

Optikai mérésekkel és szimulációkkal támogatott anyagtudományi vizsgálatok

Tatár Levente^a, Kocsó Endre^b, Bereczki Péter^c, Molnár János^d

^aEnergiatudományi Kutatóközpont, kutatómérnök, tatar.levente@ek-cer.hu

^bDunaújvárosi Egyetem, kutatómérnök, KOCSOEE@uniduna.hu

^cDunaújvárosi Egyetem, tudományos munkatárs, BERECZKIP@uniduna.hu

^dDunaújvárosi Egyetem, kutatómérnök, Molnar.Janos@uniduna.hu

Absztrakt

Az anyagvizsgálati mérések hagyományos kiértékelése gyakran egyszerű számítási modelleken alapul. A mérések során fellépnek az egyszerű modellel nem kezelhető jelenségek. Optikai mérésekkel kiegészítő információkat nyerünk a próbatestek viselkedéséről. A méréseket a próbatestek digitális párján szimuláljuk. A mérést és szimulációt együttesen az anyagtulajdonságok jobb megismerésére használjuk.

Abstract

Traditional evaluation of material science measurements is usually based on simple models. Phenomena not covered by the simple models occur during measurements. Optical measurements give additional information on specimen behaviour. Simulating the measurements is performed on digital twins of real specimens. Both measurements and simulations are used to assess more realistic material behaviour.

Kulcsszavak

anyagtudomány, optikai mérés, szakítóvizsgálat, vége-selemes szimuláció, digitális pár

Keywords

material science, optical measurement, tensile test, finite element simulation, digital twin

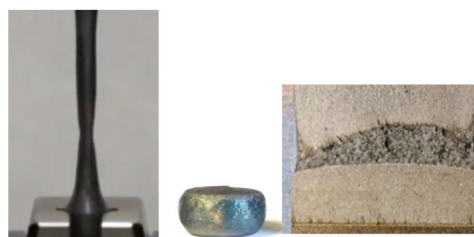
1. Bevezetés

Anyagvizsgálati mérések során általában valamilyen erő- és elmozdulás-jellegű mennyiséget mérünk egyidőben. Ez legtöbbször erő és elmozdulás, de pl. csavaróvizsgálat esetén lehet nyomaték és szögelfordulás is. Az erő jellegű mennyiségek mérése elvileg egyszerű, viszont az elmozdulás jellegű mennyiségek mérése az esetleges gyakorlati nehézségeken túl elvileg is problematikus. A Dunaújvárosi Egyetem és Energiatudományi Kutatóközpont

közös fejlesztéseként olyan rendszert dolgozunk ki, mely az elmozdulásokat optikai úton, a szokásosnál jóval több helyen méri. A mérések kiegészítéseként vége-selemes szimulációval modellezzük az anyagvizsgálati méréseket. A mért és számított adatok összehasonlítására interpolációs keretrendszert dolgozunk ki, mellyel az eltéréseket számszerűsítve túlléphetünk a „ránézésre hasonló” szintű összehasonlításon.

2. A mérésnél alkalmazott modellek, problémák az elmozdulások mérésével

A hagyományos kiértékelés általában egyszerű modelleken, számításokon alapul. Erre legegyszerűbb példa a szakítás és a zömítés. A számítási modell egytengelyű húzást, illetve összenyomást feltételez. A kísérlet elején az egytengelyű állapot ténylegesen jó közelítést jelent. Noha már a folyamat kezdetén is felléphetnek többtengelyű hatások, ezek olyannyira kis mértékben befolyásolják a kiértékelte mérési eredményeket, hogy ezek hatása gyakorlati szempontból elhanyagolható. A kísérlet előre haladtával viszont dominánssá válnak olyan jelenségek, melyek az egyszerű modellekkel már nem értelmezhetőek. Ilyen szakítóvizsgálat esetén a kontrakció, zömítés esetén a hordósodás (1. ábra a, b). Törésmechanikai hárompontos hajlítás során maga a számítási modell bonyolultabb, de itt is felléphetnek olyan jelenségek, melyek az „egyszerű” modellel nem értelmezhetőek. Ilyen a görbült, ferde repedésfront (1. ábra c).



1. ábra: A hagyományos kiértékelés során problémát jelentő jelenségek:
a) kontrakció
b) hordósodás
c) görbült, ferde repedésfront

Az általunk javasolt megközelítésben a méréseket hagyományos műszerezéssel végezzük, viszont optikai úton kiegészítő információkat nyerünk, ezért optikai mérésekkel támogatott vizsgálatokról beszélhetünk. A mérés elvét szakítóvizsgálaton keresztül mutatjuk be, majd rátérünk a zömítésre és a hárompontos hajlításra is. Végül a Vickers keménységmérés és a folyásgörbe viszonyait tárgyaljuk.

Szakítóvizsgálat során a keresztfej-elmozdulás nem tekinthető a próbatest megnyúlását kellő mértékben jellemző mennyiségnek, ugyanis a próbatest hengeres részének megnyúlásán kívül számos egyéb elmozdulást is mér. Ilyenek (a teljesség igénye nélkül) a próbatest fejeinek megnyúlása, a befogópofák helyezkedése, csúszása (pofás befogás esetén), a menetes illesztések megfeszülése (menetes befogásnál és a befogó-keresztfej között), csapfurat helyi rugalmas alakváltozásai, stb. Éppen ezért az általánosan használt elrendezésben a próbatestekre extenzométert helyeznek, melynek a próbatesttel együtt mozgó karjai a próbatest hengeres részének (vagy a téglalap, négyzet keresztmetszetű résznek) az elmozdulását mérik. Feltételezve, hogy a mérés során a próbatest mérés szempontjából releváns részének alakja hengeres, vagy egyenes hasáb alakú marad, a feszültséget és a nyúlást egyszerű formulákkal lehet meghatározni. A feszültség meghatározásához feltételezni kell a térfogatállandóságot, ami a képlékeny szakaszon jó közelítésnek számít, de a rugalmas szakaszon nem az, viszont a nagyon kis rugalmas nyúlások miatt nem okoz számottevő hibát. A folyamat vége felé ez az egyszerű megközelítés nem alkalmazható, a folyásgörbe meghatározásához közvetlenül nem használható fel a

kontrakció utáni szakaszon a hosszirányú extenzométer által mért jel. Lehetőség van keresztirányú extenzométer használatára is, de ebben az esetben is problémát jelent a kontrakció, ugyanis:

- a feszültség- és nyúláseloszlás a kontrakciós szakaszban megszűnik egytengelyűnek lenni,
- semmilyen garancia nincs arra, hogy a próbatest pontosan a keresztirányú extenzométer fölhelyezésének helyén kontrahál. Ilyen esetben bemetszett próbatestek alkalmazása megfelelőbb, viszont ekkor már a folyamat elején sem lehet a sima próbatestre használt formulákat alkalmazni.

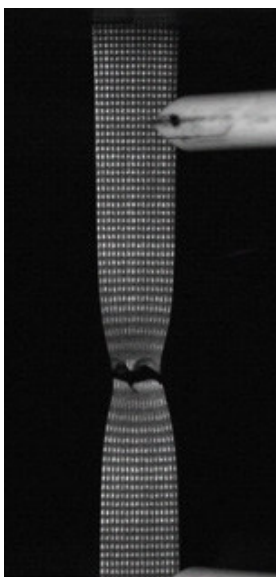
Zömítésnél az elsődleges problémát a próbatest és a szerszámok sík lapjai közti súrlódás jelenti. A súrlódás a próbatestek véglapjain az anyag mozgását gátolja, szemben a két véglap közötti résszel, ahol ilyen külső kényszer nincs. Ennek következtében alakul ki a jól ismert hordószerű alak. A hordósodás csökkentésére kenőanyagokat használnak, ezáltal a folyamat kezdetén a hordósodás gyakorlati szempontból elhanyagolható, de a mérés végére még így is jelentős marad.

3. Az alkalmazott megközelítés

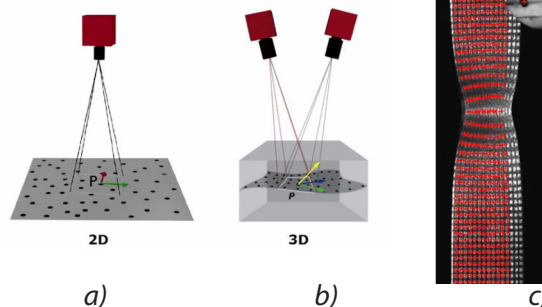
Az általunk alkalmazott megközelítésben a próbatesteket hagyományos műszerezéssel látjuk el, és optikai úton plusz információt nyerünk. Ilyen elrendezést mutatunk be a 2. ábrán.

Az optikai alapú elmozdulás-méréseket – a holografikus méréseket nem számítva – két nagy csoportra oszthatjuk:

- a darabon levő mintázat követésén alapuló eljárások (3. ábra),
- a darab pillanatnyi állapotának értékelésén alapuló eljárások (4. ábra).

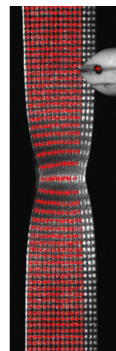


2. ábra: Extenzométerrel és optikai jelölésekkel egyaránt ellátott próbatest



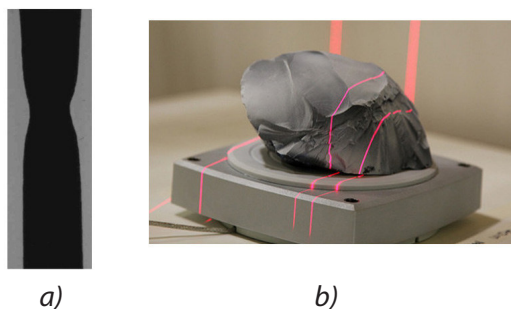
3. ábra: A darabon levő mintázat követésén alapuló eljárások

- a) 2D képkorreláció szabálytalan mintázattal
b) 3D képkorreláció szabálytalan mintázattal
c) Szabályos mintázat



A darabon levő mintázat lehet szabályos, mint a mi esetünkben, vagy szabálytalan, mint amelyet 2D és 3D képkorrelációnál használnak. Az eljárások lényegét a 3.a, b és c ábrán mutatjuk be.

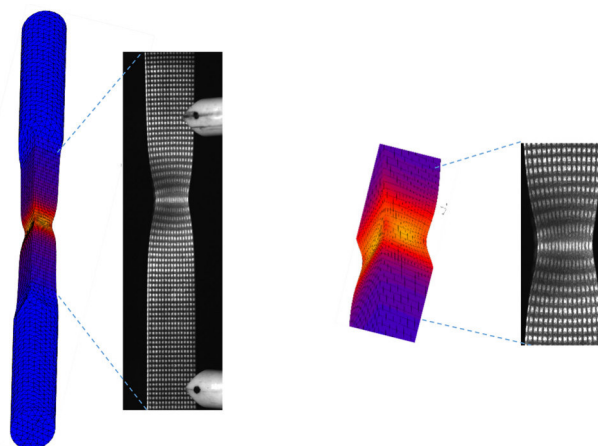
A darab pillanatnyi állapotának értékelésén alapuló eljárások esetén nem egy darab felületére felvitt mintázat alakulását követjük, hanem a pillanatnyi állapotot jellemző képeket. Egyszerű kontúrkövetésnél „csak” a darab és a háttér közötti kontúr egyértelmű és



4. ábra: A darab pillanatnyi állapotának értékelésén alapuló eljárások:
 a) Szakítópróbatest kontúrjának követése
 b) Lézerszkennelés

pontos szétválasztása a lényeges, 3D szkennelésnél a darabra rávetített mintázat az, aminek a képét feldolgozzuk. A darab alakjától függően, a szkennelés során a mintázat a darabon mindig máshol keletkezik. A vetített mintázatok képeiből, ismerve az elrendezés geometriai viszonyait a darab rekonstruálható. A 3D szkennelés egyik változata a lézerszkennelés.

Jelenleg szabályos négyzetrácsot használunk a 3.c ábra szerint. A véletlenszerű mintázathoz képest hátrány lehet az, hogy ezt a rácsot nehezebb elkészíteni, ugyanakkor előnyt jelenthet, hogy már a feldolgozatlan ábrán is felismerhetőek az alakváltozási mező tendenciái pl. aszimmetrikus alakváltozás, forgások stb., melyeket a 2D és/vagy 3D képkorreláció által használt matematikai apparátus miatt esetleg a feldolgozott adatokban nem észlelünk.

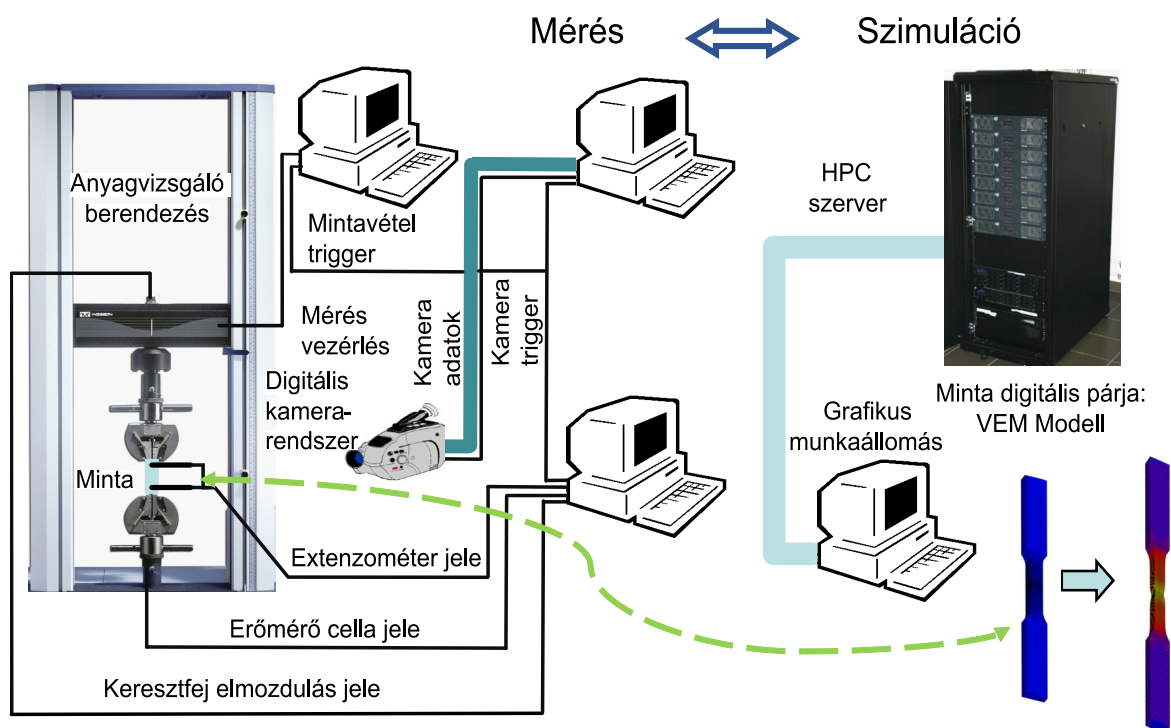


5. ábra: A próbatest és annak digitális párja

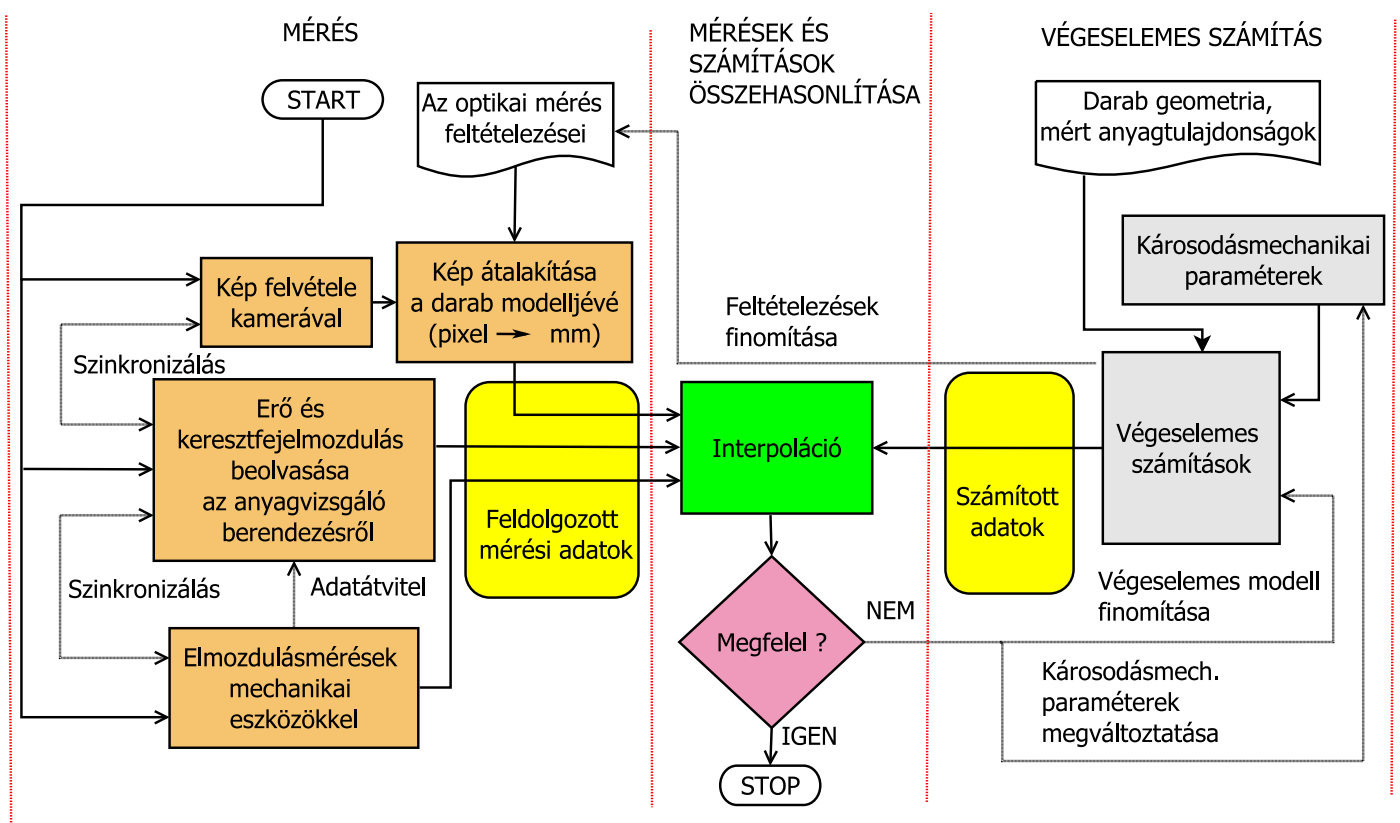
4. Szimulációk, digitális pár (digitális iker)

A folyamat jobb megértéséhez végeselemes szimulációval megalkotjuk a próbatest digitális párját (digitális ikerként is szokás emlegetni) (5. ábra).

A mérések és számítások viszonyait a 6. és 7. ábra szemlélteti. A 6. ábrán a felvételek készítését, a mérés-vezérlést, a működtetéshez szükséges szinkronizálás jeleket mutatjuk be részletesebben. Ezen az ábrán a mérések és a szimulációk közötti viszonyt csak igen elnagyoltan vázoljuk. A 7. ábrán részletesebben ismertetjük azt, hogy milyen kezdeti feltételezéseket használunk, a nyers mért adatokat hogyan alakítjuk át feldolgozott mérési adatokká, hol történik adatátvitel, milyen kezdeti és peremfeltételek szükségesek a szimulációhoz, milyen



6. ábra: A mérőrendszer vezérlése és a szimuláció



7. ábra: A mérés és szimuláció során végzett átalakítások és interpolációk

további feldolgozást igényel a végeselemes számítás eredménye és hogyan, milyen interpolációval lehet a méréseket és a számításokat egymással összehasonlítani.

A 7. ábra szerint a folyamat alapvetően három részre osztható:

1. mérések (beleértve azok kiértékelését),
2. számítások (végeselemmel),
3. mérések és számítások összehasonlítása.

Anyagvizsgálati mérések során a vizsgáló-berendezés közvetlenül szolgáltat erő és elmozdulás értékeket. A keresztfej-elmozdulás (vagy ennek analóg mennyisége, pl. szögelfordulás) minden esetben a szolgáltatott mérési eredmények közé tartozik. Opcionális mechanikai mérőeszközök a különféle extenzométerek. Ezek lehetnek olyanok, melyek gyárilag az anyagvizsgáló berendezéshez vannak illesztve, de előfordulhat az is, hogy különleges, egyedi gyártású extenzométereket használunk, melyeket utólag kell az anyagvizsgáló berendezés rendszeréhez illeszteni. Megjegyzés: Az anyagvizsgáló berendezések gyártói ezt gyakran (kihasználva a monopol-helyzetüket) szoftveresen megakadályozzák.

Optikai támogatással végzett anyagvizsgálat esetén a vizsgálat egyik fő része a felvételek elkészítése. Ez többféle módon történhet. A mérések egy

része (pl. egy szakítóvizsgálat) kifejezetten lassú, ezért a folyamathoz elegendő egyenként triggerelt képeket felvenni. Kivételt csak a vizsgálat legutolsó fázisa, a gyors törés jelent. Nagyon fontos a megfelelő szinkronizálás az anyagvizsgáló berendezés által szolgáltatott adatok, az esetenként egyedileg legyártott extenzométerekkel való mérések és a felvételek között. Előfordulhat az is, hogy más-más időpontokban kapunk adatokat a különféle eszközökről és az időbeli eltérések nem elhanyagolhatóak. Ez a mérések értelmezésében bizonyos fokú interpolációt tesz (tehet) szükségessé. Kellően sűrű mintavételezés esetén ez nem jelent problémát.

A vizsgálat fontos része a képek átalakítása a darab modelljévé. Ehhez a lépéshez bizonyos alapvető feltételezésekre van szükség. Ilyen pl. az, hogy hárompontos hajlítás, vagy lapos próbatest szakítása esetén a darab kamera felé eső felülete merőleges a kamera optikai tengelyére, hengeres próbatest esetén a próbatest tengelye és a darab optikai tengelye merőleges egymásra. További egyszerűsítő feltételezés, hogy a kamera-darab távolság állandó, a darab egyetlen pontja sem távolodik el oly mértékben a kamerától, hogy az jelentős mérési hibát okozzon. Az adatok feldolgozása után feldolgozott mérési adatokat kapunk.

A szimulációs lépésben a kezdeti geometria és az

anyagtulajdonságok ismeretében végelelemes modellt készítünk. A végelelemes modell nagy deformációkat, valódi feszültség-valódi nyúlás folyásgörbét használó rugalmas-képlékeny modell. A végelelemes modellen számításokat végzünk, majd ezeket a számításokat összehasonlítjuk a mérési eredményekkel.

Nagyon fontos, hogy a számítások és a mérések összehasonlításához interpolációra van szükség. A mérési adataink adott erőnek és keresztfej-elmozdulásnak megfelelő pontokban érhetőek el. A végelelemes modellből szintén különböző időpontokban, különböző erőknél, különböző szimulált keresztfej-elmozdulásra, a darab különböző pontjaira kapunk eredményeket. A mérésekből és szimulációkból kapott adatok sem időben, sem keresztfej-elmozdulásban, sem erőben, sem térben nem esnek egybe, ezért interpolációra van szükség ahhoz, hogy az összehasonlítás számszerűsíthető legyen. Az interpoláció során feltételezhető, hogy az erőt és a keresztfej elmozdulását sűrűbben mintavételezzük, mint amilyen sűrűn a képek rendelkezésekre állnak, illetve mint amilyen sűrűn a végelelemes számítási eredmények elérhetőek.

Az első összehasonlítások eredménye általában az, hogy a végelelemes *modell* további finomításra szorul. Ennek egyik legfontosabb része a végelelemes *háló* finomítása. (A végelelemes modell a hálón kívül tartalmazza az anyagtulajdonságokat, peremfeltételeket, kontaktot, valamint számos, a program futásához szükséges beállítást.) A megfelelő finomítások után elérhetjük azt, hogy a végelelemes számítás a folyamat kezdetét jól modellezi. A folyamat végén a mérés és szimuláció közötti eltérés igen jelentőssé válik. Ez részben egyszerűen a folyásgörbe megváltoztatásával kezelhető.

5. Szakítóvizsgálat – mérés és modellezés

Szakítóvizsgálat esetén mindaddig, amíg a kontrakció nem jelentős, az egytengelyűség érvényesnek tekinthető és a feszültség minden mérési pontban egyszerű formulákkal meghatározható. A mérési adatok kisebb-nagyobb mérési zajjal terheltek. Általánosan elfogadott megközelítés, hogy a folyásgörbét analitikus formulával közelítik. Ezzel a megközelítéssel az a probléma, hogy az analitikus formulák szisztematikus hibával terheltek. Ez különösképpen akkor okoz gondot, ha valamiért extrapolációra van szükség. Másik lehetőség a folyásgörbe multilineáris közelítése. Ez a közelítés nem hordozza az analitikus formulák szisztematikus hibáit, viszont a görbét feszültség-nyúlás párokkal kell megadni. Gyakorlati

szempontból 20-100 adatpár bőven elegendő egy jó szimulációhoz. Ennek általában sokszorosa az, amit az anyagvizsgáló berendezés szolgáltat, így a feladat az adatok redukciója szükség szerint zajcsökkentéssel együtt. Extrapolációs szempontból ez a megközelítés is problémás.

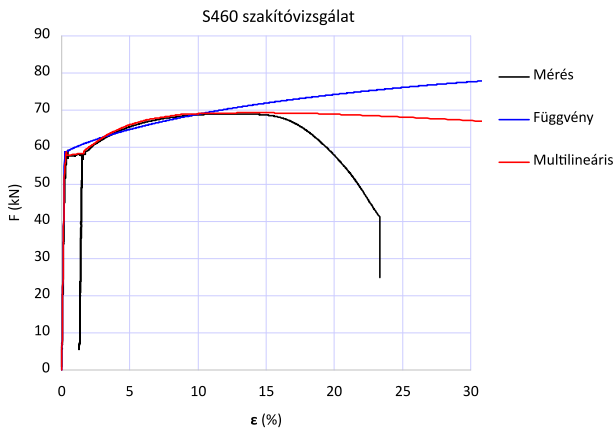
Szakítóvizsgálat esetén a mérési folyamat végén a folyásgörbe egyszerű formulákkal már nem meghatározható. Ebben az esetben jó közelítést jelenthet analitikus formulák alkalmazása (mint pl. a Bridgman korrekció [1]). Amennyiben ezeket a formulákat nem használjuk, a folyásgörbe kontrakció utáni szakaszának meghatározásához iteratív eljárás szükséges. A lehetőségeket jól összefoglalja a [2] és a [3] cikkek.

Gyakran (pl. törésmechanikai vizsgálat szimulációjához) szükség van egészen nagy nyúlásokig érvényes folyásgörbére. A vizsgálat szakadás közeli, intenzív deformáció által jellemzett részét már nem lehet egyszerűen csak a folyásgörbe változtatásával kezelni, itt már az „egyszerű” rugalmas-képlékeny modellenél bonyolultabb modelleket kell használni. Ilyenek a károsodásmechanikai modellek, melyekből többféle létezik. A legelterjedtebb a módosított Gurson modell [4], [5], melyet Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modellnek is neveznek. A Gurson modell számos károsodásmechanikai paramétert tartalmaz. A folyamat megfelelő modellezéséhez ezeket a paramétereket a méréshez kell illeszteni. A modell alkalmazását tekintve léteznek próbálkozások és részeredmények olyan paraméterszettek, illetve modellek megalkotására, melyeknél a paraméterek a próbatestekről tetszés szerinti szerkezetekre átvihetők, de az igazi áttörés még várat magára. A károsodási paraméterek megváltoztatásával általában újra és újra le kell futtatni a végelelemes számítást, mindaddig, míg az eredmények elfogadhatóak lesznek. A probléma egyik lényeges részét röviden a következőképpen foglalhatjuk össze:

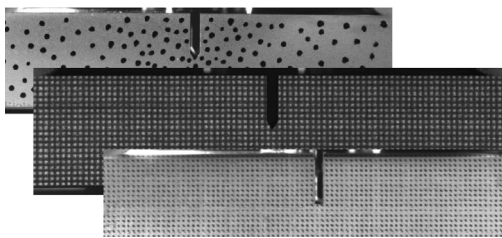
A modell kétféle anyagot feltételez:

- ideális, károsodásmentes anyagot,
- valódi, károsodott anyagot.

A modellhez az ideális, károsodásmentes anyag folyásgörbét kell megadni, a valódi, károsodást tartalmazó anyag ennél „lágyabb”. Ez a lágyulás a Gurson modell lényegéhez tartozik. A valóságban viszont csak a valós anyagon tudunk méréseket végezni. Ez azt jelenti, hogy többféle károsodási paraméterszett – folyásgörbe együttese létezik, mely egy adott próbatestre, egy adott hálóra, egy adott vizsgálatra makroszkopikusan ugyanolyan, vagy nagyon hasonló erő-elmozdulást ad.



8. ábra: Mért erő-nyúlás diagram és különböző folyásgörbékkel számolt eredmények



9. ábra: Rácsosási próbák

A folyásgörbe végének meghatározásához lehetőség van nemcsak szakítást, hanem zömítést is alkalmazni. Ebben az esetben a hordósodás jelenti az egyszerű formulák alkalmazhatóságának végét. Problémát jelenthet továbbá a kétféle módszerrel meghatározott görbék összeillesztése.

A 8. ábrán egytengelyű szakítóvizsgálat modellezését mutatjuk be annak érdekében, hogy kihangsúlyozzuk a megfelelő folyásgörbe használatának fontosságát.

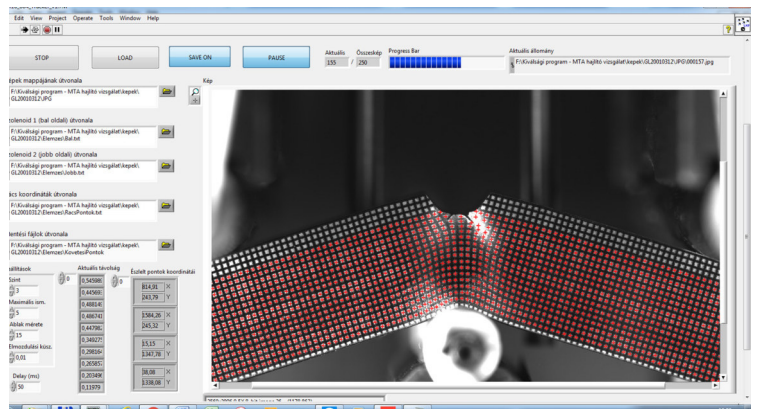
A 8. ábrán látható, hogy ha a mért folyásgörbét jobban közelítő multilineáris görbét használunk, a próbatest valós viselkedését a folyamat elején sokkal jobban lehet szimulálni, mint amikor a teljes folyásgörbét végig egy analitikus görbével közelítjük, ugyanakkor a multilineáris görbét használó számítás eredménye sem közelíti megfelelően a folyamat végét. Az itt elvégzett számítások rugalmas-képlékeny, károsodás nélküli modellt használnak. A görbe végét károsodásmechanikai modellel jobban lehet majd a méréshez illeszteni. Tekintettel arra, hogy a károsodásmechanikai modellek sokkal több erőforrást igényelnek, mint az „egyszerű” rugalmas képlékeny modell, a fejlesztést más irányban folytatjuk és a szakítás modellezéséhez károsodásmechanikai modellt (egyelőre) nem alkalmazunk.

6. Hárompontos hajlítás – mérés és modellezés

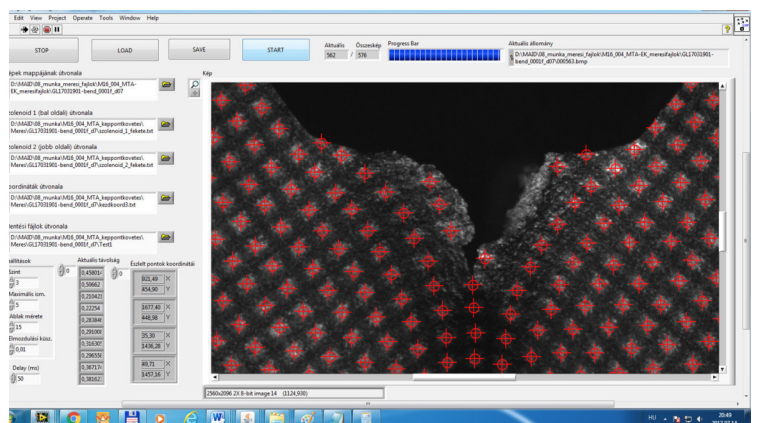
A hárompontos hajlítás optikai vizsgálatához számos rácsozási próbát végeztünk. Rácsozási próbák láthatóak a 9. ábrán.

A vizsgálat során a keresztfej-elmozdulás és az erő mérésén túlmenően, az optikai elmozdulásmérésen kívül, mechanikai extenzométereket is használtunk. A Dunaújvárosi Egyetemen kifejlesztették a pontok követését lehetővé tevő programot. Ez látható működés közben a 10. és 11. ábrán.

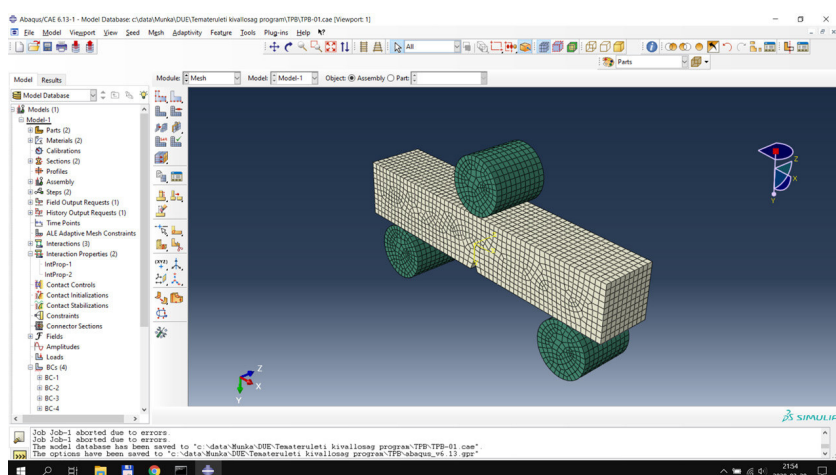
A Dunaújvárosi Egyetem és az Energiatudományi Kutatóközpont munkatársai egymástól függetlenül elkészítették a hárompontos hajlítás modelljét. A modellezéshez más-más végeeselemes programot használtunk. A modell képe a Dunaújvárosi Egyetem változatában a 12. ábrán látható. A kétféle modell általában egymáshoz jól illeszkedő eredményt ad és mindkét modell viszonylag jól követi a hárompontos hajlításra az erő-extenzométer jeleket a görbe elején. A tönkremenetel előrehaladtával, a repedés megjelenésével a kétféle végeeselemes modell továbbra is egymáshoz hasonló eredményeket ad, ugyanakkor mindkét modell eredménye igen jelentős mértékben eltér a mért értékektől.



10. ábra: A Dunaújvárosi Egyetemen kifejlesztett rácspont-követési rendszer



11. ábra: Repedés kialakulása V bemetszésből



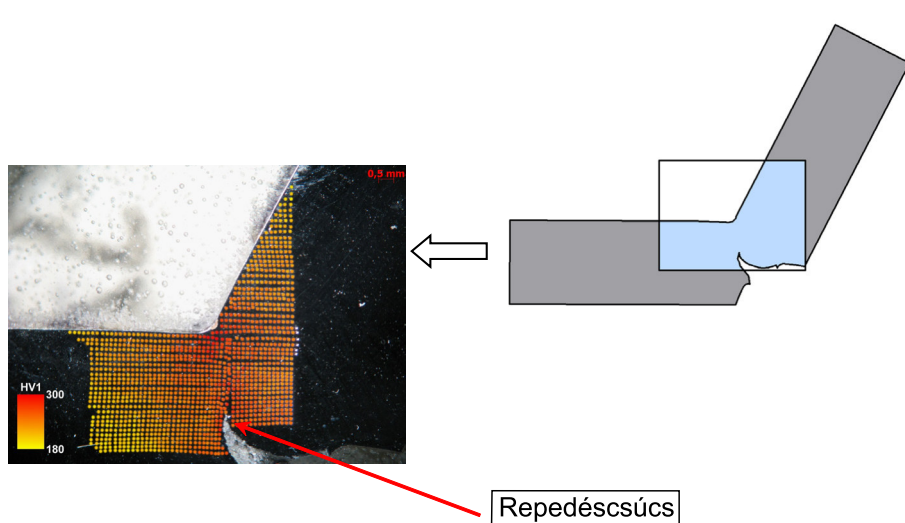
12. ábra: A Dunaújvárosi Egyetem modellje

Mivel a mérés-szimuláció-összehasonlítás hármasa esetén a módszer fejlesztése az egyik legfontosabb tevékenység, károsodásmechanikai modellek alkalmazására még nem tértünk át, tekintve, hogy a károsodásmechanikai modellek idő- és erőforrás-igénye sokszorosa az „egyszerű” rugalmas-képlékeny-kontakt feladatának.

7. Keménységmérés és szimulációja

A hajlítás okozta változások nyomon követésére a Dunaújvárosi Egyetemen a hárompontos hajlító próbatest hajlított zónájában Vickers keménységmérést (HV1) végeztek. A keménység-térkép a 13. ábrán látható. A mért keménységek kb. 180-300 HV1 közé estek.

Tekintve, hogy maga a keménységmérés lokálisan képlékeny alakváltozást jelent, elvileg homogén, izotrop anyag esetén összefüggést lehet találni a darab különféle módon felkeményedett részein mért keménység és a felkeményedett állapotban

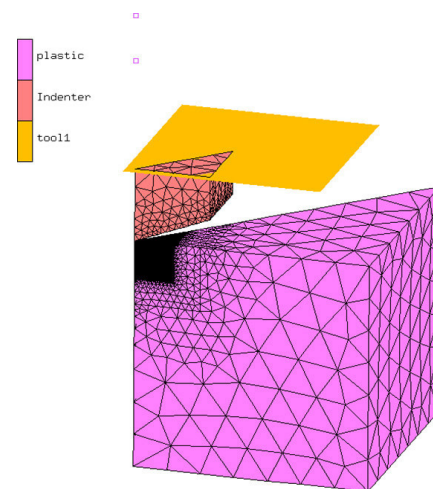


13. ábra: A keménység térképe hárompontos hajlítás esetén

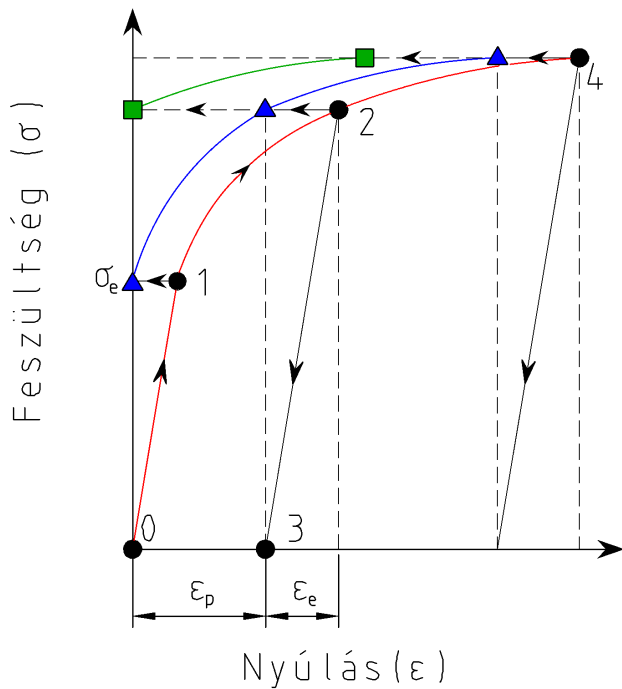
érvényes folyásgörbe között.

Ennek érdekében rugalmas-képlékeny, nagy deformációs, kontaktot tartalmazó végeleemes modellt készítettünk. A végeleemes hálót több lépésben kellett finomítani, ahhoz, hogy a lenyomatot a hálóról kellő pontossággal le lehessen olvasni. Kihhasználva a szimmetriákat, 1/8-ad modellt hoztunk létre. A végeleemes háló a kontakt testekkel a 14. ábrán látható. Peremfeltételként a Vickers keménységmérés elve szerint 1 kgf erőt adtunk rá a megfelelő, a „tool1” névre hallgató szerszámhoz rendelt csomópontra. A végeleemes rendszer a számítás során az erőt átadta magára a szerszámra.

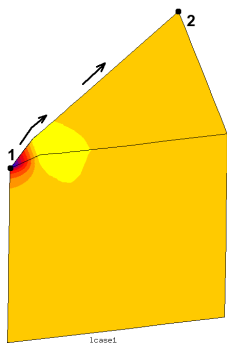
Az előzőleg meghatározott folyásgörbét felhasználva mesterségesen létrehoztuk a különféle mértékben felkeményedett anyagnak megfelelő folyásgörbéket. Idealizált felkeményedést használtunk a 15. ábra szerint. Az eredeti, nem felkeményedett anyag folyásgörbéje a 0-1-2-4 (piros) görbe. Tekintve, hogy a szimulációkhoz használt MARC-Mentat rendszer nem a teljes, hanem a képlékeny folyásgörbét használja, a végeleemes program inputjaként a kék háromszögekkel megadott folyásgörbét használjuk. Amennyiben az 1-2 görbe mentén előzetes képlékeny alakítást végzünk, ismételt felterhelés során a folyásgörbe a 3-2-nek megfelelő rugalmas szakasszal és a 2-4-gyel jelzett képlékeny keményedéssel jellemezhető. Ezt a felkeményedési állapotot a Marc-Mentat programban a zöld négyzetekkel jellemezhető folyásgörbével lehet szimulálni. Látható, hogy a különféle mértékben felkeményedett anyagok folyásgörbéi – ebben



14. ábra: Végeleemes háló a kontakt testekkel



15. ábra: Az anyag felkeményedése



16. ábra: A Vickers keménységmérés során felhasznált útvonal

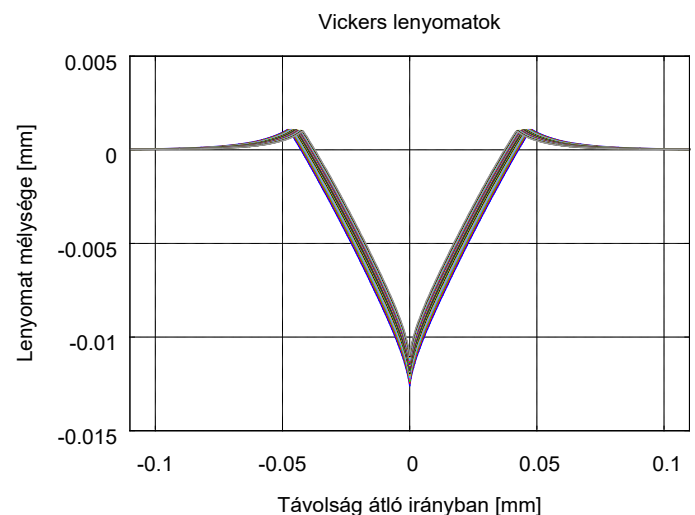
az idealizált esetben – a képlékeny folyásgörbe (kék háromszögekkel jelölt) egyszerű eltolásával generálhatóak. Nagymértékű felkeményedés esetén ezzel az eljárással a képlékeny anyagviselkedés a rugalmas viselkedés gyakorlatilag átmenet nélküli folytatása. A valós felkeményedés eltér az idealizált esetektől.

8. A Vickers keménységmérés szimulációjának eredményei

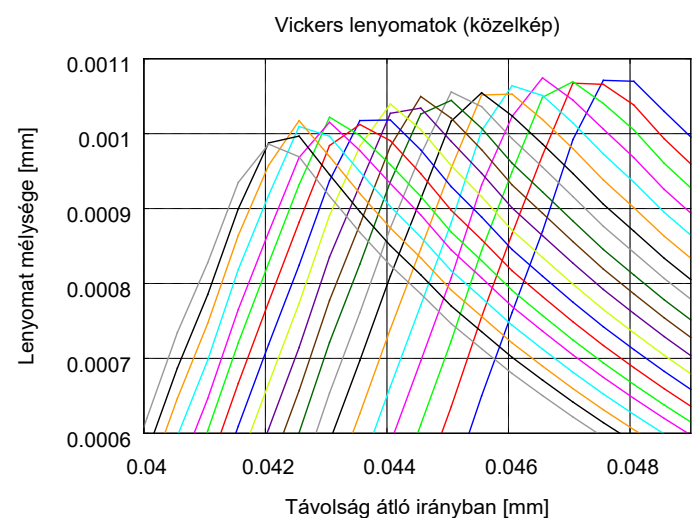
A végesselemes számítás eredményeinek postprocesszálása során meghatároztuk a szerszám által hagyott fél lenyomatot a 16. ábra 1-2 útvonalának megfelelően. Noha nagyon finom elemeket használtunk, a lenyomat pontossága mégis hagyott kívánnivalót maga után, így az egyes modellezett lenyomatokra spline-t illesztettünk, és a lenyomat szélének a spline legmagasabb pontját tekintettük.

A 17. és 18. ábra a Vickers keménységmérés modellezett lenyomatait mutatja be. A fél lenyomatot a 17. ábrán a szimmetria kedvéért egésze egészítettük ki. Az ábrákat a jobb láthatóság érdekében a lenyomat magasságának irányában megnyújtottuk. Az eredmények nem voltak meggyőzőek, így a keménységmérés modellje további átalakításokra, kiegészítésekre szorul. Lehetséges okok:

- a végesselemes háló még mindig nem kellően finom (jellemző hálóméret az aktív zónában: 0.005 mm),
- a szerszám és a darab közti súrlódást nem vettük figyelembe,
- a számítások eredményeként kapott nyúlások és feszültségek jócskán meghaladják mind a szakító, mind a zömítővizsgálatokkal meghatározott értékeket.



17. ábra: Modellezett Vickers lenyomatok



18. ábra: Közelkép a modellezett Vickers lenyomat széléről

9. Összefoglalás

A Dunaújvárosi Egyetem és az Energiatudományi Kutatóközpont közös munkájával optikai mérésekkel támogatott anyagvizsgálati eljárást fejlesztünk. A cikkben bemutattuk, hogy melyek a mérések hagyományos kiértékelésének problémái, milyen bizonytalanságok lépnek fel a folyásgörbe meghatározásánál abban az esetben, ha elhagyjuk azt a tartományt, melyen belül a szakítás, vagy a zömítés egytengelyűnek tekinthető. Váztuk, hogy a többtengelyű állapotban milyen módon lehet szakítógörbét meghatározni. Kiemeltük, hogy a törést közvetlenül megelőző szakaszon a folyásgörbe meghatározásának bizonytalansága tovább nő, tekintettel arra, hogy itt már az anyag viselkedésének megfelelő leírására károsodásmechanikai modellekre van szükség; a károsodásmechanikai modellek kétféle anyagot használnak, a károsodott és az idealizált, nem károsodott anyagot. Méréseket viszont csak a valódi, károsodott anyagon tudunk végezni.

Az optikai mérésekkel támogatott vizsgálatok esetén a darabhoz rögzített mérési pontok elmozdulását tudjuk követni, kiegészítve az erő, keresztfej-elmozdulás és extenzométer adatait. Ettől azt várjuk, hogy az anyag erőteljesebben károsodott, tönkremenetel-közeli állapotáról több információt nyerünk, miáltal pontosabb összehasonlításra lesz lehetőségünk a mérések és modell-eredmények között.

A pontosabb összehasonlításhoz elengedhetetlen egy megfelelő interpolációs rutin (modul) létrehozása, tekintettel arra, hogy a mérések és számítások a próbatest más pontján, más időpontban, más erőnél, más keresztfej-elmozdulásnál szolgáltatnak adatokat.

A Dunaújvárosi Egyetemen hárompontos hajlítóvizsgálatokat végeztünk, melyeket végeselemes modellekkel szimuláltunk. Az egyik meghajlított próbatesten HV1 Vickers keménységméréseket végeztünk, az eredményt keménység-térképként ábrázoltunk. A keménységmérés folyamatát mesterségesen előállított folyásgörbékkel szimuláltuk. A mesterségesen előállított folyásgörbék nem

bizonyultak megfelelőnek, ugyanakkor a munka folytatására szükség van, mert keménységméréssel elvileg olyan nagy alakváltozásokra is kapunk adatokat, melyekre sem a szakítás, sem a zömítés nem ad mérési pontot. Hárompontos hajlításnál a repedésél körül igen nagy nyúlások lépnek fel, jelenleg ezt csak a szakító- és zömítővizsgálatból extrapolált anyaggörbékkel tudjuk modellezni. Megvizsgáljuk annak lehetőségét, hogy milyen kiegészítő információkat nyerünk akkor, ha műszerezett keménységmérést használunk a hagyományos keménységmérés helyett. Egytengelyű meghúzással (még a kontrakció előtt leállva a szakítóvizsgálattal) vizsgálni lehet a keménység-nyúlás viszonyait a mesterségesen létrehozott folyásgörbék nélkül is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás támogatását az Innovációs és Technológiai Minisztérium által támogatott Tématerületi Kiválósági Program 2020 (2020-4.1.1.-TKP2020) biztosítja. Résztvevők: Dunaújvárosi Egyetem és Energiatudományi Kutatóközpont

Irodalomjegyzék

- [1] Bridgman, P. W.: Studies in Large Plastic Flow and Fracture, Vol. 177. McGraw-Hill, New York (1952)
- [2] Tu, S., Ren, X., He, J., Zhang, Z.: Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review, Fatigue Fract Eng Mater Struct. 43 (2020) 3–19.
<https://doi.org/10.1111/ffe.13134>
- [3] Ling, Y.: Uniaxial true stress-strain after necking. AMP Journal of technology, 5(1), (1996) 37–48.
- [4] Gurson, A. L.: Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Path I-Yield Function and Flow Rules for Porous Ductile Media. ASME Transaction, J. Eng. Mat. Tech. 99 (1977) 2–17.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/7351470>
- [5] Tvergaard, V., Needleman, A.: Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, Acta Metallurgica 32(1) January 1984, 157–169,
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90213-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90213-X),
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000161608490213X>