérőkészülék tervezését, kifejlesztését tűztem ki célul. E célkitűzés megvalósításához elengedhetetlenül szükséges a ciklikus alakváltozási vizsgálatok megvalósítását lehetővé tévő mérőkészülékek tématerületén végzett elemző és értékelő irodalom feldolgozás.*

A megvalósítandó mérőkészülék segítségével lehetőség nyílik a napjainkban kiemelt jelentőségű nagyszilárdságú autóiipari lemezanyagok izotróp-kinematikus keményedésre vonatkozó anyag-paramétereinek meghatározására. A Bevezetésben is áttekintett anyagfejlesztési eredményekből nyilvánvaló, hogy a vizsgálatok szempontjából szóba jöhető lemezanyagok választéka nagyon széles. A különféle lemezanyagok nagyszilárdságú viselkedését is különféle anyagszerkezeti elveken működő mechanizmusok eredményezik. Ezért a szóba jöhető lemezanyagok tartományát a vizsgálat céljára leszűkítettem az autóiiparban széles körben elterjedt ún. DP (*Dual Phase*) kettősfázisú, ferrit-martenzites lemezanyagokra.

- *Az előzők figyelembevételével célul tűztem ki a megtervezett és legyártott mérőkészülék segítségével a nagyszilárdságú autóiipari lemezanyagok klasszikus anyagminőségének tekinthető DP600, DP800 és DP1000 acélminőségek visszarugózás szempontjából meghatározó fontosságú anyagparamétereinek meghatározását és annak vizsgálatát, hogy az egyes típusoknál hogyan változnak a kritikus anyagparaméterek.*

Eddigi tudományos kutatásaimban az alakítási folyamatok végeselemes modellezése kiemelt szerepet töltött és tölt be jelenleg is. A különféle végeselemes programrendszerek alkalmazásának egyik kulcskérdése az alkalmazott anyagmodellek pontossága, megbízhatósága.

- *Kutatási célkitűzéseim között ezért az előző pontban vázolt anyagparaméterek meghatározásának egyik elsődleges céljaként fogalmaztam meg olyan végeselemes modellezések, összehasonlító elemzések elvégzését, amelyekkel az alkalmazott anyagmodellek pontosságát, megbízhatóságát is igazolhatom.*

2. A FELADATOK MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Az *elméleti kutatómunka* során, irodalomkutatásra alapozva, foglalkoztam a lemezek alakítási folyamatainak végeselemes elven történő modellezése területén alkalmazott anyagmodellekkel, ezek közül is kiemelten az izotróp-kinematikusan keményedő anyagmodellekkel [9]-[14]. A modellek tanulmányozása során megállapítottam, hogy a visszarugózási folyamat egyre pontosabb meghatározásához elengedhetetlen a Bauschinger-hatás egyes részfolyamatainak leírásához szükséges anyagparaméterek adott anyagminőségre vonatkozó pontos meghatározása.

Az izotróp-kinematikus keményedést leíró anyagmodellek kinematikus viselkedésével összefüggésbe hozható anyagparaméterek meghatározása ciklikus alakváltozási vizsgálat során történhet. Ennek végrehajtása többféle anyagvizsgálati módszerrel lehetséges. Először irodalomkutatás alapján összefoglaltam milyen módszerekkel lehetséges ciklikus alakváltozási vizsgálatokat elvégezni [15]-[28]. Az egyes módszerek megismerése során összefoglaltam az egyes mérési módszerek előnyeit, hátrányait és ezek ismeretében kidolgoztam egy lehetséges mérési készülék kifejlesztésének irányvonalát.

Az előbbieket ismeretében egy lemezsorral megtámasztott ciklikus húzó-nyomó vizsgálati készüléket terveztem és valósítottam meg. A lemezsorral történő megtámasztás az irodalmi áttekintés alapján merőben új elvnek számít. A próbatest felületéhez szorított támasztó lemezek követik a próbatest hosszváltozását mind húzó, mind nyomó irányban. Ez a megtámasztási elv a többi módszernél bemutatott, és azok egyik legnagyobb hátrányaként említhető, súrlódás hatását minimalizálja.

A *kísérleti kutatómunka* során a lemezsorral megtámasztott húzó-nyomó mérőkészülék segítségével ciklikus alakváltozási hiszterézis görbéket vettem fel a vizsgált ferrit-martenzites lemezanyagokon. Az alakváltozási tartomány kiterjesztését előalakított próbatestek segítségével valósítottam meg. A mérés során felvett alakváltozási hiszterézis görbék felhasználásával az izotróp-kinematikus anyagmodellek kinematikus viselkedését meghatározó anyagparamétereket a vizsgált anyagokra meghatároztam.

Az anyagparaméterek pontos értékeinek hatását a visszarugózott geometriára az AutoForm programrendszerben végzett numerikus szimulációval vizsgáltam. Az összehasonlító elemzést a témában elfogadott, a Numisheet'93 konferencián bemutatott benchmark vizsgálat alakítási folyamat paraméterei szerint végeztem el [29].

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1. A ciklikus alakváltozási lemezvizsgálatok mérőkészülékeinek területén végzett irodalomkutatás tapasztalatainak felhasználásával a lemez próbatestek nyomó igénybevételi tartományon bekövetkező kihajlását, merőben új elven megakadályozó ciklikus húzó-nyomó mérőkészüléket terveztem és valósítottam meg (3), (6), (15).
- (a) A ciklikus húzó-nyomó mérőkészülékek elemző vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a kihajlás bekövetkezésének megakadályozására tervezett megtámasztó egységek közül az olyan elven működőket kell előnyben részesíteni, amelyeknél a számos bizonytalanságot okozó súrlódási hatás a lehető legminimálisabb.
- (b) A mérőkészülék tervezésénél olyan megoldást kell alkalmazni, amely adott esetben a mérést egy állandónak tekinthető kompenzációs értékkel figyelembe vehető mértékben befolyásolja, szemben a mérésre esetleg kisebb hatást gyakorló, de csak sztochasztikus kompenzációs értékkel figyelembe vehető megoldásokkal.
- T2. Nagyszilárdságú autóiipari lemezanyagok visszarugózási jelenségének numerikus modellkísérletei alapján, összhangban az alakítási kísérletek tapasztalataival, a következő megállapítást teszem (2), (4), (5).
- (a) Ciklikus képlékeny alakváltozás során a Bauschinger-hatás eredményeként bekövetkező (látszólagos) rugalmassági modulus csökkenés szoros kapcsolatban van az alapanyag szilárdságával és szövetszerkezetével.
- (b) A visszarugózás mértéke szorosan összefügg a ciklikus képlékeny alakváltozás hatására bekövetkező rugalmassági modulus csökkenés mértékével: nagyobb mértékű rugalmassági modulus csökkenés – azonos szilárdság (*folyáshatár*) esetén – nagyobb mértékű visszarugózást eredményez.
- T3. Nagyszilárdságú lemezanyagok ciklikus húzó-nyomó vizsgálata során felvett feszültség-alakváltozási hiszterézis görbék elemzése alapján megállapítottam, hogy az állandó alakváltozási mértékű ciklusok hatására az anyag az ún. telítési (*saturation*) diszlokációs szerkezetet az előalakítás függvényében kezdetben alulról (*keményedve*), majd egy kritikus előalakítási mérték után felülről (*lágylva*) közelíti. Különböző előalakítási értékekkel elvégzett kísérleti vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy minél nagyobb a lemezanyag szilárdsága (*folyási határa*), annál kisebb az a kritikus előalakítási érték, amelynél a ciklikus keményedés, ciklikus lágylásba vált át (2), (4), (5).

- T4. DP600, DP800 és DP1000 minőségű ferrit-martenzit szövetelemeket tartalmazó kettős-fázisú (*Dual-Phase*) anyagok mérési eredményei alapján meghatározott izotróp-kinematikus keményedési viselkedést mutató anyagmodellek anyagparamétereinek vizsgálati eredményei alapján megállapítottam, hogy a visszarugózás szempontjából meghatározó anyagparaméterek még ugyanazon anyagcsoportba tartozó lemezanyagok esetében is a szövetelemek mennyiségi arányaitól függően különböznek (4), (15).
- (a) A lemezalakítás numerikus modellezése terén általánosan alkalmazott izotróp-kinematikus anyagmodellek γ , χ és K anyagparamétereit numerikus érzékenységi vizsgálatokkal elemezve megállapítottam, hogy a kettős-fázisú (*DP*) anyagok esetén a visszarugózás mértékének szempontjából a γ és K paramétereknek van jelentősebb hatása.
- (b) A kettős-fázisú (*DP*) anyagok γ anyagparamétere alapvetően a ferrit-martenzit arány függvénye. A vizsgálati eredmények elemzéséből megállapítottam, hogy minél nagyobb a kettős-fázisú (*DP*) anyagok százalékos ferrit aránya annál kisebb a visszarugózása is.

4. HASZNOSÍTÁS ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉS LEHETŐSÉGEI

A kutatómunka ipari hasznosítási lehetőségei közül a legmeghatározóbb, hogy a kapott eredmények az anyagparaméter tartományokat finomítva a gyakorló technológus mérnökök számára szolgáltatnak a visszarugózási folyamatok pontosabb leírására alkalmas anyagparamétereket a DP acélok egy meghatározott (*vizsgált*) tartományára (*DP600, DP800 és DP1000*). Ennek nyilvánvaló pozitív eredménye, hogy a termék- és szerszámtervezési fázis időigénye csökken, a szerszámpróbák hatékonyabbá tehetők, az egyes termékek bevezetési ideje lerövidíthető, összességében a tervezés és a gyártás gazdaságosabbá tehető.

Továbblépési, továbbfejlesztési lehetőségek, számos területen fogalmazhatók meg. Az egyik legkézenfekvőbb továbbfejlesztés az autóiiparban jelentős szerepet betöltő DP acélok nagyobb tartományára kiterjeszteni a vizsgálatokat. Vizsgálataim és a szakirodalmi háttér alapján is az a véleményem, hogy a nagyobb martenzit-ferrit aránnyal rendelkező nagyszilárdságú ötvözeteknél a visszarugózás szempontjából lényeges paraméterekben az eddigiek során tapasztalt értékeknél is markánsabb különbségek lehetnek.

Ugyancsak érdemes további vizsgálatokat végezni a szilárdságnövelést más anyagszerkezettani mechanizmusokkal biztosító ötvözetekkel (*pl. TRIP, TWIP, X-AHSS, U-AHSS acélok*). Végző soron a vizsgálatok ilyen irányú kiterjesztésével, az autóiiparban járatos lemezminőségek visszarugózását megbízhatóbban leíró anyagmodellek kidolgozása, az új anyagmodellek anyagparamétereinek pontosabb meghatározása és ezeket egységes rendszerbe foglaló anyagkatalógus készítése lehet egy további célkitűzés.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

IDEGEN NYELVŰ

- (1) Tisza, M., Lukács, Zs.: *Computer aided process planning and die design in simulation environment in sheet metal forming*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1567 (2014) pp. 1002-1007. DOI: 10.1063/1.
- (2) Lukács, Zs., Tisza, M.: *Formability investigations of advanced high strength steels*, IDDRG 2014, Paris, France, 1-4. June 2014.
- (3) Tisza, M., Lukács, Zs.: *Modelling and experimental investigation of large strain cyclic plastic deformation of high strength dual-phase steels*, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain, 20-25. July 2014.
- (4) Lukács, Zs., Tisza, M.: *Theoretical and experimental investigation of springback phenomena in high strength dual-phase steels*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 214 (2014) to be published (IF 2013-ban: 0,653)
- (5) Tisza, M., Lukács, Zs.: *Springback analysis of high strength dual-phase steels*, ICTP 2014, Nagoya, Japan, 19-24. October 2014. Procedia Engineering (2014) Accepted for publication
- (6) Lukács, Zs., Gál, G., Tisza, M.: *New Equipment for Measuring Large Strain Cyclic Tension-compression Testing of Sheet Metal*, Multiscience-XVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 10-11 April 2014.
- (7) Tisza, M., Kovács, P.Z., Lukács, Zs.: *Tool making innovations in sheet metal forming*, ICPT 2008 International Conference, Gyeongju, South Korea, 07-11. September 2008. pp. 792-794.
- (8) Tisza, M., Gál, G., Lukács, Zs.: *Numerical Modelling of Hot Forming Processes*, INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES 3:(1) pp. 21-34. (2008)
- (9) Tisza, M., Gál, G., Lukács, Zs.: *Integrated Process Simulation and Die Design in Sheet Metal Forming*, ESAFORM 2008, Lyon, France, 23-25. April 2008., pp. 61-62.
- (10) Tisza, M., Gál, G., Lukács, Zs.: *Integrated Process Simulation and Die Design in Sheet Metal Forming*, INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIAL FORMING 1:(1) pp. 185-188. (2008) (IF: 0,509)
- (11) Tisza, M., Lukács, Zs., Gál, G.: *Integrated Process Simulation and Die Design in Sheet Metal Forming*, IDDRG 2007, Győr, Hungary, 21-23. May 2007. pp. 407-416.
- (12) Tisza, M., Lukács, Zs., Tisza, M jr.: *Fast Computer Aided Tool Design Using FEM Analysis*, In: Dudás I, Szabó O, Varga G (ed.), Proceeding of the 12th International Conference on Tools: ICT-2007., Miskolc, University of Miskolc, 06-08. September 2007. pp. 159-164. (ISBN:978-80-7318-572-5)

- (13) Tisza, M., Gál, G., Lukács, Zs., Kovács, P.Z.: *Simulation of multi-step deep-drawing processes performed in transfer presses*, In: ComPlas 2005: Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity: Fundamentals and Applications, Barcelona, Spain, 05-08. September 2005. pp. 251-254.
- (14) Tisza, M., Lukács, Zs., Tisza, M jr.: *FEM analysis in die design practice*, In: Banabic D (ed.), Proceedings of the 8th ESAFORM conference on material forming: ESAFORM 2005. Cluj-Napoca, Romania, 23-25. April 2005. Publishing House of the Romanian Academy, 2005. pp. 309-312. (ISBN:9732711736)

MAGYAR NYELVŰ

- (15) Lukács, Zs., Tisza, M.: *Nagyszilárdságú acélok visszarugózásának vizsgálata*, Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban – MTEKMR 2014, Szolnok, 2014. május 13. pp. CD (ISBN:978-963-358-051-6)
- (16) Tisza, M., Lukács, Zs., Gál, G., Kiss, A., Kovács, P.Z.: *Számítógépes mérnöki módszerek alkalmazása a képlékenyalakításban*, GÉP 64:(2) pp. 11-14. (2013)
- (17) Tisza, M., Lukács, Zs., Gál, G., Kiss, A., Kovács, P.Z.: *Képlékenyalakítási folyamatok modellezése*, In: Pálinkás Sándor, Szabó Gábor, Szűcs Máté (szerk.), XIV. Képlékenyalakító konferencia: Miskolc 2012., 2012.02.16-2012.02.18. Miskolci Egyetem, 2012. pp. 90-95. (ISBN:978-963-661-985-5)
- (18) Tisza, M., Gál, G., Lukács, Zs.: *Számítógéppel segített technológiai és szerszámtervezés a lemezalakításban*, GÉPGYÁRTÁS 58:(3) pp. 81-85. (2008)
- (19) Lukács, Zs., Gál, G.: *Autóipari lemezalkatrészek számítógépes technológiai tervezése*, MLR-RET Diákfórum, Miskolc, 2007. június 8. (2007)
- (20) Tisza, M., Lukács, Zs., Gál, G., Kovács, P.Z.: *Többlépcsős mélyhúzás numerikus modellezése*, OGÉT 2005 XIII. Nemzetközi Gépész Találkozó, Szatmárnémeti, Románia, 2005.04.28-2005.05.01. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2005. p. CD. (ISBN:973 7840 03 8)
- (21) Tisza, M., Rowsan, R., Lukács, Zs.: *Technológiai folyamatok végeelemes modellezése*, Szakmérnöki jegyzet, Számítógépes tervezés és gyártás Szakmérnöki Szak, Miskolc: ME, 2006. 249 p.
- (22) Tisza, M., Rowsan, R., Lukács, Zs.: *Végeelemes modellezés a képlékenyalakításban*, Tisza M (szerk.) Miskolc: Miskolci Egyetem, 2005. 160 p.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Thomas P. Meichsner, *Innovative Concepts for Lightweight- and Hybrid Structure*, TTP 2013 Ultra High Strength Materials, Graz, September 19th 2013.
- [2] Tisza, M.: *Developments in Sheet Metal Forming for the Automotive Industry*, Proc. of ICME, Bratislava, 29. Nov. 2007. pp. 171-178.
- [3] Chung, J., Kwon, O.: *Development of high performance auto steels at Posco steels*, Proc. of the 9th ICTP Conference, Gyeongju-Korea, 7-11. September 2008. pp. 3-8.
- [4] Opbroek, E.: *Advanced High Strength Steels – AHSS Application Guidelines*, World Auto Steel, June 2009. pp. 1-338.
- [5] Yoshida, F., Uemori, T.: *A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and work hardening stagnation*, Int. Journal of Plasticity, v. 18. (2002) pp. 661-686.
- [6] AutoForm Engineering GmbH: *AutoFormplus R3.1 Softver Manual*, Switzerland, (2012).
- [7] Lukács, Zs., Tisza, M.: *Lemezalkatrészek képlékenyalakításának végeselemes modellezése*, Kutatási jelentés – Készült a Videoton Precíziós Kft. részére. Mechanikai Technológiai Tanszék, Miskolc, 2006. pp. 1-48.
- [8] Tisza, M., Lukács, Zs., Gál, G.: *Hűtőszekrény ajtópaneelen habosításkor keletkező felületi hibák vizsgálata*, Kutatási zárójelentés – Készült az Elektrolux Nyíregyháza részére, Miskolc, 2007. pp. 1-62.
- [9] Lemaitre, J., Chaboche, J.L., 1990. *Mechanics of solid materials*. Cambridge University Press, Cambridge
- [10] Armstrong, P.J., Frederick, C.O., 1996. *A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect*. GEGB Report RD/B/N731. Berkeley Nuclear Laboratories.
- [11] Chaboche, J.L., Rousselier, G., 1983. *On the plastic and viscoplastic constitutive equation – Part I.: Rules developed with internal variable concept*. Journal of Pressure Vessel Technology 105. pp. 153-158.
- [12] Yoshida, F., Uemori, T., Fujiwara, K., *Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain*. 2002. Int. J. of Plasticity 18. pp. 633-659.

- [13] Kubli, W., Krasovskyy, A., Sester, M., 2008. *Advanced modelling of reverse loading effect for sheet metal forming processes*. In: Hora, P. (ed) Proceedings of the 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, NUMISHEET 2008. Interlaken, Switzerland, 479-484.
- [14] Kubli, W., Krasovskyy, A., Sester, M., 2008. *Modeling of reverse loading effects including workhardening stagnation and early re-plastification*. In Proceeding of ESAFORM Conference.
- [15] Geng, L., Shen, Y., Wagoner, R.H., 2002. *Anisotropic hardening equations derived from reverse-bend testing*. Int. J. Plasticity 18 (5-6) pp. 743-767.
- [16] Yoshida, F., Urabe, M., Toropov, V.V., 1998. *Identification of material parameters in constitutive model for sheet metals from cyclic bending test*. Int. Mech Sci. Vol. 40 No 2-3, pp. 237-249.
- [17] Zhao, K.M., Lee, J.K., 2001. *Generation of Cyclic Stress-Strain Curves for Sheet Metals*. J. of Engineering Materials and Technology Vol. 123, pp. 391-397.
- [18] Omerspahic, E., Mattiasson, K., Enquist, B., *Identification of material hardening parameters by three-point bending of metal sheets*. 2006. Int. J. of Mechanical Sciences Vol. 48, pp. 1525-1532.
- [19] Miyauchi, K.: *Deformation path on stress-strain relation in sheet metals*. 1992. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 34, pp. 195-200.
- [20] Merklein, M., Biasutti, M., 2011. *Forward and reverse simple shear test experiments for material modeling in forming simulations*. In: Hirt, G., Tekkaya, A.E., (Eds) International Conference on Technology of Plasticity, Aachen. pp. 702-707.
- [21] Bae, D.H., Ghosh, A.K., 2003. *A planar simple shear test and flow behavior in superplastic Al-Mg alloy*. Metall. Mater. Trans. A. 34. pp. 2465-2471.
- [22] Bouvier, S., Haddadi, P., Levée, C., Teodosiu, C., *Simple shear test: experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheet at large strains*. 2006. J. of Material Processing and Technology 172, pp. 96-103.
- [23] Thuillier, S., Manach, P.Y., *Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths*. 2009. Int. J. of Plasticity 25, pp. 733-751.
- [24] Boger, R.K., Wagoner, R.H., Barlat, F., Lee, M.G., Chung, K., *Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material*. 2005. Int. J. of Plasticity 21. pp. 2319-2343.

- [25] Yoshida, F., Uemori, T., Fujiwara, K., *Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain*. 2002. Int. J. of Plasticity 18. pp. 633-659.
- [26] Kuwabara, T., Kumano, Y., Ziegelheim, J., Kurosaki, I., *Tension-compression asymmetry of phosphor bronze for electronic parts and its effect on bending behavior*. 2009. Int. J. of Plasticity 25. pp. 1759-1776.
- [27] Cao, J., Lee, W., Cheng, H.S., Seniw, M., Wang, H.-P., Chung, K., *Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metal*. 2009. Int. J. of Plasticity 25. pp. 942-972.
- [28] Eggertsen, P.-A., Mattiasson, K., *On the identification of kinematic hardening material parameters for accurate springback predictions*. 2011. Int. J. of Material Forming, Vol.4, pp. 103-120.
- [29] Makinouchi, E., Nakamachi, E., Onate, R.K, Wagoner R.H., 1993. *Simulation of the 2D Draw Bending Process, Numisheet Benchmark*. Proceedings of the 2th International Conference NUMISHEET'93, Tokyo

