

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**

# **Anyagroncsolódás modellezése Abaqus/Standard környezetben**

Írta:

Ortvein János Péter

*Gépészmérnöki mesterszak, géptervező szakirány, I. évfolyam*

Konzulensek:

Angeli Dániel

*Motorfejlesztő mérnök, Audi Hungaria Motor Kft.*

Dr. Szekrényes András

*Egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék*

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta.

Győr, 2012

## Tartalomjegyzék

|       |                                                                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Bevezetés .....                                                                                 | 8  |
| 2     | A témaválasztás indoklása, aktualitása .....                                                    | 9  |
| 3     | Elméleti áttekintés.....                                                                        | 10 |
| 3.1   | Idealizált rugalmas-képlékeny anyagmodell, felkeményedés és szakadás .....                      | 10 |
| 3.2   | Szakítóvizsgálat .....                                                                          | 11 |
| 3.2.1 | Legfontosabb fogalmak.....                                                                      | 12 |
| 3.2.2 | Látszólagos feszültség és valódi feszültség.....                                                | 12 |
| 3.2.3 | Szakadáshoz vezető törés, mint a szakítóvizsgálat eredménye.....                                | 14 |
| 4     | Az anyagroncsolódás modellezésének lehetőségeivel kapcsolatban elvégzett kutatások.....         | 18 |
| 4.1   | A TDK dolgozatomban kutatási hipotézisének megfogalmazása .....                                 | 18 |
| 4.2   | A felhasznált mechanikai anyagmodell .....                                                      | 18 |
| 4.2.1 | Roncsolódás és törés modellezése ABAQUS/Standard környezetben .....                             | 20 |
| 4.3   | Szakítóvizsgálat FEM segítségével.....                                                          | 25 |
| 4.3.1 | A próbatest-modell peremfeltételeinek és igénybevételeinek meghatározása .....                  | 25 |
| 4.3.2 | Az eredmények kiértékelésének módszere.....                                                     | 27 |
| 4.3.3 | Az eredmények rövid ismertetése .....                                                           | 29 |
| 4.4   | Szakítóvizsgálat XFEM segítségével.....                                                         | 31 |
| 4.4.1 | Nulladik variáns – divergencia-probléma .....                                                   | 31 |
| 4.4.2 | Első variáns - <i>*amplitude</i> parancs bevezetése, avagy a konvergencia biztosítása.....      | 32 |
| 4.4.3 | Második variáns – a teljes mechanikai anyagmodell alkalmazása.....                              | 38 |
| 5     | A mechanikai anyagmodell validálása.....                                                        | 42 |
| 5.1   | Az anyagmodell validálása az XFEM-mel számolt húzóerő-elmozdulás diagram alapján ...            | 43 |
| 5.2   | Az anyagmodell validálása az XFEM-mel számolt lokális $\sigma - \epsilon$ diagram alapján ..... | 45 |
| 6     | Alkalmazási példa – motoremelő/-mozgató fül XFEM vizsgálata .....                               | 48 |
| 6.1   | Az alkalmazási környezet bemutatása és a végelelemes modell felépítése.....                     | 48 |
| 6.2   | Az eredmények kiértékelése .....                                                                | 50 |
| 6.3   | Következtetések, kitekintés.....                                                                | 55 |

---

|   |                                 |    |
|---|---------------------------------|----|
| 7 | Összefoglalás, kitekintés ..... | 57 |
| 8 | Irodalomjegyzék.....            | 58 |

---

## Táblázatjegyzék

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. táblázat. Jelölések magyarázata.....                                                 | 12 |
| 2. táblázat. A felhasznált parancsok bemutatása (ABAQUS/Standard) [12][14].....         | 22 |
| 3. táblázat. A *damage evoluion parancs bemutatása (ABAQUS/Standard) [12][14] .....     | 24 |
| 4. táblázat. Az motoremelő-/mozgató fül XFEM analízisének legfontosabb eredményei ..... | 55 |

## Diagramjegyzék

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. diagram. Az felhasznált mechanikai anyagmodell $\sigma - \varepsilon$ görbéje.....                        | 19 |
| 2. diagram. A mérések során meghatározott törési paraméterek.....                                            | 19 |
| 3. diagram. A kritikus tartomány feszültség-nyúlás görbéje (FEM) .....                                       | 30 |
| 4. diagram. Húzóerő-elmozdulás diagram és a roncsolódás kezdete - XFEM ( <i>ductile</i> ) .....              | 35 |
| 5. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás diagram – XFEM ( <i>ductile</i> ) .....                | 36 |
| 6. diagram. Feszültség-globális alakváltozás diagram – XFEM ( <i>ductile</i> ).....                          | 36 |
| 7. diagram. Húzóerő-elmozdulás diagram - XFEM ( <i>ductile</i> és <i>shear</i> ) .....                       | 39 |
| 8. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás diagram – XFEM ( <i>ductile</i> és <i>shear</i> )..... | 40 |
| 9. diagram. Feszültség-globális alakváltozás diagram – XFEM ( <i>ductile</i> és <i>shear</i> ).....          | 41 |
| 10. diagram. Magyarázó mintadiagram a hibaszázalék meghatározásához .....                                    | 42 |
| 11. diagram. A húzóerő-elmozdulás mért és számított görbéi .....                                             | 43 |
| 12. diagram. A húzóerő-elmozdulás mért és számított görbéi (nagyítva).....                                   | 44 |
| 13. diagram. Húzóerő-elmozdulás hibaszázalék görbéje .....                                                   | 44 |
| 14. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás mért és számított görbéi .....                        | 45 |
| 15. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás mért és számított görbéi (nagyítva).....              | 46 |
| 16. diagram. Lokális feszültség-lokális alakváltozás hibaszázalék görbéje .....                              | 46 |
| 17. diagram. Lokális feszültség-lokális alakváltozás hibaszázalék görbéje (nagyítva).....                    | 47 |
| 18. diagram. Az alkatrész valós feszültség-globális alakváltozás diagramja .....                             | 53 |
| 19. diagram. Az alkatrész húzóerő-elmozdulás diagramja.....                                                  | 53 |
| 20. diagram. Valós feszültség (elmozdulás) és húzóerő (globális alakváltozás) diagram.....                   | 54 |

## Ábrajegyzék

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra. Az ideálisan rugalmas-képlékeny-felkeményedő anyagmodell $\sigma - \varepsilon$ görbéje [3] .....       | 11 |
| 2. ábra. Szabványos próbatestek [5] .....                                                                        | 11 |
| 3. ábra. Szakítóvizsgálat jellegzetes $\sigma - \varepsilon$ diagramja [7] .....                                 | 12 |
| 4. ábra. Jellegzetes $\sigma - \varepsilon$ görbe [3] .....                                                      | 13 |
| 5. ábra. A látszólagos és a valós feszültség [3] .....                                                           | 13 |
| 6. ábra. Nagyszilárdságú acélok $\sigma - \varepsilon$ görbéje [3] .....                                         | 14 |
| 7. ábra. Az anyag állapotai [8] .....                                                                            | 15 |
| 8. ábra. Jellegzetes szívós törés [9] .....                                                                      | 15 |
| 9. ábra. A szakadás elméleti folyamata [9], [10] .....                                                           | 16 |
| 10. ábra. A rideg törés elméleti folyamata és a töret felület szemléltetése [9] .....                            | 16 |
| 11. ábra. A transzkrisztallin törés [9] .....                                                                    | 17 |
| 12. ábra. Az interkrisztallin törés [9] .....                                                                    | 17 |
| 13. ábra. igénybevétel hatására adott válaszfázisok [11] .....                                                   | 20 |
| 14. ábra. XFEM parancsok értelmezése [13] .....                                                                  | 21 |
| 15. ábra. Roncsolódási tényező definiálásának szemléltetése [11] .....                                           | 23 |
| 16. ábra. A roncsolódás folyamatának szemléltetése [15] .....                                                    | 23 |
| 17. ábra. Lapos próbatest .....                                                                                  | 25 |
| 18. ábra. Alkalmazott végelelemes háló .....                                                                     | 25 |
| 19. ábra. Az előkészített próbatest-modell .....                                                                 | 26 |
| 20. ábra. A definiált, $\mathbf{P}$ csomópont szemléltetése .....                                                | 27 |
| 21. ábra. A próbatest viselkedése FEM alkalmazása esetén .....                                                   | 29 |
| 22. ábra. A kritikus tartomány meghatározása .....                                                               | 30 |
| 23. ábra. Végelelem nagyfokú deformációja .....                                                                  | 32 |
| 24. ábra. *amplitude [14] ABAQUS/Standard környezetben .....                                                     | 33 |
| 25. ábra. Exponenciális terhelési görbe .....                                                                    | 33 |
| 26. ábra. A próbatest viselkedése XFEM ( <i>ductile</i> ) alkalmazása esetén .....                               | 34 |
| 27. ábra. A kritikus tartomány definiálása – XFEM ( <i>ductile</i> ) .....                                       | 35 |
| 28. ábra. Szakítóvizsgálat idealizált látszólagos és valós feszültség-alakváltozás görbéje [7] .....             | 37 |
| 29. ábra. Elméleti [10] és szimulált (XFEM/ <i>ductile</i> ) szakadás folyamatának összehasonlítása .....        | 37 |
| 30. ábra. A próbatest viselkedése XFEM ( <i>ductile</i> és <i>shear</i> ) alkalmazása esetén .....               | 38 |
| 31. ábra. A kritikus tartomány definiálása - XFEM ( <i>ductile</i> és <i>shear</i> ) .....                       | 39 |
| 32. ábra. A szimulált (XFEM/ <i>ductile</i> és XFEM/ <i>ductile</i> és <i>shear</i> ) szakadások folyamata ..... | 41 |
| 33. ábra. A motoremelő-/mozgató fülek alkalmazási környezete .....                                               | 48 |
| 34. ábra. A fül 3D modellje .....                                                                                | 49 |

---

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 35. ábra. A végelelemes modell felépítése – megfogások definiálása..... | 49 |
| 36. ábra. A végelelemes modell felépítése – terhelés definiálása.....   | 50 |
| 37. ábra. A kiinduló és a deformált alkatrész.....                      | 50 |
| 38. ábra. A repedések kialakulásának folyamata.....                     | 51 |
| 39. ábra. Az XFEM számítás legfontosabb eredményei az alkatrészen.....  | 51 |
| 40. ábra. Az alkatrész kritikus tartománya .....                        | 52 |
| 41. ábra. A kritikus tartomány feszültségképe .....                     | 52 |
| 42. ábra. Az alkatrész roncsolódásának kezdete .....                    | 54 |

---

## 1 Bevezetés

A járműiparban alkalmazott alkatrészek jelentős hányadát hosszú évek óta szimulációs eredmények segítségével fejlesztik. Ez a folyamat azonban csak akkor lehet sikeres, amennyiben a számításokhoz használt modellek a lehető legpontosabban reprezentálják az alkatrész eredeti tulajdonságait, valamint annak adott körülmények közötti valós viselkedését.

Az utóbbi években szükségessé vált fejlesztési költségek és fejlesztési idők csökkentése vetett véget a megszámlálhatatlanul sok, valós környezetben történő próbavizsgálatoknak. Egyre inkább különböző, számítógéppel támogatott módszerek, alkalmazások használata került előtérbe; különösen a végeselem-módszer (FEM) széleskörű alkalmazása kapott teret a járműipar számos területén. A FEM legjelentősebb előnye a korábbi próbavizsgálatokkal szemben, hogy egy adott kezdeti kialakítás további variánsainak viselkedése is egyszerűen, valamint a valóság reprezentálása mellett vizsgálható az adott alkatrész legyártása nélkül. Ahhoz, hogy a FEM által szolgáltatott eredmények megbízhatóak legyenek, az adott alkatrészt a valósághoz lehető legjobban közelítve (anyagparaméterek, peremfeltételek, terhelések stb.) kell felépíteni. Ehhez szükségesek a CAD geometriai modellek, amelyek 3D-s környezetben reprezentálják a későbbi számításainkhoz szükséges geometriát, és alapjai a mind mennyiségben, mind minőségben megfelelő kiértékelésnek.

A számítógéppel támogatott analíziseknek több célja is lehet. Talán a leggyakrabban használatos ezek közül az alkatrész terhelés hatására kialakuló feszültségi állapotának vizsgálata, és ez által az alkatrész tönkremenetelének elkerülése már a tervezés kezdeti szakaszában.

A megbízható eredmények tekintetében döntő fontosságú lehet az alkatrész anyagának kiválasztása, ill. viselkedésének ismerete. Az anyagparaméterek megfelelő mélységű tisztázása is szükséges ahhoz, hogy az analízis során kapott eredmények túlmutassanak a korábbi FEM eredményeken, és az alkatrész viselkedését a valósághoz ennél is jobban közelíthessék. Az ún. *eXtended Finite Element Method* (XFEM) egy olyan végeselemes módszer az alkatrészek virtuálisan történő szilárdsági vizsgálatában, amely lehetővé teszi, hogy a valóságban is bekövetkező, igénybevétel hatására adott szilárdsági határt átlépve, az anyag szerkezetének roncsolódásai virtuálisan is számíthatóak legyenek. Az eddigi FEM számításoknál használatos megoldási tér így kibővül, az összetettebb feladatok is pontosabb, valósághoz közelebbi eredményeket produkálnak. Az XFEM alkalmazási területe tehát igen sokrétű: képes virtuálisan modellezni és megjeleníteni a már a tervezés korai fázisában elkerülendő alkatrész-tönkremenetelt, mindamelllett anyagtulajdonságok, anyagparaméterek validálására is megfelelően használható.

## 2 A témaválasztás indoklása, aktualitása

A jövőbeli munkahelyemként szívesen képzelnék el egy nagyobb járműipari vállalatot, ezért is jelentkeztem 2012 nyarára az Audi Hungaria Motor Kft.-hez gyakornoknak, ahova felvételt is nyertem.

Az egyetemi szemeszterek során érdeklődésem a különböző alkatrészek (gépelemek, egyéb járműipari alkatrészek) végeselemes környezetben történő vizsgálata felé irányult. A témakörnek megfelelően választottam BSc-szakdolgozat témámat („*Fogaskerék hajtómű elemek alakoptimalizálása*” címmel) is 2011-ben, amelyben a FEM már egy összetettebb alkalmazásával foglalkoztam a *graphIT Kft.* támogatásával UGS NX környezetben TOSCA topológia optimalóval.

A mesterképzés kezdetével fontos volt számomra, hogy mind elméleti, mind gyakorlati tudásomat elmélyíthessem további FEM problémák, összetettebb gyakorlati alkalmazások megismerése által, akár egy új program, vagy módszer segítségével. Ebben biztosított lehetőséget az AHM Kft. az eXtended Finite Elemente Method (XFEM) megismerésén és annak alkalmazásán keresztül.

Az Audi Hungaria Motor Kft., Motorfejlesztés területének egy korábbi projektje egy motoremelő/-mozgató fül végeselemes vizsgálata, amelyhez az emelőfül anyagának paramétereit használják. Ezért egy müncheni vállalat lapos próbatestek szakítóvizsgálati mérései során határozta meg az alkalmazott anyag anyagtulajdonságait, és hozta létre annak mechanikai anyagmodelljét.

A projekt aktualitása, a motoremelő/-mozgató fül esetén is alkalmazott acél mechanikai anyagmodelljének validálása, amely a későbbi virtuális vizsgálati eredmények elfogadásában jelentős előre lépést fog nyújtani. Ehhez azonban szükséges egy olyan végeselemes modell, ill. módszer megalkotása, amely a szakítóvizsgálati környezetet, és a szakítóvizsgálat eredményeit a valóságnak legmegfelelőbben szimulálja.

A számítógéppel támogatott számítások esetén alkalmazott hagyományos végeselem-módszert „behatárolt” módszernek is nevezhetnénk, ugyanis csak egy korlátozott működési intervallumon belül képes modellezni az anyag viselkedését, azaz nincs lehetőség repedés, és/vagy törés virtuális modellezésére. A probléma megoldásának újdonsága ezért éppen abban rejlik, hogy egy teljesen új módszer, az XFEM kerül alkalmazásra ABAQUS/Standard környezetben, amely a korábbi FEM-től eltérően képes alkatrészek szerkezeti roncsolódásának, törésének modellezésére, biztosítva ezáltal a szakítóvizsgálat környezetének és eredményeinek megfelelő mértékű virtuális közelítését, és a mechanikai anyagmodell validálásának elméleti lehetőségét.

*A feladat titkosságára való tekintettel dolgozatomban valamennyi adatsort és diagramot csak bizonyos korlátok között van lehetőségem bemutatni.*

### 3 Elméleti áttekintés

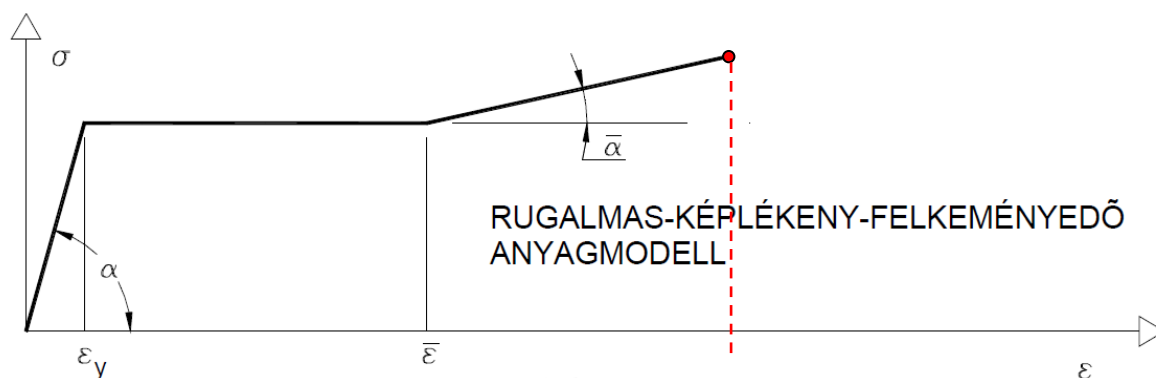
A feladat megkezdésekor nagy hangsúlyt fektettem a témához szorosan kapcsolódó elméleti alapok áttekintésére, amelyek elengedhetetlenek a későbbi eredmények megfelelő mérnöki értelmezéséhez. A következőkben tehát a feladat megoldásához szükséges elméleti alapokat ismertetem.

#### 3.1 Idealizált rugalmas-képlékeny anyagmodell, felkeményedés és szakadás

A természettudományok legösszetettebb feladatai közé tartozik az anyag viselkedésének modellezése. Az anyagmodell szó általános kifejezésként választ jelent, választ az őt érő külső igénybevételekre. Egy anyagmodell vizsgálata minden területen (vegyészeknek, gépészeknek, elektronikai területeken) mást és mást jelent, ezért a továbbiakban az anyagnak a külső hatásokra (pl. erők, hőmérsékletváltozások) adott mechanikai válaszát (feszültségek, deformációk) fogom keresni, vizsgálni [1]. Tanulmányaim során számos anyagmodellel találkoztam, amelyek igénybevétel hatására különféle viselkedést produkálnak. Dolgozatomban csak a feladat megoldásában elengedhetetlen ideális rugalmas-képlékeny anyagmodell, valamint a felkeményedés és szakadás elméletének bemutatásával foglalkozom.

Az ideális rugalmas-képlékeny anyagmodell (a szerkezeti acél  $\sigma - \varepsilon$  diagramjának leegyszerűsítéséből adódik) vizsgálata egyirányú terhelés, és ennek hatására létrejövő, ugyanezen irányban fellépő alakváltozás összefüggésével történik [2]. A rugalmas-képlékeny, vagy más néven elasztoplasztikus anyag az anyagot jellemző folyási határig rugalmasan viselkedik, a folyási határt meghaladó igénybevételre pedig képlékeny alakváltozást mutat, azaz feszültségnövekedés nélküli korlátlan alakváltozást feltételez. Tehermentesítés esetén ismét rugalmasan viselkedik. Megjegyzem, hogy képlékeny anyagmodell alkalmazása során maradandó alakváltozásokkal is számolni kell.

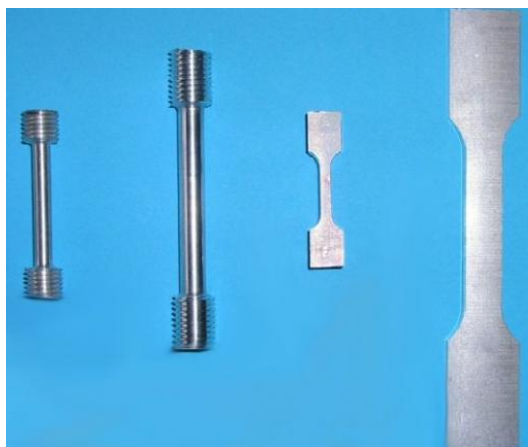
A rugalmas-képlékeny-felkeményedő anyagmodell segítségével belátható, hogy bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás után további nyúlás csak feszültségnövekedéssel együtt alakulhat ki. Ezért definiálható a felkeményedési modulus ( $E' = \tan \bar{\alpha}$ ), ami az idealizált  $\sigma - \varepsilon$  diagram harmadik egyenes szakaszát jellemzi, amely egységugrásszerűen ér véget. Itt történik meg a törés (1. ábra.) [3].



1. ábra. Az ideálisan rugalmas-képlékeny-felkeményedő anyagmodell  $\sigma - \varepsilon$  görbéje [3]

### 3.2 Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat a mechanikai anyagvizsgálat egyik fajtája, ami a legelterjedtebb roncsolásos vizsgálatnak is tekinthető. A vizsgálat célja, anyagok egytengelyű húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározása. A szakítóvizsgálathoz felhasznált próbatestek (2. ábra.) legfontosabb kialakítási kritériumai, hogy azok reprezentálják a vizsgálandó anyagtételt, fejkiképzése illeszkedjen a rendelkezésre álló szakítógéphez, a próbatest szakítandó keresztmetszete, a várható szilárdság figyelembevételével illeszkedjen a szakítógép méréshatárához, valamint alakja tegye lehetővé a vizsgálni kívánt paraméterek meghatározását [4].

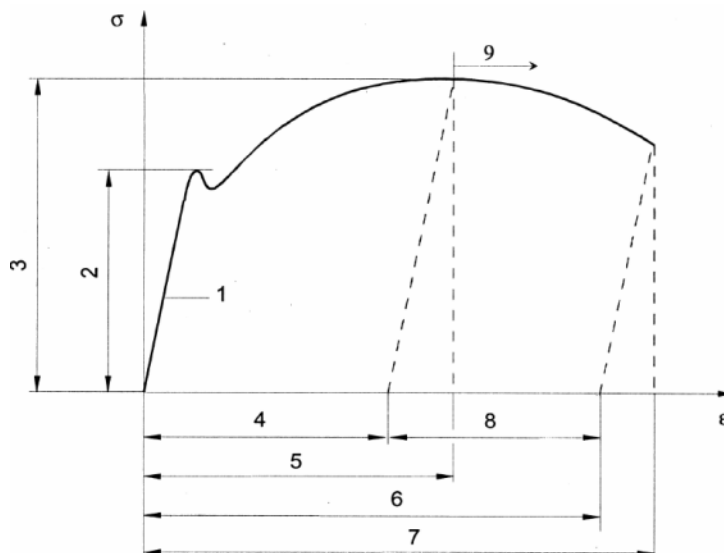


2. ábra. Szabványos próbatestek [5]

A mérés során a kezdetben  $A_0$  keresztmetszettel jelölt és jellemzett,  $L_0$  kezdeti hosszúságú próbatestet egytengelyű húzó igénybevétellel adott sebesség mellett addig nyújtjuk, ameddig be nem következik a szakadás/törés [6]. A vizsgálat egyik legfontosabb eredménye a szakítódiaagram (megnyúlás-erő diagram), amelyen a szakítás folyamata nyomon követhető, és az adott anyagmodellnek megfelelő szakaszokra osztható.

### 3.2.1 Legfontosabb fogalmak

A szakítóvizsgálati mérés során felmerülő legfontosabb fogalmakat a következő  $\sigma - \varepsilon$  diagram (3. ábra.) segítségével táblázatos formában (1. táblázat.) ismertetem.



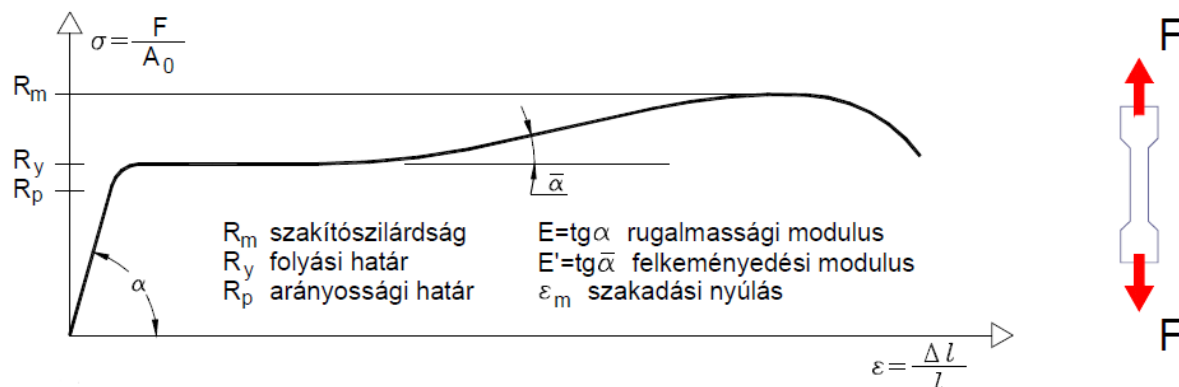
3. ábra. Szakítóvizsgálat jellegzetes  $\sigma - \varepsilon$  diagramja [7]

| Számozás | Megnevezés                                      |
|----------|-------------------------------------------------|
| 1        | Hooke-egyenes                                   |
| 2        | Folyáshatár                                     |
| 3        | Szakítószilárdság                               |
| 4        | Maradó alakváltozás                             |
| 5        | Legnagyobb terheléskor mért teljes alakváltozás |
| 6        | Szakadási nyúlás                                |
| 7        | Teljes nyúlás szakadáskor                       |
| 8        | Kontrakciós nyúlás                              |
| 9        | Roncsolódás kezdete                             |

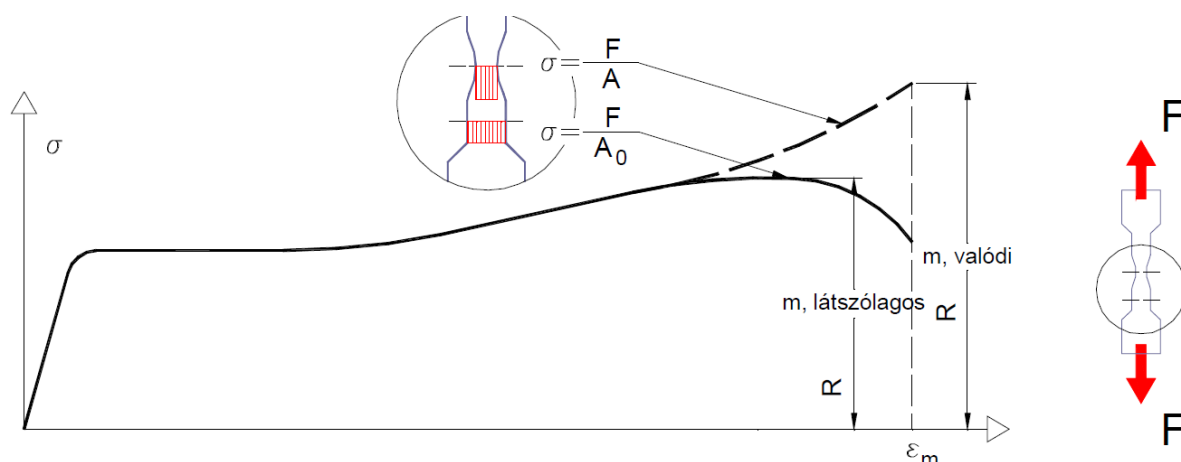
1. táblázat. Jelölések magyarázata

### 3.2.2 Látszólagos feszültség és valódi feszültség

A szakítóvizsgálat eredményének megfelelő szintű kiértékelése érdekében először két egymástól eltérő fogalmat ismertetek: a *látszólagos feszültség* és a *valós feszültség* fogalmát. Ehhez a következő, szerkezeti acél jellegzetes  $\sigma - \varepsilon$  diagramjából indulok ki (4. ábra.).

4. ábra. Jellegzetes  $\sigma - \varepsilon$  görbe [3]

Ismert, hogy *statikus vizsgálatnál* ( $\nu = 1 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ ) a húzott próbatest keresztmetszete már a szakadás előtti állapotban jelentős mértékben lecsökken (*kontrahál*). Attól függően, hogy a feszültséget az eredeti ( $A_0$ ), vagy a kontrahált keresztmetszetre vonatkoztatva vizsgálom, eltérő feszültség-nyúlás görbéket kapok (5. ábra.).



5. ábra. A látszólagos és a valós feszültség [3]

Kiértékeléskor ennek megfelelően megkülönböztetjük a *látszólagos feszültséget*

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

valamint a *valós feszültséget*,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

ahol

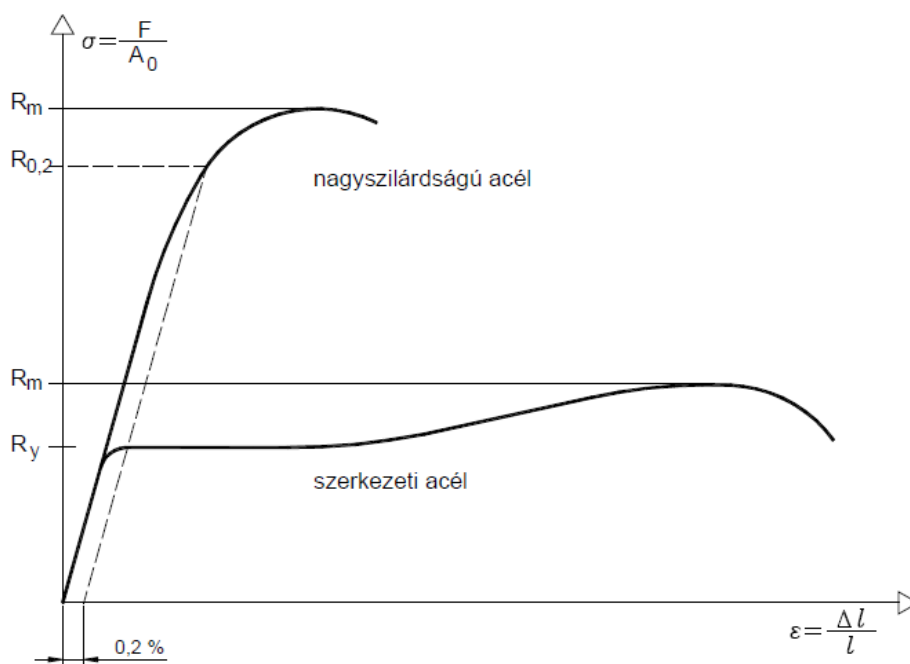
$F, [N]$ : az aktuális húzóerő

$A_0, [\text{mm}^2]$ : a próbatest eredeti keresztmetszete

$A, [\text{mm}^2]$ : a próbatest aktuális keresztmetszete, amely függ a nyúlás mértékétől

A kontrakciós szakaszon azonban már nem egytengelyű a feszültségi állapot, ezért az  $R_{m, \text{valódi}}$ , a kontrakció figyelembevételével számított szakítószilárdság értéke sem tekinthető pontosnak. Emellett a különböző anyagminőségekre előírt szakítószilárdság-értékek mindig a próbatest eredeti keresztmetszete alapján számolt értékek, ezért látszólagos értékeknek tekinthetők.

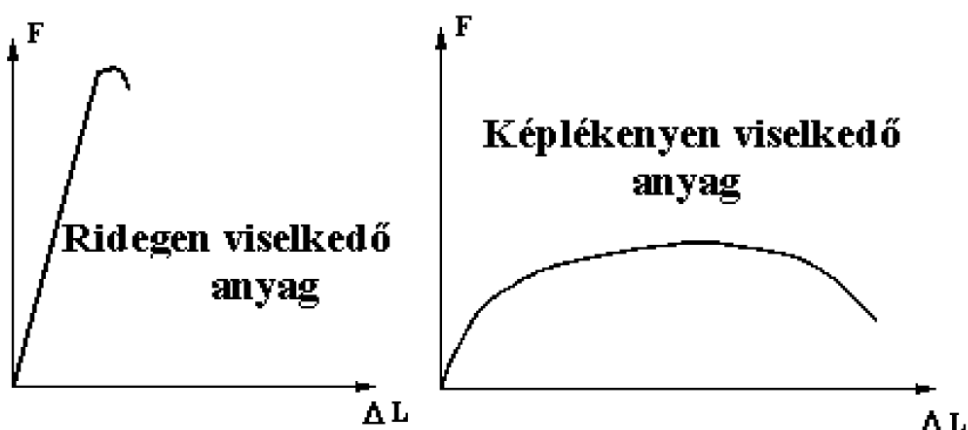
Továbbá fontos megemlíteni, hogy a nagyszilárdságú acélok nem rendelkeznek egyértelmű folyáshatárral, ezt a 0,2% maradó alakváltozáshoz tartozó  $R_{0,2}$  feszültség (egyezményes folyáshatár) helyettesíti (6. ábra.).



6. ábra. Nagyszilárdságú acélok  $\sigma - \epsilon$  görbéje [3]

### 3.2.3 Szakadáshoz vezető törés, mint a szakítóvizsgálat eredménye

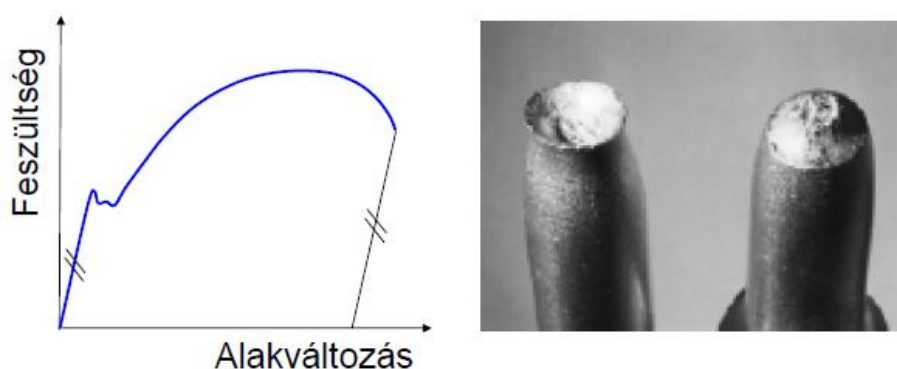
A szerkezeti anyagaink tönkremenetelének két szélsőséges típusa a ridegtörés, ill. a képlékeny törés. A rideg, ill. képlékeny viselkedést, amely nem tekinthető anyagi tulajdonságnak, hanem az anyag állapotát is jelentheti, az adott anyagon végzett szakítóvizsgálat is jól szemlélteti (7. ábra.) [8].



7. ábra. Az anyag állapotai [8]

I) A szívós törés

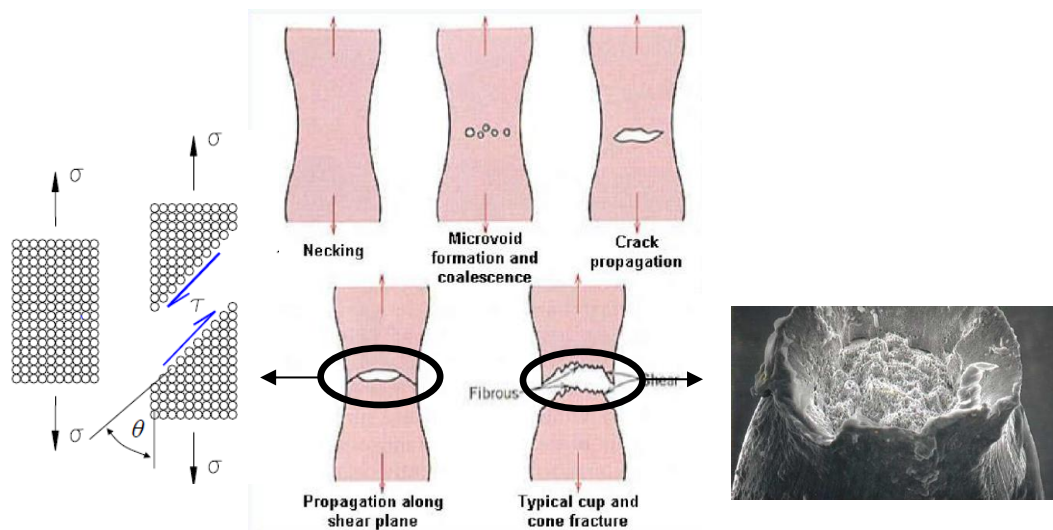
Szakadás előtti állapotban jelentős mértékű keresztmetszet csökkenés, nagy képlékeny alakváltozás figyelhető meg (8. ábra.).



8. ábra. Jellegzetes szívós törés [9]

A szívós törés egyik fontos ismérve a törési folyamat közben kialakuló anyagroncsolódás, valamint a törési energia „átalakulása”, ugyanis annak jelentős része képlékeny alakváltozásra és új felületek képződésére fordítódik.

Tekintsük a szakítóvizsgálat példáját (9. ábra.): egytengelyű húzó igénybevétel hatására a próbatest a szakadás előtti állapotban kontrahál, keresztmetszete lecsökken. Ezután a kontrahált részen üregek keletkeznek, amelyek kialakulását ún. második fázisú részecskék segítenek elő. A folyamatos igénybevétel hatására az üregek növekednek majd összeérnek, ami felületi elnyíródást eredményez. A törés közvetlenül az elnyírt felület kialakulása után következik be.



9. ábra. A szakadás elméleti folyamata [9], [10]

Az anyag szívós (képlékeny) viselkedését az igénybevétel sebessége – a feszültségi állapot és hőmérséklet mellett - döntő mértékben befolyásolja: csökkenő sebesség hatására képlékenyebb, növekvő sebesség hatására ridegebb viselkedést tapasztalni a szakítóvizsgálat során[9].

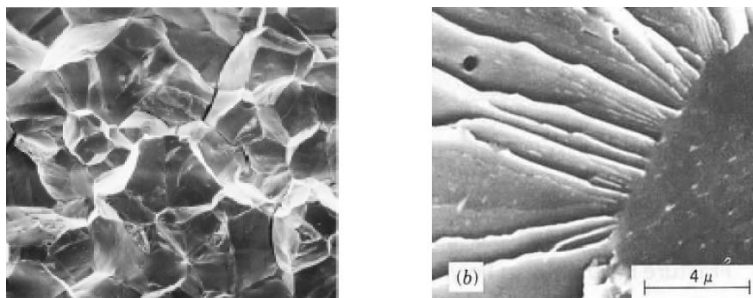
## II) A rideg törés

Maradva a szakítóvizsgálat példájánál és csak az igénybevételi sebességet, mint állapot tényezőt figyelembe véve, mint említettem, az igénybevétel sebességének növelése kontrakciómentes szakadást, azaz rideg törést eredményez. Ebben az esetben a próbatest a húzó igénybevétel hatására „elpattan”, a törési energia csak új felületek képzésére fordítódik (10. ábra.).

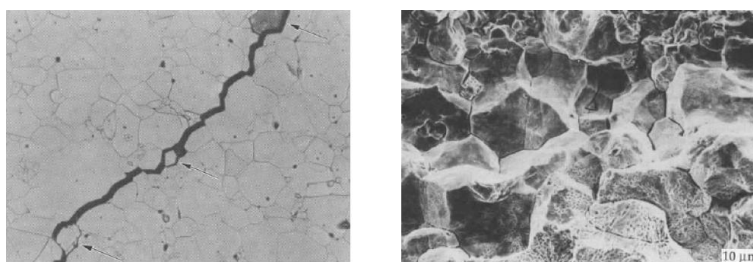


10. ábra. A rideg törés elméleti folyamata és a töret felület szemléltetése [9]

Amikor a repedés szemcséken keresztül, meghatározott atomsíkon terjed, a törés hasadáson (transzkrisztallin) törés. Ezt jól mutatja a 11. ábra.. Az interkrisztallin törés szemcsék közötti, szemcsehatárokon történő törést jellemez (12. ábra.).



11. ábra. A transzkristallin törés [9]



12. ábra. Az interkristallin törés [9]

## 4 Az anyagroncsolódás modellezésének lehetőségeivel kapcsolatban elvégzett kutatások

### 4.1 A TDK dolgozatomban kutatási hipotézisének megfogalmazása

A TDK dolgozatomban legfőbb célja, az anyagroncsolódás virtuális modellezési lehetőségeinek feltárása ABAQUS/Standard környezetben.

Kutatási hipotéziseimet ennek érdekében a következőképpen állítottam fel:

1. *Az eXtended Finite Element Method segítségével történő, olyan működő analízis-módszer kialakítása, amely már képes a megnevezett – komplex mérési eredmények alapján definiált anyagparaméterekkel ellátott - mechanikai anyagmodell felhasználásával, az esetlegesen kialakuló anyagroncsolódások virtuális modellezésére.*
2. *A mechanikai anyagmodell validálása a kialakított XFEM analízis-módszer segítségével.*

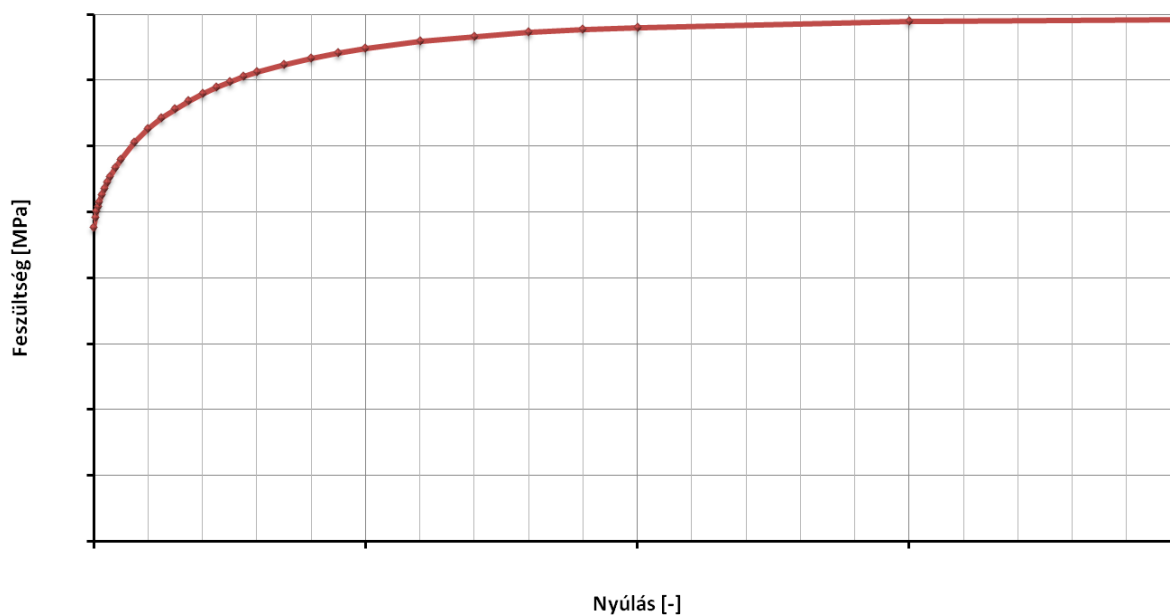
Kiemelt célom továbbá, hogy a validált mechanikai anyagmodellt felhasználva, az AHM Kft., Motorfejlesztés területének már említett projektjében szereplő, motoremelő/-mozgató fül XFEM-mel történő vizsgálata, és annak maximális teherbíró képességének meghatározása [kg]-ban.

### 4.2 A felhasznált mechanikai anyagmodell

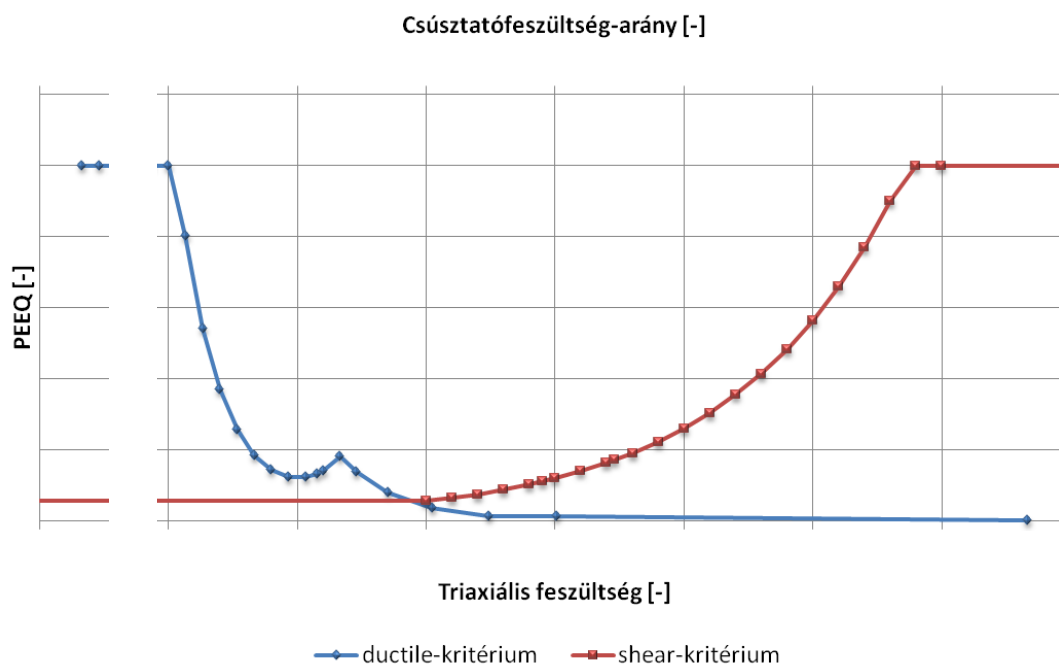
A felhasználandó mechanikai anyagmodell számos olyan paramétereket tartalmaz (*Melléklet*), amelyek további vizsgálata, értelmezése szükséges a feladat megoldása során. Mivel a végesesemes számításokat ABAQUS/Standard környezetben végeztem el, ezért elsősorban a program felhasználók számára írt dokumentációja jelentette a legnagyobb segítséget az XFEM-eljárás elemzése során.

A müncheni cég méréseiből felállított mechanikai anyagmodellt, amelyet a feladat megoldásának egészében alkalmazni fogok, a 1. diagram. és a 2. diagram. mutatja. *Itt jegyezném meg, hogy egy, a valóságot legjobban közelítő, a valós anyag viselkedését számokban definiáló mechanikai anyagmodell megalkotása rendkívül körülményes és összetett mérések sorozatát igényli. A parancsokhoz szükséges adatok jelen esetben is ilyen komplex mérések eredményei, amelyek közül a későbbi, kiértékeléséhez szükségeseket a Melléklet tartalmazza.*

A felhasznált mechanikai anyagmodell feszültség-nyúlás diagramja

1. diagram. Az felhasznált mechanikai anyagmodell  $\sigma - \varepsilon$  görbéje

A törési kritériumok diagramja



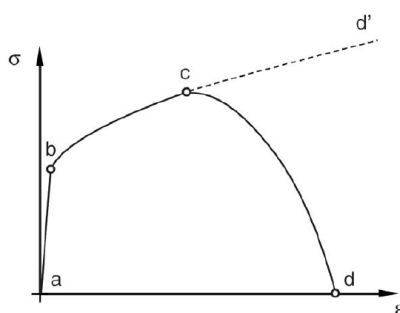
2. diagram. A mérések során meghatározott törési paraméterek

*A mechanikai anyagmodellben szereplő különböző parancsok és kritériumok definíciót és magyarázatát a következő alponban ismertetem.*

#### 4.2.1 Roncsolódás és törés modellezése ABAQUS/Standard környezetben

A mérnöki gyakorlatban nagyon fontos, hogy mind egyszerű alkatrészek, mind összetettebb konstrukciók esetén képesek legyünk adott igénybevétel hatására létrejövő anyagroncsolódások, esetleg szakadások, törések bekövetkezésének kezdetét pontosan meghatározni. Ebben jelent nagy segítséget az ABAQUS/Standard és ABAQUS/Explicit környezete.

A tönkremenetel elmélete az anyag degradációjának teljes folyamatát írja le, ami igénybevétel hatására kialakuló, továbbterjedő (kiszélesedő) és egyesülő, mikron nagyságú üregek, repedések keletkezésén alapul. Az anyag tönkremenetele – szakadása, törése - annak teljes teherbíró-képességének elvesztésére utal, ami az anyagmerevség progresszív degradációjának eredménye [10].



13. ábra. igénybevétel hatására adott válaszfázisok [11]

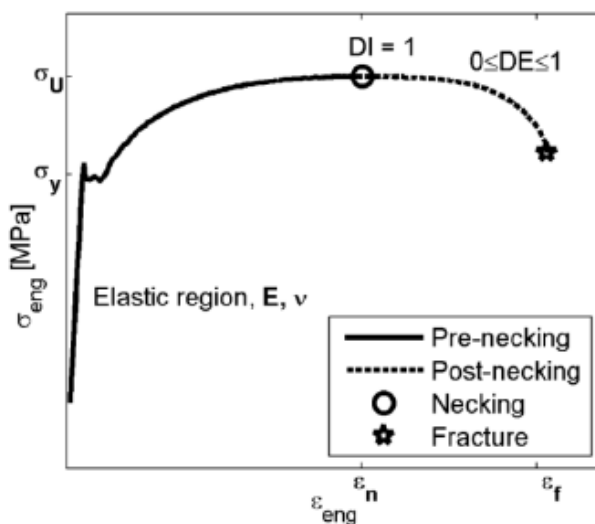
Tételezzük fel, hogy a megnevezett  $\sigma - \varepsilon$  görbe (13. ábra.) egy hagyományos lapos próbatest terhelés hatására adott különböző válaszfázisait mutatja. A kezdetben lineárisan rugalmas (a-b szakasz) anyagmodellt képlékeny-felkeményedő anyagmodell követ (b-c szakasz). A „c”-vel jelölt pont a mechanikai anyagmodellben definiált adatoknak megfelelően instabilitási jelenségekre jellemző kezdeti „határállapot” kialakulásának helye, ahol megkezdődhet a valóságban is adott igénybevétel hatására létrejövő anyagroncsolódás. A kisebb deformáció hatására generált, hirtelen bekövetkező feszültségcsökkenés tehát az anyag belső struktúrájában kialakuló instabilitásra enged következtetni, ami egészen a „d”-vel jelölt pontig, az anyag szakadásáig tart. A c-d szakasz tehát a merevség degradációjának kiterjesztése is egyben, amit a próbatesten kialakuló *kontrakció* jelez. Emellett megállapítható, hogy a c-d szakasz tulajdonképpen a c-d’ szakasz azon változata, amely figyelembe veszi a degradációt.

Az előzőek alapján tehát a tönkremenetel leírása ABAQUS környezetben négy különböző részből tevődik össze [12]:

- a sértetlen anyag terhelésre adott válasza (a-b-c-d’ szakasz)
- a roncsolódás kezdeti kritériuma, feltétele (c pont)
- a roncsolódás kiterjedésének törvénye (c-d szakasz)
- végelemek törlésének lehetősége (teljes anyagmerevség-degradáció esetén)

A továbbiakban, a mechanikai anyagmodellben is felhasznált, a törésmechanikai szimulációhoz szükséges parancsokat - a roncsolódás kezdeti kritériumának és terjedési törvényének átfogóbb tárgyalását szakítóvizsgálat példáján keresztül ismertetem.

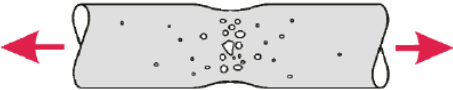
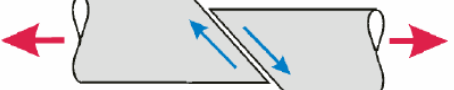
Induljunk ki a 14. ábra.-ból.



14. ábra. XFEM parancsok értelmezése [13]

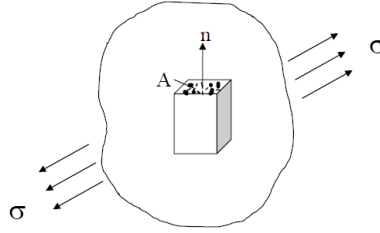
Jelölje DI a *\*damage initiation*[12][14], mint a roncsolódás kezdeti kritériuma, parancsot. A  $\sigma - \varepsilon$  diagramon jól látszik, hogy amikor az igénybevétel hatására kialakuló feszültség eléri – a 14. ábra. alapján - maximális értékét, ami az anyag szakítószilárdsága – konzekvensen ezt „c” ponttal is jelölhetem –, a DI értéke 1. Ez azt jelenti, hogy a korábbi *elő-kontrakciós szakasz* itt zárul, a próbatest kontrahálni kezd és a DI segítségével definiált további anyagviselkedés jelenik meg. A pontozott vonallal jelölt szakasz tulajdonképpen az anyag további viselkedését ábrázolja, amit a kontrakció kezdetétől egészen a szakadás pillanatáig terjedő, DE-vel is jelölt *\*damage evolution* [12][14], mint a roncsolódás terjedési törvénye, parancs befolyásol.

Az anyagroncsolódás modellezés-elméletének további pontosítása érdekében először a parancsok mélyebb magyarázatára törekszem. A könnyebb érthetőség, és az esetleges egymással történő összehasonlíthatóság érdekében a felhasznált parancsok legfontosabb jellemzőit és alkalmazásukat táblázatos formában mutatom be (2. táblázat.).

| Damage initiation<br>– „ductile” kritérium                                                                                                                                                                 | Megnevezés                                         | Damage initiation<br>– „shear” kritérium                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Az üregek (repedések) kialakulásának következtében létrejövő roncsolódás meghatározása                                                                                                                     | Leírás / miért alkalmazom?                         | A nyírófelület kialakulásának következtében létrejövő roncsolódás meghatározása                                                                                                                              |
|                                                                                                                           | Virtuális szemléltetése<br>[15]                    |                                                                                                                            |
| A modell feltételezi, hogy az egyenértékű plasztikus nyúlás (PEEQ) a triaxiális feszültség és a nyúlás mértékének függvénye a roncsolódás kezdetén                                                         | Jellemzése                                         | A modell feltételezi, hogy az egyenértékű plasztikus nyúlás (PEEQ) a csúsztatófeszültségek arányának és a nyúlás mértékének függvénye a roncsolódás kezdetén                                                 |
| Triaxiális feszültség számítása<br>$\eta = -\frac{p}{q}$                                                                                                                                                   | Matematikai összefüggése                           | Csúsztatófeszültségek arányának számítása<br>$\Theta_s = \frac{(q + k_s \cdot p)}{\tau_{max}}$                                                                                                               |
| $p$ : nyomófeszültség<br>$q$ : Mises-féle feszültség                                                                                                                                                       | Összefüggés magyarázata                            | $k_s$ : méréssel meghatározott anyagjellemző                                                                                                                                                                 |
| <b>*DAMAGE INITIATION, CRITERION=DUCTILE</b><br>Első sorba írjuk, egymás után a következőket:<br>1. egyenértékű plasztikus nyúlás értéke a roncsolódás kezdetén<br>2. triaxiális feszültség értéke, $\eta$ | ABAQUS - definíció                                 | <b>*DAMAGE INITIATION, CRITERION=SHEAR</b><br>Első sorba írjuk, egymás után a következőket:<br>1. egyenértékű plasztikus nyúlás értéke a roncsolódás kezdetén<br>2. Csúsztatófeszültségek aránya, $\Theta_s$ |
| *damage initiation,<br>criterion=ductile<br>...                                                                                                                                                            | Gyakorlati alkalmazása (mérési eredmények alapján) | *damage initiation,<br>criterion=shear, ks="érték"<br>...                                                                                                                                                    |

2. táblázat. A felhasznált parancsok bemutatása (ABAQUS/Standard) [12][14]

A roncsolódás terjedési törvényének átfogóbb tárgyalása előtt definiáljuk a  $D$  skalárt, mint *roncsolódási változót* [11].



15. ábra. Roncsolódási tényező definiálásának szemléltetése [11]

Induljunk ki a 15. ábra. alapján meghatározható

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (3)$$

összefüggésből [11], ami átírható a

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (4)$$

egyenlőségre, ahol

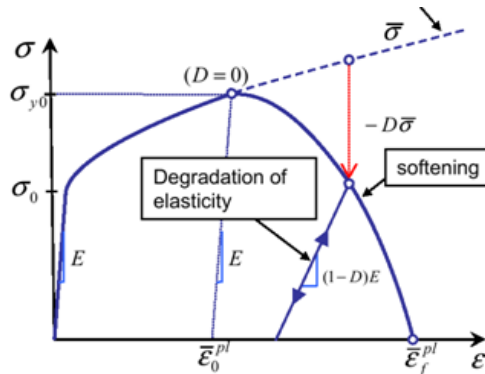
$D$ : a roncsolódási változó

$\bar{\sigma}$ : az adott inkrementumban számított sértetlen, roncsolódás nélkül számított feszültségi tenzor

Továbbá, belátható az is, hogy amikor a  $D = 0$  összefüggés teljesül, igaz lesz, hogy  $\sigma = \bar{\sigma}$  - konzekvensen a 13. ábra. alapján ez a „c” pont. Amennyiben a roncsolódási tényező értéke nő ( $D > 0$ ), az anyag roncsolódása két formában történhet: a kialakult feszültség vagy az anyag rugalmasságának csökkenése által. Utóbbi esetén a (4) átírható a

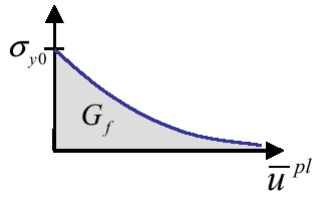
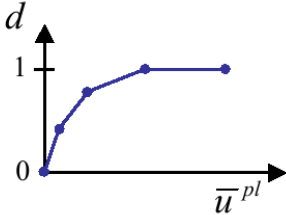
$$\sigma = E_0(1 - D)\varepsilon \quad (5)$$

egyenlőségre [11]. Amennyiben a  $D = 1$  összefüggés teljesül, az anyag elveszíti teljes teherviselő képességét, más szóval, elszakad – (lásd. (4)). A roncsolódás terjedési törvénye tehát az anyagmerevség degradációjának mértékét írja le, amint a megfelelő kezdeti kritérium működésbe lép. A 16. ábra. segítségével könnyen értelmezhetők a leírtak [11].



16. ábra. A roncsolódás folyamatának szemléltetése [15]

A további, ABAQUS/Standard környezetben használatos jellemzőket táblázatos formában foglaltam össze (3. táblázat.).

| Megnevezés                                         | Damage evolution                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Leírás / miért alkalmazom?                         | Definiálja az anyagmerevség degradációjának mértékét                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Típusa (TYPE)                                      |  <p>Energialapú (<b>ENERGY</b>) (lineáris vagy exponenciális jelleg) [15]</p>  <p>Elmozdulás alapú (<b>DISPLACEMENT</b>) (táblázatos formában megadható, lineáris, vagy exponenciális jelleg) [15]</p> |
| Matematikai összefüggése                           | $\sigma = (1 - D)\bar{\sigma}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Összefüggés magyarázata                            | $D$ , mint roncsolódási változó                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ABAQUS -definíció                                  | <b>*DAMAGE EVOLUTION, TYPE=...</b><br>Első sorba írjuk:<br>1. Értéke (pl. 0,1)                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Gyakorlati alkalmazása (mérési eredmények alapján) | <b>*damage evolution,</b><br><b>type=displacement, softening=linear</b><br>„érték”                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

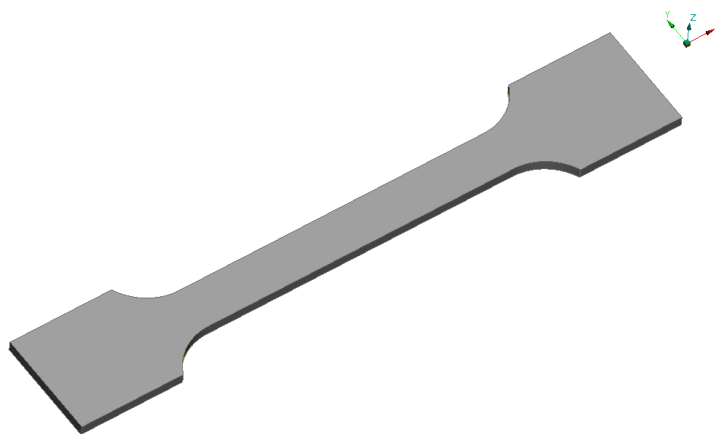
3. táblázat. A \*damage evoluion parancs bemutatása (ABAQUS/Standard) [12][14]

### 4.3 Szakítóvizsgálat FEM segítségével

Gyakorlati kutatásaim alapját az az első számítás képezte, amelyben nem alkalmaztam az XFEM-mel kapcsolatos parancsokat. Döntésemet indokolta, hogy első lépésben a legfontosabb a szakítóvizsgálati próbatest-modell pontos felépítése, valamint a modell virtuális térben történő viselkedésének, és az eredmények helyességének megítélése.

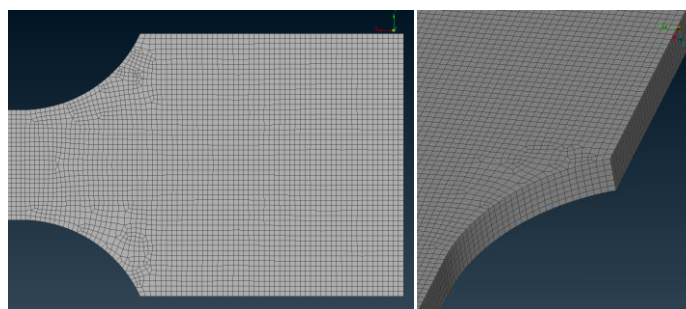
#### 4.3.1 A próbatest-modell peremfeltételeinek és igénybevételének meghatározása

A következőkben a szakítóvizsgálat előkészítését mutatom be a végeelem-análízishez. Ehhez elegendő a mérés során vizsgált próbatest végeselemes definiálása (17. ábra.). A számítások során alkalmazott 3D-modell pontos méreteit a *Melléklet* tartalmazza.



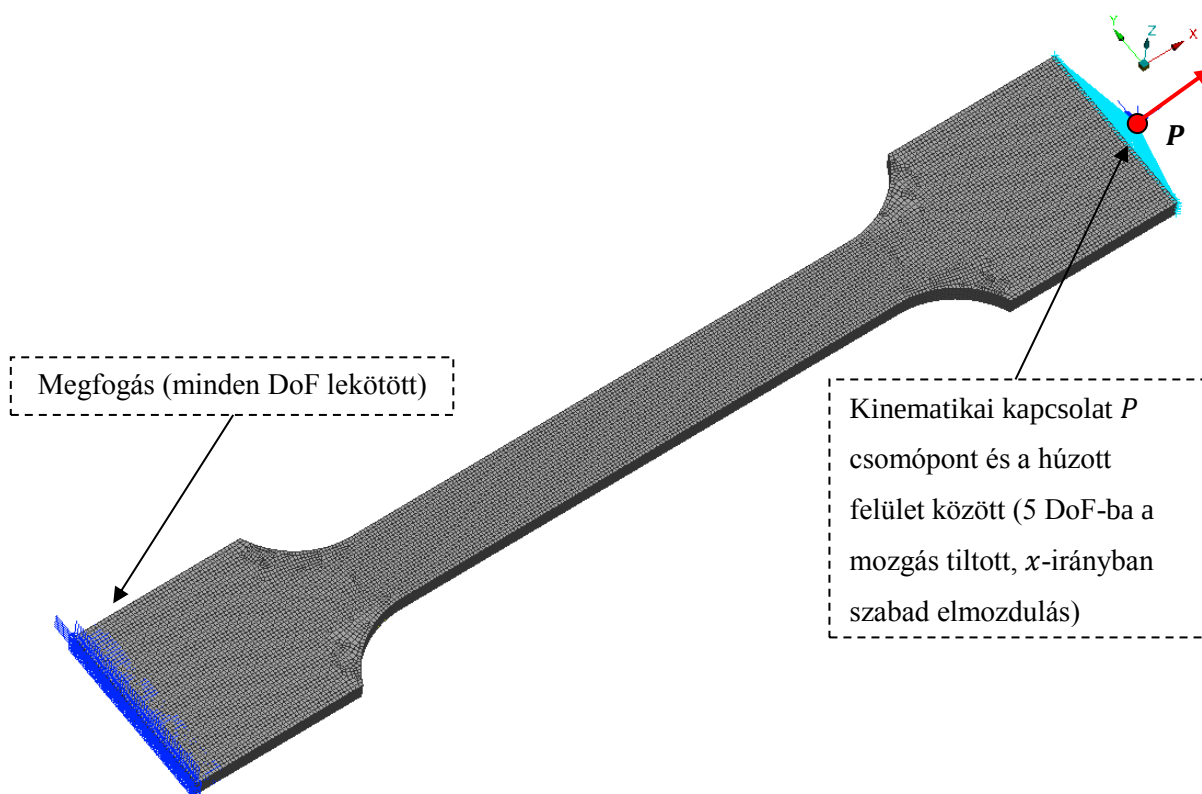
17. ábra. Lapos próbatest

A végeselemes hálózashoz. 0,7 [mm] élhosszúságú quad felületi hálót választottam, amelyet kihúzással 8 csomópontos hexaéder (C3D8) térfogati hálóvá alakítottam. A próbatest végeselemes modellje összesen 66648 elemet tartalmaz, amelynek mindegyike C3D8 típusú elem (18. ábra.).



18. ábra. Alkalmazott végeselemes háló

A szakítóvizsgálat során a próbatest egyik végét befogták, ez egy, a próbatest egyik végének mind a hat szabadságfokát megkötő kinematikai kényszert jelent a végeselemes környezetben. A próbatest másik végén további kinematikai kényszert alkalmazok, amely segítségével egyszerűbben definiálható az egytengelyű húzás folyamata. Ennek érdekében a próbatest legfelső, a húzás irányára merőleges felületének középpontjától pontosan 10 [mm] távolságban egy csomópontot definiálok. Ezt a könnyebb megkülönböztethetőség érdekében  $P$ -vel jelölöm. A csomópont és a legfelső felület között alkalmazom az említett kinematikai kényszer-kapcsolatot („kinematic coupling”, [12][14]), ami lehetővé teszi, hogy a  $P$  csomópontra adott megfogások és igénybevételek, a próbatest felületén fejtsék ki a felületre „redukált” hatásukat. A  $P$  csomópont csak az adott húzási irányban mozdulhat el – legyen ez az irány az  $x$ -irány –, az összes többi irányban a mozgása tiltott. Az igénybevétel hatását nem erőként definiálom, hiszen a mérés során az erő az elmozdulás függvényben változik, hanem egy maximális, lineáris görbe mentén változó, kezdetben 80 [mm]-ben definiált  $x$ -irányú elmozdulást határozok meg szintén  $P$  csomópontra. Az előkészített próbatest-modellt a (19. ábra.) mutatja.



19. ábra. Az előkészített próbatest-modell

A próbatest anyaga a korábban ismertetett acél (4.2 alfejezet), amelyből a későbbi, az ABAQUS/Standard környezetben XFEM számításhoz szükséges parancsokat (*\*damage initiation*, *\*damage evolution*) deaktiváltam. Itt újra kiemelném, hogy ezen számítás célja, az alkalmazott mechanikai anyagmodell viselkedésének megismerése FEM környezetben.

A feladatot nem tekinthetem lineárisan rugalmas problémaként, ugyanis a próbatest teljes alakváltozását szeretném vizsgálni annak definiált elmozdulásáig. Ebből kifolyólag az analízist nem lineáris problémaként kezelem.

Megjegyzem: *ahhoz, hogy egy végeselemes számítás stabilan működjön, fontos, hogy az analízis során fellépő konvergencia feltételek teljesüljenek.* Jelen esetben, mivel egy egyszerű számításról van szó, nem kellett megküzdünk ilyen fajta problémával.

A felépített végeselemes modell összes, a számításhoz szükséges adatát egy .inp kiterjesztésű fájl tárolja. Ennek későbbi értelmezését segítően a *Mellékletben* egy rövid szöveges magyarázatot ismertetek.

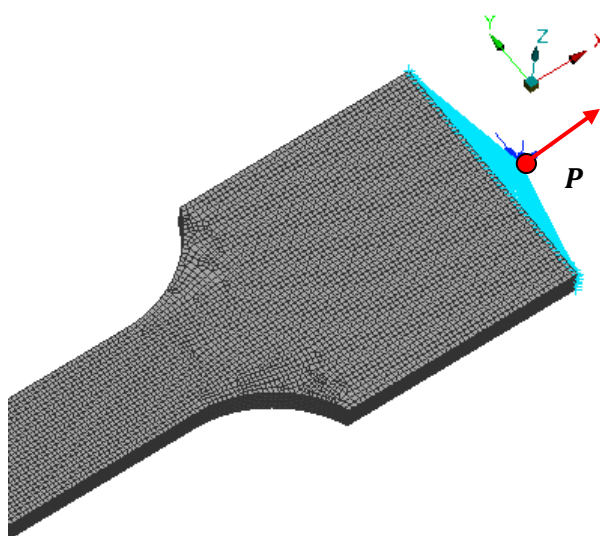
#### 4.3.2 Az eredmények kiértékelésének módszere

A végeselemes modell felépítése után a számítási eredmények kiértékelésének módszerét mutatom be, amit a szakítóvizsgálattal kapcsolatos elmélet és a TDK dolgozatom hipotézise alapján alakítottam ki. Ez a módszer egy következetes és jobban átlátható eredményértelmezést tesz lehetővé, amit dolgozatom egésze során alkalmazok.

A kiértékelési módszer a következő:

a) A húzás irányában fellépő erő és elmozdulás meghatározása

Ebben a pontban mindig az analízis által kiszámított eredmények kerülnek feldolgozásra. A 20. ábra. szemlélteti a definiált,  $P$  csomópontot, amelyben annak adott értékű aktuális elmozdulásának ( $\Delta l$ ) hatására kialakult aktuális húzóerőket ( $F$ ) keresem az egyes időpillanatokban a húzás irányának megfelelő komponenseként. Az erő, elmozdulás értékeket az  $F(\Delta l)$  függvény szerint ábrázolom.



20. ábra. A definiált,  $P$  csomópont szemléltetése

b) A lokális feszültség-lokális nyúlás függvényének meghatározása

A szakítóvizsgálat során fontos feladat a próbatest kontrahált részének lokális vizsgálata. Ezért szükségem lesz egy olyan tartományra, ami csak a lokális nyúlás végelemeit tartalmazza. Ezt *kritikus tartománynak* nevezem el. Jelölje  $EsL$  („*Elementenreihe senkrecht auf die Länge*”) a próbatest hosszára merőleges elemsorok számát,  $EeD$  („*Elementenreihe entlang der Dicke*”) pedig a próbatest vastagsága menti elemsorok számát. A lokális értékek kiértékelésekor nem minden egyes elem feszültség és nyúlás értékét dolgozom fel, hanem csak a kritikus tartományba eső elemek minden egyes „időpillanatra” számított átlag feszültség- és nyúlásértékét.

Itt jegyzem meg, hogy jelen esetben az „időpillanat” fogalom a számítás lefutására, ill. az egyes egyenlőségi iterációk idejére/időpontjára utal, hiszen a számítás statikus, nem időtartományon számolunk.

Ennek megfelelően jelölje  $AVGS11$  a húzóirányú főfeszültség átlagértékét,  $AVGPE$  pedig a plasztikus nyúlás átlagértékét. Az így, minden időpillanatra számított értékeket ábrázolom  $\sigma(\varepsilon)$  diagramon, amelynek  $x$ -tengelyén  $AVGPE$ ,  $y$ -tengelyén  $AVGS11$  értékeket veszem fel.

c) A látszólagos feszültség-globális nyúlás függvényének meghatározása

Kiindulva a 20. ábra.-ból és az a) pontban meghatározott erő, elmozdulás értékekből, látszólagos feszültség és globális elmozdulás számolható a

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6)$$

és az

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

képletek segítségével. Előbbiben  $F$  az aktuális húzóerőt  $P$  csomópontban,  $A_0$  a próbatest kezdeti keresztmetszetét jelöli, utóbbiban a  $\Delta l$ -lel jelölt érték a próbatest  $P$  csomópontbeli aktuális elmozdulása,  $l_0$  pedig annak kezdeti hosszúsága. Az így kapott értékeket minden időpillanatra vonatkoztatva  $\sigma(\varepsilon)$  diagramon ábrázolom.

d) A valós feszültség-globális nyúlás függvényének meghatározása

A valós feszültség a kontrahált részre vonatkozik, ami tehát minden időpillanatban változik a nyúlás függvényében. Ezért a

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

összefüggést megfelelően átírva, a

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{F}{A(\varepsilon)} \quad (9)$$

egyenlőséghez jutunk, ahol  $F$  az aktuális húzóerőt,  $A$  a próbatest aktuális,  $\varepsilon$ -függő keresztmetszetét jelöli. Belátható, hogy itt a  $\sigma(\varepsilon)$  valós feszültség tulajdonképpen a kritikus tartományra meghatározott  $AVGS11$ -gyel jelölt átlagfeszültség értékét megfelelően közelíti. A (9) tehát a

$$\sigma(\varepsilon) \approx AVGS11 \quad (10)$$

közelítésre módosul. Ezek után a globális nyúlás a (10) segítségével már számítható. Az így kapott értékeket minden időpillanatra vonatkoztatva  $\sigma(\varepsilon)$  diagramon ábrázolom.

e) A mérési és számolási eredmények összehasonlítása

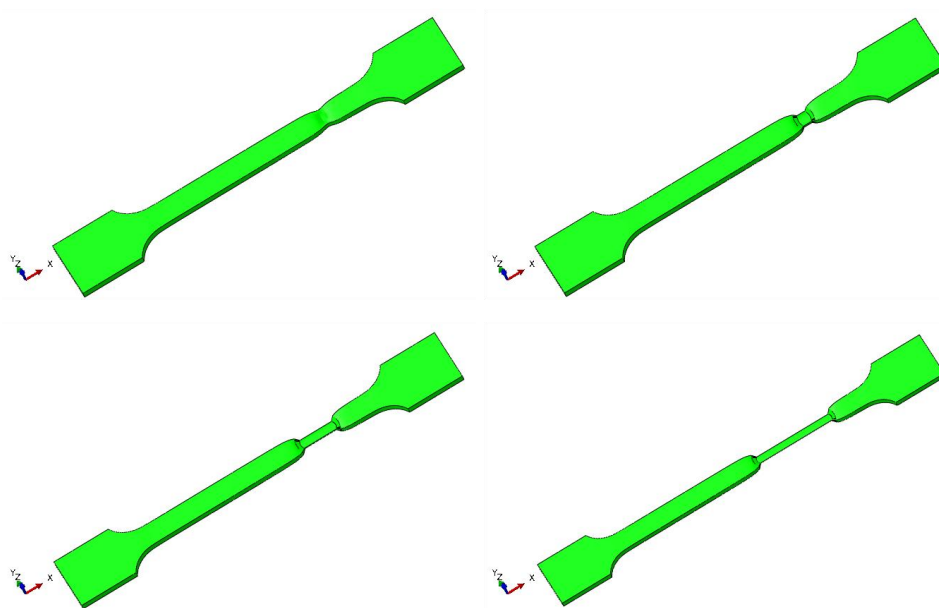
A kiértékelés utolsó pontjában mindig a szükséges diagramok összehasonlítását fogom elvégezni, amely a mechanikai anyagmodell validálásakor játszik igazán fontos szerepet.

Megjegyzem, hogy az azonos  $x$ -változójú függvényeket - c) és d) alpont - az eredmények kiértékelésekor természetesen egy diagramban ábrázolom.

### 4.3.3 Az eredmények rövid ismertetése

Az első végeselemes számítás (hagyományos, nem XFEM számítás) a várt eredményeket szolgáltatta. *Fontos megemlíteni, hogy jelen esetben nem a számított eredmények részletes értelmezése, szilárdsági ellenőrzése a célom, hanem, a TDK dolgozatom hipotézisét szem előtt tartva, az eredmények alapján megítélni a próbatest viselkedését.*

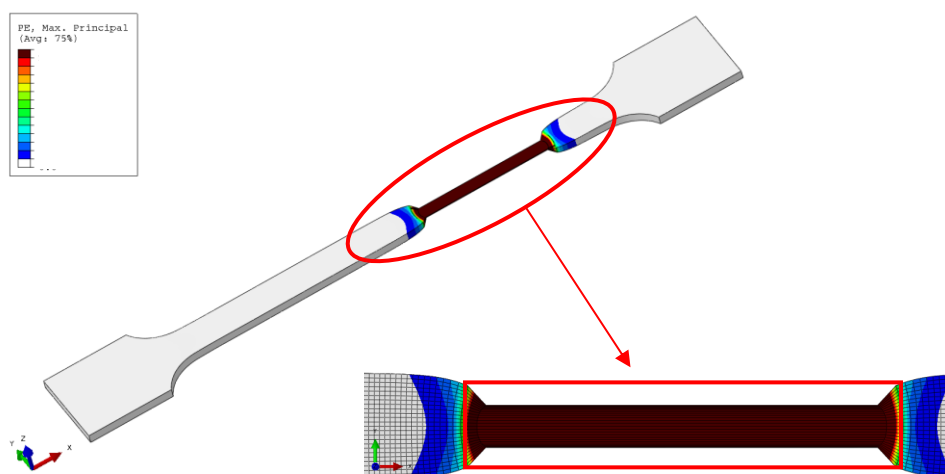
Az analízis főbb eredményeit a következő, 21. ábra. mutatja.



21. ábra. A próbatest viselkedése FEM alkalmazása esetén

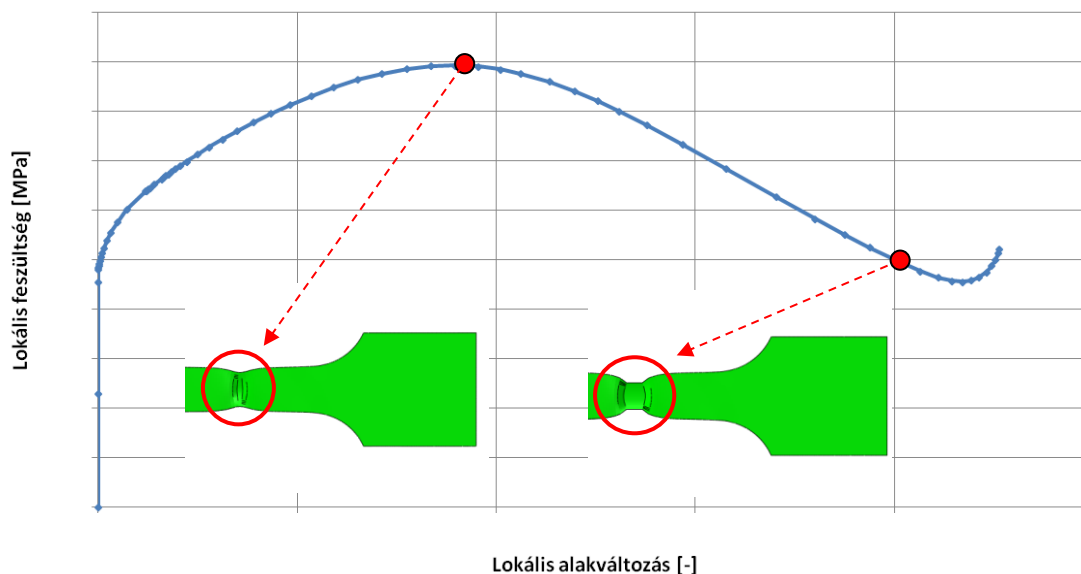
A végeselemes számítás alapján megállapítható a próbatest kontrakciójának helyessége. Emellett azonban jól látszik, hogy a próbatest adott kontrakció után a végtelenségig, jelen esetben a definiált 80 [mm] elmozdulás eléréséig nyúlik, ami a próbatest valós viselkedésével nem egyező eredményt mutat. Ezért nem szükséges a 4.3.2 alfejezetben leírtak szerinti teljes kiértékelés, csupán a próbatest lokális, kontrahált helyén kialakuló, feszültség-nyúlás értékek érdekelnek.

A 22. ábra.-n meghatározott kritikus tartomány három EsL és hat EeD tartalmaz, amely feszültség-nyúlás diagramját az 3. diagram. mutatja.



22. ábra. A kritikus tartomány meghatározása

### Lokális feszültség-lokális alakváltozás diagram (FEM)



3. diagram. A kritikus tartomány feszültség-nyúlás görbéje (FEM)

A lokális alakváltozás a megnevezett három EsL átlagnyúlásából következik, ami tehát a kritikus tartomány több mint 200 [%]-os megnyúlását jelzi. *Ilyen mértékű lokális alakváltozás, bármely acél mechanikai anyagmodellje esetén sem következhet be a próbatest szakadása nélkül!* Ez, az eredmény számítással is megalapozott magyarázata arra, hogy az első végeselemes számítás (hagyományos FEM) a próbatest megfelelő hálózásának és felépítésének (peremfeltételek, igénybevételek) helyessége ellenére, kontrahált keresztmetszetének kialakulása után, annak nem valóságos viselkedését szolgáltatja.

#### 4.4 Szakítóvizsgálat XFEM segítségével

Az előző végeselemes számításkor felépített szakítóvizsgálati próbatest-modell (4.3.1) képezte a következőkben ismertetésre kerülő virtuális szakítóvizsgálatom alapját. Dolgozatom következő részében tehát az XFEM ABAQUS/Standard környezetben történő gyakorlati alkalmazását mutatom be a már ismertetett próbatest-modell példáján keresztül.

Egy korábbi alfejezetben (4.2.1) ismertettem a mérési eredmények segítségével definiált mechanikai anyagmodell azon szükséges paramétereit, amelyek megfelelő módú alkalmazása lehetővé teszi a vizsgálni kívánt próbatest szakadásának FEM modellezését. Ezek tehát a következők [14]:

- (1) *\*damage initiation, criterion=ductile/shear*
- (2) *\*damage evolution, ...*

A felsorolt parancsokat felhasználva ABAQUS/Standard környezetben fogom megalkotni azt a modellezési sémát, amely biztosítja, hogy megfelelő pontosságú mechanikai anyagmodell alkalmazása esetén, egy tetszőleges alkatrész szakítószilárdságának elérése utáni viselkedése is modellezhető legyen. Ezt az eddigi FEM-mel történő számítások nem tették lehetővé.

A továbbiakban a végső séma kialakítását segítő ún. *tervezési-variánsokat* ismertetem. Megismételném, hogy a variációk során nem változtattam a korábbi, FEM-mel történő analízis során megalkotott végeselemes modell elemein, peremfeltételein, igénybevételén, és az analízisben továbbra is elasztikus-plasztikus anyagmodell szerepel.

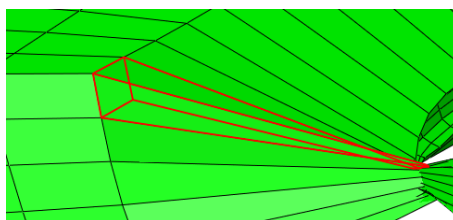
##### 4.4.1 Nulladik variáns – divergencia-probléma

A legelső tervezési-variáns kialakítása során lehetőség szerint a teljes mechanikai anyagmodell viselkedésének megismerése volt a célom. Ennek érdekében a korábbi deaktivált parancsok mindegyikét aktiváltam, más szóval, a mérési eredmények alapján felállított anyagmodellt változtatások nélkül alkalmaztam. A megoldás során azonban több hibaüzenet is azt közölte, hogy a program nem képes egy adott időinkrementum után további számításokat végezni, ugyanis a számítás nem teljesíti a konvergencia feltételeket, a számítás tehát egy bizonyos „határ” elérése után divergál.

A nulladik variáns eredménytelensége rávilágított arra, hogy az XFEM-mel történő analízis során számolnom kell a számítás során fellépő konvergencia-problémákkal, ami a végeselemes számítás lefutásának egyik alapkérdése is lehet. Feltételezem, hogy a nulladik variánsomban használt modell felépítésének helyessége megfelelő, a továbbiakban tehát a konvergens számítás elérésére kell törekednem.

#### 4.4.2 Első variáns - *\*amplitude* parancs bevezetése, avagy a konvergencia biztosítása

Az előző tervezési variáns legfontosabb konzekvenciája, hogy a szakítószilárdság elérése után bekövetkező anyagroncsolódás kezdeti feltétele (*\*damage initiation* [14]) olyan mértékben képes deformálni az alkalmazott elemeket, hogy azok elvesztik korábbi arányaikat, aránytalanná válnak (23. ábra.), így a további számítás velük már nem lehetséges. Ezért a számítás divergál, és leáll.



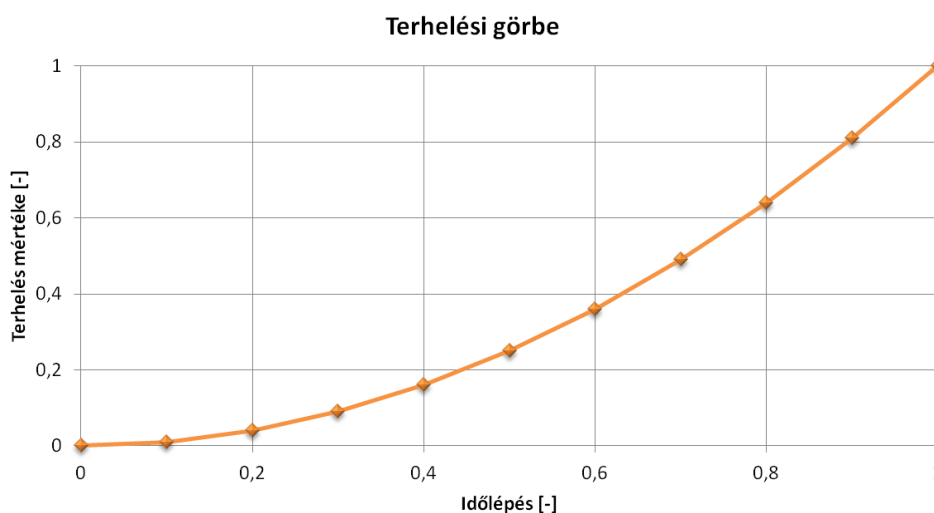
23. ábra. Végeselem nagyfokú deformációja

Erre egy megoldást jelenthetne a megadott időinkrementum lépéseinek további csökkentése – ez alapértelmezett értéként  $10^{-5}$  (!) mértékű lépést jelent –, ami azonban nem biztosítaná az analízis hosszútávú konvergenciáját. Emiatt indokoltnak láttam a *\*amplitude* [12][14] ABAQUS-parancs beépítését a bemeneti .inp-fájlba, amely segítségével a terhelés, modellre történő ráadása szabályozható akár egy tetszőleges függvény szerint. Így a terhelés hatására kialakult alakváltozás is szabályozható, ami megakadályozza a végeselemek idő előtti szétesését, tehát a számítás divergenciáját is. Ez csupán az egyenlőségi iterációk megsegítésére szolgál, magát az eredményt nem befolyásolja, hiszen az egyes igénybevételekhez továbbra is ugyanaz a deformációtartomány tartozik, csak a számítás lefutásán változtat.

Első tervezési variánsomban ezért exponenciális függvény szerinti terhelés megadást (24. ábra. és 25. ábra.) alkalmaztam a következők szerint:

```
*AMPLITUDE, NAME=EXP
0, 0
0.1, 0.01
0.2, 0.04
0.3, 0.09
0.4, 0.16
0.5, 0.25
0.6, 0.36
0.7, 0.49
0.8, 0.64
0.9, 0.81
1, 1
```

24. ábra. \*amplitude [14] ABAQUS/Standard környezetben



25. ábra. Exponenciális terhelési görbe

A számítás konvergenciájára való tekintettel első lépésben nem láttam ésszerűnek a mechanikai anyagmodellben a vállalat által megadott roncsolódási kritériumok és roncsolódás terjedési törvények mindegyikének alkalmazását. Ezért először csak a

*\*damage initiation, criterion=ductile*

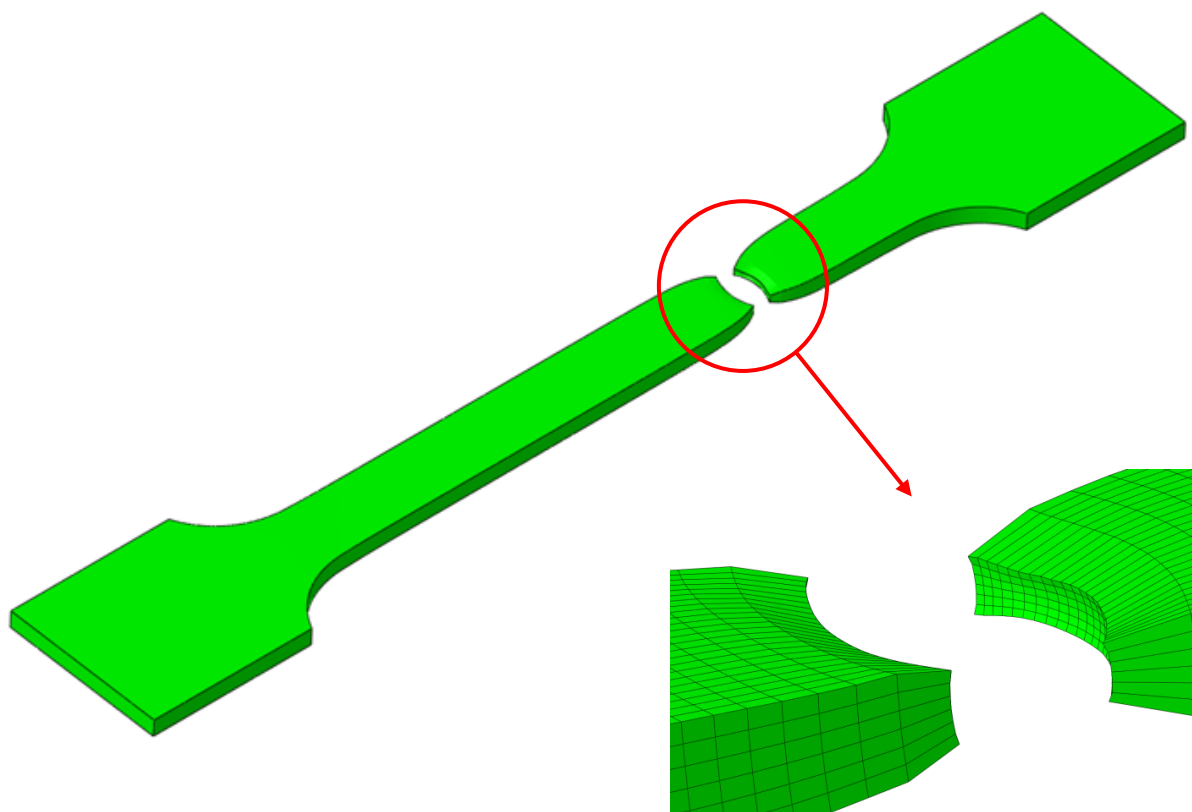
és az ehhez tartozó roncsolódás terjedésének törvényét definiáló

*\*damage evolution, type=displacement, softening=linear*

parancsokat aktiváltam[14].

A számítás az említett beállításokkal és megadott paraméterekkel együtt konvergenciát mutatott.

Az első XFEM-analízis nagyon kedvező eredményeket produkált; az első variáns sikerességét a próbatest-modell virtuális szakadása reprezentálja (26. ábra.).



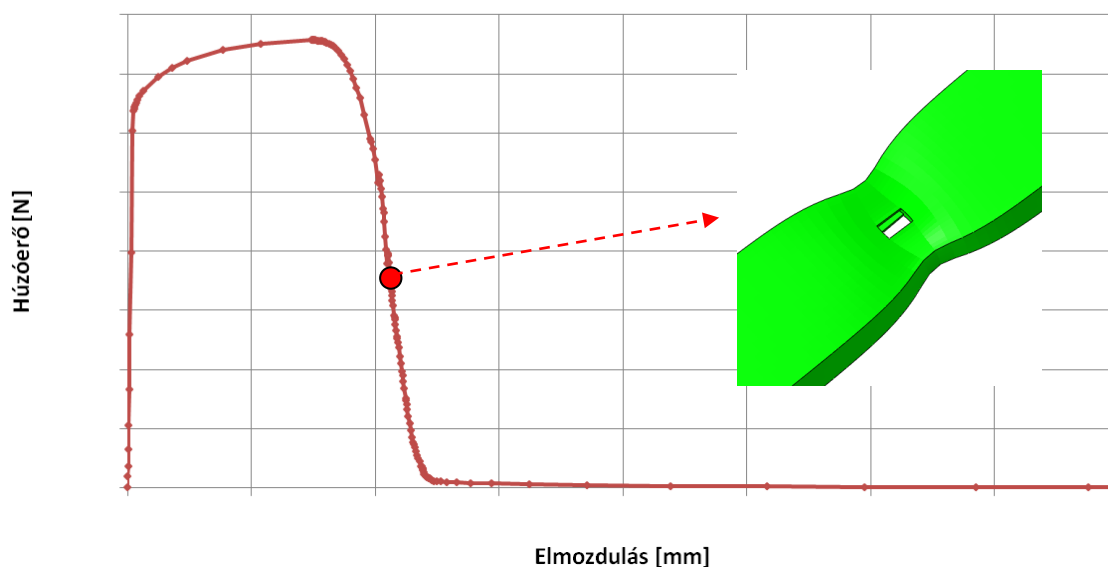
26. ábra. A próbatest viselkedése XFEM (ductile) alkalmazása esetén

Az eredmények kiértékelésére felállított módszer (4.3.2) alapján definiálom a szükséges görbéket:

a) A húzás irányában fellépő erő és elmozdulás meghatározása

A 4. diagram. jól mutatja a próbatest számított kontrakcióját és roncsolódásának kezdetét: a próbatest kontrakciója után, kb. 18000 [N] egytengelyű húzóerő hatására ~21 [mm] elmozdulás mellett az anyag szakadása elkezdődik.

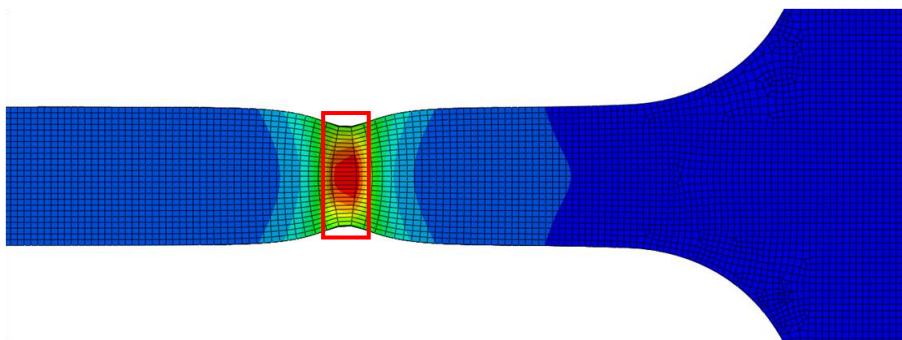
### Húzóerő-elmozdulás diagram (XFEM\_ductile)



#### 4. diagram. Húzóerő-elmozdulás diagram és a roncsolódás kezdete - XFEM (ductile)

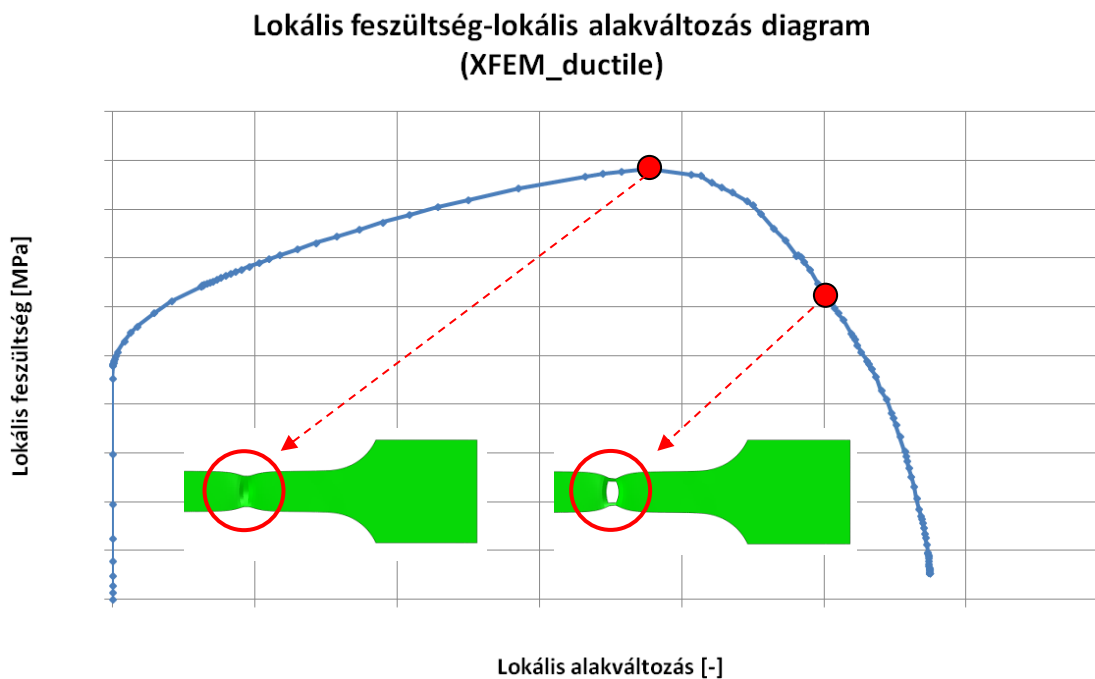
##### b) A lokális feszültség-lokális alakváltozás függvényének meghatározása

A kritikus tartomány definiálását a következő ábra alapján végzem el (27. ábra.). A kiválasztott tartományt három EsL és hat EeD alkotja.



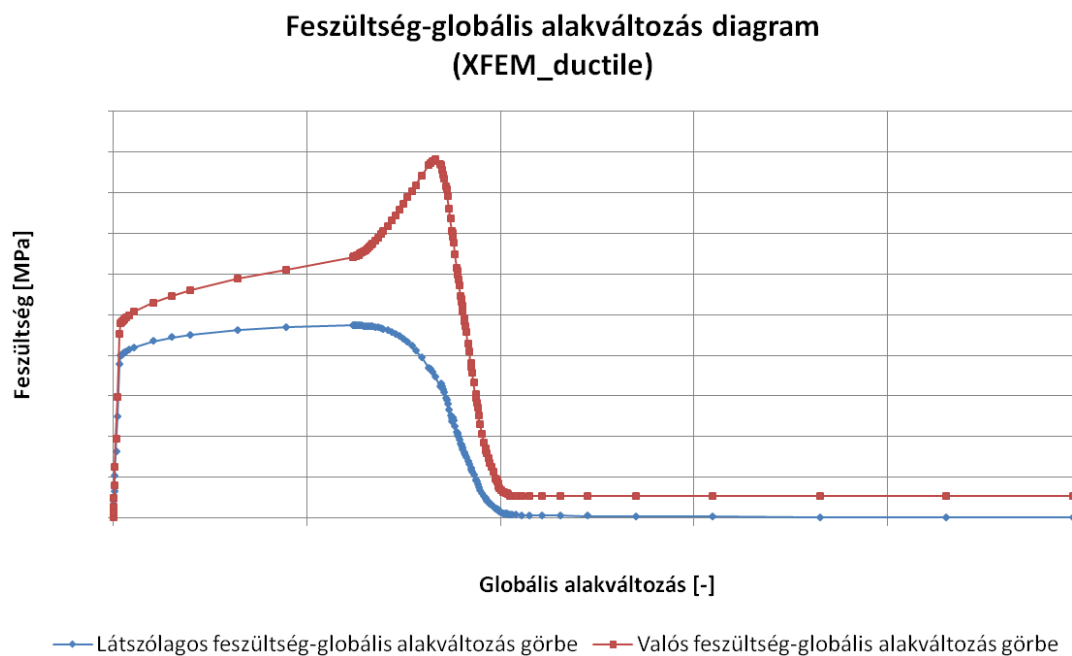
27. ábra. A kritikus tartomány definiálása – XFEM (ductile)

Kizárólag ezeket az elemeket felhasználva határozom meg a próbatest lokális feszültség-nyúlás görbéjét (5. diagram.), amely kis alakváltozás hatására bekövetkező nagy feszültségesést mutat – pontosan azt a progresszív jeleget, amit az idealizált, elméleti szakítóvizsgálati görbe is mutatott (13. ábra.). Az eredmény helyességére utal az is, hogy az 5. diagram.-on jelölt felső ponton, a próbatest szakítószilárdságának helyén – ahol  $DI = 1$  – az elő-kontrakciós szakasz lezárul, az anyag roncsolódása elkezdődik (4.2.1).

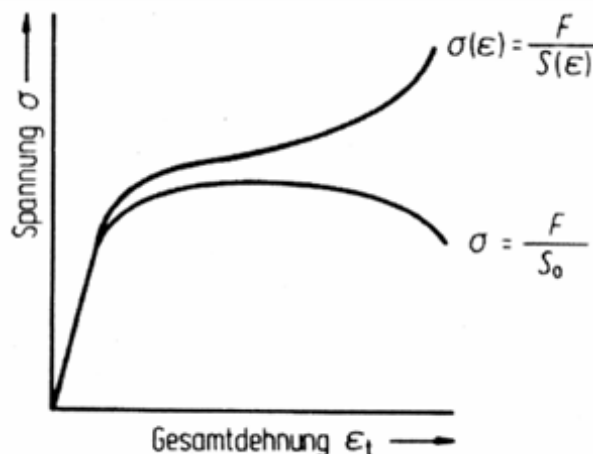


5. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás diagram – XFEM (ductile)

c) A látszólagos és valós feszültség meghatározása a globális alakváltozás függvényében



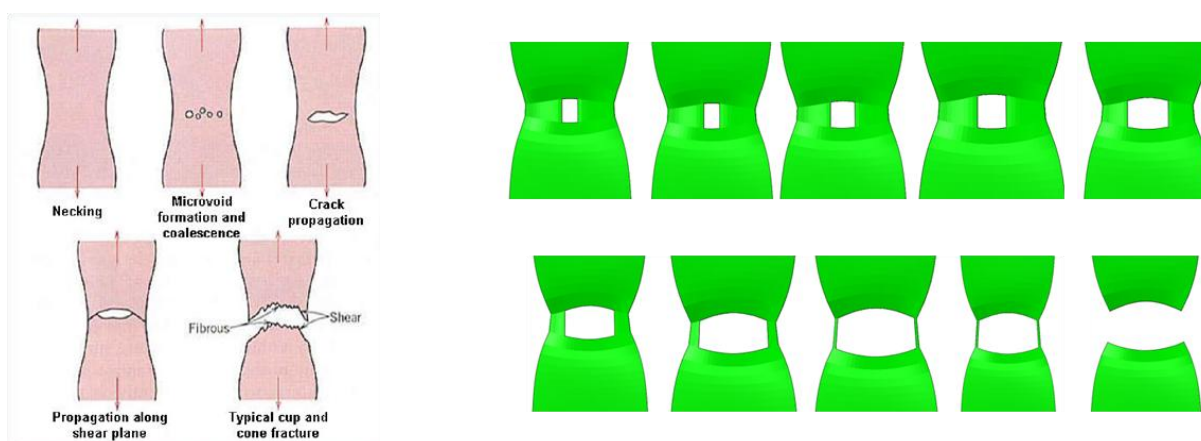
6. diagram. Feszültség-globális alakváltozás diagram – XFEM (ductile)



28. ábra. Szakítóvizsgálat idealizált látszólagos és valós feszültség-alakváltozás görbéje [7]

A számított és idealizált (elméleti) látszólagos és valós feszültség-globális alakváltozás görbék jellegének hasonlósága a 6. diagram. és 28. ábra. összehasonlításával egyszerűen belátható.

Az elért eredmények alapján kijelenthető, hogy kutatásaim, és a létrehozott első tervezési variáns jó pontosságú eredményt szolgáltatott: az analízis konvergenciáját, ezáltal annak teljes lefutását, valamint a szakadás végeleselemes modellezésének lehetőségét is biztosította. Az első variáns eredményei rámutatnak a korábban említett szakadás elméleti folyamatára, miszerint az anyagi roncsolódások a próbatest belsejében kezdődnek el üregek kialakulásával. Ezek húzásirányban szélesednek ki, és összenövésével, majd egy nyírófelület kialakításával a próbatest szakadásához vezetnek. A valós (elméleti) és szimulált folyamat összehasonlítását a 29. ábra. segítségével szemléltetem.



29. ábra. Elméleti [10] és szimulált (XFEM/ductile) szakadás folyamatának összehasonlítása

#### 4.4.3 Második variáns – a teljes mechanikai anyagmodell alkalmazása

Kiindulva az első variáns eredményeiből, további célomnak tekintem a teljes mechanikai anyagmodell alkalmazását és viselkedésének vizsgálatát a következő számítás során, amellyel remélhetőleg a valós szakadási tulajdonságokhoz még közelebb eső eredményekre juthatok. Ennek érdekében a második tervezési variáns ABAQUS/Standard környezetben történő felépítése nagyban hasonlít az első variánséhoz, mivel az *\*amplitude* paranccsal definiált exponenciális terhelés megadás konvergens számítást eredményezett a nulladik variáns divergenciájával szemben. A második variáns különbsége tehát, hogy az alkalmazott mechanikai anyagmodell tartalmazza a

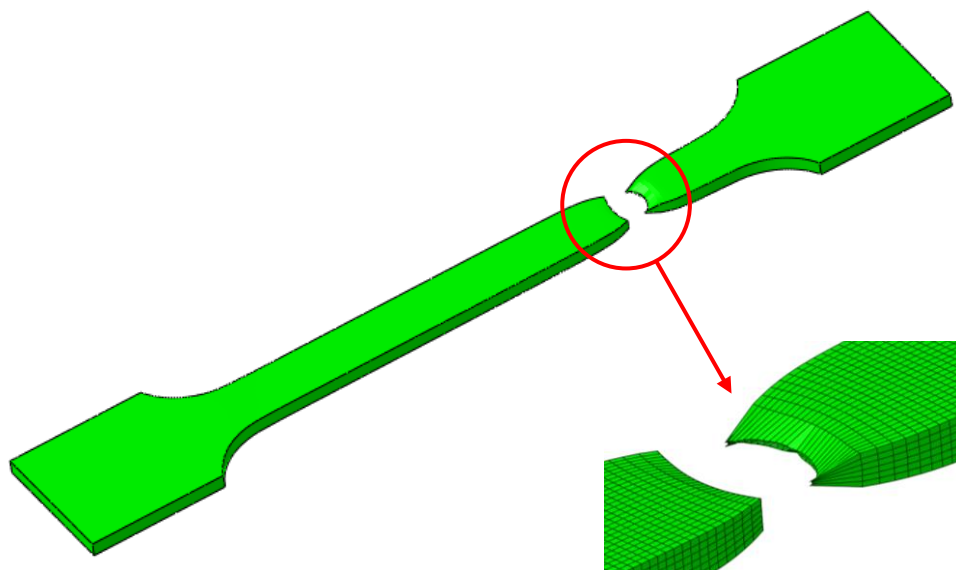
*\*damage initiation, criterion=shear, ks= "érték"*

roncsolódás kezdeti kritériumát, valamint az ehhez tartozó

*\*damage evolution, type=displacement, softening=linear*

roncsolódás terjedési törvényének parancsát is.

A számítás során nem lépett fel divergencia, az analízis teljes egészében lefutott, és az eredmények egy még pontosabb, kevésbé szimmetrikus szakadási felületet reprezentálnak (30. ábra.).



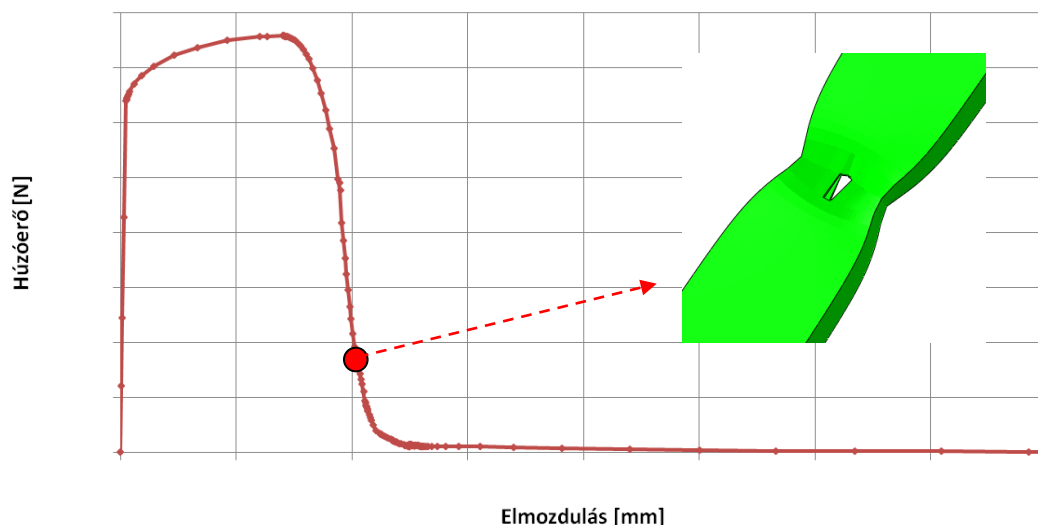
30. ábra. A próbatest viselkedése XFEM (*ductile* és *shear*) alkalmazása esetén

Az eredmények kiértékelését a 4.3.2 pontban felállított módszer segítségével végeztem el, amelyet a következő diagramok foglalnak össze.

a) A látszólagos és valós feszültség meghatározása a globális alakváltozás függvényében

A 7. diagram. jól mutatja a virtuális próbatest kontrakciójának kezdetét és az azutáni roncsolódás kezdeti pontját  $\approx 9400$  [N] egytengelyű húzóerő hatására,  $\approx 20$  [mm] mellett.

Húzóerő-elmozdulás diagram  
(XFEM\_ductile és shear)



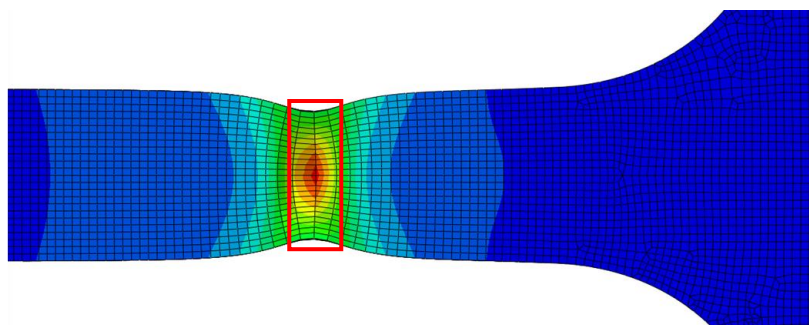
7. diagram. Húzóerő-elmozdulás diagram - XFEM (ductile és shear)

Mivel a felhasznált mechanikai anyagmodell jelen esetben közelít legjobban a valósághoz, ezért az eddig vizsgált, első és második tervezési variáns húzóerő-elmozdulás görbéi esetén utóbbi, utókontrakciós szakaszának meredeksége nagyobb kell, hogy legyen. Amennyiben ez igaz, úgy a második variáns esetén, az első variánsnál számított, ugyanaz az elmozdulás kisebb húzóerő hatására kell hogy bekövetkezzen.

A 4. diagram. és 7. diagram. megfelel az említetteknek: a roncsolódás kezdete az első variáns esetén  $\approx 21 [mm]$  elmozdulás és  $\approx 18000 [N]$  húzóerő mellett, míg a második variáns esetén, nagyjából megegyező elmozdulás  $\approx 20 [mm]$  és  $\approx 9400 [N]$  húzóerő mellett következik be. Ezért a második variáns még pontosabb megfelelést mutat.

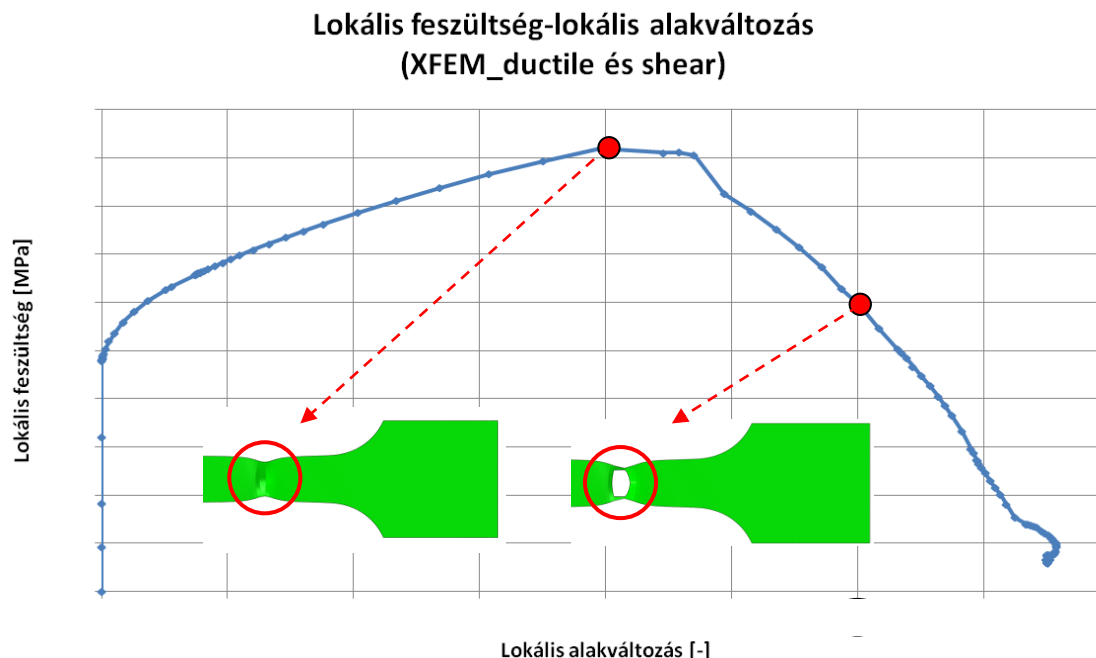
b) A lokális feszültség-lokális alakváltozás függvényének meghatározása

A megszokott módon először a kritikus tartomány definiálását végzem el, amihez a 31. ábra.-t használom. A kiválasztott tartományt összesen két EsL és hat EeD alkotja.



31. ábra. A kritikus tartomány definiálása - XFEM (ductile és shear)

A definiált kritikus tartomány elemeinek átlag feszültség-nyúlás értékei alkotta görbe jól reprezentálja az anyagmerevség progresszív degradációját a roncsolódás kezdete ( $DI = 1$ ) után (8. diagram.)

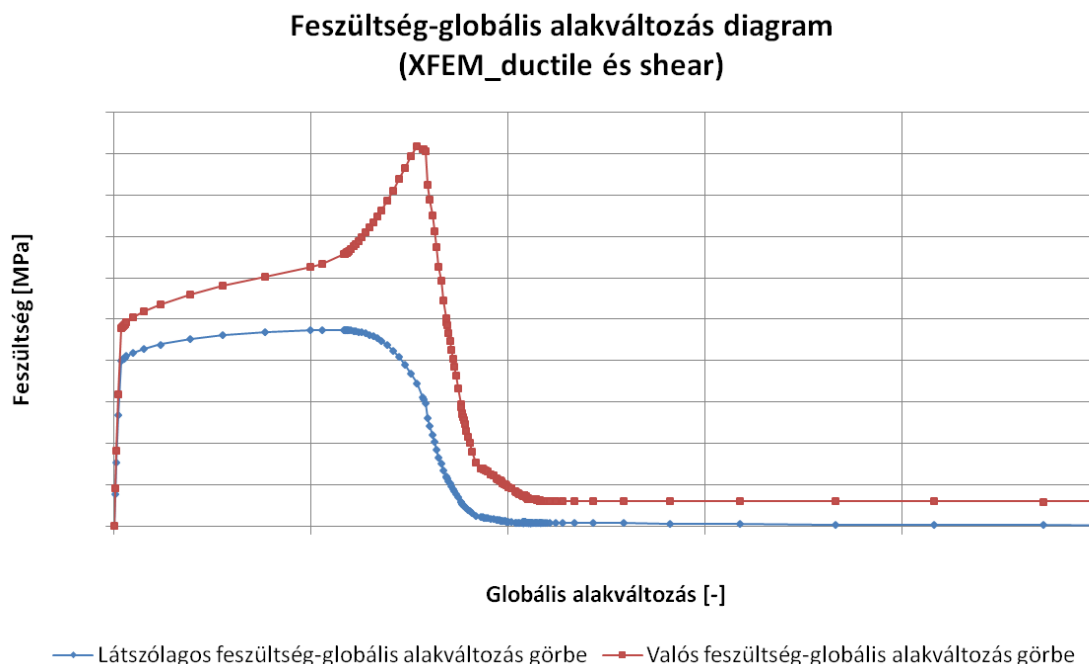


**8. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás diagram – XFEM (ductile és shear)**

A második variánsban alkalmazott *\*damage initiation, criterion=shear, ks="érték"* ABAQUS parancs a szakadás során kialakuló nyíróréteget modellezi. Ennek hatását igyekszik megjeleníteni a 8. diagram. Jól látszik, hogy a kritikus helyen elért szakítószilárdság után az anyag további jelentős alakváltozást mutat az első variációhoz képest (5. diagram.), ami egy kevésbé merev tulajdonságra enged következtetni. A szakítás ilyen módon definiált folyamata során tehát nem csak mikroüregek képződnek, hanem keresztirányban is fellép molekuláris sérülés, ezáltal virtuálisan lelassul a tönkremenetel folyamata, az anyag „ellentart” a törés előtt.

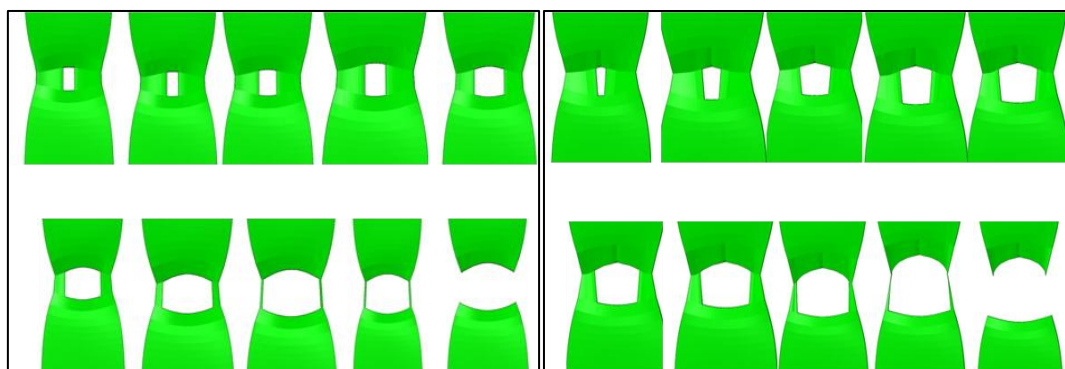
c) A látszólagos és valós feszültség meghatározása a globális alakváltozás függvényében

Jelen variáció esetén szintén jól kivehető az idealizált (28. ábra.) és számított, látszólagos és valós feszültség-alakváltozás görbe hasonlósága.



**9. diagram. Feszültség-globális alakváltozás diagram – XFEM (*ductile* és *shear*)**

A második tervezési variánsról összefoglalva elmondható, hogy képes a próbatest szakítóvizsgálatát, ill. magát a szakadás folyamatát még pontosabban modellezni. Emellett megemlítenéd, hogy az XFEM számítás során létrejött szakadási felület pontosabb hasonlóságot mutat a próbatest valós szakadási felületéhez. Annak érdekében, hogy ezt egyértelműen bemutassam, összehasonlítom az első és második variáció eredményeképpen létrejött számított szakadásos törés folyamatát (32. ábra.).



**32. ábra. A szimulált (XFEM/*ductile* és XFEM/*ductile* és *shear*) szakadások folyamata**

Összefoglalva, sikerült olyan egymásra épülő, XFEM-mel történő számításokat elvégezni, amelyek eredményei jól közelítik egy lapos próbatest valós szakítóvizsgálatának eredményeit. Kijelenthető, hogy a második tervezési variáns további XFEM-mel történő számítások – eljárások pontosítása, fejlesztése, később szilárdsági analízisben történő integrálása – alapját képezhetik.

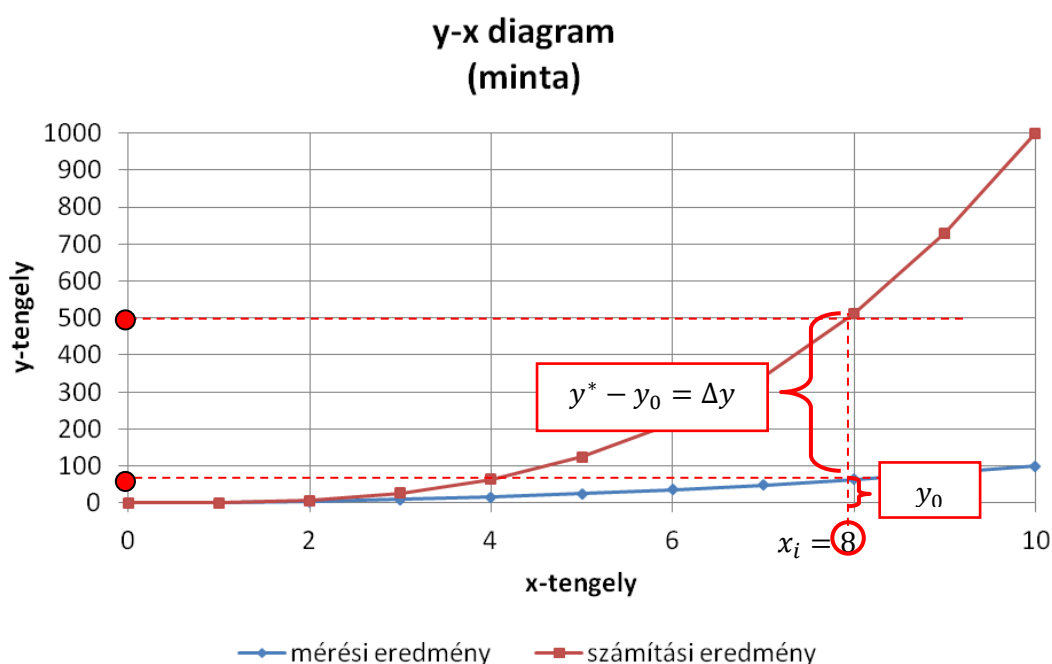
## 5 A mechanikai anyagmodell validálása

Általánosan igaz, hogy a mérési eredmények csak akkor válhatnak felhasználhatóvá, ha tudjuk, hogy az adott eredmény mekkora pontossággal bír, milyen határok között fogadható el. Ezért a mérési eredmények mindig csak hibahatárokon belül vehetők figyelembe. A munkám hipotézisének is megfelelően, a következő feladatom tehát a mérési eredmények alapján megalkotott mechanikai anyagmodell validálása, amelyet a mérési és az általam, XFEM-mel meghatározott adatok összehasonlításával és hibabecslésével, a számított eredmények hibaszázalékának meghatározásával végzek. Természetesen, ehhez a pontosabb számítási eredményeket produkáló, második tervezési variáns eredményeit használom fel.

A hibaszázalék meghatározását két részletben fogom elvégezni azonos módszert követve: egy közös diagramban veszem fel a mérési adatokból alkotott, és az általam, XFEM-mel meghatározott, ehhez tartozó görbét. Mivel interpolációt nem alkalmazok a görbék egyenletének meghatározásához, ezért a következőképp járok el a hibaszázalékok meghatározásakor: jelölje  $x_i$  a két diagram közös  $x$  változóját, ahol  $i = 0, \dots$ , (az adott függvény utolsó vizsgált pontja), és legyen  $y_0$  a mérési görbe, és  $y^*$  az XFEM számítási görbe adott  $x_i$ -hez tartozó értéke. A jelöléseket felhasználva felírható az adott hibaszázalék a

$$H = \frac{y^* - y_0}{y_0} \cdot 100 [\%] = \frac{\Delta y}{y_0} [\%] \quad (11)$$

összefüggés segítségével, amelynek grafikus magyarázatát a 10. diagram. mutatja.

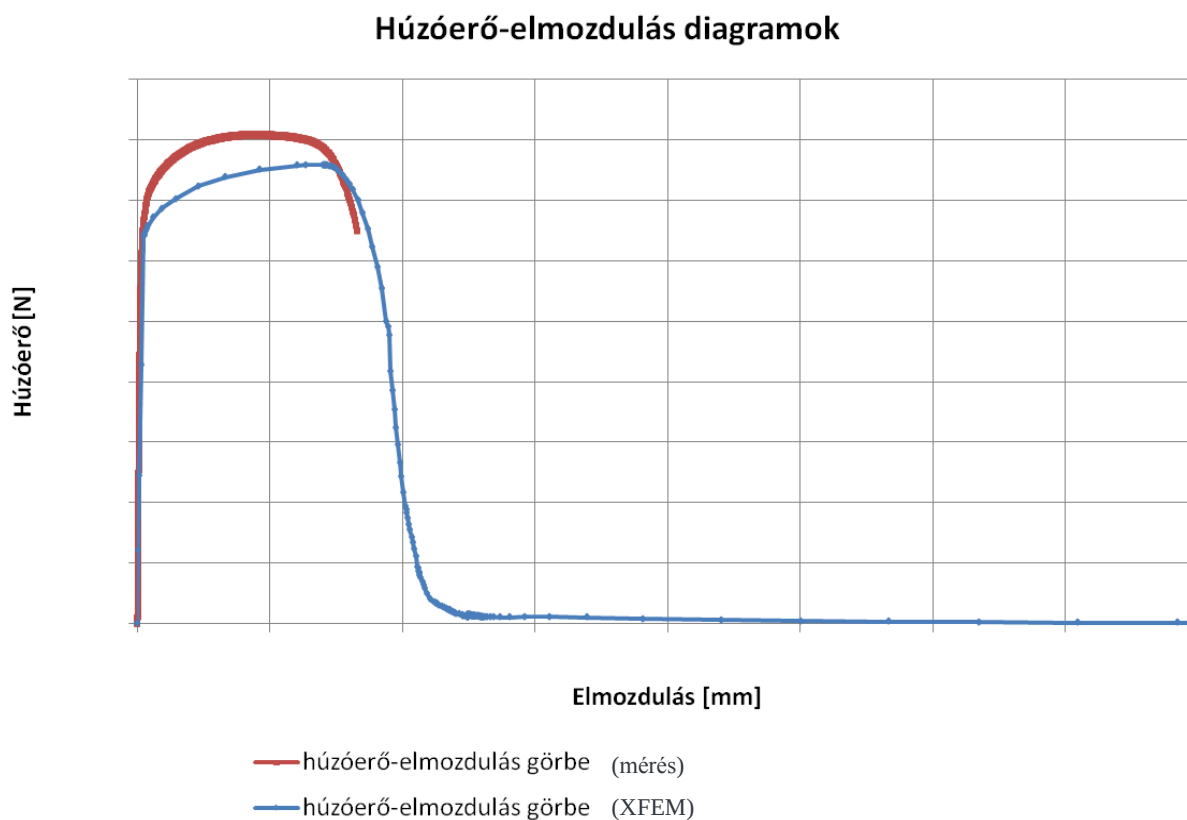


10. diagram. Magyarázó mintadiagram a hibaszázalék meghatározásához

Ezek után adott tartományon belül tetszőleges  $x$ -értékeket választok ki. Ezek a mért és a számított (XFEM) görbék által meghatároznak egy-egy  $y$ -értéket, amelyből már a (11) segítségével számítható adott  $x$ -helyen a hibaszázalék. A hibaszázalék adatokat egy *hibaszázalék( $x$ )* diagramon ábrázolom, amelyekre egy harmadfokú trendvonalat illeszttek. Megjegyzem, hogy természetesen az  $x$ -érték mindig a vizsgált görbe  $x$  változóját jelöli.

### 5.1 Az anyagmodell validálása az XFEM-mel számolt húzóerő-elmozdulás diagram alapján

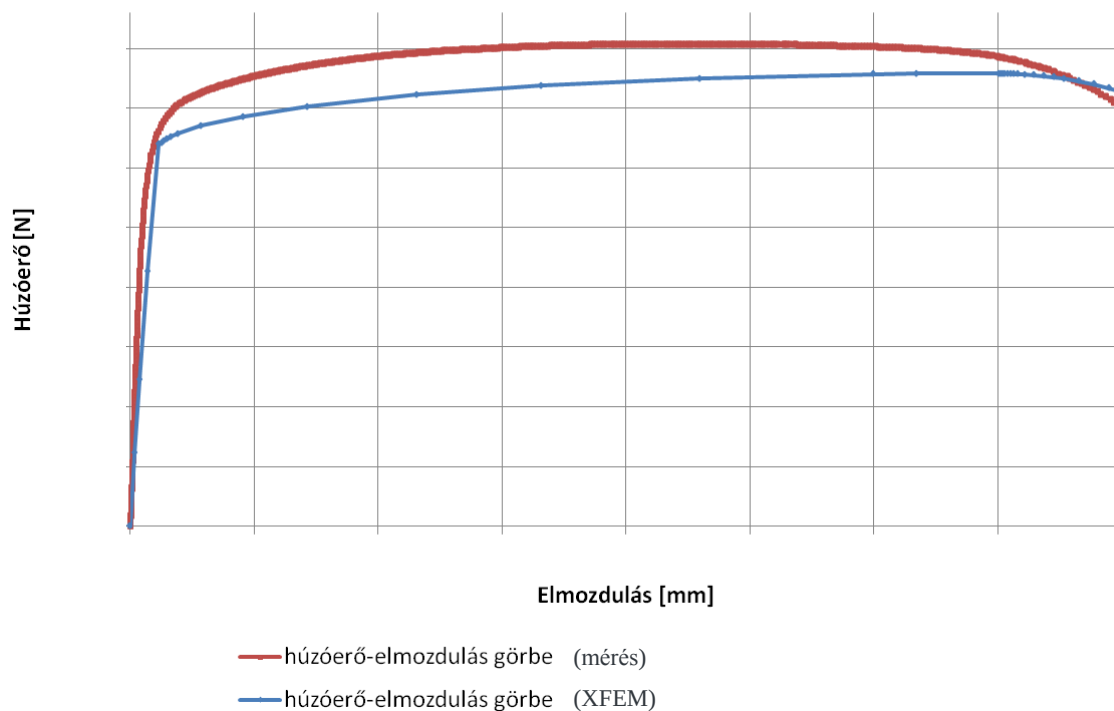
Elsőként a mért és számolt húzóerő-elmozdulás görbét ismertetem egy közös diagramon (11. diagram.).



**11. diagram. A húzóerő-elmozdulás mért és számított görbéi**

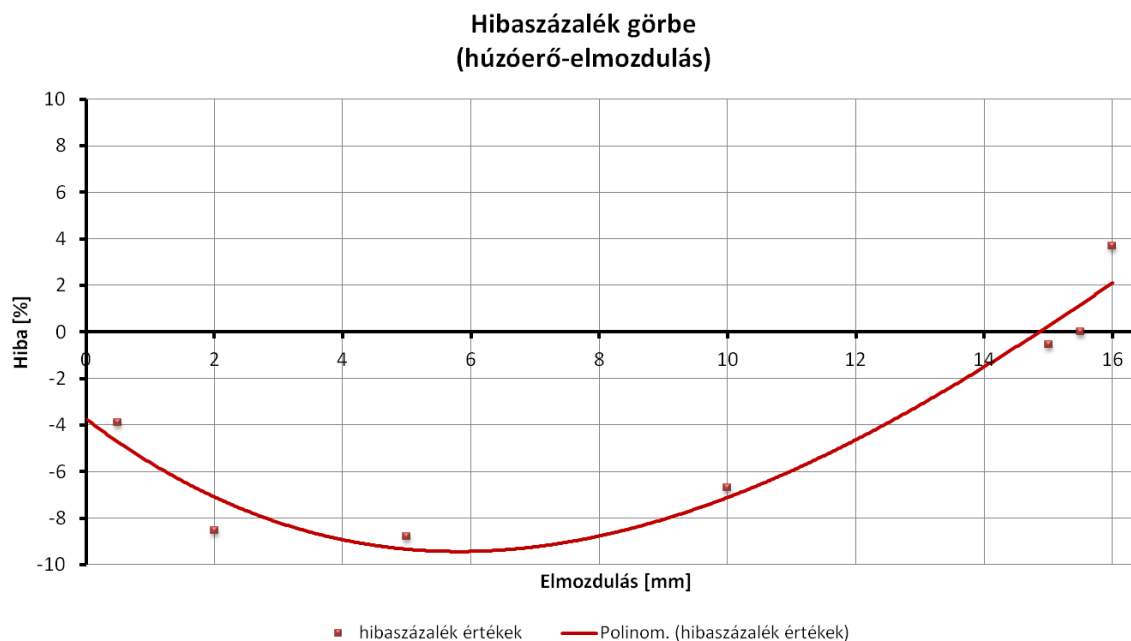
A jobb láthatóság érdekében a tengelyek skálázását megváltoztatom (12. diagram.).

### Húzóerő-elmozdulás diagramok



12. diagram. A húzóerő-elmozdulás mért és számított görbéi (nagyítva)

A 12. diagram.-ból kiindulva tetszőleges elmozdulás értékeket választok ki annak  $[0,16]$  tartományában. Ezekre a pontokra kiszámított hibaszázalékokat diagramban ábrázoltatom, amelyekre trendvonalat fektetek (13. diagram.).

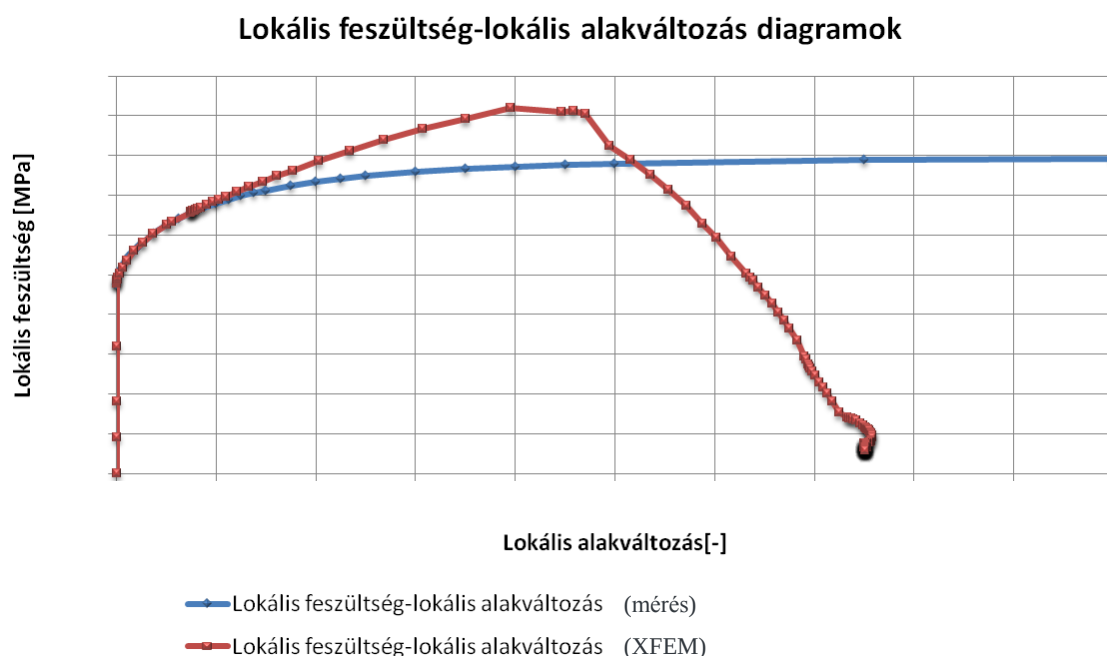


13. diagram. Húzóerő-elmozdulás hibaszázalék görbéje

A számunkra érdekes,  $[0,16]$  vizsgált elmozdulás tartományban számolt hibaszázalék jelentős része - a 13. diagram. alapján - a negyedik síknegyedben helyezkedik el; legnagyobb hibája  $-10$  [%]. Az XFEM-mel számolt eredmények tehát alulról közelítik a mért (elméleti) görbét, ami konzervatív becslés, tehát egy későbbi szilárdsági számítás során a biztonság irányába mozdítaná el az eredményeket (biztonságos hiba).

## 5.2 Az anyagmodell validálása az XFEM-mel számolt lokális $\sigma - \varepsilon$ diagram alapján

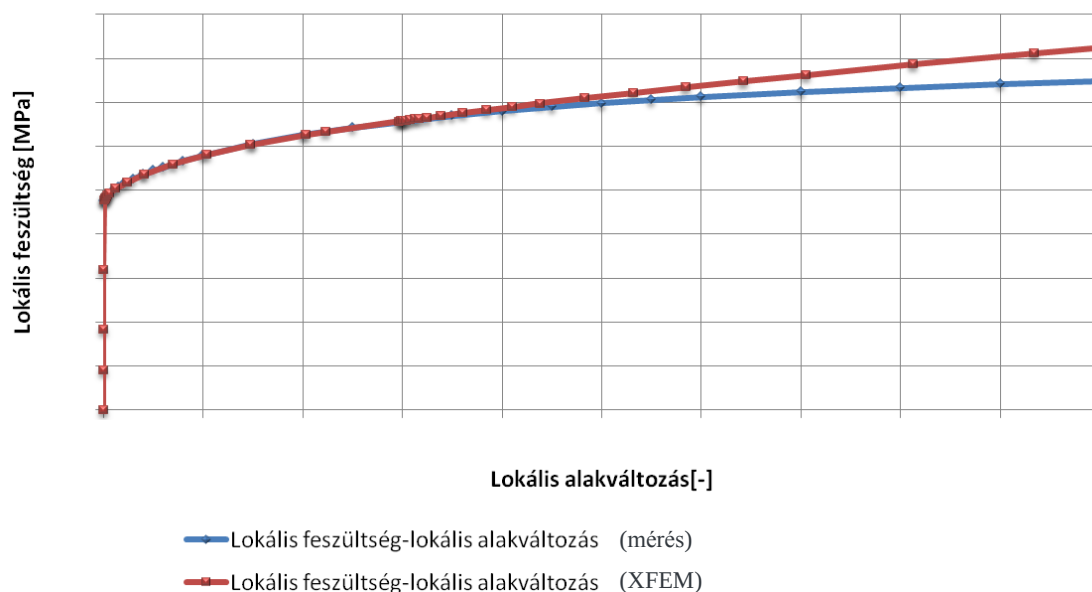
A következőkben a mért és számolt lokális feszültség-lokális alakváltozás értékeket hasonlítom össze. Induljunk ki a próbatest komplex mérésekkel meghatározott és annak szimulációja (XFEM) alapján felvett lokális feszültség-lokális alakváltozás görbájéből (14. diagram.).



**14. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás mért és számított görbéi**

A görbék pontosabb megítélhetőségének érdekében változtatok a skálázáson (15. diagram.). Jól látszik, hogy a számított görbe szinte teljes mértékben ráfekszik a mért görbére egészen a 20 [%] lokális alakváltozás eléréséig.

### Lokális feszültség-lokális alakváltozás diagramok



15. diagram. A lokális feszültség-lokális alakváltozás mért és számított görbéi (nagyítva)

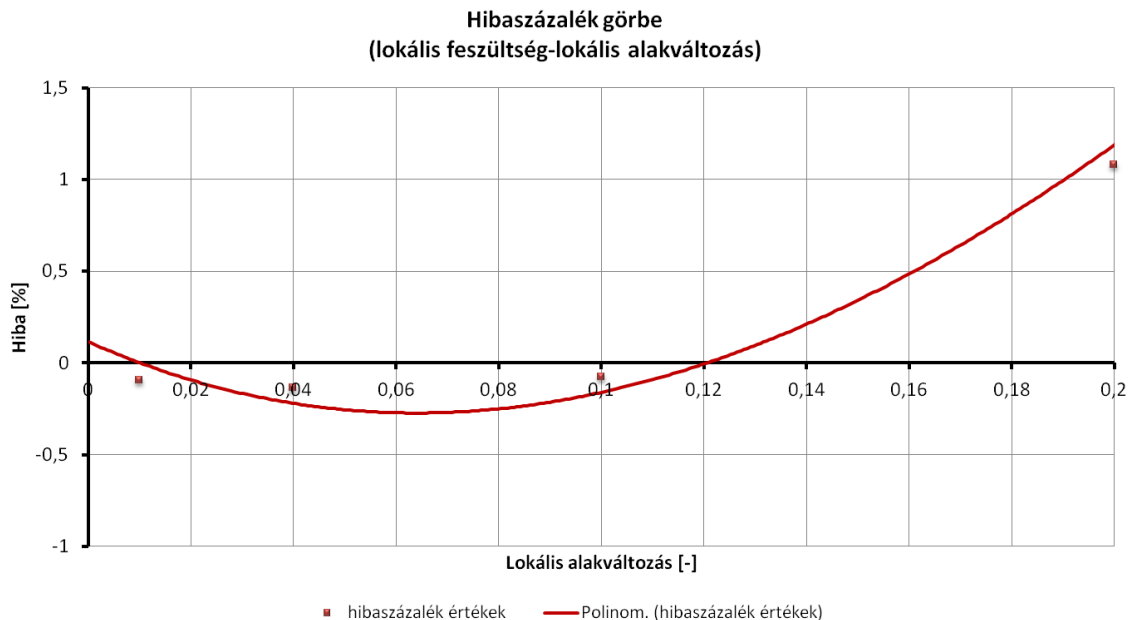
A mechanikai anyagmodell validálásához azonban számszerű értékekre lesz szükségem. Ezért meghatározom a számított görbe hibaszázalékát a korábban ismertett módszer segítségével (16. diagram.).



16. diagram. Lokális feszültség-lokális alakváltozás hibaszázalék görbéje

A hibaszázalék-értékek jelentős része az első síknegyedben található, tehát a mérési eredmények alapján felállított anyaggörbét felülről közelíti a számítási eredmény. A  $[0, 0,2]$  alakváltozási

tartomány (17. diagram.) maximális hibaszázaléka  $\approx 1,2$  [%] (!), amely azt jelenti, hogy jó közelítéssel 20 [%] nyúlásig a szimulációs modell viselkedése a valós próbatest viselkedésével megegyezik.



**17. diagram. Lokális feszültség-lokális alakváltozás hibaszázalék görbéje (nagyítva)**

Az eredményeket összefoglalva belátható tehát, hogy a felépített XFEM-analízis a vártnál pontosabb értékeket szolgáltatott. A vizsgált változókhoz tartozó húzóerők és lokális feszültségek értékeiből számított hibaszázalékok  $\pm 10$  [%]-os tartományon belül mozognak, mindamellett fontos kiemelni, hogy sikerült elérni egy mindössze  $\approx 1,2$  [%] hibaértéket is. Ezen eredmények alapján tehát a méréssel meghatározott acél mechanikai anyagmodelljét sikerült validálni.

## 6 Alkalmazási példa – motoremelő/-mozgató fül XFEM vizsgálata

A dolgozatom kiemelt célja, hogy a kidolgozott XFEM-en alapuló módszert a validált anyagparaméterekkel együtt egy gyakorlati példán keresztül is bemutassam, ami jelentős előrelépést nyújt az AHM Kft. említett projektjében.

A motoremelő/-mozgató füleket (mostantól „fűl”) ahogy neve is mutatja, motorok be- és kiserelésakor, azok szállításakor használják. Alkalmazási területük miatt szigorú biztonsági előírásokat vesznek figyelembe a fűlek kialakítása során: terhelésük következményeként létrejövő igénybevételüket a megfelelő biztonsági előírás és biztonsági tényező felhasználása mellett, az előírt tartományra kell megfeleltetni. Ezek a biztonsági követelmények a következők:

- *a motoremelő/-mozgató fűlet a normálterhelés négyszeresére kell méretezni*
- *négyszeres túlterhelés esetén szigorúan csak a rugalmas tartomány határai közötti deformáció engedhető meg*

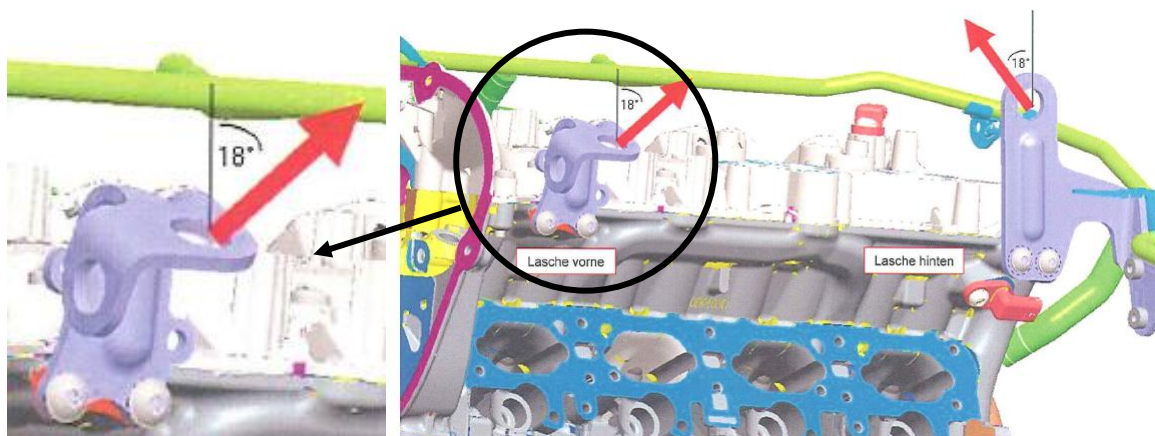
Az alkalmazási példa fontos részét képezi, hogy a felépített végeselemes modell szimulációja számszerű adatokat szolgáltatson a tönkremeneteli állapotra vonatkozóan, és ezek alapján megválaszolhatóak legyenek az alábbi problémakörök:

- *mekkora az a maximális igénybevétel, amely esetén a fűl deformációja már nem a rugalmas-képlékeny tartomány között mozog és anyagroncsolódás figyelhető meg?*
- *mekkora a megengedhető normálterhelés négyszeres biztonság esetén?*

Elsődleges feladatom tehát a fűlek alkalmazási környezetének feltárása és a kiválasztott fűl végeselemes modelljének ismertetése.

### 6.1 Az alkalmazási környezet bemutatása és a végeselemes modell felépítése

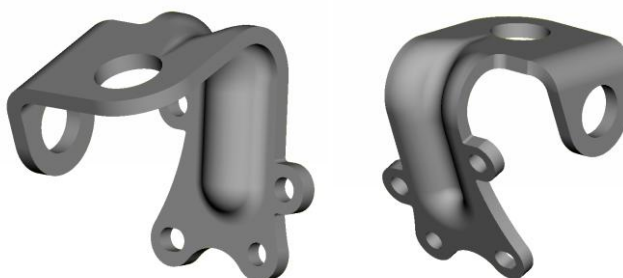
A fűlek alkalmazási környezetét a következő ábra szemlélteti (33. ábra.).



33. ábra. A motoremelő/-mozgató fűlek alkalmazási környezete

Dolgozatomban a motorblokkhoz rögzített fülek közül az ábra szerinti, bal oldali kialakítás részletes bemutatásával foglalkozom. A fül alsó része két csavarkötéssel csatlakozik a motor megfelelő részéhez, felső felébe egy emelőhorog illeszkedik, amit egy hozzákapcsolt láncsor segítségével, a kiemeléshez szükséges nagyságú húzóerővel terhelnek az ábrán is jelölt,  $18^\circ$ -os szögben.

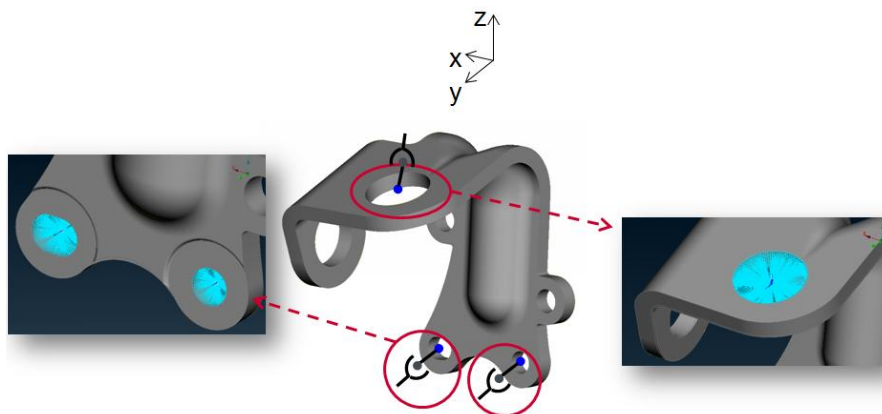
A végeleemes modell felépítése során olyan egyszerűsítéseket alkalmaztam, amelyek a későbbi numerikus számítások konvergenciáját segíthetik elő, mindamellet gyorsabb analízis lefutást eredményeznek, de a végeredményeket negatív irányban nem befolyásolják. A számításhoz csak a fül térbeli modelljét használtam fel, amit a 34. ábra. szemléltet.



34. ábra. A fül 3D modellje

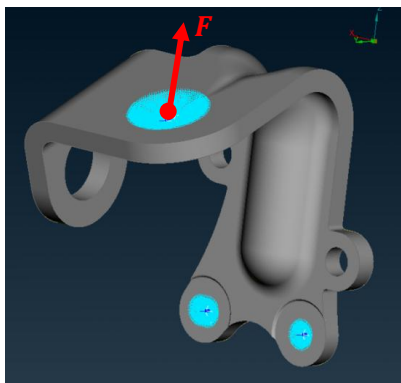
A végeleemes modell hálózását négy csomópontos tetra (C3D4) elemtípussal végeztem el, amelyek átlagos elemmérete  $2\text{ [mm]}$ .

A csavarkötéseket egyszerűsítve adtam meg úgy, hogy a furatok palástfelületeinek csomópontjai és egy központi (létrehozott) csomópont között kinematikai kapcsolatot definiáltam. A létrehozott egy-egy csomópontban JOIN-kényszert alkalmaztam, amelynek segítségével a definiált csomópont körüli rotációt engedélyeztem, a csomópont elmozdulását  $x$ -,  $y$ - és  $z$ -irányban letiltottam 35. ábra..



35. ábra. A végeleemes modell felépítése – megfogások definiálása

A terhelés megadásának helyén, azaz a fül felső részén szintén létrehoztam egy kinematikai kapcsolatot és JOIN-kényszert alkalmaztam az ismertetett módon. Az itt definiált csomópontra csak húzóirányú (z-irány) elmozdulását engedélyeztem, és a húzásirányban elmozdulás alapú (200 [mm]) terhelést adtam meg (36. ábra.).

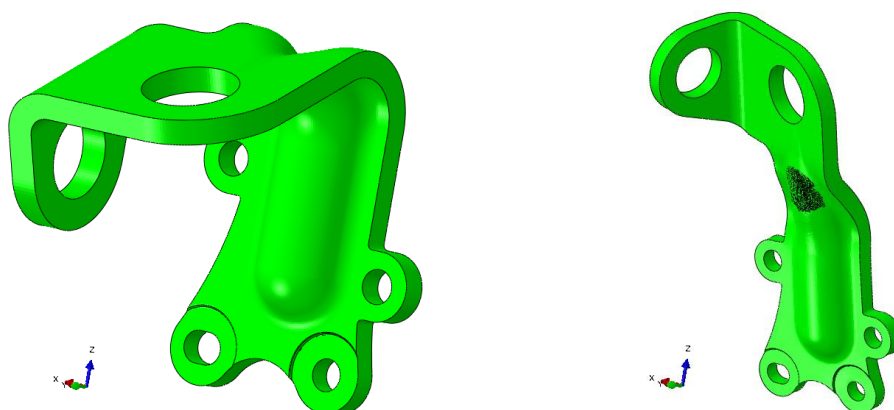


36. ábra. A végeselemes modell felépítése – terhelés definiálása

A validált acél anyagmodelljét, valamint a végső variánsban is felhasznált analízisparamétereket változatlanul definiáltam a modellre (lásd. 4.4 alfejezet).

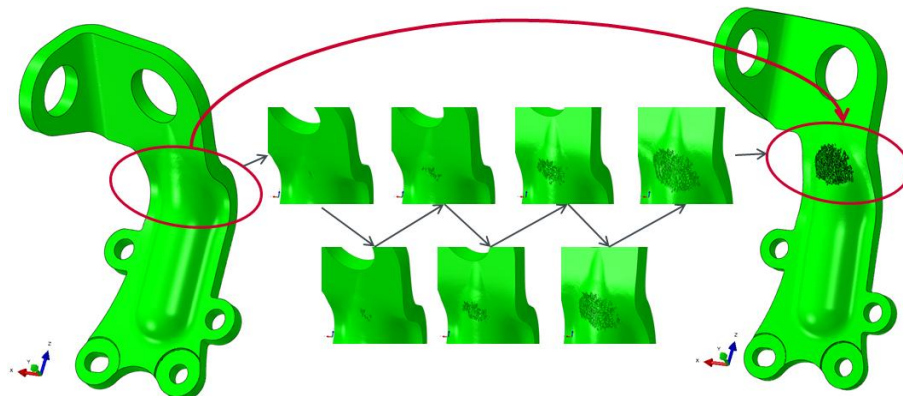
## 6.2 Az eredmények kiértékelése

Az XFEM analízis eredményeinek kiértékelésekor törekedtem a korábban definiált problémakörök megválaszolására, ezért a legfontosabb feladat a tönkremenetel kezdetének megállapítása volt. Ehhez első lépésben a kiinduló geometria és az analízis végeredményét adó deformált alak összehasonlítását végeztem el (37. ábra.).



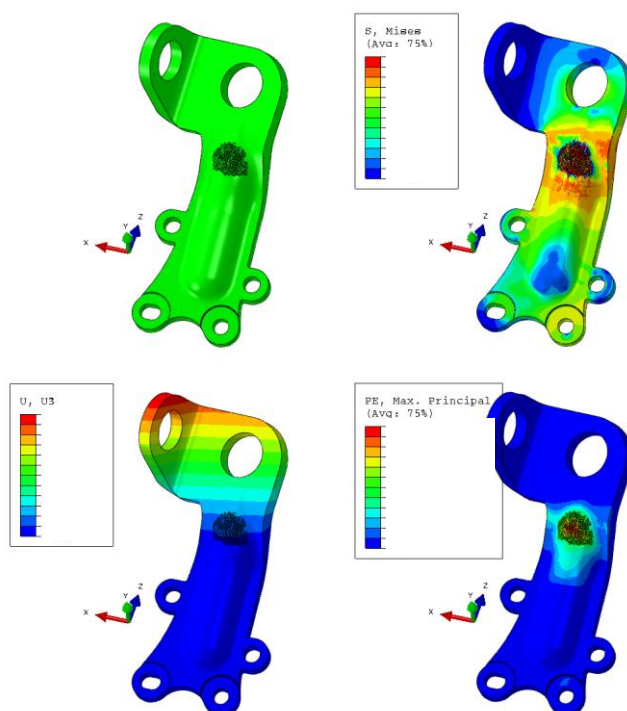
37. ábra. A kiinduló és a deformált alkatrész

A fül hajlított felületén jól megfigyelhetők a roncsolódási paraméterek következményeként létrejövő felületi repedések, amelyek kialakulásának folyamatát további ábrák szemléltetnek (38. ábra.).



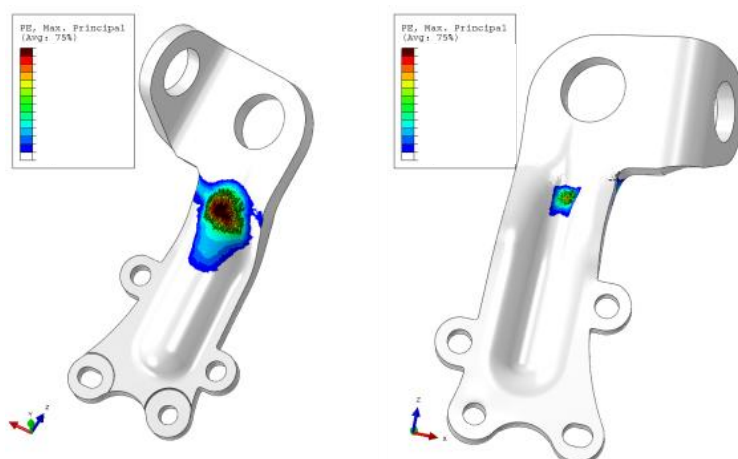
38. ábra. A repedések kialakulásának folyamata

A fül végeselemes analízise egyértelműen rávilágít az alkatrész terhelhetőségének határára, azaz a tönkremeneteli állapot kezdetére. Ezért a húzó igénybevételre adott válasz, az alkatrész deformációja csak egy adott feszültségi állapot eléréséig terjedhet. Ezt a feszültségi-határállapotot az alkatrész felületén megjelenő első repedés jelzi. Az eredményeket - von Mises feszültségképet, a z-irányú elmozdulás mezőt, és az alakváltozást - a következő ábrák mutatják (39. ábra.).



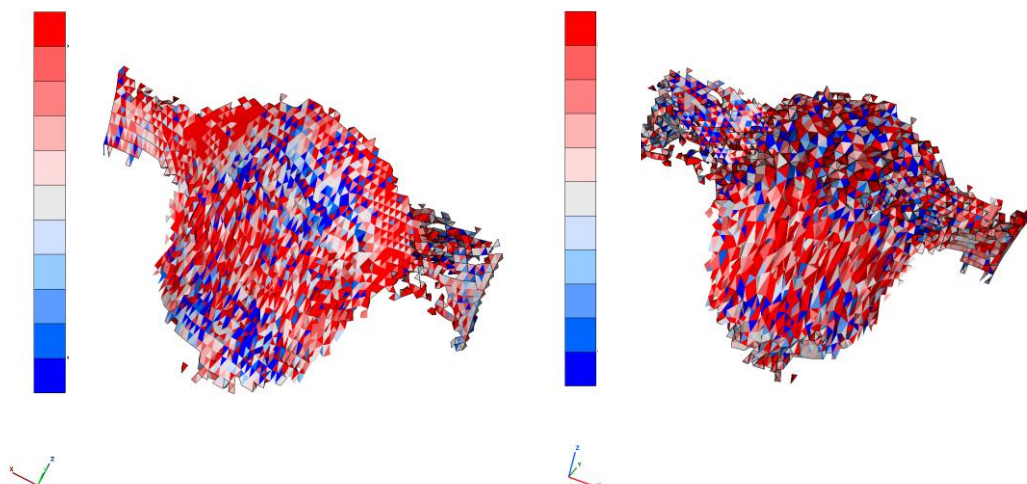
39. ábra. Az XFEM számítás legfontosabb eredményei az alkatrészen

A bemutatott ábrákon jól látszik az alkatrész kritikus tartománya. Ahhoz, hogy meghatározhassuk a tönkremenetel kezdetét, és az ehhez tartozó maximális igénybevétel és normálterhelés nagyságát, két diagram definiálása szükséges. A korábban megalkotott kiértékelési módszert felhasználva, felvehető az alkatrész valós feszültség-globális alakváltozás és húzóerő-elmozdulás görbéje. Előbbihez a kritikus tartomány elemeit használjuk fel (40. ábra.).

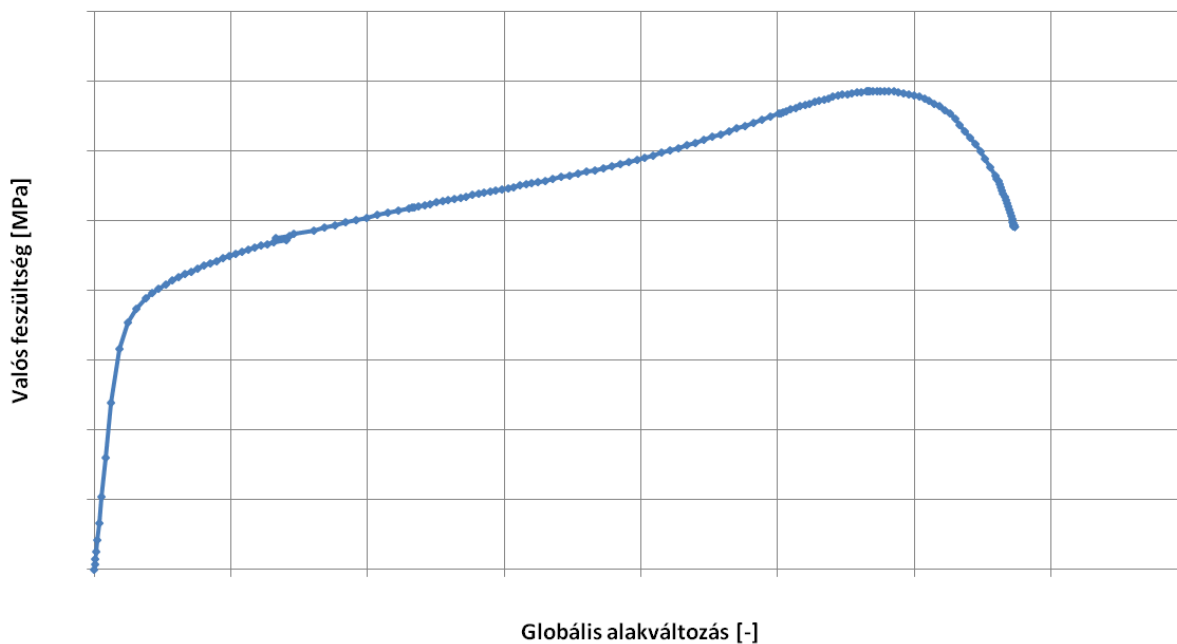


40. ábra. Az alkatrész kritikus tartománya

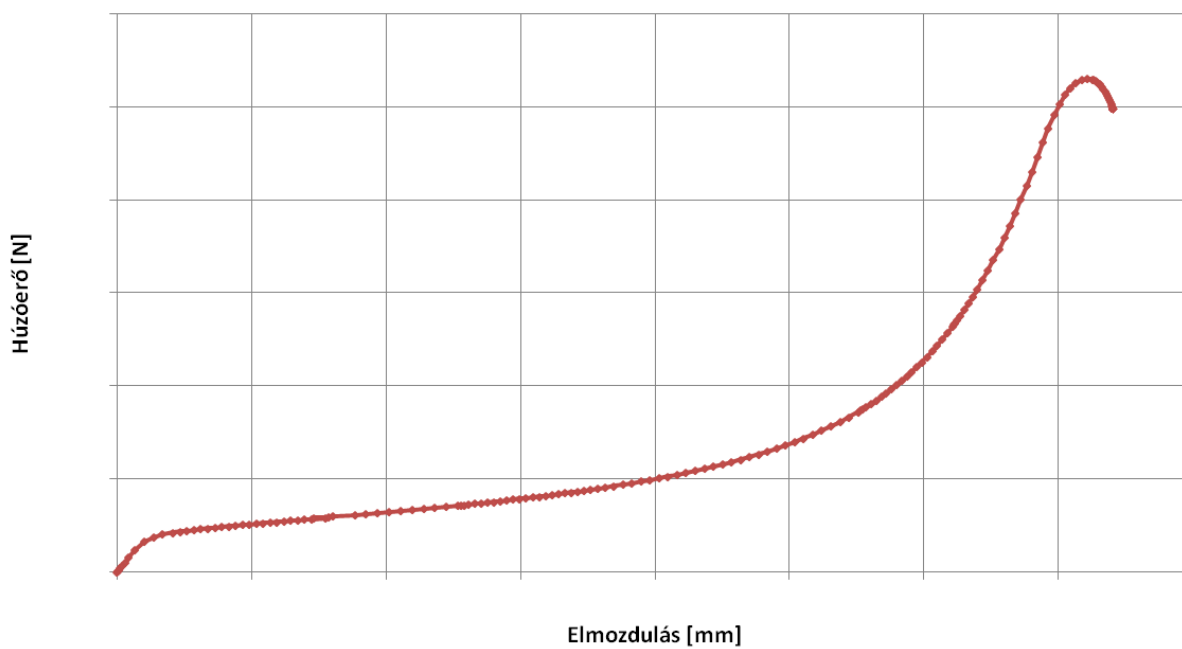
A kiválasztott elemek alkotta feszültségképet szemlélteti a következő, 41. ábra.. A feszültségértékek átlagát képezve, felvehető tehát a valós feszültség (AVGS11) a globális alakváltozás függvényében (18. diagram.).



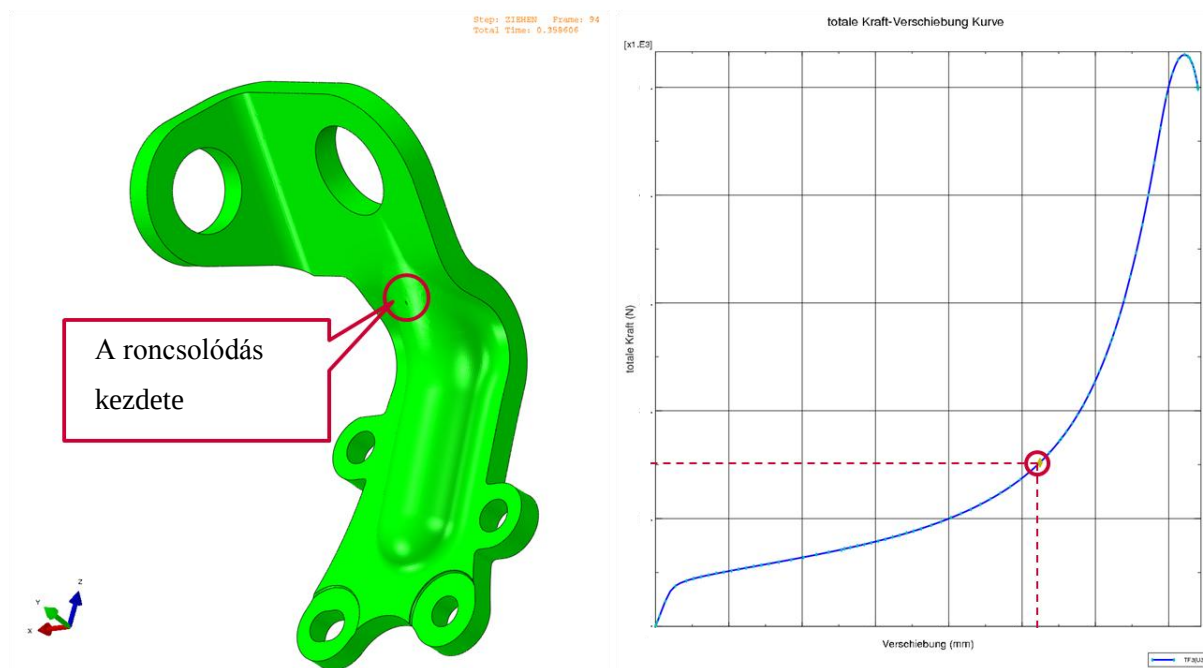
41. ábra. A kritikus tartomány feszültségképe

**Valós feszültség - globális alakváltozás diagram****18. diagram. Az alkatrész valós feszültség-globális alakváltozás diagramja**

A húzóerő-elmozdulás görbe (19. diagram.) lekérdezhető a terhelés megadás helyén létrehozott csomópontban (36. ábra.).

**Húzóerő - elmozdulás diagram****19. diagram. Az alkatrész húzóerő-elmozdulás diagramja**

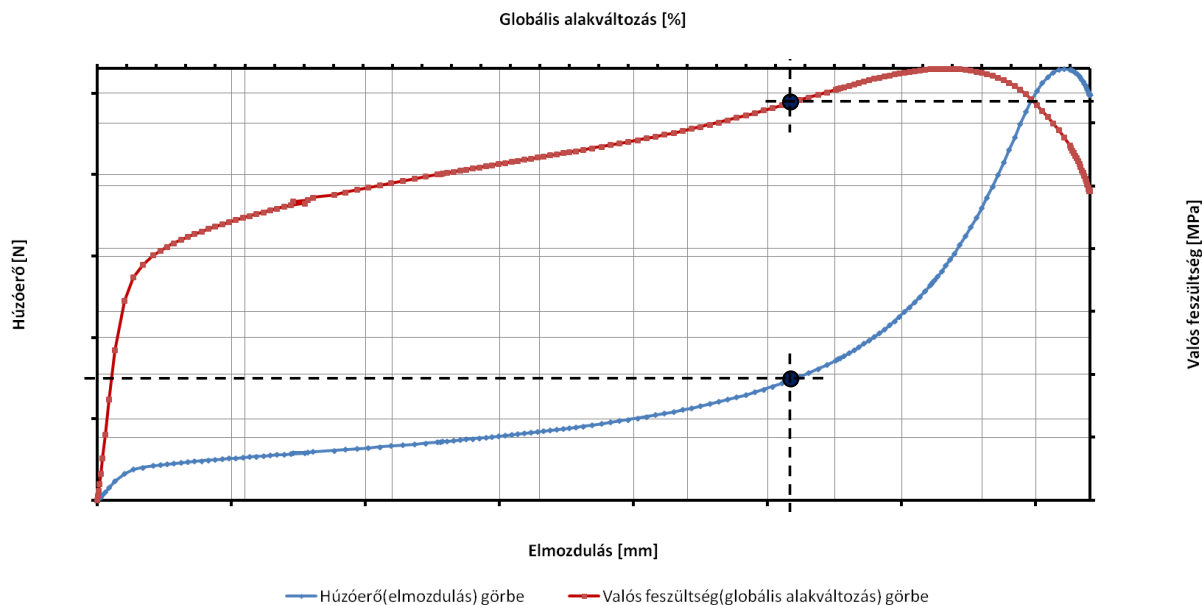
Felhasználva az ABAQUS postprocesszor képességeit, a tönkremenetel kezdete adott időlépésben leolvasható, és a húzóerő-elmozdulás görbébe is felvehető (42. ábra.).



42. ábra. Az alkatrész roncsolódásának kezdete (erő-elmozdulás diagram)

A két görbét egy közös diagramban ábrázolva meghatározhatóak a keresett feszültség és húzóerő értékek (20. diagram.), amelyeket táblázatos formában foglaltam össze (4. táblázat.).

Húzóerő (elmozdulás) és valós feszültség (globális alakváltozás) diagramok



20. diagram. Valós feszültség (elmozdulás) és húzóerő (globális alakváltozás) diagram

| A roncsolódás kialakulása - eredmények összefoglalása             |                |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| Húzóerő                                                           | 14748,6 [N]    |
| Húzóerő esetén létrejövő elmozdulás                               | 25,8684 [mm]   |
| von Mises feszültség                                              | 632,1314 [MPa] |
| Z-irányú globális alakváltozás a von Mises feszültségérték esetén | 47,0335 [%]    |

4. táblázat. Az motoremelő-/mozgató fül XFEM analízisének legfontosabb eredményei

### 6.3 Következtetések, kitekintés

A motoremelő-/mozgató fül XFEM-mel történő szimulációja számszerű adatokat biztosított az alkatrész egyértelmű tönkremenetelét illetően. A számítások során sikerült meghatározni azt a kezdeti tönkremeneteli állapotot, amikor az anyag elveszíti korábbi rugalmas-képlékeny tulajdonságát, és az anyagmodellben definiált paramétereknek megfelelően az alkatrészen repedések keletkeznek.

Az alkalmazási feladat bevezetőjében felállított problémaköröket az alkalmazott módszerrel meghatároztuk. Az eredmények a következők:

- A motoremelő-/mozgató fül kritikus tartományán  $\sigma_{max} = 632,1314$  [MPa] von Mises feszültség elérésekor apró repedések keletkeznek. Ez az érték a fül esetén megengedhető legnagyobb feszültségérték feletti érték.
- A megengedhető feszültség ( $\sigma_{max}$ )  $F = 14748,6$  [N] húzóerő hatására alakul ki. A motoremelő-/mozgató fület az előírásoknak megfelelően négyszeres biztonság mellett maximálisan  $F_{max} < 3687,15$  [N] húzóerő terhelheti. Ez tehát összesen  $m_{max} < 375,85$  [kg] tömeget jelent.

A feladattal kapcsolatosan megemlíthető további finomítási lehetőségek, amelyek még közelebb visznek a motoremelő-/mozgató fül realisztikus viselkedéséhez.

1. Hálóvariánsok készítése, elemtípusoktól való függőség megítélése. Az így kapott eredmények alapos összehasonlítása, kiértékelése. A legmegfelelőbbnek ítélt variáns alkalmazása a végelelemes modellre
2. Modellépítés: egyszerűsítések elhagyása – csavarkötések felépítése, emelőhorog és láncsor térbeli modelljének és kontaktkapcsolatainak létrehozása, definiálása; peremfeltételek újbóli részletes tanulmányozása a teljes virtuális alkalmazási környezet esetén (pl. kinematikai kapcsolatok, kontaktpárok).

Összegezve tehát fontos megjegyezni, hogy az alkalmazási feladat XFEM-mel történő megoldása is bizonyíték a kialakított számítási módszer helyességére és annak gyakorlati alkalmazhatóságára, ami jelentős előrelépést jelenthet az AHM Kft. projektjeiben. A példa alapján

belátható, hogy a validált anyagmodellel lehetőség nyílik további alkatrészek virtuális vizsgálatára, és azok terhelés hatására létrejövő esetleges roncsolódásainak modellezésére.

## 7 Összefoglalás, kitekintés

TDK dolgozatom célkitűzésének megfelelően sikerült egy olyan XFEM-en alapuló módszer kidolgozása, amely során egy adott alkatrész szakítószilárdság utáni viselkedése is modellezhető, virtuálisan is megjeleníthető. Az analízis-variánsok eredményei rávilágítottak a számítógéppel támogatott szimulációk során felmerülő esetleges problématerületekre, ill. azok megoldásának lehetőségeire, amelyeket felhasználva ABAQUS/Standard környezetben sikerült létrehozni azt a bemeneti (.inp) fájlt, ami a későbbi virtuális roncsolódás-vizsgálatok alapját képezheti.

Kutatásom súlypontját jelentette a komplex mérések alapján kialakított, ABAQUS/Standard környezetben használható acél mechanikai anyagmodelljének validálása az általam felépített XFEM szakítóvizsgálat eredményei alapján. A számítások során értelmeztem az anyagmodellben definiált ABAQUS-parancsokat, ismertettem azok elméleti háttérét. A roncsolódás virtuális modellezésének sikeressége miatt több tervezési variánst építettem fel. Ezekben a roncsolódáshoz szükséges parancsok gyakorlati alkalmazását is magyaráztam, és értelmeztem a modellezett próbatest viselkedését. Így jutottam el a végső variáns megalkotásához, amelynek eredményeit összevetettem a méréssel meghatározott mechanikai anyagmodell viselkedésével. A validálás sikerességét ezen eredmények hibaanalízise mutatta, amely során sikerült egy  $\pm 10$  [%]-os hibatarományon belül maradni. Kiemelendő kutatásom azon eredménye, amely a próbatest lokális feszültség-lokális alakváltozás plasztikus tartományán belül maradván, összesen  $\approx 1,2$  [%] hibaszázalékot mutat.

Mivel a mérnöki gyakorlatban minden nap, más és más problémákkal kell szembenézni, ezért az anyagroncsolódással kapcsolatos, XFEM alapú kutatásoknak naprakésznek kell lenniük. Ezért további finomítások szükségesek az anyagroncsolódás számítógépes modellezését illetően. Törekednünk kell a még pontosabb eredményre, amelyeket a jelenlegi modell finomításával, ill. új lehetőségek alkalmazásával érhetünk el.

Ezeket röviden összefoglalva:

1. *Az alkalmazott végeselemes háló elemeinek lokális finomítása a kritikus területen, valamint további elemtípusokkal (pl. C3D8R, C3D20) kialakított variánsok vizsgálata*
  - 1.1. *További tanulmányok írása az XFEM és az alkalmazott elemtípusok közötti összefüggésről*
2. *Peremfeltételek finomítása – a befogás helyének megváltoztatása*
3. *Explicit számítás – lehetővé teszi egységnyi idő alatt létrejövő elmozdulás, azaz a húzás sebességének definiálást, így mind statikai, mind dinamikus szakítás szimulálható*
  - 3.1. *További tanulmányok írása az explicit számítás és az XFEM közötti összefüggésének, lehetőségeinek feltárásával kapcsolatban*

---

## 8 Irodalomjegyzék

- [1] I. Bojtár, „Negyedik előadás - Előadásvázlat,” in *Mechanikai anyagmodellek*, Budapest, 2010..
- [2] G. Agárdy és L. Lublóy, *Mechanika I. - Statika*, Szerzők, 2006.
- [3] G. Dr. Németh, *Tartószerkezetek III. - Acélszerkezetek méretezésének alapjai*.
- [4] J. Magyarkúti, „Anyagvizsgálatok,” Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, 2008..
- [5] „<http://skristoff.hubpages.com/hub/Tensile-Testing-for-Evaluating-Material-Strength>”.
- [6] J. Dr. Lovas és G. Dr. Krállics, „Mechanikai anyagvizsgálat,” [http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT1/letoltes//temakorok/mechanikai\\_anyagvizsg\\_ais.pdf](http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT1/letoltes//temakorok/mechanikai_anyagvizsg_ais.pdf).
- [7] A. Prof. Dr.-Ing. Fischer, „Praktikum Grundlagen der Werkstofftechnik - Scriptum für Studierende der Universität Duisburg-Essen,” 2006..
- [8] „[http://www.mtt.bme.hu/en/education/BMEGEMTAEA4/download/labor/Mechanikai\\_anyagvizsgalat\\_II.pdf](http://www.mtt.bme.hu/en/education/BMEGEMTAEA4/download/labor/Mechanikai_anyagvizsgalat_II.pdf)”.
- [9] G. Dr. Krállics, „Törés,” [http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT1/letoltes//eloadas/tores\\_ais\\_09.pdf](http://www.att.bme.hu/oktatas/BMEGEMTAMT1/letoltes//eloadas/tores_ais_09.pdf).
- [10] T. Udomphol, „Laboratory 3: Tensile Testing,” Mechanical metallurgy laboratory 431303.
- [11] <http://mashayekhi.iut.ac.ir/sites/mashayekhi.iut.ac.ir/files/download/mahdi/assignments/Presentation11.pdf>.
- [12] ABAQUS, „User Guide”.
- [13] „<http://www.math.chalmers.se/~aila/JonasRingsberg.pdf>”.
- [14] ABAQUS, „Keywords Reference Manual”.
- [15] A. A. Topics, „Lecture 9: Material Damage and Failure,” <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM738/19-damage-failure.pdf>, 2006..

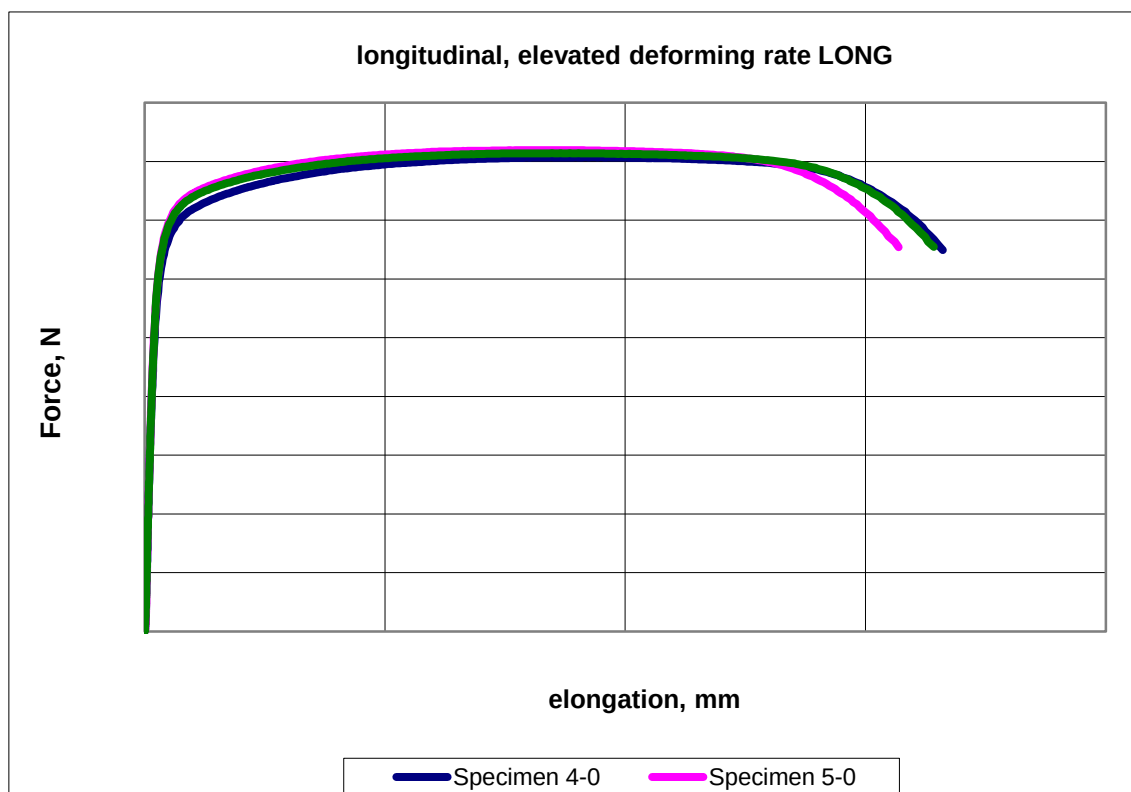
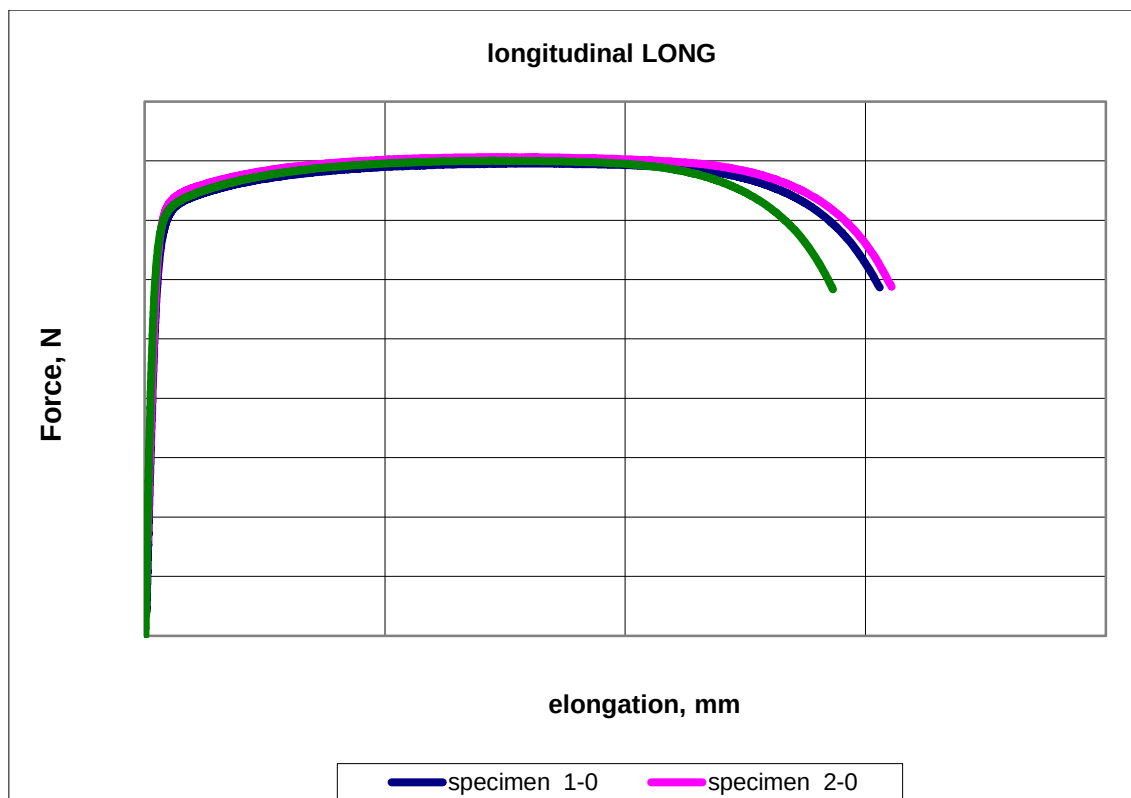
# Melléklet

A Melléklet-ben közölt, a kutatással kapcsolatos adatok az Audi Hungaria Motor Kft. szigorú előírásai miatt nem publikálhatóak. A számok ipari titkok. Ennek megfelelően sem a méréssel, sem a számításokkal kapcsolatos számszerű adatok nem tehetők közzé.

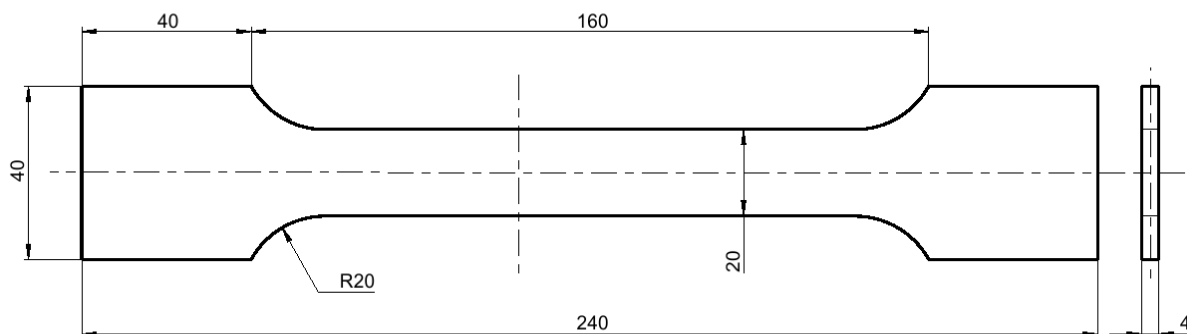
A vizsgált acél mechanikai anyagmodelljének bemenő .inp fájlja (ABAQUS)

```
**      - 20110617      - 4.0 mm
**-----
** Einheitensystem: mm-t-s --> MPa
**-----
** Werkstoffnormnummer: -
** Werkstoffnormname   :
** Hersteller          :
** Handelsname         :
** Halbzeug           : Platten
** Dicke               : mm
** Beschichtung        : -
**-----
** Prueflabor          :
** Datenaufbereitung:
** Daten von E-Modul, Querkontraktionszahl und Dichte von AUDI uebernommen
**
** Extrapol. Fließkurve: Hocket-Sherby  sigma = a - (a - sigma0) exp( -c phi^n)
** Fließsort           : von Mises (isotrop)
** Asymmetrie          : -
** Taillierung         : -
**
** Ductiler Trennbruch: Approximation ueber eta (isotrop)
** Ductiler Scherbruch: Approximation ueber theta (isotrop)
** Instabilitaet       : -
**-----
**
** *Material, Name=
**
** *Density
** ...
**
** *elastic, type=isotropic
** ...
**
** *plastic, hardening=isotropic
** ...
**
** *damage initiation, criterion=ductile
** ...
**
** *damage evolution, type=displacement
** ...
**
** *damage initiation, criterion=shear, ks=
** ...
**
** *damage evolution, type=displacement
** ...
```

*A mérési eredmények – szakítóvizsgálat, húzóerő-elmozdulás görbéi (kivonat)*



### A vizsgált 3D próbatest pontos geometriája



### Az input fájl felépítése, értelmezése

A programban használható parancsokat, azok paramétereit és adatait, illetve a kommenteket az input (.inp kiterjesztés) fájlban található sorokkal definiálhatjuk. Három típusú sort különböztethetünk meg: a csillaggal kezdődő parancssort, az adatsort, és a két csillaggal kezdődő kommentsort.

- A parancssor tartalmazza a programban használható lehetőségekhez tartozó parancsokat, azok paramétereit. A paraméterek a parancssorban a parancsokat követő formulák, kifejezések.
- Adatsorok, amelyeket a numerikus illetve alfanumerikus adatok bevitelére használhatunk. A legtöbb esetben a parancssorokat adatsorok követik.
- Minden sor, amely két csillag jellel kezdődik, komment sor. Ilyen sor bárhová kerülhet a fájlban belül. Ezeket az Abaqus figyelmen kívül hagyja, csak a beolvasás során listázza. A kommentsorok számával és helyével kapcsolatban nincsenek megkötések.

A lehetőségeket és a hozzájuk tartozó parancsokat illetve azok paramétereit az Abaqus Keywords Reference Manual [14] tartalmazza. Itt találhatóak a parancs és adatbevitel formális szabályai. Ha egy input fájl olyan sort tartalmaz, amely nem felel meg ezeknek a szabályoknak, akkor hibaüzenetet kapunk, a hiba okáról, a .dat fájlból tájékozódhatunk. Ebből kiderül, hogy melyik sorban és azon belül melyik szóban - parancsban található a hiba.

A második variáns működő input fájlja magyarázattal

```
*HEADING
**
**
** CSOMÓPONTOK DEFINIÁLÁSA
**
*NODE
  1, -117.38623171583211, -19.231105645812015, 4.
...
  80480, 123.17211667900003, 3.552713678800501E-14, 2.
**
** 3D-SOLID ELEMENK DEFINIÁLÁSA
**
**SOLID ELEMENTS
**
*ELEMENT, TYPE=C3D8, ELSET=Probestueck
  6981, 1, 4050, 8273, 6966, 21538, 21638, 16112, 16204
...
  77756, 68564, 68982, 64506, 64504, 80061, 80479, 76003, 76001
**
** KINEMATIKAI KAPCSOLAT DEFINIÁLÁSA FELÜLET ÉS CSOMÓPONT KÖZÖTT
**
** KINEMATIC/DISTRIBUTING COUPLING
**
*COUPLING, CONSTRAINT NAME=COUPLING_1, REF NODE=80480, SURFACE=MOVE
*KINEMATIC
  1,      3
**
** ANYAG DEFINIÁLÁSA - MECHANIKAI ANYAGMODELL BEILLESZTÉSE
**
** SECTION DATA
**
*SOLID SECTION, ELSET=Probestueck, MATERIAL=
**
** MATERIALS
**
**
*MATERIAL, NAME=
*DENSITY

*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
      ,
**
*plastic, hardening=isotropic
...
**
*damage initiation, criterion=ductile
...
**
*damage evolution, type=displacement
...
**
*damage initiation, criterion=shear, ks=
...
**
*damage evolution, type=displacement
...
**
** FELÜLETEK ÉS SET-EK DEFINIÁLÁSA A KÖNNYEBB PEREMFELTÉTELEK MEGADÁSA ÉRDEKÉBEN
**
** SURFACE DEFINITIONS
**
*SURFACE, NAME=MOVE, TYPE=NODE
MOVE,      1.
**
** SETS
**
*NSET, NSET=FIX
  6966, 6967, 6968, 6969, 6970, 6971, 6972, 6973, 6974, 6975,...
...
75708,
*NSET, NSET=MOVE
  5533, 5645, 7043, 7044, 7045, 7046, 7047, 7048,...
...

```

```
79219,
**
** TERHELÉS MEGADÁSI GÖRBE LÉTREHOZÁSA
**
** AMPLITUDES
**
*AMPLITUDE, NAME=EXP
0,      0
...
1,      1
**
** PEREMFELTÉTELEK MEGADÁSA
**
**BOUNDARY
**
*BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, OP=NEW
FIX,      1,      3,      0.
80480,    2,      6,      0.
**
** ANALÍZIS LÉTREHOZÁSA
**
** STEPS
**
** 1. ANALÍZIS TÍPUSÁNAK DEFINIÁLÁSA ÉS A LÉPÉSKÖZÖK MEGHATÁROZÁSA
**
** STEP 1
**
*STEP, NAME=Zugversuch, INC=10000, NLGEOM=YES, UNSYMM=YES
*STATIC, STABILIZE
      0.01, 1., 1E-15 , 0.05
**
** 2. IGÉNYBEVÉTEL MEGADÁSA
**
** BOUNDARY
**
*BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, OP=MOD, AMPLITUDE=EXP
      80480, 1, , 80.
**
** KIMENŐ ADATOK MEGADÁSA
**
** OUTPUT REQUEST
**
*OUTPUT, FIELD, FREQUENCY=1
*NODE OUTPUT
CF,
RF,
TF,
U,
*ELEMENT OUTPUT, POSITION=INTEGRATION POINTS
E,
MISES,
PE,
PEEQ,
S,statusxfem
SENER,
STATUS,
SDEG,
DMICRT,
**OUTPUT, HISTORY, FREQUENCY=1
*END STEP
```