

Nagyszilárdságú acéllemezek törési határ alakváltozásának vizsgálati módszerei

Investigation methods for fracture strain of high strength steel sheets

Gál Viktor^a, Lukács Zsolt^b, Kovács Péter Zoltán^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, viktor.gal2@bayzoltan.hu

^bMiskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, egyetemi docens, zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu

^cMiskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, egyetemi docens, metkpcz@uni-miskolc.hu

Kulcsszavak

törési alakváltozás, alakíthatóság, DP acél, nyíró próbatest, feszültség háromtengelyűség

Keywords

fracture strain, formability, DP steels, shear specimen, stress triaxiality

Absztrakt

Az elmúlt évtizedek autóiipari fejlesztéseinek köszönhetően napjainkban a nagyszilárdságú acéllemezek széles palettája áll rendelkezésre. A szilárdság növekedése azonban az alakváltozó képességek csökkenésével jár együtt, ami jelentősen megnehezíti a komplex geometriájú lemezkatrészek gyártásának tervezését. A selejtek és többletköltségek elkerülése érdekében a gyártók végeeselemes modellező szoftvereket alkalmaznak, melyekben szükség van a vizsgált anyagok viselkedésének leírására. A rugalmas és képlékeny viselkedés leírása bevett gyakorlat, azonban az alakítás határának definiálásra jelenleg alkalmazott módszerek működőképessége megkérdőjelezhető. Cikkünkben az alakíthatóság valódi határának, tehát a törésig elviselt alakváltozásnak a vizsgálatait mutatjuk be három nagyszilárdságú Dual Phase (DP) acélra vonatkozóan.

Abstract

Due to the recent decades' developments in the automotive industry, a wide range of high-strength steels are available nowadays. However, the increase in strength is accompanied by a decrease in formability. The lack of formability makes manufacturing sheet metal parts with complex geometries difficult. To avoid additional costs, manufacturers use finite element modeling software, which requires a description of the behavior of the tested materials. Although describing the elastic and plastic deformation is common practice, the validity of the currently used methods to determine the fracture behaviour is questionable. In this paper, the true limit of formability, i.e. the strain to fracture was investigated in case of three high-strength Dual Phase (DP) steels.

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek autóiipari fejlesztéseit két tényező, a környezetvédelmi, illetve a biztonsági előírások indukálták. Környezetvédelmi szempontból fontos lenne a káros anyag kibocsátás csökkentése, mely legegyszerűbben a járművek tömegének redukálásával érhető el. Ez azonban nem tehető meg pusztán a felhasznált anyagok mennyiségének a csökkentésével, mivel a biztonsági előírások betartásához növelni kell azok szilárdságát. Ez magyarázza, hogy napjainkban a nagyszilárdságú acélok széles palettája áll a gyártók rendelkezésére [1]. A növekvő szilárdsággal azonban az alakváltozó képesség csökkenése jár együtt, ami problémát okoz az egyre bonyolódó geometriájú karosszéria elemek gyártásánál. A szerszámpróbák, illetve a kezdeti selejtek költségét napjainkban végeeselemes modellező szoftverek alkalmazásával próbálják csökkenteni, ezek használatához azonban le kell írni az anyagok viselkedését.

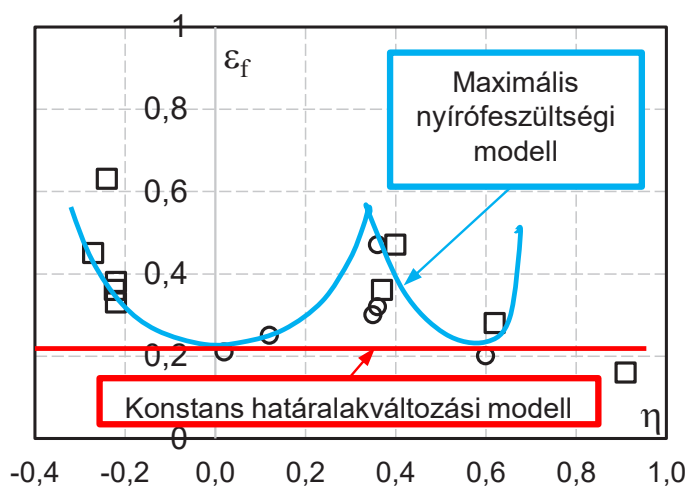
A lemezek rugalmas, illetve képlékeny viselkedésének leírására számos szabvány, illetve vizsgálati módszer áll rendelkezésre, azonban a károsodás definiálására alkalmazott megközelítéseket fenntartásokkal kell alkalmazni. Mivel az autóiipari lemezkatrészek esetében általában már a 30%-os elvékonyodás sem megengedett, a károsodások előrejelzésére a kontrakciós határgörbét (Forming Limit Curve-FLC) alkalmazzák. Problémát jelent azonban, hogy a kontrakció megjelenése eltérhet [2] összetett alakváltozási útvonalak esetén, ezért az FLC a törést alul vagy túlbecsülheti. Az FLC hiányosságai miatt a kutatások egyre inkább az anyag alakíthatóságának a valódi határának [3], vagyis a törési alakváltozásnak a meghatározására és alkalmazására irányulnak.

Képlékeny alakítás hatására az anyagokban jelenlévő üregek (pl.: anyagfolytonossági hiányok) elkezdnek növekedni, új üregek keletkeznek [4], majd összenőnek, és egy bizonyos üreg-térfogathányad elérése után az anyag belső felületei elválnak egymástól, vagyis létrejön a törés. Az üregek növekedése (illetve torzulása), így az üreg-térfogathányad növekedése nem azonos egytengelyű húzó-, illetve tiszta nyíró igénybevétel esetén. A törésig elviselt alakváltozás tehát függ a feszültségállapottól, ezért ennek jellemzésére a feszültség háromtengelyűséget (η) vezeték be, amely a hidrosztatikus feszültségkomponens σ_m és az összehasonlító (von Mises) feszültségek $\bar{\sigma}$ hányadosával írható le.

Kezdetekben a törési határalakváltozások meghatározására irányuló vizsgálatok – felhasználástól függően – a feszültségtérnek csak kisebb tartományát fedték le. Bao és Wierzbicki [5] az elsők között voltak, akik összegyűjtötték és továbbfejlesztették a törési alakváltozások meghatározását célzó vizsgálatokat. Az általuk összeállított vizsgálatosorozat a teljes feszültségteret lefedi, azonban egyszerre tartalmaz térfogat- (1. ábra négyzettel jelölt pontok), illetve lemezalakítási (1. ábra körrel jelölt pontok) vizsgálatokat, így a repedés megjelenése nem minden esetben egyezik meg a lemezkatrészeknél megszokott síkból kiinduló repedéssel. Ez az eltérés megkérdőjelezhetővé teszi a károsodási határállapot alkalmazhatóságát lemezkatrészek gyártása esetén.

Az eltérések kiküszöbölésére napjainkban is folynak a kutatások, hogy olyan síklemezből gyártható próbatesteket és vizsgálatosorozatokat hozzanak létre, amelyek az autóiipar számára releváns tartományt megfelelően leírják.

Végeeselemes modellező szoftverekben a károsodási kritériumot valamilyen – a fizikai vizsgálatokkal meghatározott



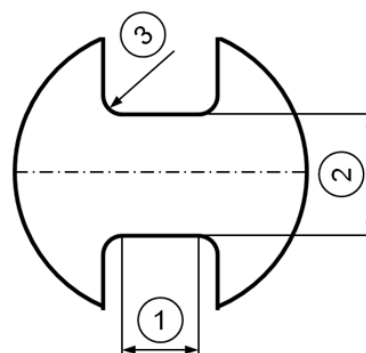
1. ábra: Törési modellek és a fizikai mérések eredményeinek kapcsolata

törési pontokat közelítő – károsodási modellel írják le. Ahogy az az 1. ábrán, a fizikai mérési pontokkal összhangban bemutatott, maximális nyírófeszültségi modell és konstans határalakváltozási modell összevetéséből is látszik, jelentős eltérés lehet az egyes törési kritériumok között [6].

Ebben a cikkben a tiszta nyírás ($\eta = 0$), illetve a kéttengelyű húzás ($\eta = 2/3$) közötti tartományban elviselt törési határalakváltozás lemez próbatestekkel történő meghatározásának lehetőségeit mutatjuk be három nagyszilárdságú Dual Phase (DP) acél (DP600, DP800, DP1000) vizsgálatán keresztül. A próbatestek bemutatása után ismertetjük a vizsgálati környezetet, valamint a törési alakváltozások meghatározásának módját. A vizsgálatok kiértékelése után elemezzük, hogy a három DP acél lemez próbatesteivel meghatározott törési pontjaira milyen közelítés illeszkedik a legjobban.

2. A vizsgálatok leírása

Jelen cikk célja, hogy bemutassa a törési határalakváltozás vizsgálatának lehetőségeit lemez próbatest esetére a tiszta nyírás, illetve a kéttengelyű húzás közötti tartományra. Bár a tartomány egyes egzakt feszültségállapotaihoz akár több különbözően működő próbatest is rendelkezésre áll [7], még nincs olyan egységes és szabványosított vizsgálati módszer, amellyel az egész feszültségtér leírható lenne. Az eredmények összevethetősége miatt jellemzően olyan vizsgálatokat alkalmaznak, amelyek a feszültségtér minél nagyobb tartományát lefedik. Elterjedten alkalmazzák tehát az FLC felvételére használt úgynevezett Nakazima vizsgálatot [8] a törési pontok meghatározására az egy- ($\eta = 1/3$), illetve kéttengelyű ($\eta = 2/3$) húzó igénybevétel közötti tartományban. A tiszta nyírás, illetve az egytengelyű húzás közötti tartományban a törési pontok meghatározása jellemzően a tiszta nyíró próbatestek módosításával létrehozott geometriákon keresztül történik. A jelen kutatómunkában elvégzett vizsgálatokat – illetve próbatesteket – ennek megfelelően két részletben fogjuk ismertetni a következő alfejezetekben.



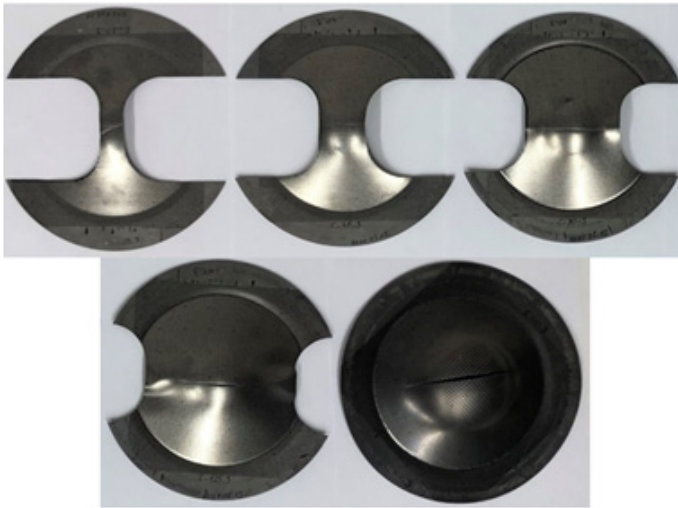
2. ábra: Szabványos Nakazima próbatest [8]

2.1 Nakazima vizsgálat

Az egy és kéttengelyű húzó igénybevételi tartományban a törési határalakváltozások meghatározása általánosan a Nakazima vizsgálat eredményeinek a törési alakváltozásokra vonatkozó kiterjesztésével történik. Ehhez első lépésben a szabványosított [8] vizsgálatot kell elvégezni, melynek lényege, hogy a különböző feszültségállapotokat azonos módon kialakított, de eltérő híd szélességű próbatestekkel hozzák létre.

A 2. ábra a szabványos próbatest geometriát szemlélteti, ami alapján a vizsgálatokhoz legyártásra kerültek a próbatestek. Az ábrán az 1-gyel és 3-mal jelölt méret minden próbatest esetén 30 mm volt. A különböző feszültségállapotok a próbatest 2-vel jelölt szélességével változtathatók, ezért a vizsgálatokhoz mind a három DP acélból öt különböző híd szélességet munkáltunk (20 mm, 40 mm, 80 mm, 125 mm, 200 mm) lézervágással az 1 mm-es táblalemezekből. Anyagminőségenként 5 különböző geometriájú próbatest került 3 ismétléssel kimunkálásra.

Mivel napjainkban nincs lehetőség lemezalkatrészek esetében közvetlenül a feszültség háromtengelyűség mérésre, bevett szokás szerint a nagyobb és kisebb főalakváltozások arányát felhasználva transzformálják az egyes pontokat a feszültségtérbe. A feszültségfüggő törési alakváltozások meghatározására tehát a próbatestek terhelése során a megszokott alakváltozások mérésére van szükség. Nakazima próbatesteknél összetett alakváltozások miatt a hagyományos nyúlásmérési módszerek nem adnak megfelelő eredményt, így optikai mérőrendszert alkalmaznak. Az optikai méréseket összefoglalóan DIC rövidítéssel jelölik, amely a Digital Image Correlation (digitális képkorrelációs eljárás) szavak kezdőbetűiből adódik ki. Az optikai mérések elvégzése a Nakazima próbatestek esetében egy négykamerás mérő- és kiértékelő rendszerrel történt, a Miskolci Egyetem Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetében. A Vialux Autogrid kamerarendszerrel történő méréshez a próbatest felületére szabályos geometriai alakzatot kell felvinni az alakváltozás méréséhez, így a vágást követően szitanyomással 2 mm osztástávolságú négyzetrács háló került a próbatest felszínére. A háló minősége alapjaiban határozza meg a mérési eredményeket, mivel az egymáshoz képest szögben álló kamerák a háló egyes csomópontjait érzékelik, és ezeknek a képfelvételeken rögzített elmozdulása alapján



3. ábra: Tönkrementelig alakított Nakazima próbatestek

származtatja az alakváltozásokat. A próbatest hálózása, valamint az optikai mérőrendszer kalibrálása után a vizsgálat a próbatest szakadásig történő terhelésével megy végbe. Ehhez első lépésben az előkészített próbatestet egy húzó és egy szorítógyűrű között kell rögzíteni úgy, hogy a lemez vizsgálati tartományon kívül eső részének az elmozdulása gátolva legyen. Ennek elérésére (híd-szélességtől függően), 250-300 kN terhelőerő szorította a lemezeket. A próbatestet, rögzítése után, annak síkjára merőlegesen, egy félgömb végződésű nyomófej terheli állandó elmozdulási sebességgel egészen a szakadásáig. A hálózott, majd elszakított próbatesteket a 3. ábra szemlélteti.

A vizsgálat eredményeit befolyásolhatja a megfelelő mintavételezési sebesség, így a szabványnak megfelelő 1 mm/perc terhelési sebesség mellé 10FPS (Frames Per Second) képrögzítési sebességet választottunk.

2.2 Nyíró igénybevételnek kitett próbatestek

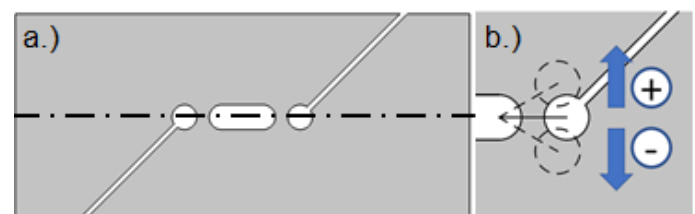
Az egy-, illetve kéttengelyű húzó igénybevétel közötti tartományt lefedő Nakazima vizsgálatok után az egytengelyű húzó-, illetve a tiszta nyírás közötti tartományban volt szükség a törési határalakváltozások meghatározására. Ez a tartomány a kistrádiuszú, egyenes falú húzott daraboknál releváns [9], ugyanis ezeknél az alakváltozási állapotok (és így a feszültségállapotok is) a nyíró igénybevételnek felelnek meg [10]. Mivel a nyíró igénybevétel hatására létrejövő alakváltozások leírására nincs a Nakazima vizsgálatnak megfelelő nagy tartományt lefedő módszer, a törési alakváltozás vizsgálatára egyszerre alkalmaznak indirekt és technológiai vizsgálatokat is. Bár alkalmazás szempontjából a technológiai vizsgálatok érvényessége megkérdőjelezhetetlen, a határalakváltozások meghatározásának még mindig az egytengelyű húzással terhelt próbatestek alkalmazása a legelterjedtebb módja. Ezen próbatestek közös jellemzője, hogy a próbatest geometriai kialakítása olyan, hogy a húzó igénybevétel hatására az alakváltozó zónájának oldalai egymással párhuzamos, de ellentétes irányban mozdulnak el, ezzel létrehozva a nyíró igénybevételt a lemez síkjában.

A tiszta nyíró igénybevétel meghatározására rendelkezésre áll szabványos próbatest [11], azonban ennél a terhelés során fellépő oldalirányú erők miatt a nyíró zóna elfordulhat [12], melynek eredményeként nem jön létre tiszta nyíró igénybevétel. További problémát jelent, hogy a kontúron fellépő húzó igénybevétel hatására egyes esetekben hamarabb keletkezhet repedés, mint a nyíró zónában, ami a nyíró határalakváltozás alulbecsléséhez vezethet. A nyíró próbatestek ezen problémáinak kiküszöbölése folyamatos kutatásokat indukál, melynek eredményeként új és bonyolult próbatest geometriák kerülnek kialakításra. Ezek gyártása költség és időigényes folyamat, emellett – mivel az optimális geometria anyagfüggő – minden vizsgált anyag esetén a geometria újraoptimalására van szükség.

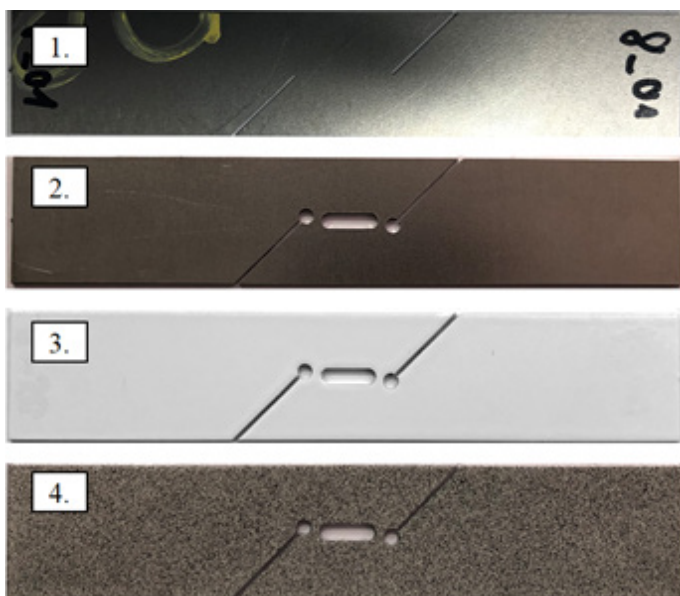
Ezeket a problémákat felismerve, korábbi kutatásaink során végeselemes modellezés segítségével kifejlesztettünk egy olyan próbatestet [13], mely egyszerűen megmunkálható geometriai elemeket tartalmaz, és optimalizálása is egy paraméter változtatásával végrehajtható. Az új nyíró próbatestet sematikusán a 4. ábra a.) része szemlélteti.

Korábbi kutatásaink során az új próbatest geometriát a nyíró zóna szögének megváltoztatásával optimalizáltuk a jelen cikkben vizsgált három DP acélra. A vizsgálatok azt mutatták, hogy ahhoz, hogy a feszültségállapot a teljes terhelés során a tiszta nyírásnak feleljen meg a 4. ábra b.) részén feltüntetett jelölés szerint a nyíró zóna negatív irányú elforgatására van szükség. Érdekes volt továbbá megfigyelni, hogy a három különböző DP acél esetén a zóna elforgatási szöge eltér (DP600-13°, DP800-11°, DP1000-9°) [14], és a zónaszög illetve a szilárdság között fordított arányosság áll fent.

A teljes feszültségtér lefedéséhez a tiszta nyírás mellett szükség van a nyíró-szakító tartományban is törési határalakváltozások meghatározására. Ebben a tartományban a próbatesteket jellemzően a tiszta nyíró igénybevételi próbatestek módosításával hozzák létre úgy, hogy a nyíró zónának a szögét változtatják meg, ezzel módosítva a zóna viselkedését. Ezeknél a próbatesteknél – a tiszta nyíró próbatestekkel szemben – nincsenek egzakt előírások a feszültségállapotra vonatkozóan, így célunk az volt, hogy a vizsgálatok során két jól elkülöníthető pontot hozzunk létre a feszültségtér releváns tartományában. Az alakváltozó zóna terhelésének szöge, valamint a feszültség háromtengelyűség közötti összefüggés figyelembe vételével két új próbatest geometriát hoztunk létre, a 4. ábra b.) részén szemléltetetteknek megfelelően a zóna pozitív



4. ábra: a) Az új próbatest geometria, b) A nyíró zóna elforgatása



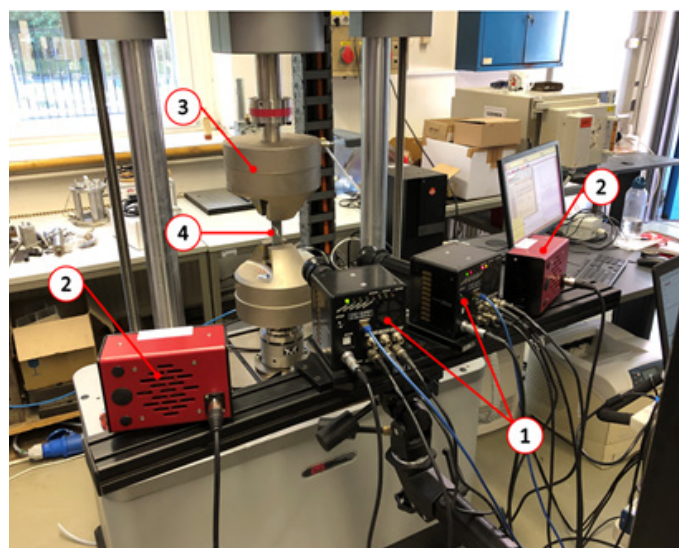
5. ábra: DP800 nyíró próbatest előkészítésének lépései

irányú, $+30^\circ$ illetve $+60^\circ$ -os elforgatásával. Mivel – ahogy azt korábban említettük – nincs előírás egzakt feszültség-állapotra vonatkozóan, mind a három acélmínőség esetén az említett két próbatest geometria került alkalmazásra.

Az 5. ábrán összefoglaltuk az új kialakítású próbatestek gyártási, illetve vizsgálat előkészítési lépéseit. Az új próbatestek geometriája két lépésben készült. Először a táblalemezről a próbatestek külső kontúrja – valamint a gyártás felgyorsítása érdekében a nyírózó zónát a kontúrral összekötő nyitás – került lézervágással kimunkálásra (5. ábra 1). A nyíró igénybevétellel terhelt próbatestek alkalmazhatóságát a nyírózó zóna kontúrjának gyártástechnológiája erősen befolyásolja [14], ennek megfelelően ezek a geometriai elemek forgácsolással készültek (5. ábra 2).

Mivel a próbatest vizsgált nyírózó zónájában összetett alakváltozások jönnek létre, jelen vizsgálatoknál is optikai mérőrendszer alkalmazására volt szükség. Ebben az esetben azonban nem volt lehetőség a Vialux rendszer használatára, ugyanis a vizsgálati zóna magassága mindössze 1,5 mm volt, ami nem tette lehetővé a már említett négyzetrács háló felvitelét.

A nyíró próbatestek optikai méréshez így egy másik optikai alakváltozás mérő rendszer, a GOM-Aramis került alkalmazásra. Ehhez azonban a próbatest további – előzőtől eltérő – előkészítésére volt szükség, ugyanis a GOM a próbatest felületén sztochasztikusan elhelyezett (általában fekete színű) festékpontokat elemez. A nagyobb kontraszt elérése érdekében bevett módszer, hogy a fekete festékpontok felvitelére előtt a próbatest felületét fehér festékkel alapozzák. A nagyobb kontrasztra azért van szükség, mert ez a rendszer a fekete festékpontokat veszi figyelembe, és a terhelés során ezeknek az elmozdulásából számítja ki automatikusan az alakváltozásokat. Az előkészítés során tehát a próbatest vizsgálni kívánt felületét először tisztítottuk, majd alapoztuk fehér festékkel (5. ábra 3). A próbatest ezután kapta meg a méréshez szükséges mintázatot (5. ábra 4).



6. ábra: Vizsgálati elrendezés a nyíró és nyíró-szakító próbatestek vizsgálatához

Mind a nyíró igénybevételi, mind a nyíró-szakító próbatesteken végzett méréseket a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük. A próbatestek terhelésére egytengelyű húzó igénybevételt alkalmaztunk, amit a befogópofák állandó elmozdulási sebessége biztosított. Az előkísérletek azt mutatták, hogy a szakadás a nyíró próbatestek esetében 2 mm körüli dugattyú elmozdulásnál következik be. A kis elmozdulás mellett létrejövő nagy alakváltozást figyelembe kellett venni a megfelelő mintavételezéshez. A befogópofák relatív elmozdulási sebességét így 0,2 mm/perc-re választottuk. A kis terhelési sebesség lehetőséget adott a megfelelő mintavételezésre, melynek sebessége változott a vizsgálat során: a rugalmas alakváltozás tartományában 5FPS-t, az egyenes nyúlásnak megfelelő tartományban 10FPS-t, a szakadás várható bekövetkezése előtt 15FPS-t alkalmaztunk. Az egyes mintavételezési sebességeket az előkísérletek eredményei alapján határoztuk meg. A próbatestek alakváltozásáról a képeket egy Titanar objektívvel szerelt Photron Fastcam kamera készítette. A terhelést egy Instron E10000 biaxiális elektro-dinamikus berendezés szolgáltatta.

A 6. ábra a vizsgálati elrendezést szemlélteti. Az ábrán 1. jelöli a két, szögben álló kamerát az objektívekkel, amelyek az alakváltozás közben készítették a felvételeket a próbatestről, valamint az azon levő festékpontok elmozdulásáról. Mivel az optikai mérés sarkalatos paramétere a megvilágítás, az ábrán 2-vel jelöltem a reflektorokat, melyek a kamerával párhuzamos kék fényel világítják meg a próbatestet, így téve lehetővé a legjobb minőségű képek elkészítését. Az ábrán 3 jelöli a 16 bar-os hidraulikus befogókat, és a közéjük helyezett, 4-gyel jelölt próbatestet.

3. A törési alakváltozások meghatározása

Jelen kutatás célja a törési alakváltozások meghatározása az autóiipar számára releváns feszültség háromtengelyűségi térben. Az előző fejezetben bemutattuk a Nakazima, illetve az új fejlesztésű nyíró igénybevétellel

terhelt próbatestek geometriáját és vizsgálatát. Ebben a fejezetben a vizsgálatok kiértékelésének menetét ismertetjük.

3.1 Nakazima próbatestek törési határ alakváltozása

A Nakazima próbatestek vizsgálata és általuk az FLC pontjainak meghatározása napjainkban már rutin feladatnak számít. A törési határalakváltozás meghatározása azonban két lépésben – a próbatestek és vizsgálati eredmények szabványostól eltérő kiértékelésével – történik. Első lépésben az optikai mérőrendszer segítségével meg kell határozni a szakadás előtti utolsó képen a legnagyobb mérhető a logaritmikus főalakváltozásokat ($\varepsilon_{1,2,3}^{fDIC}$). Második lépésben a szakadásig terhelt próbatestek esetében kell megmérni a törési lemeztvastagságokat.

Ahhoz, hogy mérni tudjuk a lemeztvastagság megváltozását, a félgömbvégződésű bélyeggel szakadásig terhelt próbatestekből első lépésben a próbatesten megjelenő repedést is magába foglaló tartomány került kimunkálásra (7. ábra a) részén piros téglalappal jelölt tartomány). Bevett szokás szerint a kimunkált, és a törési helyet is magába foglaló tartományt ezután általános csiszolatkészítési eljárásnak megfelelően műgyantában rögzítik, majd csiszolják és polírozzák, ezután az így elkészült mintákon végzik el a törési lemeztvastagság mérését mikroszkóp segítségével. Mivel ez, az adott próbatest szám miatt (3x15 db) meglehetősen hosszadalmas folyamat lett volna, a csiszolás és a vastagságmérés kivitelezésére egy mintaelőkészítő készüléket (7. ábra b) részét) terveztünk és gyártottunk le, amely lehetőséget nyújt a darabok műgyantába öntés nélküli rögzítésére, csiszolására, majd ezek után a darabok törési vastagságának mérésére. A készülék működésének alapja, hogy a szakadás kimunkált környezetét az ábrán 1-el jelölt nyomólap a 2-vel jelölt gumipárnán keresztül szorítja a 3-mal jelölt gömbszeletre. A 4-el jelölt alaplapra szerelt gömbszelet sugara megegyezik a vizsgálat során

alkalmazott bélyegével, így a vizsgálat során, a szakadás időpontjának megfelelő elrendezésben van lehetőségünk méréseket végezni. Az 5-tel jelölt ellendarabok a csiszolás folyamata során biztosítják a megtámasztást, ezeket a 6-tal jelölt ellendarab szorítja az alaplaphoz. A leírt módszerrel az elszakított próbatestből kimunkált, majd csiszolt darabokról készült mikroszkópi képet, valamint a mért vastagságot a 7. ábra c) része szemlélteti. A törési lemeztvastagság meghatározására a próbatest két töretfelületén mért, egymással szemben lévő vastagságok átlagát használtuk fel.

A kezdeti és a törési lemeztvastagság ismeretében lehetőségünk nyílt a töréshez tartozó, vastagságirányú alakváltozás származtatására:

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0}, \quad (1)$$

ahol a t_0 a lemez kiinduló vastagsága, t pedig a töret mikroszkóppal mért vastagsága. Az így kapott harmadik főalakváltozás jóval nagyobb a DIC-módszerrel mértnél. A kettő közötti különbség $\Delta\varepsilon_3$. A jól ismert tény figyelembevételével, miszerint a törés síkalakváltozási állapotban történik [3], térfogatállandóság feltételezésével a $\Delta\varepsilon_1 = -\Delta\varepsilon_3$ összefüggés adódik. A nagyobb törési főalakváltozás tehát a következő összefüggés szerint határozható meg:

$$\varepsilon_1^f = \varepsilon_1^{fDIC} + \Delta\varepsilon_1, \quad (2)$$

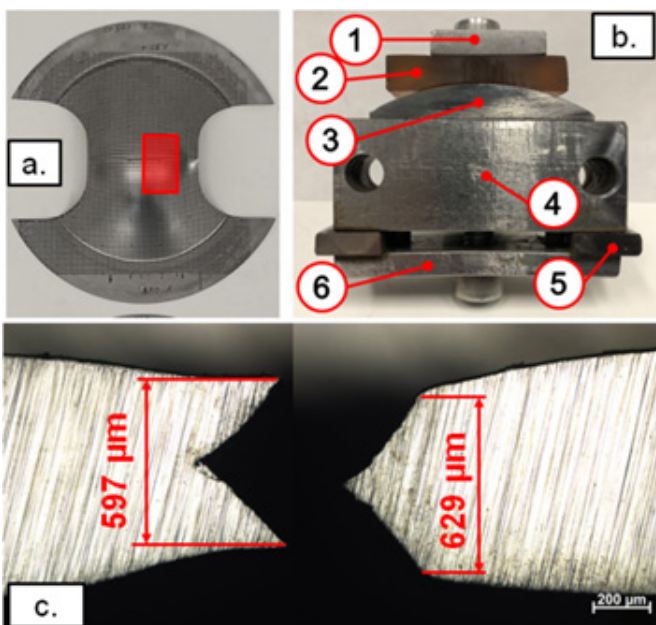
ahol ε_1^{fDIC} a DIC-vel meghatározott nagyobb főalakváltozás a törést megelőző utolsó képen és ε_1^f a nagyobbik törésig elviselt főalakváltozás. Mivel ahogy azt említettük a törés síkalakváltozási állapotban megy végbe, a kisebbik törési főalakváltozás megegyezik a DIC-vel meghatározottal, tehát $\varepsilon_2^f = \varepsilon_2^{fDIC}$. A törési főalakváltozások ismeretében a Nakazima próbatestekkel meghatározott törési pontokat transzformálni lehet a feszültségtérbe.

3.2 Nyíró-szakító próbatestek törési határ alakváltozása

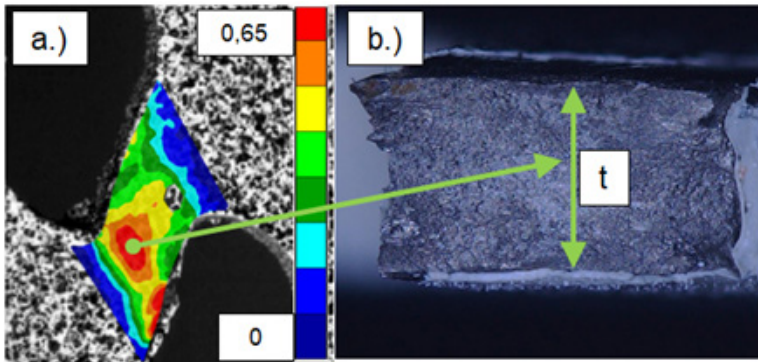
Mind a +30°-os, mind a +60°-os nyírózó zóna elforgatással meghatározott próbatestből, minden vizsgált anyagminőségből 4-4 db próbatest sorozatot készítettünk és ezt követően a 6. ábrán bemutatott vizsgálati körülmények között szakadásig alakítottuk, miközben folyamatosan rögzítettük a próbatestek nyírózó zónájának felszínén az alakváltozás eloszlását GOM-Aramis rendszerrel.

A törési határ meghatározása ezen próbatestek esetében is a már bemutatott törési lemeztvastagság módszer alkalmazásával történt. A károsodás utáni lemeztvastagság meghatározásának módját a 8. ábra szemlélteti.

Első lépésben a törés előtti utolsó képen (8. ábra a) részén) a legnagyobb összehasonlító alakváltozású pontban határoztuk meg a főalakváltozások értékeit. Második lépésben a próbatest töretfelületén – a legnagyobb összehasonlító alakváltozásnak megfelelő pontban – lemértük a lemeztvastagság változását (8. ábra b) részén). Ezek után az előzőekben ismertetett módszer segítségével határoztuk meg a törési főalakváltozásokat.



7. ábra: a) A kimunkált tartomány, b) Mintaelőkészítő készülék, c) Törési lemeztvastagság mérése



8. ábra: a) Törés előtti alakváltozás eloszlás, b) A törési lemezvastagság mérése

3.3 Tiszta nyíró próbatest határ alakváltozása

Tiszta nyíró próbatest esetén a lemezvastagság nem változik. Ennek megfelelően ebben az esetben a törési határ alakváltozásokat pusztán a szakadás előtti utolsó képen megfigyelt főalakváltozások adták.

4. Törési határalakváltozások a feszültségtérben

Az előző fejezetekben ismertettük a törési határalakváltozások meghatározásához szükséges próbatestek geometriáját, a vizsgálatok menetét illetve azok kiértékelését. Ebben a fejezetben az elvégzett vizsgálatokkal meghatározott eredményeket szemlélítjük. Ahogy az korábban említésre került, jelenleg még nincs módszer terhelés közben a fellépő feszültség háromtengelyűség mérésére, így bevett szokás a törési főalakváltozásokkal meghatározott pontok feszültségtérbe történő transzformálása.

A transzformációhoz első lépésben meghatároztuk az egyes próbatestek törési pontjaihoz tartozó alakváltozási irányokat (β), amit a törési főalakváltozások hányadosa ad meg a következők szerint:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2^f}{\varepsilon_1^f} \quad (3)$$

Az alakváltozási-, illetve feszültségállapotok között kapcsolat van, így az alakváltozási irány alapján származtatható a főfeszültségek (σ_1, σ_2) aránya (α) a következő összefüggéssel:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1+2\beta}{2+\beta} \quad (4)$$

A főfeszültségek arányának felhasználásával a feszültség háromtengelyűség (η) értékének a meghatározása a következő összefüggéssel lehetséges:

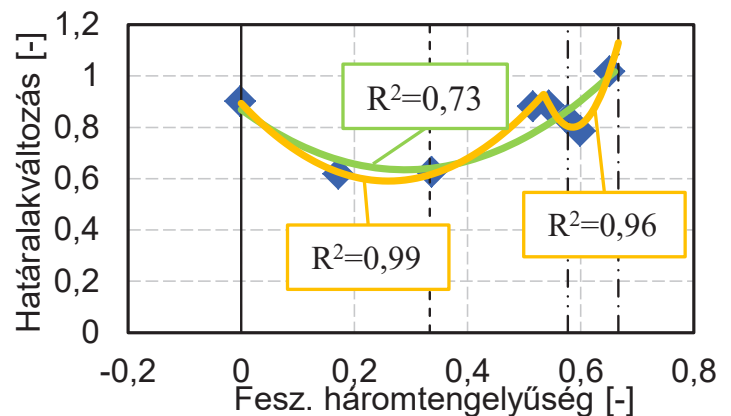
$$\eta = \frac{\alpha+1}{3\sqrt{\alpha^2-\alpha+1}} \quad (5)$$

Az így származtatott feszültség háromtengelyűség függvényében, a főalakváltozások alapján számított összehasonlító alakváltozásokat DP800 acélmínőség esetére a 9. ábra kékekkel jelölt pontok foglalják össze.

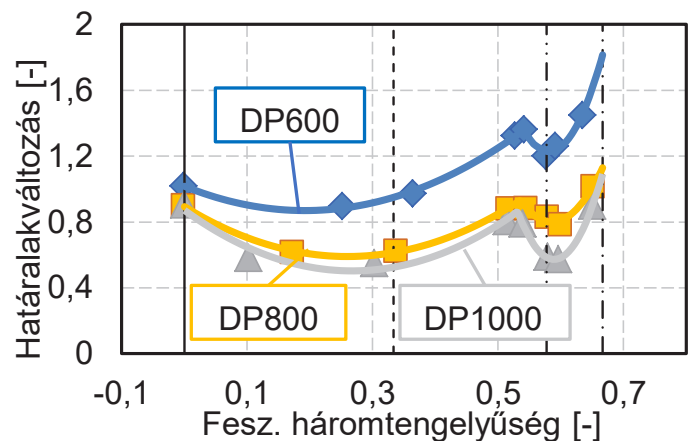
A törési pontokat a feszültségtérben – a lehetőségeket figyelembe véve – két különböző módon

közelítettük. A vizsgált pontokat először a világoszölddel jelölt másodfokú polinommal írtuk le, ebben az esetben a korrelációs együttható 0,73 értékű volt. Jobb közelítést kaptunk azonban, ha a törési pontokat két részre osztottuk és azokat két másodfokú polinommal közelítettük. Ebben az esetben az R^2 a kisebb feszültség háromtengelyűség ($\eta=0\dots0,54$) esetén 0,99, a nagyobb háromtengelyű feszültségértékek ($\eta=0,54\dots0,66$) esetén pedig 0,96 volt. Ezek alapján kijelenthető, hogy az általunk vizsgált összefüggések közül a törési pontokat DP800 acél esetén két egymást metsző másodfokú polinommal (dupla parabola) lehet elérni.

A három vizsgált DP acél törési pontjait transzformáltuk a feszültségtérbe, majd a DP800 acélnál bemutatott módszer alapján a törési pontokat az azokra legjobban illeszkedő dupla parabolával közelítettük. A legjobb illeszkedést mind a három vizsgált acél esetében úgy kaptuk, hogy a két polinom közül az alacsonyabb feszültség háromtengelyűség értékekhez tartozót a nyíró; $+30^\circ$; $+60^\circ$ valamint a 20 mm hídszélességű Nakazima próbatestekre, a magasabb feszültség háromtengelyűség értékekhez tartozót pedig a 40 mm; 80 mm; 125 mm, illetve 200 mm-es Nakazima próbatestek által meghatározott törési pontokra illesztettük. Az eredményeket a 10. ábra foglalja össze, ami alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a DP acélok



9. ábra: Törési pontok és közelítési lehetőségeik a feszültségtérben



10. ábra: DP acélok törési határ alakváltozásai a feszültségtérben

szilárdságának növekedésével a törésig elviselt alakváltozás csökken.

A három vizsgált anyagra alkalmazva a megközelítést megfigyelhető, hogy a parabolák minden esetben ugyanannál a feszültség háromtengelyűség értéknél ($\eta=0,54$) metszik egymást.

A törési határgörbéket a feszültségtérben vizsgálva tehát kijelenthető, hogy DP acélok esetében a törési pontokat legjobban közelítő duplaparabola metszéspontja minden esetben ugyanazon feszültségértéknél metszi egymást, eltérés pusztán az adott feszültségértéknél elviselt törési alakváltozásban van, amely fordítottan arányos a vizsgált anyag szilárdságával.

5. Összefoglalás

Jelen cikkben három nagyszilárdságú DP acél törési alakváltozásának a meghatározási lehetőségeit vizsgáltuk két részletben. Először az alakítási határdiagram meghatározására alkalmas Nakazima vizsgálattal határoztuk meg a törési határ alakváltozásokat az egy-, illetve kéttengelyű húzó igénybevétel közötti tartományban. Második lépésként az új fejlesztésű nyíró-, illetve az ennek módosításával létrehozott nyíró-szakító próbatestek segítségével az egytengelyű húzó-, illetve a tiszta nyíró igénybevétel közötti tartományban határoztunk meg törési pontokat. A DP 800 acélon a bemutatott próbatestekkel meghatározott törési pontok feszültségtérbe történő transzformálásával vizsgáltuk az azokat legjobban közelítő összefüggéseket. Megállapítottuk, hogy a törési pontokat a legjobban két egymást metsző másodfokú polinommal lehet közelíteni. A DP600, DP800, illetve DP1000 acéloknál meghatározott törési határt leíró összefüggések összehasonlítása azt mutatta, hogy a vizsgált anyagok esetén a törési alakváltozások és a szilárdság között fordított arányosság van. Érdekes volt továbbá megfigyelni, hogy bár a különböző szilárdságú DP acélok törési alakváltozásai eltértek a szilárdság függvényében, a törési pontokat közelítő duplaparabolák minden esetben $\eta=0,54$ feszültség háromtengelyűség értéknél metszették egymást.

Irodalomjegyzék

[1] Tisza. M; Czinege. I; Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts; International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (2018) pp.: 229-238 <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.09.001>

- [2] Hora P.; Berisha B.; Hirsiger D.; Komischke T.; Schober R.; Critical aspects of the experimental and theoretical crack prediction in sheet and bulk metal forming; Forming Technology Forum 2018 pp.: 1-14.
- [3] Atkins A.G., Fracture in forming; Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) 609-618 SSD10924-0136 (95) 01875-F C
- [4] Tvergaard V., Needleman A.; Nonlocal effects on localization in a void sheet International Journal of Solids and Structures Volume 34, Issue 18, June 1997, Pages 2221-2238.
- [5] Yingbin B., Wierzbicki T.; On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space; International Journal of Mechanical Sciences 46 (2004) 81-98 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006>
- [6] Wierzbicki T., Yingbin B., Young-Woong L., Yuanli B.; Calibration and evaluation of seven fracture models; International journal of Mechanical Sciences 47 (2005) 719-743 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.03.003>
- [7] Takuda H., Ozawa K., Hama T., Yoshida T., Nitta J.; Forming Limit Prediction in Bore Expansion by Combination of Finite Element Simulation and Ductile Fracture Criterion Materials Transactions, Vol. 50, No. 8 (2009) pp. 1930 to 1934; <https://doi.org/10.2320/matertrans.P-M2009817>
- [8] ISO/DIS 12004- Metallic Materials- Sheet and strip- Determination of forming limit curves
- [9] Gorji M., Berisha B., Manopulo N., Hora P.; Effect of through thickness strain distribution on shear fracture hazard and its mitigation by using multilayer aluminum sheets; Journal of Materials Processing Technology 232 (2016) 19-33; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.014>
- [10] Gorji M., Berisha B., Manopulo N., Hora P.; Experimental based crack failure criterion and its application in deep drawing operations. IDDRG 2015 conference shanghai china 2015, May 31 - June 3
- [11] ASTM Standard B 831-05 Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/B0831-05, www.astm.org
- [12] Brosius A., Yin Q., Güner A., and Tekkaya A.E.; A New Shear Test for Sheet Metal Characterization; steel research int. 82 (2011) No. 4; DOI: 10.1002/srin.201000163E
- [13] Gál V., Lukács Zs.; A new specimen for investigating shear fracture strain; International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG 2021) 21st June - 2nd July 2021, Stuttgart, Germany; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (2021) 1157 012060, doi:10.1088/1757-899X/1157/1/012060E
- [14] Gál V., Lukács Zs., Béres L., Kovács P. Z., Nagyszilárdságú acélok törésig elviselt nyíró alakváltozásának vizsgálata; XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT 2022 Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2022) pp. 41-44., 4 p.