

A LANKFORD-SZÁM MEGVÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA A KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁS ÉS A HENGERLÉSI IRÁNY FÜGGVÉNYÉBEN

THE LANKFORD COEFFICIENT'S EVOLUTION IN THE FUNCTION OF THE PLASTIC STRAIN AND THE ROLLING DIRECTION

Hoffmann Ádám Zsolt¹, Béres Gábor J.^{1*}

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2022.2.ENG.004>

Kulcsszavak:

Anizotrópia,
Lankford-szám,
Folyási feltétel,
Hengerlési irány,
Szakítóvizsgálat.

Keywords:

Anisotropy,
Lankford coefficient,
Yield criterion,
Rolling direction,
Tensile test.

Cikktörténet:

Beérkezett 2022. január 25..
Átdolgozva 2022. június 10.
Elfogadva 2022. június 20.

Összefoglalás

Cikkünk a korszerű lemezalakító technológiák egyik fontos elméleti (de a szimulációs programokon keresztül közvetlen gyakorlati hasznosulással is bíró) kérdéséről, az anyag képlékeny viselkedését leíró változók közül kiemelten az r-érték kutatásáról számol be. Régóta ismert tény, hogy a lemezek alakításánál kulcsszerepet játszik az elvékonyodási hajlamra utaló Lankford-féle szám (másnéven r-érték), így annak vizsgálata napjainkban is erőteljesen zajlik a világ különböző kutatóhelyein. Munkánk során ezen anyagfüggő paraméternek a változását vizsgáltuk a képlékeny alakváltozás és a hengerlési iránnyal bezárt szög függvényében, és fejlődésének matematikai leírását is megadtuk két, a járműiparban elterjedten használatos lemezanyagra. Eredményeinkből az látható, hogy az r-érték konstanssal avagy függvényként történő definiálása, főleg a nagy alakváltozásokat eredményező technológiáknál, még számos további kérdést vet fel.

Abstract

This paper presents the evolving characteristic of the r-value, as one of the main parameter that is responsible for the description of plasticity of metallic materials. The r-value is long been used by the science and practice of sheet metal forming, and its research is still going on today. In this study, we have carried out standard tensile tests on thin sheet specimens, in different loading directions. The experiments were supported by non-contact gauge strain measurement technique. Two types of material grades used in the automotive industry were investigated, and the r-value has been given as variable, in the function of the plastic strain, instead of its customary useful constant value. Our results show that the r-value can undergo a significant change during the deformation process, which may raise new questions in the characterization of plastic behaviour of sheet metals.

* Kapcsolattartó szerző. Email: beres.gabor@gamf.uni-neumann.hu

1. Bevezetés

A lemezalakítás iparában napjaink egyik korszerű kutatási témája a folyási feltétel elméleti és gyakorlati definiálása, anizotróp viselkedésű anyagok esetén. A készterméket előállító hidegalakítási eljárások során kiemelt jelentőséggel bír az alakítani kívánt lemez viselkedésének minél pontosabb megértése és leírása. A Lankford-számnak [1] (r -értéknek) a gyakorlatban megszokottnál alaposabb megfigyelésével és változóként történő definiálásával még valóságközelibb módon lehetne az alakváltozásokat (és az ezekből eredő egyéb alakítástechnológiai jellemzőket) előre becsülni szimulációs környezetben.

A távoli- és a közelmúltban számos elmélet született a lemezanyagok viselkedésének meghatározására. Az izotróp anyagmodellek, mint például a Tresca-St. Venant [2] vagy a Huber-Mises-Hencky [3] elméletek szerint a vizsgálandó lemezanyagok tulajdonsága eltérő orientációban is közel azonosnak tekinthető. Ilyen esetekben nem áll fenn irányfüggőség a mechanikai tulajdonságokban. Ezen elméletek létjogosultságát nem lehet elvitatni, hiszen napjainkban is vannak alakításkor közel (vagy kvázi-) izotróp viselkedésű lemezanyagok, mint például az ún. "kettős-szövetű" vagy duplex acélok.

Ugyanakkor, mivel a lemezek döntő többsége anizotróp módon viselkedik alakításkor, ma már ismert, hogy valósághűbb eredmények érhetők el a számítások és a szimulációk során ha a korszerűbbnek mondható anizotróp elméleteket vesszük alapul. Több ilyen elmélet is létezik az anizotróp lemezanyagok folyási viselkedéseinek meghatározására, mint például a Hill '48 [4], a Hosford [5], vagy a Barlat és Lian [6] elméletek, a teljesség igénye nélkül.

Cikkünkben, a fent felsorolt anizotróp folyási feltételekben kivétel nélkül megjelenő r -értéknek a vizsgálatáról számolunk be, kétféle lemezanyagra. Ezek a DC04-es és a DP1000-es jelölésű (1 mm-es névleges lemezvastagságú) járműipari acélok voltak, melyeket érintésmentes nyúlásmérővel támogatott szakítóvizsgálatoknak vetettünk alá. Az r -értéket a valódi, egyenértékű alakváltozás és a hengerlési irány függvényében mértük és eredményeinket diagramokban ábrázoltuk. A kapott görbékből az látható, hogy az r -érték alakváltozás függő megváltozása nem mutat tendenciát a hengerlési irány viszonylatában, de az alakváltozás mértékének tekintetében új kérdések merülhetnek fel az r -érték definiálása kapcsán.

2. Vizsgált anyagok

2.1. DC jelölésű lemezanyagok

A DC jelölésű acélok a járműiparban is használt, kedvező mélyhúzóhatósági tulajdonságokkal rendelkező, csillapított, ötvöztelen acélok. Hidegalakításra szánt hideghengerelt lemezanyagok, melyek, mint ilyen, az újrakristályosodási hőmérséklet alatt kerülnek véghengerlésre [7].

A kiinduló előgyártmány jellemzően egy nagyjából 1270°C-os lemezbuga, mely meleghengerléssel kerül előnyújtásra. A meleg hengercs utolsó lépéseként egy vízpermetes hűtés következik, amelyet követően a tekercs, lassú, levegőn történő hűtéssel (2-3 nap) eléri a 60°C-os hőmérsékletet. Ezt követi az úgynevezett pácolás, mely a melegalakítás során keletkezett revét vagy oxidréteget hivatott eltávolítani. A reve eltávolítása után kezdetét veszi a hideghengerlés, melyet a dresszírozás követ. Ezzel a művelettel biztosítható a jó felületi minőség és megszüntethető a határozott folyás jelensége [8,9].

A DC lemezanyagok esetén a csillapítás, vagy dezoxidáció erős redukálószerrel, alumíniummal (Al) történik, amely a vas (Fe) oxid tartalmát megköti alumínium-oxid (AlO) formájában [10]. Így lehetséges, hogy mikroötvözőként (a DP acéloknál nem jelentős) alumínium is megjelenik.

A DC04 felhasználási területét tekintve hidegalakításra, főleg mélyhúzásra szánt acéllemez. A járműipar elsődlegesen burkolólemezként tekint rá, a karosszéria külső idomlemezeiként, mivel jó az alakíthatósága és bonyolult formák kialakítására is alkalmas [11]. A felületkezelt, bevonatos DC lemezek kiválóan alkalmasak lehetnek mélyhúzott szaniter vagy konyhai elemek elkészítésére.

2.2. DP jelölésű lemezanyagok

A DP (Dual Phase "kétfázisú", vagy "kettős-szövetű") acélok ún. második-generációs, fejlett, nagyszilárdságú acélok, melyeket a járműiparban előszeretettel alkalmaznak. Elnevezésüket a

szövegszerkezetükről kapták: ferrites alapszerkezeten belül diszperz eloszlású martenzit "szigetek" találhatóak, kihasználva mindkét szövetelem előnyös tulajdonságait [12].

Történetüket tekintve eredetük 1975-ig nyúlik vissza, de a fejlesztéseknek köszönhetően ma is korszerűnek számítanak [13]. A lágy ferrites szerkezet rugalmasságot, jobb alakíthatóságot, a martenzites szövetelem kiemelkedő szilárdsági tulajdonságokat biztosít. A DP acélok a ferrit-martenzit szövetelem arány és a szemcseméret beállításával relatíve jól alakíthatóak és emelt szilárdságúak is lehetnek egyben. Szakítószilárdságuk jellemzően 500-1200 MPa között van, és ehhez tartozóan a szakadás nélkül jelentkező képlékeny alakváltozás 5-35% mértékű is lehet. Fallahi és munkatársai [18] például kimutatták, hogy az alakíthatóság és a szilárdság szempontjából optimális martenzit szemcseméret, 30-40% martenzit térfogatarány mellett, a 4 μm .

A DP acélok esetén nem jelenik meg a szigorú értelemben vett folyáshatár, köszönhetően a diszlokációk szabad mozgásának a ferritben és a ferrit-martenzit szemcsehatárokon lejátszódó diszlokációs mechanizmusoknak (diszlokációs-elmélet). Szakítóvizsgálat során ugyanakkor a ferrites szövetszerkezet inhomogén plaszticitást mutat, így a teljes alakváltozás során nem azonos a fázisok viselkedése [12,14,15].

Felhasználási területét tekintve általánosan elmondható, hogy a járműiparban megfogalmazott súlycsökkentési igény hatására fejlesztették ki. A kisebb szakítószilárdsági értékkel rendelkező DP acélokból rendszerint burkoló elemek készülnek (ilyenek például a tetőlemez, a padlólemez, ajtók), míg a magasabb szilárdságú duál-fázisú acélokból szerkezeti elemek készülnek (ilyenek például: B-oszlopok, keresztartók, oldalfalak, homlokfal) [19,20]. A késztermékké történő alakítások során jellemzően először alakadásra kerül sor mélyhúzással, majd a megfelelő alakra húzott lemezeket további egyesítő vagy anyagszétválasztó eljárásoknak vetik alá, mint például a hegesztés, vagy a kontúrvágás [13,16,17].

3. A Lankford-féle szám és vizsgálata szakítóvizsgálatokkal

A Lankford-szám, vagyis az r -érték meghatározásának kísérleti módszere a szakítóvizsgálat. A lemez próbatestek egytengelyű húzása közben mérjük a darab kiinduló hosszának (l_0) és kiinduló szélességének (w_0) a megváltozását (l és w), továbbá e két mért érték birtokában számoljuk a lemezvastagságot (t) a térfogatállandóság függvényének felhasználásával. (Hengeres daraboknál az r -érték nem értelmezhető.) E célból használhatunk tapintós, vagy digitális képalkotás elvén működő nyúlásmérő rendszereket. Az MSZ EN ISO 10113 szabvány az r -értéket, adott orientációban (hengerlési irányhoz képest bezárt szög alatt) és adott mérnöki nyúlás (vagy nyúlás tartomány) elérésnek időpillanatában fennálló szélesség- és lemezvastagság irányú alakváltozások hányadosaként definiálja, a következő formában:

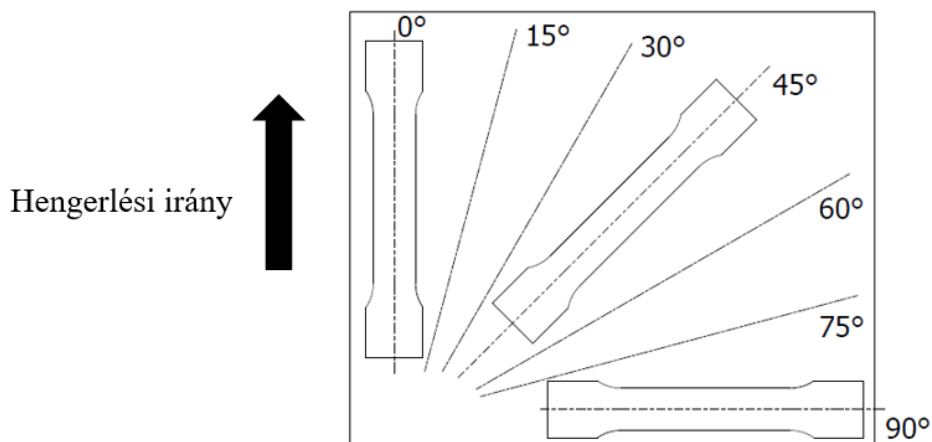
$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

Az r -érték tehát nem más, mint az adott lemezanyag elvékonyodási hajlamának számszerű kifejezése, a próbatest szélesség irányú megváltozásának a viszonylatában. A vizsgálatokat több különböző (legalább három, a 0° -os, a 45° -os és a 90° -os) orientációban kimunkált próbatesten végezzük, és a gyakorlatban legtöbbször az adott anyagra jellemző egyenletes nyúlás határát jelző alakváltozásnak (A_g) a közelében, egészen pontosan az A_g -1% mérnöki nyúlásnál adjuk meg. Igaz, a fent említett szabvány is kiemeli annak lehetőségét, hogy az r -értéket egy adott alakváltozási tartományra tekintsük érvényesnek (és ne egy konkrét alakváltozási értékhez tartozónak), de akkor is értékét egy konstansként, csak épp egy tartományra jellemző átlagértékként fejezzük ki. A Lankford-szám változását a képlékeny alakváltozás függvényében tehát, a gyakorlati és a tudományos megközelítésekben is jelenleg még (kevés eset kivételével) elhanyagoljuk, és értékét egy konstans számmal jellemezzük.

Hou et al. [21] a Lankford számot az egyenértékű alakváltozás ($\bar{\varepsilon}$) függvényében újszerű módon, egy másodfokú polinommal közelíti az

$$r_\alpha(\bar{\varepsilon}) = A_\alpha \bar{\varepsilon}^2 + B_\alpha \bar{\varepsilon} + C_\alpha \quad (2)$$

alakban, ahol A_α , B_α és C_α a szóban forgó polinom együtthatóit jelentik az adott (α) szögben kimunkált próbatestekre vonatkozóan. Az általunk vizsgált anyagok esetén 15° -onkénti osztásokban munkáltunk ki szabványos lemezpróbatesteket a hengerlési irányhoz viszonyítva, ahogyan azt az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A különböző orientációban kimunkált szakító próbatestek

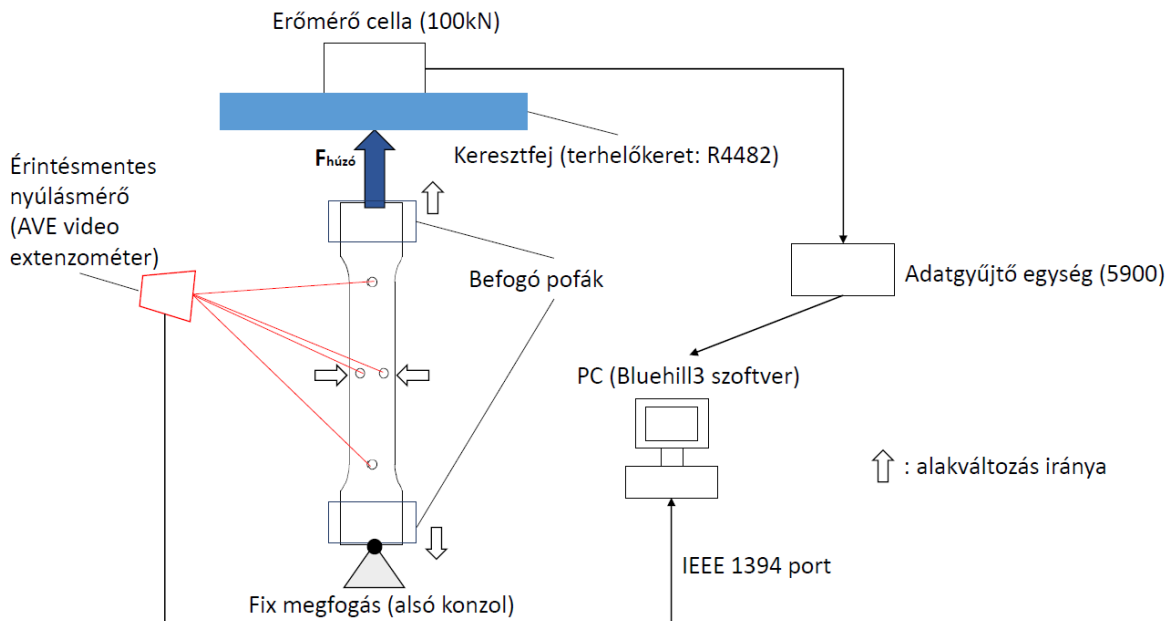
A marással kimunkált próbatesteket egy sablon segítségével kontrasztos, szabályos kör alapú jelölésekkel láttuk el (ld. lentebb 2. ábra), az alakváltozásoknak az érintésmentes nyúlásmérővel, video extenzométerrel történő meghatározáshoz.

Az érintésmentes nyúlásmérők nagy előnye, hogy a mérőberendezés nincs érintőleges kontaktusban a munkadarabbal a mérés során, így nem befolyásolja a mérési eredményeket. Az esetleges próbatest elmozdulások, megcsúszások sem jelentenek problémát, hiszen a kontrasztos jeltávokat a műszer valós időben, közvetlenül a próbatesten figyeli, a változásokat folyamatosan nyomon követve. A működési elve a berendezésnek a fényvisszaverődésen alapul. Egy vörös színű, nagy intenzitású LED sor megvilágítja a munkadarabot, amelyen a kontrasztos jelölések másként verődnek vissza, mint a körülöttük lévő háttérről. A berendezésben egy légáramlást szabályzó rendszer is található, amely a nem kívánt turbulens légáramlatokat hivatott megelőzni a gyűjtőlencse előtti térben, mivel ezek hatással lennének a mérési pontosságra. Az általunk használt Instron AVE 2663-821 video extenzométer része egy Basler A622f monokróm kamera, mely egy nagysebességű IEEE1394 400Mbit/s-os porton keresztül kommunikál a számítógéppel. A kamera maximális felbontása 1,3 Megapixel (1280x1024), amely mellé 25 fps képkockasebesség társul, ami egy mozifilm képfrissítési rátájának felel meg. Az alkalmazott kvázi-statisztikus vizsgálati sebesség következtében, mely 4 mm/perc volt és amellyel az alakváltozási sebesség $1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ alatt maradt, elegendő volt ez a beállítás. (A másik opció a VGA (640x480) felbontás és a hozzátartozó 100 fps képkockasebesség lett volna.) A kamerán egy AVE 200 mm FOV lencse található, mely tengelyirányban 200 mm, keresztirányban pedig 28 mm látómezővel rendelkezik. Mivel a készülék AVE (Advanced Video Extensometer) típusú és nem SVE (Standard Video Extensometer), így két irányban is mér elmozdulást. A mérési pontosság $\pm 2,5 \mu\text{m}$ mindkét irányban. A kontrasztos pontok mérete minimálisan 2 mm-es átmérővel kell rendelkezzen és fontos a szabályos köralak, hogy egyetlen adatpontként értelmezze a jeleket a készülék. Az alkalmazott pontméret 3 mm-es átmérővel rendelkezett és a pontok a próbatesten tengelyirányban 80 mm-re, keresztirányban pedig 10 mm-re helyezkedtek el egymástól. A jelölések fehér jelölő filccel festve, a próbatest két szimmetriatengelyén helyezkedtek el. Az érintésmentes mérőberendezés kalibrációja az MSZ EN ISO 9513:2013 szabvány szerint történt.

A jelfeldolgozás és az adatközlés nagysebességű FireWire IEEE 1394 porton keresztül történt az asztali számítógép és a nyúlásmérő berendezés között. Egyik nagy előnye ezen mérési módszernek, hogy bár az előzetesen felmért jeltávok (axiális irányban 80 mm, keresztirányban: 10 mm) az emberi tényezőtől, valamint a jelölő filc pontatlanságából adódó hibákkal rendelkeztek, azonban a nyúlásmérő az aktuálisan fennálló jeltávolsághoz viszonyít, melyet előzetes adatpont

meghatározással saját magának vesz fel. Ennek segítségével a kismértékű pontatlansági hibák kiküszöbölhetők, hiszen a mérés elején a ténylegesen mért, és nem a névleges távolság a kiinduló adat. Egy másik előnye ezen mérési eljárásnak, hogy a feldolgozott elmozdulási adatokat mérnöki alakváltozásban lehet megkapni, mind axiális, mind transzverzális (kereszt) irányban, így az elmozdulási értékeket nem kell átszámolni.

A mérési összeállítás az alábbi sematikus, egyszerűsített ábrán látható (2. ábra).

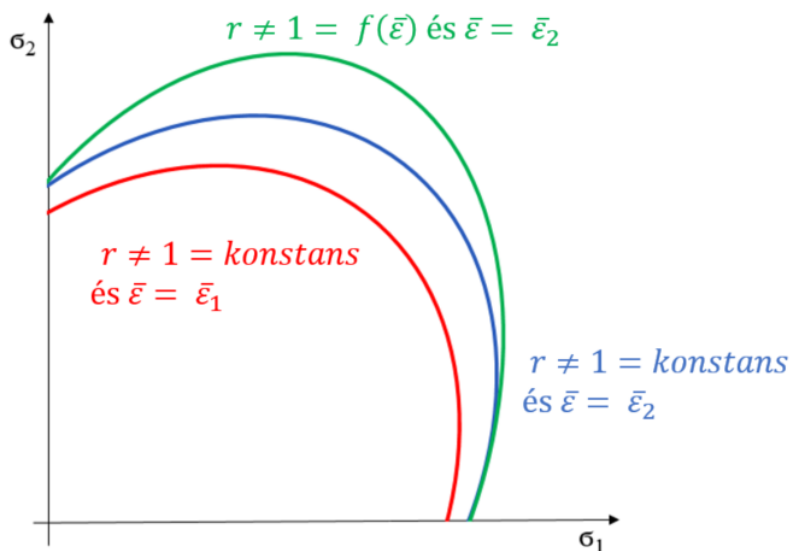


2. ábra: A mérések elvi vázlatja

A terhelést átadó eszközök a következők voltak: egy Instron 5900R4482 típusú szervomotoros szakítógép, melyen egy 5900-as adatgyűjtőegység CAT4-es UTP nagysebességű adatátviteli kábel segítségével továbbította a nyers adatokat. A terhelő keret, melyen az elmozdulásért felelős keresztfej található, egy 4482 típusú terhelőkeret volt. A keresztfejen egy kalibrált és hitelesített 100kN-os erőmérőcella volt található. A mérési paramétereknél az adatvételi gyakoriságot 500 adat/perces értéknek határoztuk meg, hogy megfelelő mennyiségű adatpont álljon végül a rendelkezésünkre. A méréseket anyagonként és kimunkálási szögenként háromszoros ismétlésszámmal végeztük.

4. Eredmények

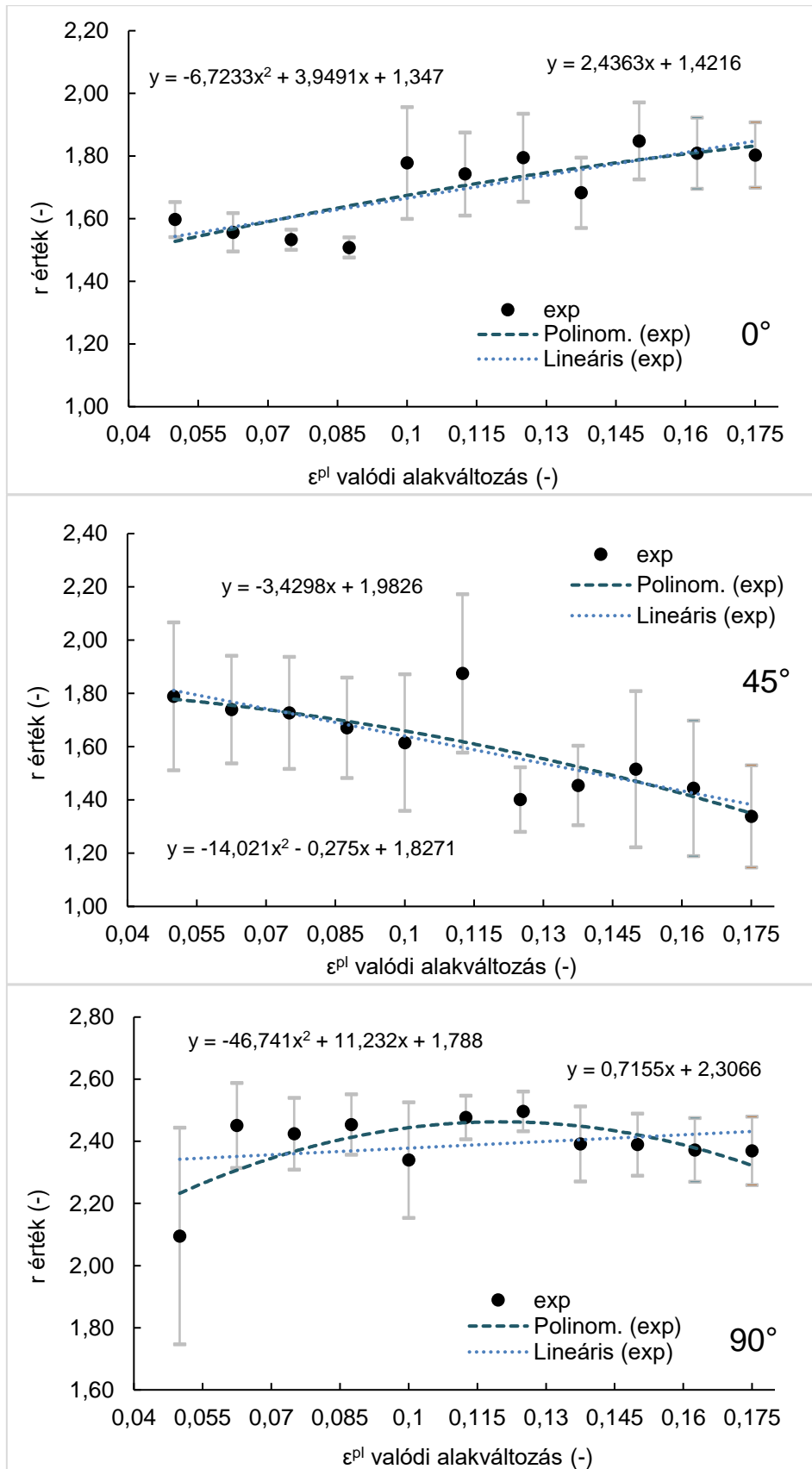
A Lankford-számot jelenlegi ismereteink szerint tehát konstans számmal adják meg, vagy lehetséges azt polinomiális alakban kifejezni az alakváltozás függvényében. Mint azt az alábbi, 3. ábrán látható sematikus ábrázolású folyási felületek mutatják, az eredmények akár jelentősen is eltérhetnek a Lankford-szám megadásának és az alakváltozás mértékének a vonatkozásában. Az ábrán pirossal látható egy anizotróp folyási felület, mely az r -értéket konstansnak és egyben egységnyitől eltérőnek tekinti, adott $\bar{\epsilon} = \epsilon_1$ alakváltozási mértéknél. Ilyenkor, a folyási felület terjeszkedése az alakváltozás hatására ($\bar{\epsilon} = \epsilon_2$) arányos és szimmetrikus a főfeszültségi (σ_1 és σ_2) tengelyek mentén (kék görbe). Ha viszont az r -érték változó, és a képlékeny alakváltozás függvényében megadható, akkor az a folyási felület torzulását vonhatja maga után az alakváltozás előrehaladtával, az ábrán látható módon (zöld görbe). Természetesen, a folyási felület torzulása a Lankford-szám megváltozásának a mértékével arányos, amely anyagfüggő jellemző. Eddigi ismereteink alapján például, épp az acélok anyagok folyási felületének kisebb ez az aszimmetrikus torzulási hajlama, de például a titán-, vagy a mgnéziumötvözeteknél ez számmotevő is lehet.



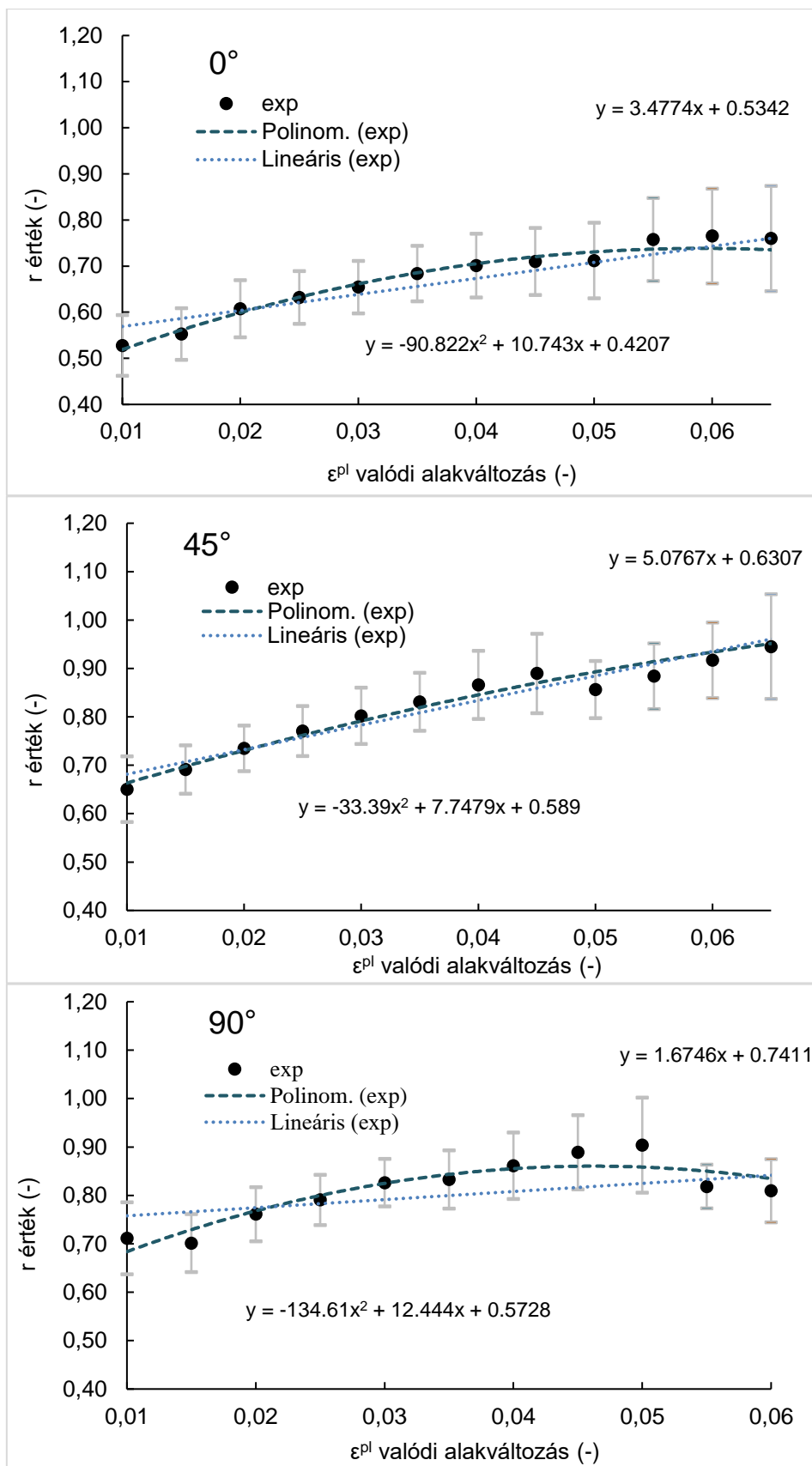
3. ábra: A Lankford-szám hatása a folyási felületre

A 4. ábra a DC04-es minőségű lemez r -értékeit mutatja három különböző hengerlési irányban, a valódi, egyenértékű alakváltozás függvényében (az ábrákon az egyenértékű alakváltozás másik szokásos jelölése, az “ ϵ^{pl} ” került feltüntetésre). Az eredményekből az látható, hogy az r -érték ennél az anyagnál számottevően változik a képlékeny alakváltozás előrehaladásával, mitöbb a különböző orientációkban kimunkált próbatetekre különböző karakterisztika jellemző. Az ábrákon minden esetben feltüntettük a közelítő másodfokú polinom egyenletét, illetve egy lineáris közelítés trendvonalát is. Ezekből az a szembetűnő, hogy a 0° -os és a 45° -os orientációban kimunkált (avagy a hengerlési irányral párhuzamos és azzal 45° -os szöget bezáró) próbateteknél a lineáris közelítés is megfelelőnek tekinthető, de a 90° -os orientációra (a hengerlési irányra merőlegesen) mindez már nem mondható el. A diagramokon mutatott eredmények alapján ennél az anyagminőségnél ajánlott tehát az r -érték változását is figyelemmel követni az anyag jellemzése során.

A DP1000-es lemezanyag eredményei az 5. ábrán kerültek feltüntetésre, melyekből az látható, hogy a lineáris közelítés csakis a hengerlési irányhoz képest 45° -os szögben kimunkált próbateteknél számít elfogadhatónak. 0° -os és 90° -os irányokban az r -érték fejlődése egy felső határértékhez tart, amely legnagyobb küszöbértéket nagyságrendileg mindig a 0.05 mértékű egyenértékű képlékeny alakváltozásnál éri el. Ez közelít az egyenletes nyúlás (A_g) értékéhez, amely ennél az anyagnál nagyságrendileg 0,67, de erre a diagramokból, a vízszintes tengelyen a valódi, egyenértékű nyúlás használata miatt csak közvetett módon lehet következtetni. (Az A_g ugyanis mérnöki mérőszám, a meghatározásához a vízszintes tengely mérnöki rendszerbe történő átszámolása volna szükséges.) Mindenesetre, az r -érték megváltozása a képlékeny alakváltozás előrehaladtával ennél az anyagnál is szembetűnő, és az orientációfüggés is egyértelműen megmutatkozik. Bár a görbék felülről korlátos jellegéből adódóan elfogadhatónak tűnik az r -értéknek a maximumhoz közeli pontban egy konstans értékkel való közelítése, itt is további kérdéseket vet még fel ennek az anyagjellemzőnek a definiálása.



4. ábra: A Lankford-szám változása az alakváltozás függvényében, három különböző hengerlési irányban, DC04-es anyagminőségre



5. ábra: A Lankford-szám változása az alakváltozás függvényében, három különböző hengerlési irányban, DP1000-as anyagminőségre

5. Törekvések, konklúzió

A szakítóvizsgálatoknál a befűződés megjelenése határt szab az r -érték kiterjedtebb meghatározásának, de a bemutatott diagramok arra engednek következtetni, hogy az r -értéknek az alakváltozás függvényében mutatott megváltozási hajlama (főleg a nagyobb alakváltozásoknál, melyek a gyakorlati technológiák során előfordulhatnak hajlításkor vagy mélyhúzáskor) még fontos kérdéseket vehet fel. Az r -érték szabványos meghatározási módja szakítóvizsgálattal történik, de többek között, éppen a vizsgálat korlátai miatt egyéb, nem szokványos mérőszámok is bevezetésre kerültek hasonló tartalommal a közelmúltban. Ilyen például az úgynevezett biaxiális anizotrópia tényező. Nekünk is a jövőbeni törekvéseink közé tartozik az r -érték széleskerű vizsgálata és egyéb, például nyomóvizsgálatból történő meghatározásának kidolgozása, hogy az anyag elvékonyodási hajlamára (a szakítóvizsgálatoknál elérhetőnél) nagyobb alakváltozásoknál is következtetni tudjunk.

Jelen munkánkból is kitűnik, hogy az r -érték, a befűződési határig is szembetűnő változáson mehet keresztül és ez ráadásul a próbatest orientáció függvényében is változhat. A DC04-es anyagnál például, a hengerlési iránnyal párhuzamosan az r -érték növekedése, arra merőlegesen annak stagnálása, azzal 45° -os szöveget bezáróan pedig a csökkenése volt megfigyelhető az alakváltozás előrehaladtával. A DP1000 lemezanyagnál ez valamivel egységesebb képet mutatott az orientáció függvényében, de ott is érdemes a három irányban mért eredményeket egymástól eltérőnek kezelni.

Mindenesetre, míg az anyag viselkedését a valóságoshoz közelebb módon leíró és a képlékeny alakváltozás fizikai tartalmával is összhangban lévő egyéb anyagjellemző nem lát napvilágot, addig a szimulációs szoftverekben, vagy a folyási feltételekből levezethető analitikus egyenletekben is megmarad az r -érték konstansként történő használata. Ezen, napjaink aktuális kutatásai változtathatnak, melyek egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek az r -érték legkülönbözőbb meghatározási módjaira és az eredményeinkből láthatóan nem véletlenül, annak változóként történő definiálásra.

Irodalomjegyzék

- [1] W. T. Lankford, S. C. Snyder and J. A. Bauscher: Trans. Am. Soc. Metals 42, 1197 (1950).
- [2] Saint-Venant, B.: Memoire sur l'établissement des équations différentielles des mouvements intérieurs opérés dans les corps solides ductiles au dela des limits ou l'élasticité purrait les ramener à leur premier état, Compt. Rend, v. 70 (1870) pp. 473-480.
- [3] Hencky, H.: On the theory of plastic defromations, Z. Angewendte Mathematics & Mechanics, v. 16. (1924) pp. 349-357.
- [4] R. Hill: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, The hydrodynamics of non-Newtonian fluids. I (1948), pp. 281-297.
- [5] Hosford, W. F.: Comments on anisotropic yield criteria, Int. Journ. Mechanical Sciences, v. 27. (1985) pp. 423-427.
- [6] Barlat, F., Lian, J.: Plastic behaviour and stretchability of sheet metals: A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, Int. Journ. Plasticity, v. 5. (1989) pp. 51-56.
- [7] ISD DUNAFERR: Hideghengerlés, <http://dunaferr.hu/hideghengerles>, Megtekintve: 2021.10.01.
- [8] Mucsi András: A képlékenyalakításra szánt, alumíniummal csillapított lágyacél szalagok gyártástechnológiájának fémtani háttere, PhD értekezés téziszfüzet, Pattantyú Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, Budapest, 2014.
- [9] Dr. Gulyás József, Dr. Horváth Ákos, Illés Péter, Dr. Farkas Péter: Acélok hengerlése, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2013.
- [10] Dr. Komócsin Mihály: Anyagok hegeszthetősége, Digitális Tankönyvtár (2013), https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagok_hegeszthetosege/1_acelok_gyartasa_es_jelolesi_rendszere.html, Megtekintve: 2021.11.01.
- [11] Prém László, Dr. Balogh András: Hagyományos és korszerű autóiipari acéllemezek ponthegezhethetőségének vizsgálata, Hegesztés-Technika XXIV. Évfolyam 4. szám (2013), pp. 41-49.
- [12] Béres Gábor, Danyi József, Végvári Ferenc, Tisza Miklós: Napjaink Járműkarosszéria anyagai, Gradus Vol 2, No 2 (2015), pp. 209-224.
- [13] N. Fonstein: Dual-phase steels, Automotive Steels (2017), pp. 169-216.
- [14] Z. P. Xiong, A. G. Kostychev, N. E. Stanford, E. V. Pereloma: Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting, Materilas and Design Vol 88 (2015), pp. 537-549 2
- [15] Yngve Bergstrom, Ylva Granbom, Dirk Sterkenburg: A Dislocation-Based Theory for the Deformation Hardening Behavior of DP Steels: Impact of Martensite Content and Ferrite Grain Size, Journal of Metallurgy (2010), pp. 1-16.

- [16] Lőrinczi József, Szabados Ottó, Szabó Zoltán, Zsámbók Dénes, Verő Balázs, Dobránszky János, Hirka József: Kísérleti gyártás DP- és TRIP-acélok hazai bevezetésére, Dunaújvárosi Főiskola Közleményei 26. (2005), pp. 395-408, Elektronikus forrás: <http://real.mtak.hu/5729/1/1155650.pdf>, Megtekintve: 2021.09.23.
- [17] Dierk Raabe: Dual phase steels, <http://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/>, Megtekintve: 2021.09.23.
- [18] P. Movahed, S. Kolahgar, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari, N. Parvin: The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets, Materials Science and Engineering (2009), pp. 518.
- [19] Bitay Enikő, Bagyinszki Gyula: Járműipari acélok szilárdságnövelési lehetőségei, XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka (2015), pp. 91-94.
- [20] WorldAutoSteel U.S.: Dual Phase (DP) Steels, <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/>, Megtekintve: 2021.08.31.
- [21] Yong Hou, et al., Journal of Materials Processing Tech., <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116314>