



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

NOVÁK BENCE

(GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAK MSC, 2. FÉLÉV)

Hogyan alkalmazzuk helyesen a végeselemes szimulációt?

Konzulensek:

Dr. Katula Levente Tamás, ATT, egyetemi
docens

Dr. Szlancsik Attila, ATT, adjunktus

Budapest, 2023.11.16.

Szerzői jog © Novák Bence.

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Tudományos Diákköri Konferenciára előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a célkitűzésekben megfogalmazottaknak maradéktalanul eleget tesz. Ezen dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2023.11.16.

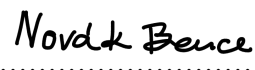


konzulens

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Novák Bence (J9VTP5)* a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.11.16.



hallgató

Tartalomjegyzék

1. Előszó	4
2. Köszönetnyilvánítás	4
3. Összefoglalás	5
3.1 Summary	6
4. Célkitűzés	7
4.1 Áttekintés	7
5. Bevezetés	7
6. Irodalomkutatás	11
6.1 Vágás/lyukasztás	11
6.2 Vágás során kialakuló zónák	11
6.3 Vágóerő-út diagram	12
6.4 Tönkremeneteli modellek	13
6.4.1 Latham-Cockroft kritérium	13
6.4.2 Bonora modell	14
6.4.3 Johnson-Cook modell	15
7. Végeselemes módszer	17
7.1 Qform bemutatása	18
7.2 MSC Marc Mentat bemutatása	19
8. Eredmények	21
8.1 A Qformban kapott eredmények	21
8.2 Az MSC Marc Mentatban kapott eredmények	23
8.2.1 Modelltörténet	25
8.2.2 További szimulációk eredményei	30
9. Összefoglalás	33
10. További célok	34
11. Felhasznált források	35
11.1 Irodalomjegyzék	35
11.2 Ábrajegyzék	35

1. Előszó

Korábbi munkám során lemezvágással foglalkoztam. Egy lyukasztási folyamat paramétervizsgálatát végeztem el egy kifejezetten képlékeny alakításhoz fejlesztett célszoftver, a Qform segítségével. A kapott eredményeim ellenőrzéseként további szimulációkat végeztem egy másik végeselemes szoftverrel, MSC Marc Mentat-tal. A mostani munkám ennek a két program által készített szimulációk eredményeit fogja bemutatni.

„Meg kell tanulnunk, hogy ne higgyünk a magunk gondolatában azért, mert az a mi gondolatunk. Ellenkezőleg: éppen azért, mert a mi gondolatunk, féken kell tartanunk, és fokozott bizalmatlansággal kell bánnunk vele.”

Paul Valéry

2. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulenseimnek - Dr. Katula Levente Tamásnak és Dr. Szlancsik Attilának - minden segítséget, amit nyújtottak, és készségesen mindig a rendelkezésemre álltak.

Szeretnék köszönetet mondani továbbá az Anyagtudomány és Technológia Tanszéknek, amiért a rendelkezésemre bocsátották a végeselemes programok, a Qform és MSC Marc Mentat hozzáférését, amivel a szimulációkat végeztem.

Budapest, 2023.10.30.

Novák Bence

3. Összefoglalás

A feladatom egy szabványos lapos szakító próbatest kivágására szolgáló szerszám tervezése lemez alapanyagból, amihez már végeztem szimulációkat előzetesen. Akkor különböző vágási paraméterek hatását vizsgáltam, hogy egyes paraméterek hogyan és milyen mértékben befolyásolják a technológiai folyamatot. Ez azért előnyös, mert a futtatási eredmények alapján ki lehet választani az optimálisnak mutakozó megoldást, így energia és költséghatékonyan lehet egy tervezést kivitelezni, és jelentősen lehet csökkenteni a konstrukciós „hibák” számát. Ezért regisztráltam a dolgozatomat zöld kategóriában.

Az előzetes szimulációkat akkor végeztem, amikor még nem rendelkeztem kellő ismeretekkel az anyag alakításakor lejátszódó degradációs folyamatokat leíró tönkremeneteli modellekről. Így a tanulmányaimat folytatva mélyebb tudást szereztem, ami lehetővé tette a meglévő modell helyességének ellenőrzését más tönkremeneteli modellekkel, melyekkel újabb szimulációkat végeztem a Qformban. A korábbi és az újonnan kapott eredmények között nem volt eltérés, ami azt jelenti, hogy a különböző elméleti megközelítésen alapuló tönkremeneteli modellek alkalmazása nem befolyásolta a végeredményt. Ez megerősítette azt a feltevésemet, hogy a korábbi modell nem kezeli helyesen a tönkremeneteli folyamatot, és ezt a problémát egy másik végelelemes programban kell tovább vizsgálnom.

Így az MSC Marc Mentat nyíltvégű végelelemes szoftverben további szimulációkat végeztem. Először egy nagy elemméretű modellel kezdtem, majd több lépésben fejlesztettem a modellelmen, amíg már megfelelőnek ítélt meg. A szimulációk során több tönkremeneteli modellt vizsgáltam. Majd az így kapott eredményeket összevettem a már meglévőkkel.

Kulcsszavak: végelelemes szimuláció, lyukasztás, károsodási modellek, összehasonlító vizsgálat, zöld

3.1 Summary

My task involved designing a tool made of sheet material for cutting standard flat fracture test specimens, for which I had previously conducted simulations. At that time, I examined the effect of various cutting parameters on the technological process, determining how and to what extent certain parameters influence it. This is advantageous because based on the simulation results, one can select the most optimal solution, allowing for the implementation of a design in an energy and cost-effective manner, and significantly reducing the number of design "flaws". This is why I registered my work in the green category.

I conducted the preliminary simulations when I did not yet have sufficient knowledge about degradation processes occurring during material shaping. As I continued my studies, I gained deeper understanding, which enabled me to verify the accuracy of the existing model with other degradation models. I performed additional simulations using Qform. There was no difference between the previous and newly obtained results, which means that the application of different theoretical approaches to degradation models did not affect the final outcome. This confirmed my assumption that the previous model did not correctly handle the degradation process, and I needed to further investigate this issue in another finite element program.

Therefore, I conducted further simulations in the open-ended finite element software MSC Marc Mentat. I started with a large element size and gradually refined the model in multiple steps until I deemed it appropriate. During the simulations, I examined several degradation models. Then, I compared the results obtained with the existing ones.

Keywords: finite element simulation, punching, degradation models, comparative study, green.

4. Célkitűzés

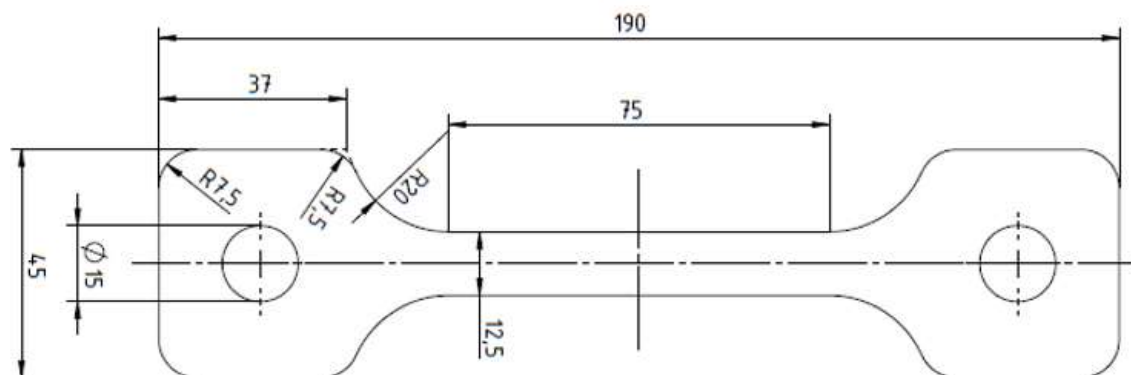
Szeretném ellenőrizni az eddigi végeselemes célszoftverrel meghatározott eredményeimet, melyhez egy másik gyártó végeselemes szoftverét használom, majd az eredményeket összehasonlítom. Célom igazolni, hogy mindkét szoftver azonos mértékben alkalmas-e a vágási folyamat szimulálására.

4.1 Áttekintés

Dolgozatom tartalmazza a feladatom során a témában folytatott előzetes kutatómunkámat és a hozzá kapcsolódó szakirodalmat. Összehasonlítást végeztem két végeselemes program között – Qform és MSC Marc Mentat -, melynek alapja ugyanazon kivágási művelet.

5. Bevezetés

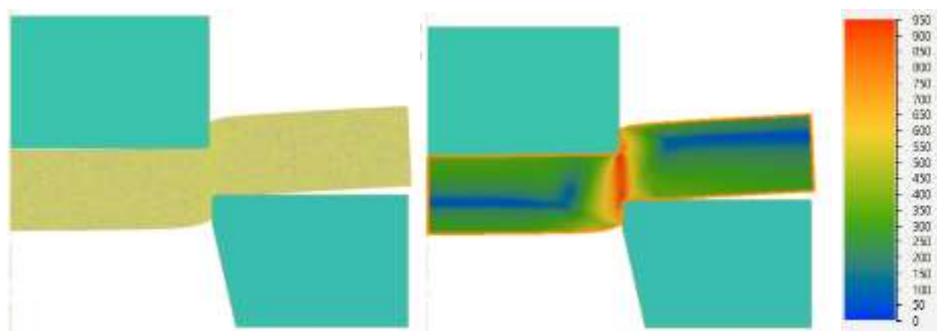
Az eddigi munkám során Qform-ban kezdtem szimulálni a vágási folyamatot, amelyben egy lapos, lemez szakító próbatestet munkálunk ki. Erről bővebben az 1. forrásban lehet olvasni, valamint az 5-1. ábra szemlélteti a kialakítását.



5-1. ábra: Korábbi modellkísérlethez meghatározott próbatest kialakítás

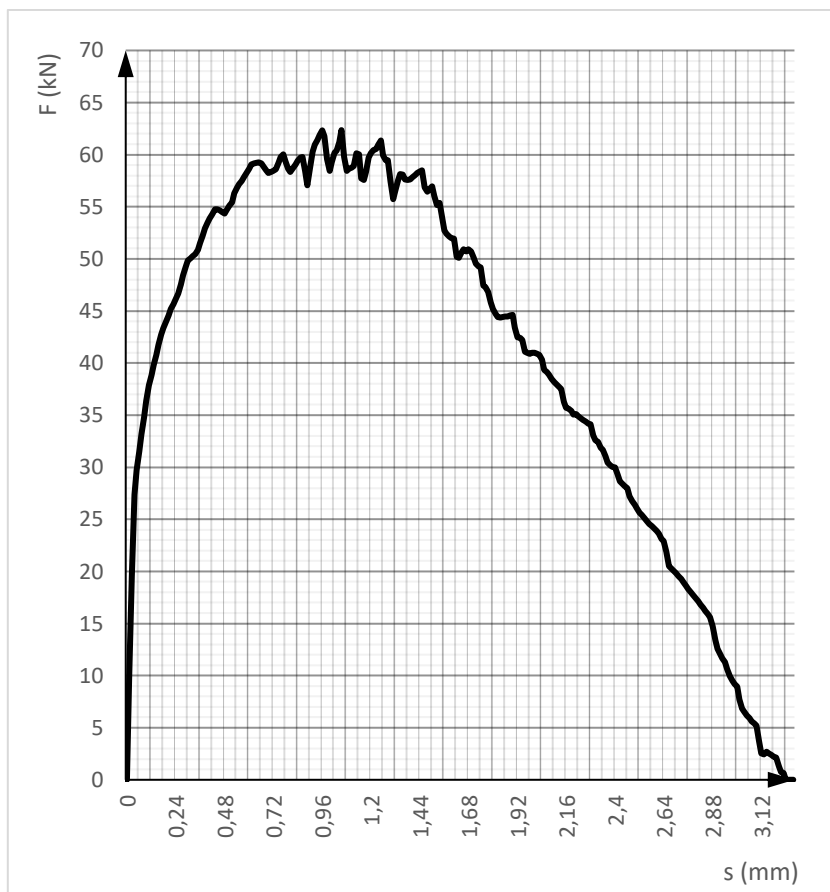
A próbatestet két technológiai lépésből lehet kialakítani: az egyik egy kivágás, majd egy lyukasztás. A két lépés közül a lyukasztást vizsgáltam, mert annál kevesebb elemű, de sűrűbb hálóval tudtam a szimulációt futtatni. Így a kisebb számítási kapacitás miatt gyorsabban kaptam meg az eredményeket. A nagyobb hálósűrűség miatt pedig pontosabb eredményeket tudtam elérni.

A szimulációt a korábbi munkámhoz képest mérnöki munkával fejlesztettem, mert 3D modell helyett 2D-s modellt alkalmaztam. A geometria miatt tudtam tengelyszimmetrikus modellként szimulálni, így tovább csökkentve a számítási kapacitást (lásd 5-2. ábra).



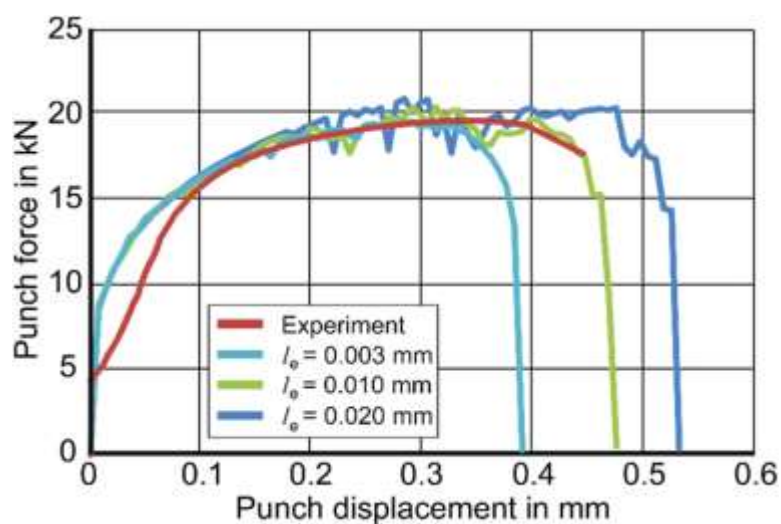
5-2. ábra: Qform szimuláció modellje (jobb oldali kép a feszültségeloszlást mutatja)

Mivel a BSc-s tanulmányaim során még nem volt megfelelő ismeretem a tönkremeneteli modellekről, így egy egyszerű modellt alkalmaztam, a Cockroft-Latham tönkremeneteli modellt. A kapott eredményeket a vágóerő-út diagram alapján értékeltem ki. A tervezett vágórészhez tartozó vágóerő-út diagramot az 5-3. ábra szemlélteti.



5-3. ábra: Qform szimuláció vágóerő út diagramja

Az 5-3. ábra grafikonja merőben eltér a valóságtól, ugyanis a valóságban az erőleesés sokkal meredekebb. Ezt lehet megfigyelni az 5-4. ábra görbéin, amit a [2]-ből emeltem ki.



5-4. ábra: Végeselemes szimuláció és valóságban mért eredmények összehasonlítása [2]

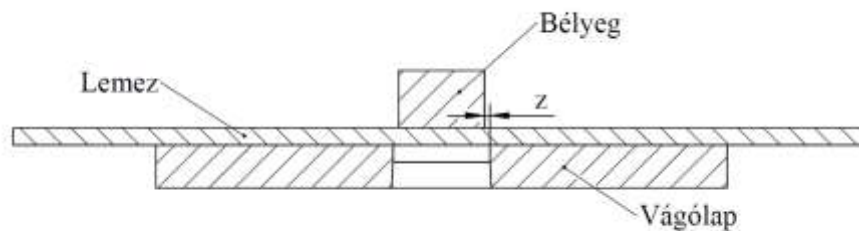
A képen szereplő l_e az elemméretet jelenti és értéke mm-ben értendő, a piros görbe pedig egy a szerzők által mért vágás erőlefutása. Az általam végzett szimulációk és a forrásban található szimulációk eredménye között a legszembevetőbb különbség, hogy a tönkremenetel a hálósűrűség növelésével egyre hamarabb végbemegy. Azonban a görbe meredeksége mindhárom esetben nagyjából azonos, szinte függőleges, míg az én esetemben sokkal kisebb meredekségű. A vágóerő csökkenése a valóságban is meredek, mert a repedésterjedésnél a repedésfrontok összeérésekor átszakad a lemez és az erő ez által drasztikusan leesik. Ez a repedésterjedés nem volt megfigyelhető a szimulációmban.

Ezért úgy éreztem további vizsgálatokat kell folytatnom. Ehhez további, bonyolultabb tönkremeneteli modellekre van szükség, valamint a hozzájuk tartozó tönkremeneteli paraméterekre. Így elkezdtem kutatni, hogy milyen modelleket tudnék még felhasználni, és melyik modellt tudom felparaméterezni.

6. Irodalomkutatás

6.1 Vágás/lyukasztás

Egy adott anyag adott zárt körvonalmonti szétválasztását nevezzük vágásnak vagy lyukasztásnak. A két folyamat különbsége, hogy vágásnál a munkadarab esik ki, lyukasztásnál pedig a hulladék. A folyamatnak két fő alkatrésze van a bélyeg és a matrica. (lásd 6-1. ábra)

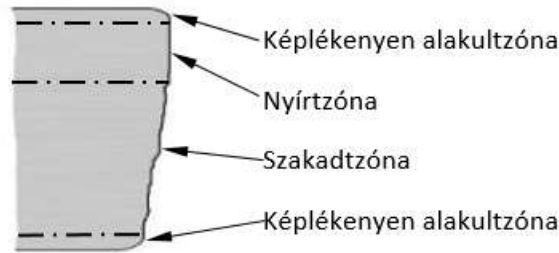


6-1. ábra: Egy vágási elrendezés, a „z” méret mutatja a vágórést

6.2 Vágás során kialakuló zónák

A vágott felületet 3 tartományra tudjuk osztani (lásd 6-2. ábra):

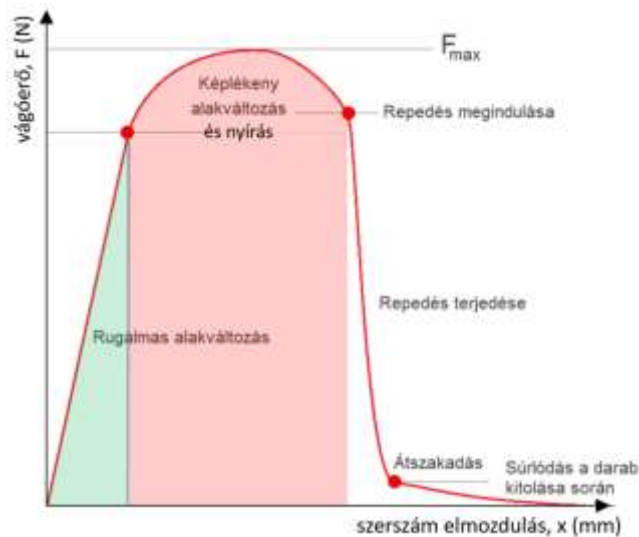
- képlékenyen alakváltozott zóna: A vágólap és a bélyeg/tüske nyomóigénybevétele miatt az anyag képlékenyen alakul. Ennek a zónának a mérete függ az anyag alakváltozókéességétől. A lágyabb anyagok jobban „kenődnek”, ezért a ridegebb anyag vágása kedvezőbb.
- nyírt zóna: Az anyagba behatoló vágóélek által okozott igénybevételtől az anyag megfolyik, és kismértékű képlékeny alakváltozást szenved. Ez azért van, mert a szerszám vágóéleinél feszültségcsúcs alakul ki, amely meghaladja a vágandó anyag nyírószilárdságát.
- szakadt zóna: A szakadt zóna azért alakul ki, mert a vágás során az anyagban repedések keletkeznek, ezek a repedések az alakítás során terjedni kezdenek, és ezek összeérése fogja kialakítani ezt a zónát. [3]



6-2. ábra: A kialakuló zónák a vágás során

6.3 Vágóerő-út diagram

A vágási folyamatot kétféleképpen ellenőrizhetjük. Az egyik, hogy megvizsgáljuk a vágott felületet, a másik, hogy elemezzük a vágóerő-út (szerszám elmozdulás) diagramot (lásd 6-3. ábra). A folyamat a repedésfrontok összeérésével ér véget, ugyanis ekkor a lemez a teljes keresztmetszetben átszakad.



6-3. ábra: Vágóerő-út diagram [4]

Ebből látszik hogy a folyamatot 3 részre tudjuk osztani:

- rugalmas szakasz: A lemez a terhelés hatására elkezdi rugalmasan alakváltozni. Ez a szakasz addig tart amíg, át nem lépjük az anyag alakítási szilárdságát (k_f).

- képlékeny alakváltozás és nyírás szakasza: Miután átléptük az anyag alakítási szilárdságát, az anyag alakváltozni kezd, aminek hatására felkeményedik. A szerszáméleknél kialakuló feszültségcsúcsok miatt a két szerszámfél behatol az anyagba. Így az anyagban kialakul egy nyíró igénybevétel. A nyírt keresztmetszet befolyásolja a vágóerőt, így a felkeményedés hatása és a nyírt keresztmetszet csökkenése eredményezi azt, hogy ebben a szakaszban van a maximális erő értéke a folyamatnak. Miután a vágóerő elérte a maximális értékét, csökkenni fog, mert a nyírt keresztmetszet csökkenése nagyobb hatást gyakorol a folyamatra, mint a felkeményedés.
- repedésterjedés: Az anyagban a szállítási állapotában mikrorepedések vannak, valamint az anyag alakváltozó képességének kimerülése miatt további repedések keletkeznek. Ezek a további alakváltozás hatására terjedni kezdenek. Amikor a két szerszám éleitől kiinduló repedésfrontok összeérnek, a lemez teljes keresztmetszetben átszakad. A folyamat itt véget is ér, innen már csak a bélyegre szorult lemez súrlódását kell leküzdeni. [3]

6.4 Tönkremeneteli modellek

A tönkremeneteli modellek olyan modellek, amelyek lokális károsodási folyamatokat (mikroüregképződés, mikroüreg növekedése, összeérése, repedésterjedés, szilárdságcsökkenés) írják le. Ilyen modellek: Bogatov-féle számítás, Latham-Cockroft kritérium, Oyane modell, Lemaitre modell, Bonora modell, Johnson-Cook modell. Ezek közül, a munkám során felhasználtakat részletesen ismertetem.

6.4.1 Latham-Cockroft kritérium

Ez az egyik legnépszerűbb tönkremeneteli kritérium, ugyanis ez a legegyszerűbb, így kevés adatra van szükségünk a számításához. A kritérium azon a hipotézisen alapul, hogy a károk felhalmozódása csak akkor következik be, ha a fő feszültségkomponensek közül legalább egyik húzó. Ezért az első főfeszültséget normalizáljuk az egyenértékű feszültséggel, majd összegezzük a teljes alakváltozásra (lásd (6.1) egyenlet).

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{\sigma_1^+}{\sigma_{eq}} d\bar{\varepsilon}_p < C_1 \quad (6.1)$$

Így a számításhoz lényegében egy paramétert kell megadni, a C_1 -et, ami azt befolyásolja, hogy meddig növekedhet az integrál értéke mielőtt bekövetkezik a tönkremenetel.

A normalizált kritérium lehetővé teszi a munkadarab károsodásának kvantitatív előrejelzését, tetszőleges hidegalakító technológiára. Hátránya az, hogy csak olyan folyamatok összehasonlítására alkalmas, ahol a két folyamat feszültségi állapota és a deformációk nem térnek el nagy mértékben egymástól. [5]

6.4.2 Bonora modell

A Bonora modell az egyik legösszetettebb tönkremeneteli modell. Figyelembe veszi az anyagban az alakítás hatására keletkező mikroüregeket, ezek növekedését és összeérését. A folyamatot a következő egyenletekkel írhatjuk le (lásd (6.2); (6.3) egyenlet):

$$dD = \frac{\alpha \cdot D_c^{1/\alpha}}{\ln\left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{th}}\right)} (D_c - D) \frac{\alpha - 1}{\alpha} f(\sigma) \frac{1}{\varphi_{képl}^+} d\varphi_{képl}^+ \quad (6.2)$$

$$f(\sigma) = \frac{3}{2} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}} \right)^2 \quad (6.3)$$

Ahol:

- D : abszolút tönkremeneteli érték
- α : anyagi paraméter
- D_c : kritikus tönkremeneteli érték
- φ_f : tönkremeneteli határ alakváltozás
- φ_{th} : alakváltozás a tönkremenetel megkezdésekor
- $f(\sigma)$: a feszültségi állapotot jellemző függvény
- $\varphi_{képl}^+$: „aktív” egyenértékű képlékeny alakváltozás
- ν : Poisson-tényező
- σ_0 : hidrosztatikus feszültség
- σ_{eq} : egyenértékű feszültség

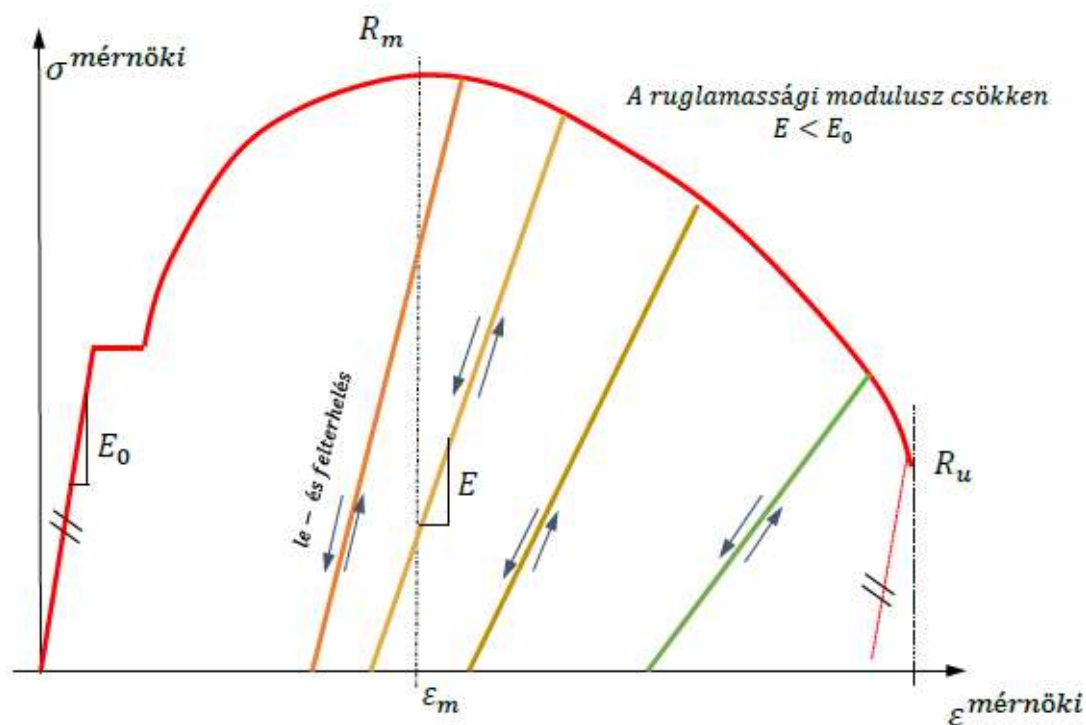
A tönkremenetel lejátszódik ha

$$D \geq D_c$$

A Bonora modell figyelembe veszi továbbá az anyag rugalmassági modulusának megváltozását a tönkremenetel során (lásd (6.4) egyenlet)

$$E = E_0 \cdot (1 - D) \quad (6.4)$$

Azt, hogy a tönkremenetel során csökken a rugalmassági modulusz nagyon jól ki lehet mutatni egy szakító vizsgálattal, aminél a kontrakciót meghaladó alakváltozás után, ha leterheljük a próbatestet majd folytatjuk a szakítást, a rugalmassági modulusz változása a 6-4. ábra szerint alakul. [6][7]



6-4. ábra: A rugalmassági modulusz csökkenése szakítóvizsgálat közben [6]

6.4.3 Johnson-Cook modell

A Johnson-Cook modell olyan tönkremeneteli modell, ami figyelembe veszi az alakítás során az alakváltozási sebesség és a hőmérséklet hatását a tönkremenetelre, amit a Latham-Cockroft és Bonora modellek nem. Hátránya hogy rengeteg mérést igényel a benne szereplő

tönkremeneteli paraméterek kimérése. A tönkremenetelt a következő egyenletek írják le (lásd (6.5); (6.6); (6.7); (6.8); (6.9) egyenlet):

$$\varphi_d = (D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \cdot \sigma^*}) [1 + D_4 \cdot \ln \varphi^*] [1 + D_5 \cdot T^*] \quad (6.5)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}} \quad (6.6)$$

$$\dot{\varphi}^* = \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \quad (6.7)$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_{olv} - T} \quad (6.8)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \varphi_{képl.}}{\varphi_d} \quad (6.9)$$

Ahol

- $D_{1...5}$: anyagparaméterek
- σ_0 : hidrosztatikus feszültség
- σ_{eq} : egyenértékű feszültség
- $\varphi_{képl.}$: egyenértékű képlékeny alakváltozás
- $\dot{\varphi}$: egyenértékű alakváltozási sebesség
- $T_0; \dot{\varphi}_0$: a hőmérséklet és alakváltozási sebesség kezdeti, referencia értékei
- T : hőmérséklet
- T_{olv} : olvadáspont
- $\Delta \varphi_{képl.}$: egyenértékű képlékeny alakváltozás növekmény
- φ_d : tönkremeneteli alakváltozás
- D : tönkremeneteli paraméter

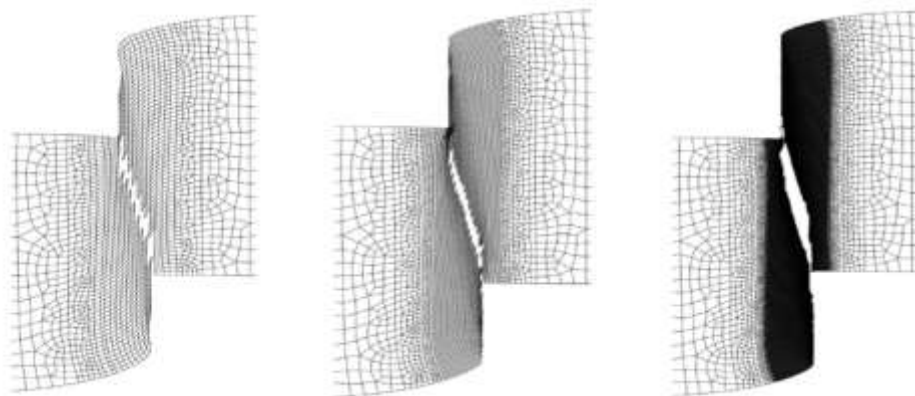
A tönkremenetel akkor következik be ha:

$$D \geq 1$$

[6]

7. Végeselemes módszer

A végeselemes módszernél (a továbbiakban VEM) egy adott geometriát, egy kontinuum testet felosztunk véges geometriájú elemre. Ezt megtehetjük síkban (2D) vagy térben (3D). Azt hogy melyiket alkalmazzuk, azt a geometria, vagy az adott feladat befolyásolja. A számítási kapacitás csökkentése érdekében mindig érdemes a feladat szimmetriáját kihasználni. 2D-s esetben négyszög illetve háromszög elemekből álló hálót tudunk használni (lásd 7-1. ábra). 3D-s modell esetén tetraéder vagy kocka elemeket tudunk alkalmazni. A felosztott geometriát véges számú elemek összegeként tekintjük, és erre a véges számú, véges kiterjedésű elemek halmazára alkalmazzuk az ismert mechanikai modelleket.



7-1. ábra: Különböző hálósűrűségű végeselemes háló lemezvágás modellezéshez [2]

A végeselemes modellezés előnye, hogy úgy tudunk több konstrukciós megoldást vizsgálni, hogy nem kell hozzá legyártani az alkatrészt, így költséghatékonyan, alapanyagtakarékosan és energiatakarékosan tudunk tervezni vagy fejleszteni egy technológiát. A virtuális térben végzett kísérletsorozat eredményeképpen az így meghatározott legjobb eredményt adó kialakítás, szerkezeti változat tesztelhető a fizikai térben. Így környezetbarát módon tudjuk előállítani a feladatra optimális eszközt. Ezenkívül a végeselemes modell alkalmazásával az analitikus számításokkal meghatározható eredményeken túli információkat is kaphatunk pl. hőmérsékleteloszlás a szerszámban/munkadarabban, vagy akár a kopás mértéke. Kideríthetők egy konstrukció kritikus helyei, ahol esetleg még változtatást kell eszközölnünk. Emellett az adott alkatrészt a beépítési környezetében és annak paramétereit között tudjuk vizsgálni, így arra is tudunk következtetni, mi történik vele a használat során. A szimulációk során figyelemmel tudjuk követni minden egyes számítási lépésben, például a

hőmérséklet-, alakváltozás-, feszültségeloszlását, ezek lefutását. Valamint lehetőségünk van a darab teljes keresztmetszetében ezeket vizsgálni. A kapott adatokból szemléletes videókat, ábrákat tudunk készíteni.

Természetesen árnyoldala is van a végeselemes szimulációnak. Általában elég költséges hozzáférést szerezni egy ilyen programhoz, ezen felül, hogy helyes eredményeket kapjunk megfelelő modellt kell felépíteni, ehhez pedig szükséges egy olyan szakember, akinek szakterülete a VEM-es szimuláció. Mivel a geometriát véges számú elemből építettük, így sose a valóságot kapjuk, a VEM-es szimulációval mindig csak közelítjük azt. Ezért a kapott eredményeket kellő óvatossággal kell kezelni és lehetőség szerint ellenőrizni kell.

7.1 Qform bemutatása

A Qform egy kifejezetten képlékeny alakítási folyamatok szimulálására alkalmas végeselemes célprogram. Előnye a többi programhoz képest, hogy sokkal felhasználóbarátabb, így kevesebb idő kell a program használatának elsajátításához.

Nagy előnye, hogy a hálót a beimportált alakzatra a program generálja és a lépések között a megfelelő helyeken, ahol szükséges, magától sűríti vagy ritkítja azt. A megfelelő háló használatával csökkenthetjük a számítási kapacitást és gyorsabb futásidő érhető el. A hálózásnál a felhasználónak lehetősége van lokálisan a hálót sűríteni illetve ritkítani. Így, ahol nagyobb alakváltozások/feszültségértékek várhatóak lokálisan (például: sarkok, élek mentén), oda sűrűbb hálót tudunk illeszteni. Emellett a lépések közti időkülönbséget is a program automatikusan állítja. A lépések között folyamatosan ment, így ha megszakadna valamiért a szimuláció az adott lépéstől tudjuk tovább futtatni.

Hátránya, hogy a program csak háromszög elemekből képes hálót generálni négyszög elemek használatára nincs lehetőség. A háromszög elemek kevesebb szabadsági fokkal rendelkeznek, és könnyebb ezekkel számításokat végezni. Ezért előnyösek olyan területeken, ahol a modell egyszerűsítése, illetve a gyorsabb számítási idő fontos szempont. A négyszög elemek több szabadsági fokkal rendelkeznek, ami bonyolultabbá teszi a számításokat. Viszont a négyszögek pontosabbá tehetik a modellt olyan területeken, ahol a sima felületek vagy szabályos alakzatok előnyösek. Így a vágásnál, ahol nincsenek olyan geometriák, amiket csak bonyolultan tudnánk definiálni a pontosabb számítás miatt kedvezőbb lenne a négyszög elemek használata. [8]

7.2 MSC Marc Mentat bemutatása

Az MSC Marc Mentat egy nyíltvégű VEM-es szimulációs program, így a Qformmal ellentétben nemcsak képlékeny alakítások szimulálhatók benne, hanem tetszőleges mechanikai problémák vizsgálatára is alkalmas. Szimulálhatunk benne termikus problémákat is. Emellett arra is lehetőség van, hogy egyszerre termikus és mechanikus problémát is szimuláljunk benne. Így kitűnően alkalmas például hegesztési folyamatok szimulálására. Ezenkívül megvizsgálhatjuk testek sajátfrekvenciáit, képlékenységi instabilitási problémákat, diffúziós folyamatokat, piezoelektromos és mágneses viselkedést is vizsgálhatunk.

A Marcban a hálót a felhasználó hozza létre az alakzatra. Mivel a létrehozott háló kritikusán befolyásolja az eredményt, a felhasználótól sokkal jobban függ a szimuláció eredménye. Ezért ajánlatos hálógeneráló programok használata, annak, aki nem gyakorlott a hálózásban. Ilyen program a COMSOL Multiphysics, HyperMesh, stb. A Marcban lehetőség van háromszög elemek mellett négyszög és tetra elemek használatára is.

Míg a Qform lépésről lépésre vezeti a felhasználót a szimuláció összeállításában, a Marc kezelőfelülete nem. Így a program helyes használatát nehezebb elsajátítani, de ez az ára annak, hogy ez a program sokkal összetettebb problémák szimulációjára is alkalmas.

A Marcban is lehetőség van hálósűritésre, újrahálózásra, de ezeknek a paramétereit is a felhasználó állítja be, hogy hol és mikor történjen az újrahálózás. Erre több opció is van, amelyek közül a felhasználó választja ki a számára megfelelőt. Így ennek a beállítása is sokkal összetettebb, mint a Qformban.

Míg a Qform automatikusan állítja a lépések közt eltelt időt, a Marcban alapesetben ugyanakkora lépésközökkel dolgozik a program. Itt szintén be lehet állítani, hogy ez változzon, de ez is a felhasználó feladata, és nem a program generálja automatikusan.

Összefoglalva a leírtakat, a következő táblázatban összegyűjtöttem a legfőbb tulajdonságait a két programnak (lásd 7-1. táblázat):

	Qform	MSC Marc Mentat
Mire lehet alkalmazni?	Képlékeny alakítási folyamatok szimulálására	Mechanikai, termikus, diffúziós, piezoelektromos, mágneses folyamat szimulálására
Háló generálása	Automatikus	A felhasználó feladata a háló létrehozása
Újrahálózás	Automatikus	Felhasználó állítja be (alapból nem háló újra)
Lépésköz	Automatikus	Felhasználó állítja be (alapból egyforma lépésközök)

7-1. táblázat: A két program összehasonlítása

8. Eredmények

8.1 A Qformban kapott eredmények

Mivel a korábbi munkám során kapott eredményekről feltételezem, hogy hibásak lehetnek, ezért elkezdtem gondolkodni, hogyan tudnám ellenőrizni azokat. Úgy gondoltam, kipróbálok egy másik tönkremeneteli modellt, hátha azért kaptam ilyen eredményt, mert a használt Latham-Cockroft kritérium nem elég pontos vágási folyamatokhoz. Így elkezdtem más tönkremeneteli paramétereket keresni, és a 9. forrásban találtam 7A01-es jelzetű alumíniumra Johnson-Cook paramétereket, melyeket a 8-1. táblázat tartalmaz.

D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0,279	0,783	-3,162	0,021	1,752

8-1. táblázat: Johnson-Cook tönkremeneteli paraméterek 7A01-es alumíniumhoz [9]

Ezenkívül az alakítási szilárdsághoz is a [9]-ből vettem a megfelelő paramétereket. Ezeket az értékét a 8-2. táblázat tartalmazza.

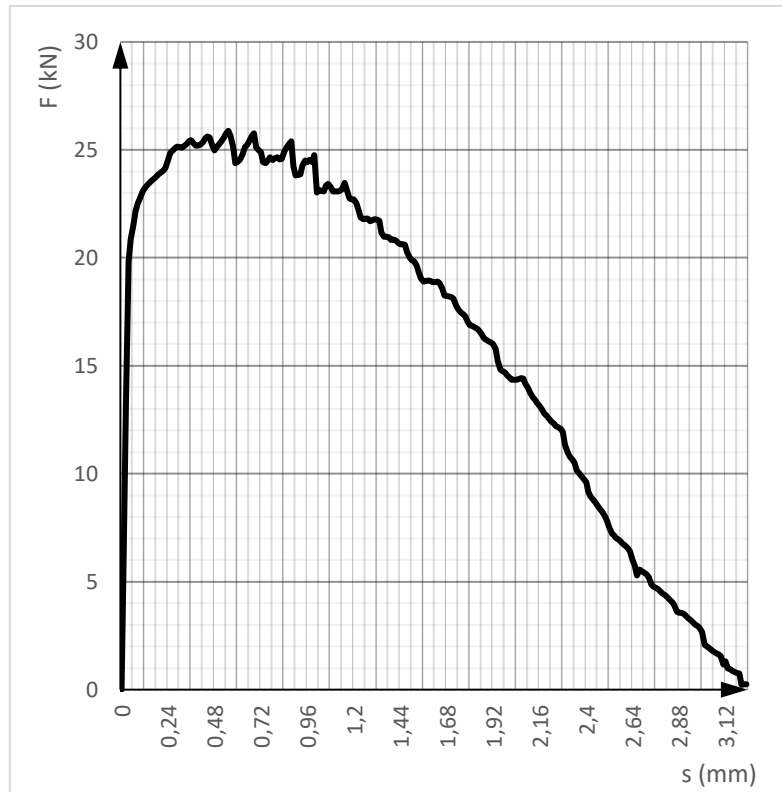
C ₁	C ₂	n
220	94	0,23

8-2. táblázat: 7A01-es alumínium anyagparaméterei [9]

Az alakítási szilárdságot a következő képlettel lehet számolni (lásd (8.1) egyenlet):

$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi^n \quad (8.1)$$

Ezekkel is lefuttattam a szimulációt a Qformban és a 8-1. ábra szerinti görbét kaptam eredményül.

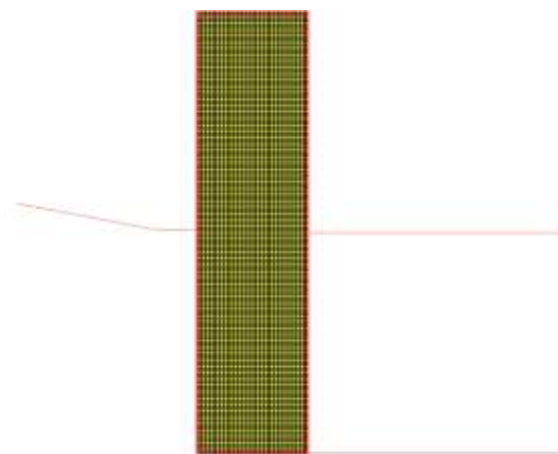


8-1. ábra: Vágóerő-út diagram Johnson-Cook modellel

Ez a görbe nagyban hasonlít az 5-3. ábra grafikonjára. Ezért felmerült a gyanú, hogy a Qform nem számol a tönkremenetel során az anyagdegradációval. Ennek ellenőrzésére készítettem egy újabb szimulációt, amiben nem állítottam be tönkremeneteli modellt. Ezáltal mind alumíniumra, mind acélra ugyanazokat a görbéket kaptam. Így bebizonyosodott, hogy a Qformba épített tönkremenetel csak a tönkremenetel helyének előrejelzésére alkalmas. Ez hasznos funkció például előrefolytatásnál annak vizsgálatára, hogy a folyamat során az anyag külseje megrepedezik-e. A vágásnál, ahol a tönkremenetel biztosan bekövetkezik, a degradációt figyelembe kell venni a számítások során. A Qformos szimulációkban az erőérték azért csökkent, mert csökkent a nyírt keresztmetszet. De nem a repedésterjedés miatt, hanem azért, mert ahogy a bélyeg haladt előre, folyamatosan képlékenyen alakított a lemezt, és a nyírt keresztmetszet csökkenését csak a csökkenő bélyeg és a matrica közötti távolság eredményezte. Ezért nincs a vágóerő-út diagramban határozott leesés. Az, hogy a szimuláció során az anyagban nem alakult ki repedés, bizonyíték arra, hogy a szoftver csak a tönkremenetel helyét képes előrejelezni. Így kijelenthető, hogy a Qform nem alkalmas vágási folyamat szimulálására.

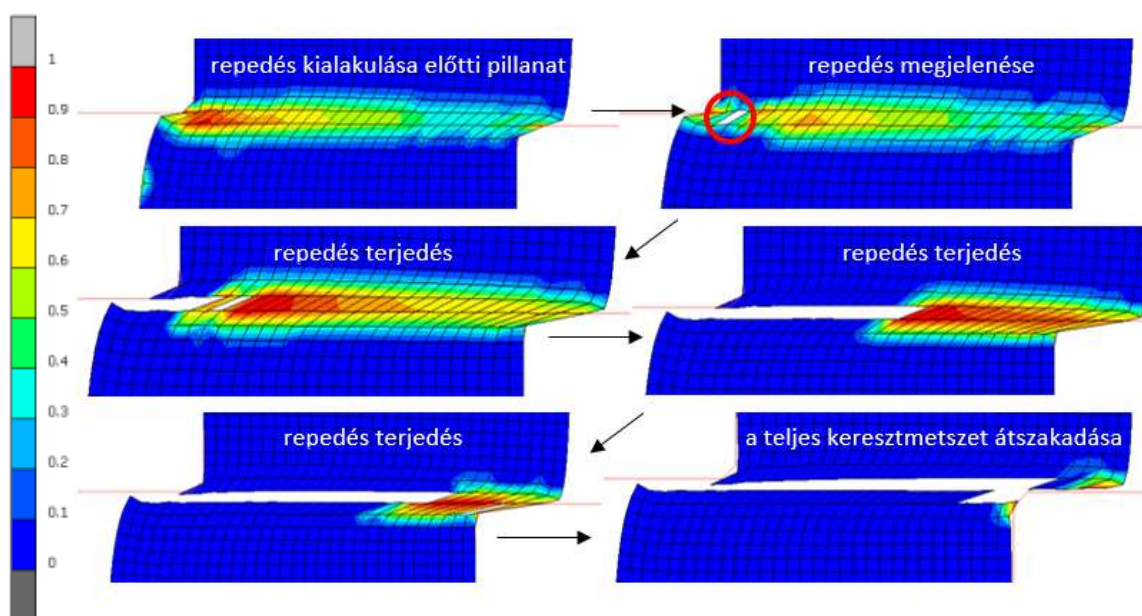
8.2 Az MSC Marc Mentatban kapott eredmények

Miután kiderült, hogy a Qform nem alkalmas a folyamat szimulálására, egy másik programban is elvégeztem a szimulációt. Először egy kis elemszámú modellt hoztam létre, hogy referenciaként szolgáljon, majd ezt a modellt módosítottam. Először egy homogén 0,1 mm-es elemekből álló hálót illesztettem a geometriára (lásd 8-2. ábra):



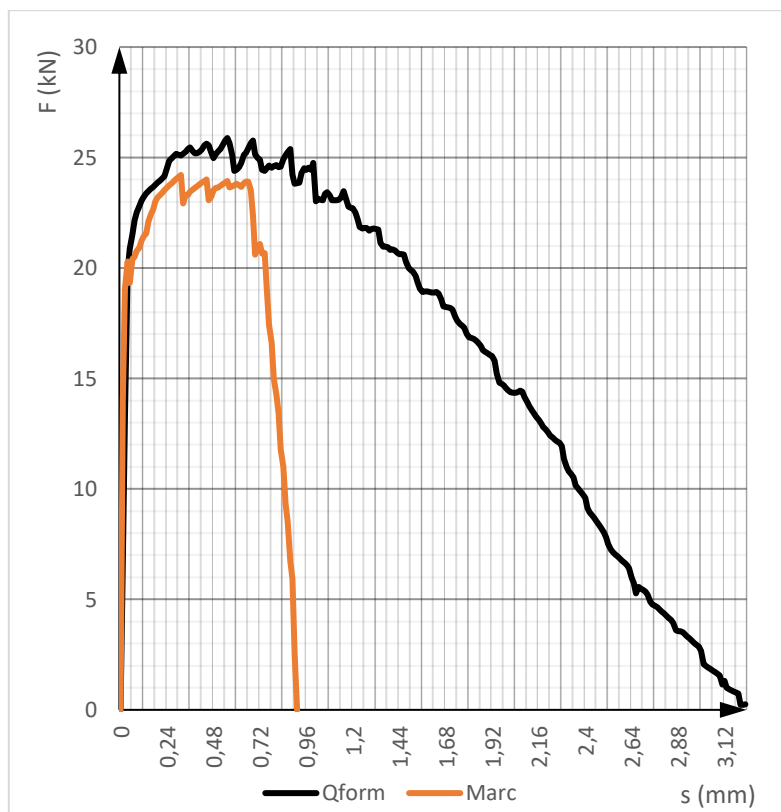
8-2. ábra: Első Marc modell

Ezzel végeztem el az első szimulációkat alumíniumra, a 8-1. táblázat és 8-2. táblázat adatait felhasználva. Az eredményeken egyértelműen látszik, hogy a Marc számolt az anyag tönkremenetelével, és azokat az elemeket ki is vette a szimulációból, amikben a tönkremenetel értéke átlépte a kritikus értéket, így lejátszódott a repedésmegjelenés és repedésterjedés folyamata. Ezt szemlélteti a 8-3. ábra. A színek a tönkremenetel mértékét jelölik.



8-3. ábra: A tönkremeneteli folyamat az első Marc modellben

A vágóerő-út diagramban is látszódik a repedés hatása. A Marc és a Qform szoftverekkel meghatározott vágóerő-út diagramokat a 8-4. ábra mutatja.



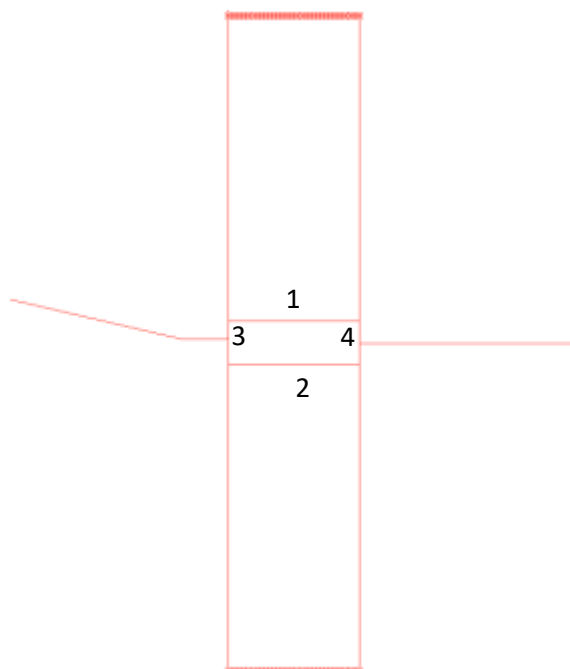
8-4. ábra: Eredmények összehasonlítása

A Marckal számított görbe esése sokkal meredekebb. Ez azért van, mert itt a repedésterjedés miatt nagyobb mértékű a nyírt keresztmetszet csökkenése. Valamint a lemez itt tényleg átszakad és látszódik, hogy már 1 mm-es bélyegelmozdulásnál véget ér a vágási művelet, míg Qformban a folyamatos képlékeny alakításnál csak akkor ér véget, amikor a bélyegelmozdulás következtében teljesen kiszorul az anyag a két szerszámfél közül.

Mivel itt ténylegesen lezajlik egy tönkremeneteli folyamat a maximális erőértékek között is van egy 10%-os eltérés. Ezek az eredmények már jobban hasonlítanak a valósághoz. Mivel ez az elemméret még túlságosan nagy, ezért a következő lépésben létrehoztam egy sűrűbb hálót, hogy pontosítsam az eredményeimet.

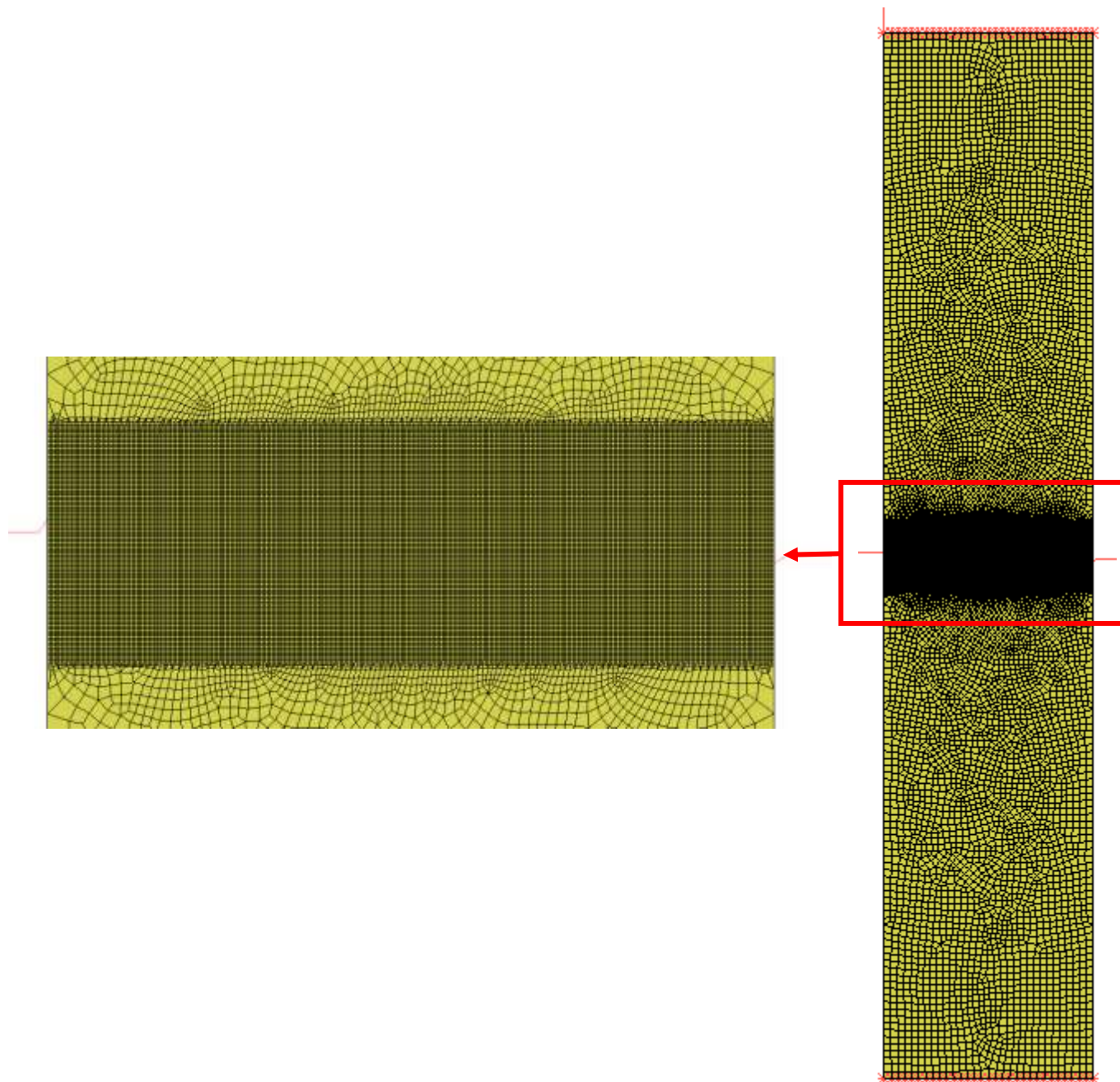
8.2.1 Modelltörténet

Az alábbiakban részletesen bemutatom hogyan építettem fel a végső modelletem. Első lépésben megalkottam egy olyan hálót, ami a nyírt keresztmetszet körül mindkét irányban 0,5-0,5 mm szélességben 0,01 mm-es elemeket tartalmaz. Ehhez szerkesztettem egy 1x3 mm es téglalapot (lásd 8-5. ábra). A számítási kapacitást csökkentendő a téglalapon kívül meghagytam a 0,1 mm-es hálót, mert a folyamat a sűrűbben hálózott részben zajlik, a többi rész hálózása a nyírás modellezése szempontjából kevésbé fontos.



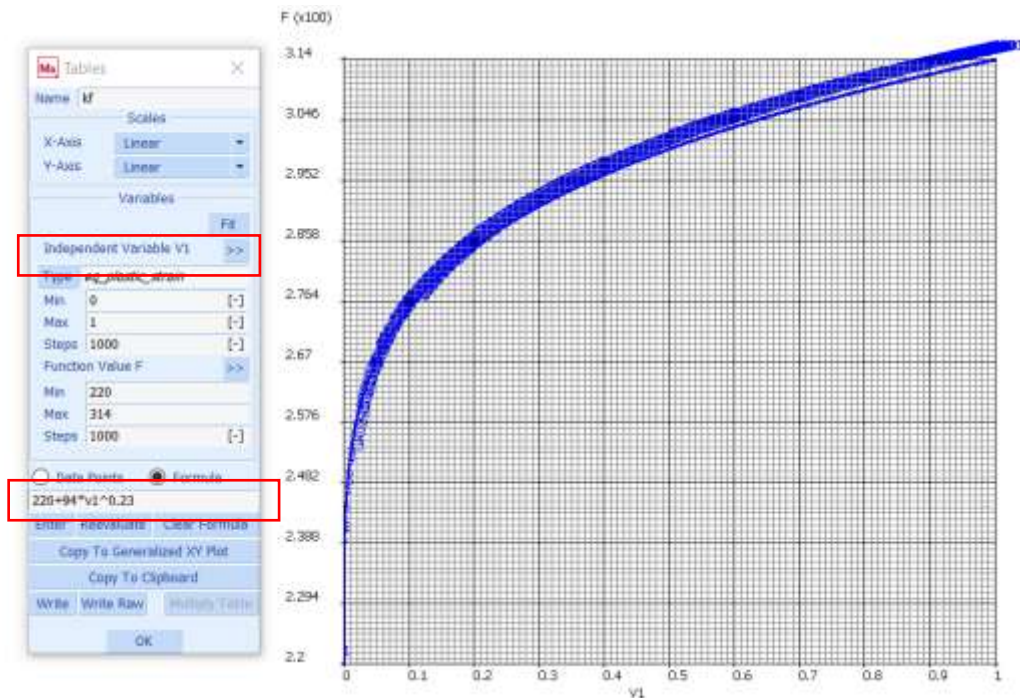
8-5. ábra: Hálózás előkészítése

Ezután az 1-es és 2-es számmal jelölt szakaszokat felosztottam 300-300 egyenlő részre, mert a lemezem 3 mm vastag. A 3-as és 4-es szakaszokat 100-100 részre osztottam fel, mert 1 mm széles területre terjed ki a sűrű hálózás. A felosztást azért csináltam így, mert, ahogyan azt a [2]-ban lévő kutatásban bemutatták ezzel az elemmérettel már jól követhető a valóságban végbemenő folyamat. Ezután a maradék szakaszokat 0,1 mm-e részekre osztottam, majd egy hálót generáltam rá. A kész hálót a 8-6. ábra mutatja.



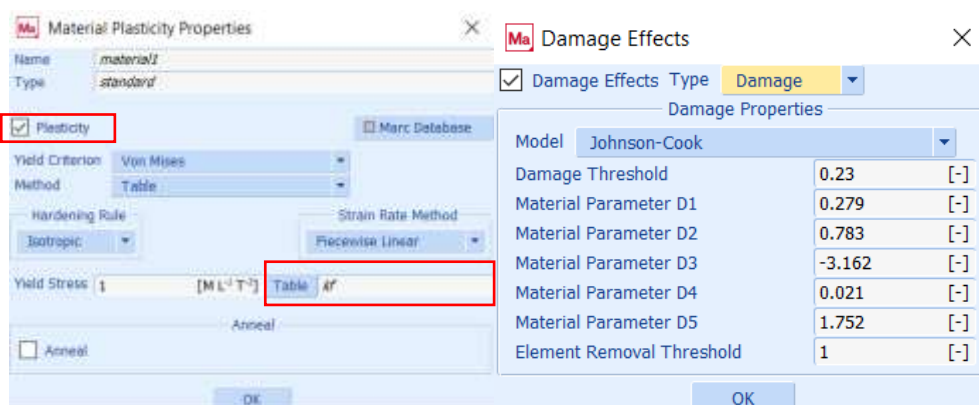
8-6. ábra: A háló kialakítása

Ezután létrehoztam a 7A01-es alumínium anyagparamétereivel az anyag alakítási szilárdság görbéjét, amihez egy egyváltozós „table”-t kellett csinálnom, ahol a független változó az egyenértékű képlékeny alakváltozás (lásd 8-7. ábra).



8-7. ábra: Anyagparaméter létrehozása

Majd létrehoztam egy új „solid geometric”-et és hozzáadtam az összes elemet. Utána generáltam egy új anyagot, amelybe beírtam az alumíniumokra jellemző sűrűséget ($2700 \frac{kg}{m^3}$), rugalmassági moduluszt (70 GPa) és a Poisson-tényezőt (0,33).

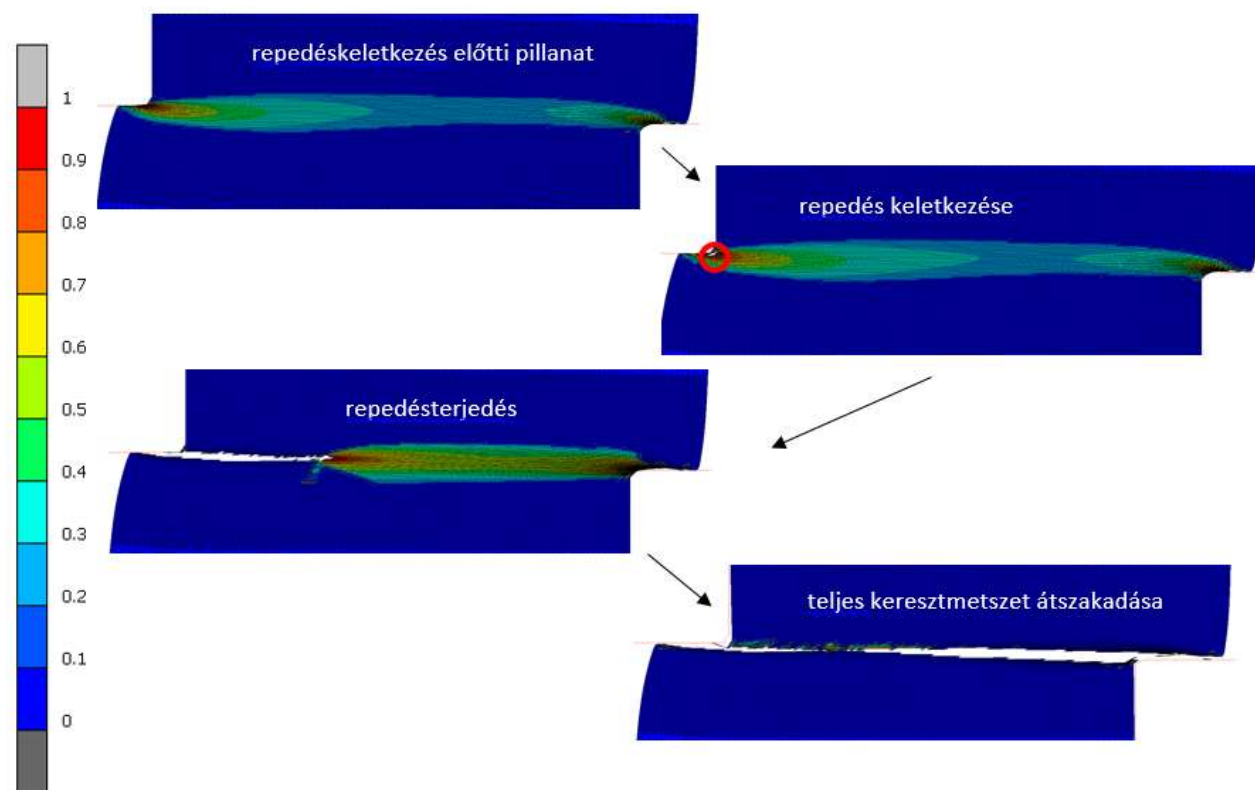


8-8. ábra: Anyagparaméterek beállítása

Ezután megalkottam a 3 „contact body”-t egy „meshed deformable”-t, ami egy deformálható háló, ehhez hozzárendeltem az összes elemet. Majd 2 darab „geometric”-et és az

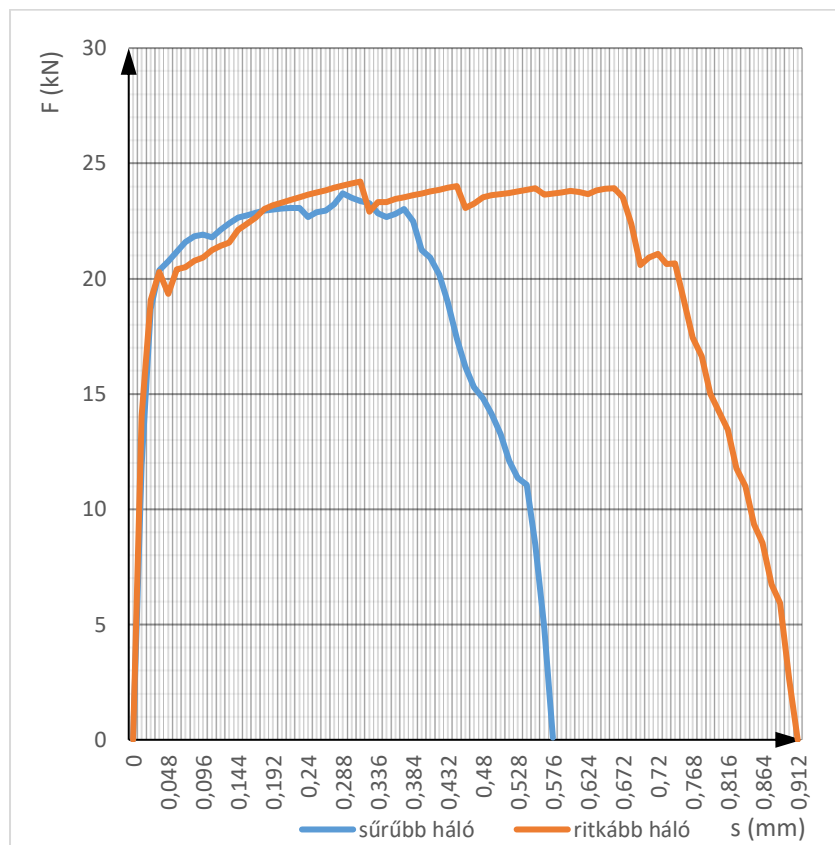
egyikhez hozzárendeltem a bélyeg vonalait, a másikhoz a matricáét. A bélyeg paraméternek beállítottam, hogy 3 mm/s-mal mozogjon. Így definiáltam 3 testet. Ezután egy „contact table”-ben definiáltam, a köztük fentálló kontaktot. Mind a 3-at „touching” kontaktra állítottam, mert a 3 elem csak érintkezik egymással, nincs meggátolva, hogy elmozduljanak egymáson. A lemez is érintkezhet magával az átszakadás után, így aktívnak hagytam a kontaktot saját magával is.

Ezután létrehoztam egy „static loadcase”-t és hozzárendeltem az előbb elkészített „contact table”-t. Beállítottam, hogy 100 ciklus számolást engedjen meg, és 100 visszalépést. Ezenkívül megadtam, hogy a szimuláció 0,6 másodpercig tartson, és 150 lépést számoljon. Majd létrehoztam egy „structural job”-ot, hozzárendeltem ehhez is a „contact table”-t valamint a létrehozott „loadcase”-t. Átállítottam, hogy Lagrange-alakváltozással számoljon. Az eredményben számoljon egyenértékű feszültséget és alakváltozást és írja ki a damage (tönkremenetel) mértékét, valamint az önmagába deformált elemeket deaktiválja. Majd lefuttattam a szimulációt. A tönkremenetel lépéseit a 8-9. ábra mutatja.



8-9. ábra: Tönkremenetel lejátszódása, Marc

A repedésterjedés hasonló, mint a ritkábban hálózott modellnél, így a két vágóerő-út diagramot is összehasonlítom, lásd 8-10. ábra.



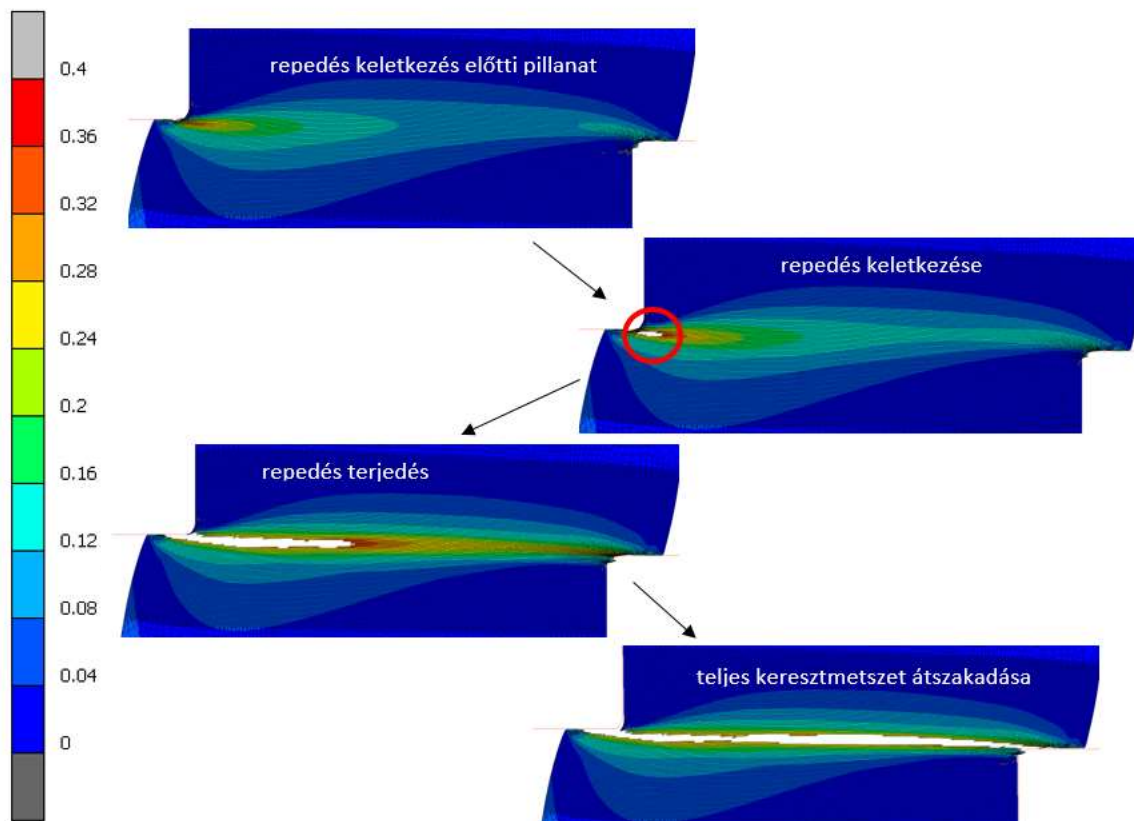
8-10. ábra: A 2 háló összehasonlítása

Ugyanaz a trend alakult ki, mint a 5-4. ábra görbéin megfigyelhető, tehát a sűrűbb hálónál előbb végbemegy a tönkremenetel. Ez abból következhet, hogy a sűrűbb hálóban nagyobb a szerszám élein keletkező feszültségcsúcs. Emiatt egy-két elemen gyorsabban felhalmozódik a tönkremenetel értéke, így előbb jelenik meg a repedés. Amikor megjelenik a repedés, a tönkremenetel felgyorsul, mert a repedéscsúcs is egy feszültséggyűjtő hely. Ezt az igazolja, hogy az erőleesés a két esetben szinte azonos, tehát a két görbe közötti fő különbség, az hogy, a finomabb háló miatt, előbb keletkezik repedés.

Ezenkívül észrevehető, hogy a maximális erőértékek között a két esetben pár százalékos eltérés mutatkozik csak. A [2] forrásra támaszkodva további hálófüggetlenségi vizsgálatot nem végeztem. Úgy ítélt meg a rendelkezésemre álló adatok alapján, elég pontos így a modell.

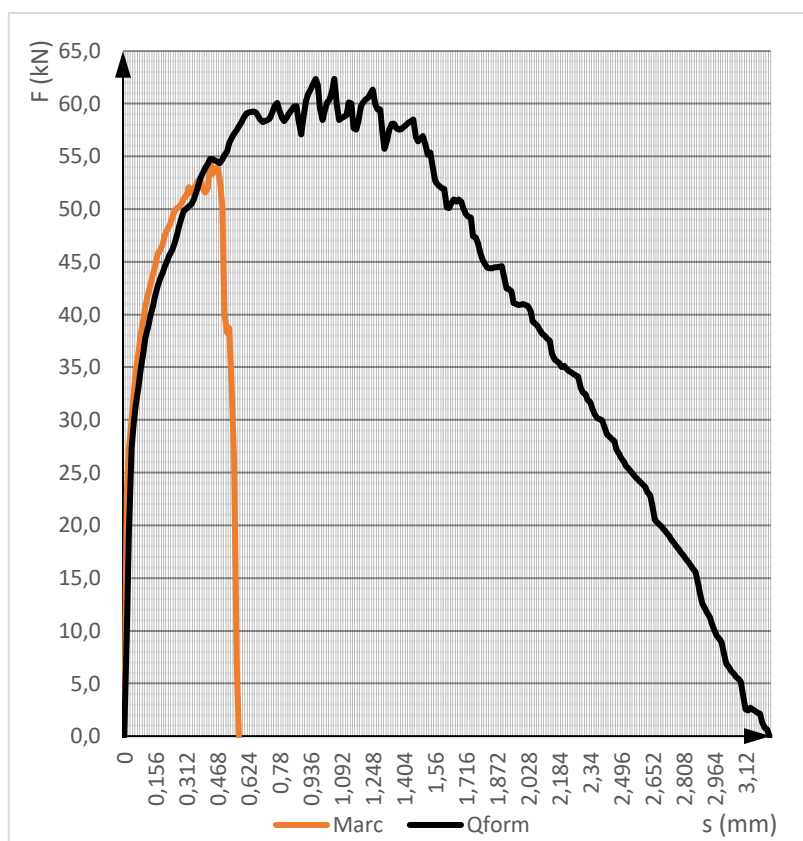
8.2.2 További szimulációk eredményei

Mivel a szerszámot acéllemez vágására terveztem, így a konzulensem – Dr. Szlancsik Attila – által ajánlott Cockroft-Latham paraméterrel ($C_1=0,3$) is lefuttattam a szimulációt S235 acélra. Ennek a számításnak az eredményeit a 8-11. ábra foglalja össze.



8-11. ábra: Tönkremenetel acélban Latham-Cockroft kritérium szerint, Marc

A számított vágóerő-út diagramot összevetettem a Qformban meghatározott eredménnyel - lásd 8-12. ábra. A két diagram – tendenciájában – ugyanazt a különbséget mutatja, mint alumínium esetében. Tehát a tönkremenetel, a Marc modellben már kisebb bélyegelmozdulásnál végbemegy, valamint az erőesés is meredekebb. A maximális erőértékek között itt is 10% különbség figyelhető meg.



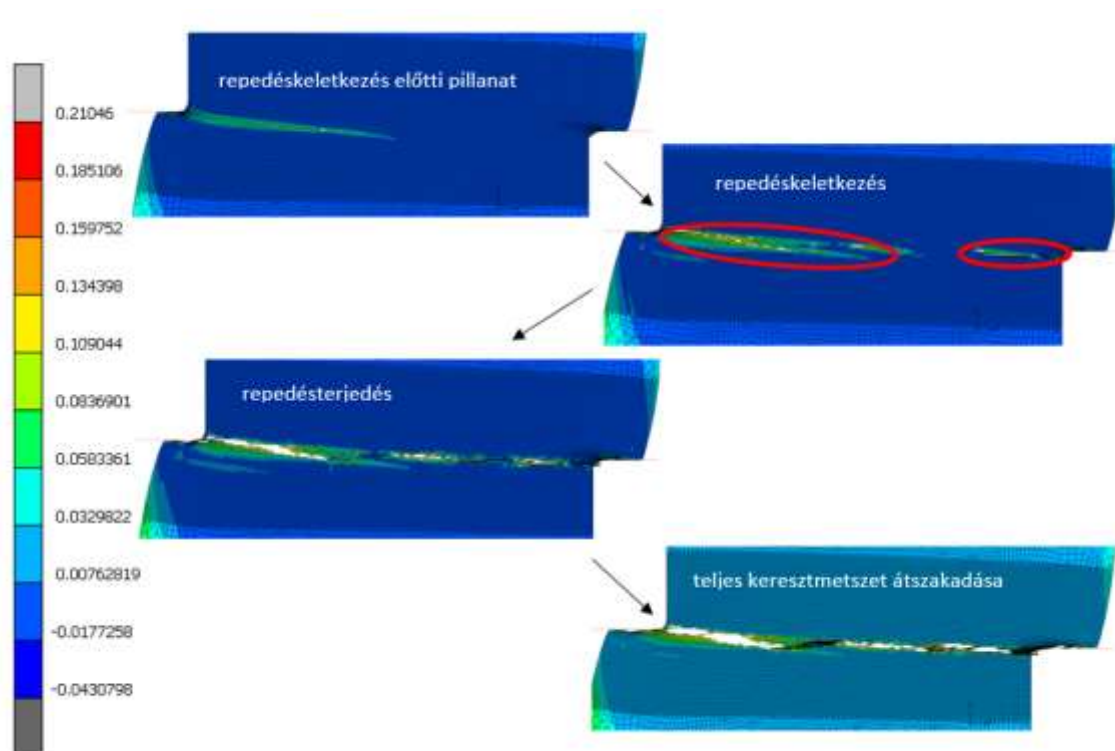
8-12. ábra: Qform és Marc szoftverekkel meghatározott eredmények összehasonlítása acélra próbatestre

Ezután összehasonlításként végeztem egy szimulációt, mert a Cockroft-Latham kritérium nem a legpontosabb tönkremeneteli kritérium. Ezért kerestem Bonora modell paramétereit, amiket a [10] forrásban találtam. A paramétereit a 8-3. táblázat: *Bonora modell paramétereit* tartalmazza.

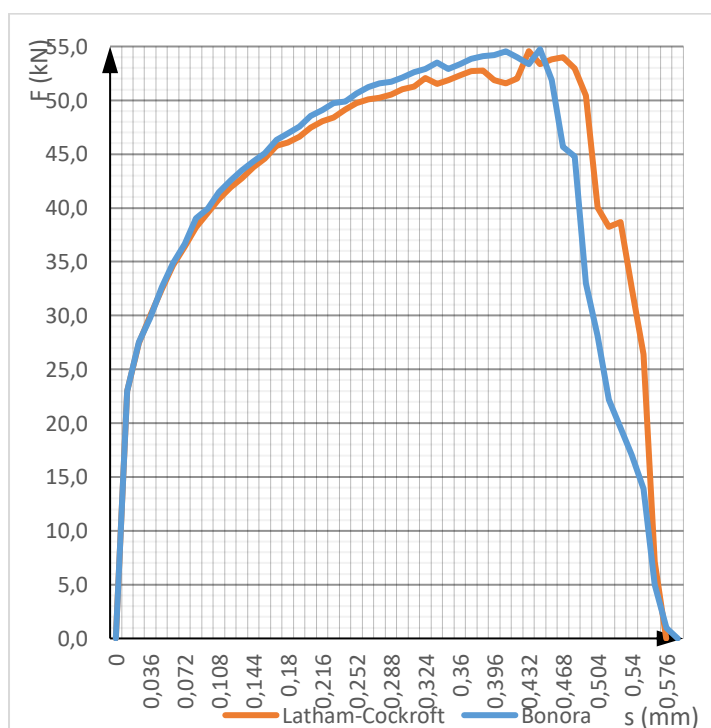
D_{Cr}	ϵ_{th}	ϵ_f	α
0,136	0,001	0,276	0,572

8-3. táblázat: Bonora modell paramétereit [10]

Ezekkel is elvégeztem a szimulációt S235 acél alapanyagra. Az anyag tönkremenetelét a 8-13. ábra, a vágóerő-út diagramot pedig a 8-14. ábra szemlélteti.



8-13. ábra: Tönkremenetel acél alapanyagra Bonora modellel, Marc



8-14. ábra: Vágóerő-út diagram Latham-Cockroft és Bonora modellekre acél alapanyagra, Marc

A vágóerő út diagramok között szinte nincs eltérés. Így már az egyszerűbb tönkremeneteli modellel is ugyanazt az eredményt kapjuk, mint egy összetettebb modellel.

9. Összefoglalás

A dolgozatomban egy kivágási folyamaton keresztül összehasonlítottam két végeselemes programot: a Qformot és az MSC Marc Mentat szoftverét. A vizsgálataim alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

- A Qform szoftvere nem számol a tönkremeneteli folyamat miatt bekövetkező mechanikai változásokkal. A programban nincs értelmezve a repedéskeletkezés és repedésterjedés. Így csak arra alkalmas, hogy megmutassa, hogy a folyamat során bekövetkezik-e az anyag tönkremenetele, és ha igen, hol fog bekövetkezni. Ez technológiai tervezés során nagyon hasznos lehet, ha nem tudjuk eldönteni például előrefolyatásnál, hogy átlépjük-e az alakítás során az anyag tönkremeneteli határát. Azonban vágási művelet szimulálásánál nem szolgáltat a Qformban végzett szimuláció megfelelő eredményt.
- Az MSC Marc Mentatban értelmezett az anyag mechanikai tönkremenetele, a program számol is ezzel. Nyomon követhető a nyírt keresztmetszetben a repedések keletkezése, terjedése és a keresztmetszet teljes átszakadása. Így megfelelő modellel ez a szoftver már alkalmas a folyamat szimulálására.
- A munkám során egy egyszerű tengelyszimmetrikus modellt építettem, majd ezen a modellen végeztem különböző anyagokon különböző tönkremeneteli paraméterekkel vizsgálatokat. Az MSC Marc Mentatban és a Qformban végzett szimulációim eredményeként kapott maximális erőértékek között acélra és alumíniumra is azt kaptam, hogy a Marckal számított maximális erőértékek 10%-kal kisebbek, a tönkremeneteli folyamatok figyelembevétele miatt.
- A szimulációkból látszódik, hogy az elemméret a maximális erőértéket nem befolyásolja számottevő mértékben, viszont a repedés megjelenése kisebb bélyegelmozdulásnál már megtörténik.
- Acél alapanyagra két tönkremeneteli modellt is vizsgáltam. A kettő között nem tapasztaltam értékelhető eltérést. Tehát a vágás szimulálására már a legegyszerűbb modell is jó eredményt szolgáltat.

A vizsgálataim legfontosabb tanulsága az volt, hogy nem szabad már annak örülni, hogy lefut egy szimuláció. A végeselemes szimulációk eredményeit érdemes mindig kritikusan

kezelné. Az, hogy egy végeselemes szimuláció eredménnyel szolgál, nem jelenti azt, hogy az helyes is. Erre nagyon jó példa a Qformban végzett szimulációim. A végeselemes eredményeket mindig alá kell támasztani valós, mért eredményekkel. Azok hiányában segítséget nyújthatnak szakirodalmi adatok – szakcikkek hasonló problémára megadott eredményei –, vagy egy második, független modellen végzett számítás eredményei.

10. További célok

- 1, Szeretnék még olyan szimulációt futtatni, amiben a szerszámterhelést vizsgálom. Szeretném megvizsgálni, hogy a bélyeg és a matrica élein milyen feszültség ébred, illetve mekkora erő kell ahhoz, hogy le tudjuk húzni a szerszámról a rászorult lemezt. Ezeknek az ismereteknek a birtokában már tudok anyagot választani a szerszámhoz és el tudom készíteni a szerszám terveit, ami alapján legyártatják azt.
- 2, Szeretnék végezni a kész szerszámon valós méréseket, ezzel validálva a modelletemet.
- 3, Terveim között szerepel próbatesteket kivágni és azokon szakítóvizsgálatokat végezni. Ezáltal szeretném kimérni a lemez anizotrópiáját, és az anyag Bonora modellhez tartozó tönkremeneteli paramétereit.

11. Felhasznált források

11.1 Irodalomjegyzék

1. forrás: Novák Bence: *Kivágó szerszám tervezése lapos szakító próbatesthez*, 2022
2. forrás: Kerim Isik, Yoshinori Yoshida, Lin Chen, Till Clausmeyer, A. Erman Tekkaya: *Modelling of the blanking process of high-carbon steel using Lemaitre damage model*, 2017
3. forrás: Skriba Zoltán: *Fémek képlékeny alakítása*, Tankönyvkiadó, Budapest 1959
4. forrás: *Alakítástechnika (BMEGEMTBGL1) Lemezvágás előadás diasora*, összeállította Dr. Katula Levente Tamás, 2022
5. forrás: Sergey Stebunov-Andrey Vlasov-Nikolai Biba: *Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion*, Tudományos cikk, 17th International Conference on Metal Forming, 2018
6. forrás :*Alakítótechnológiák elmélete (BMEGEMTNG00) Alakíthatóság, tönkremenetel diasora*, összeállította Dr. Szlancsik Attila, 2022
7. forrás: MSC Marc Mentat, *Manual Vol.A, Theory and User Information*
8. forrás: Renkó József *Qform kurzusáról készült videóanyagok*
9. forrás: Lijun Chang, Shenglin Yuan, Xingyuan Huang, Zhihua Cai: *Determination of Johnson-Cook damage model for 7xxx laminated aluminum alloy and simulation application*, 2022
10. forrás: S.S. Jafari, G.H. Majzoobi, E. Khademi, M. Kashfi: *Development of a new technique for measuring damage accumulation at high strain rates*, 2019

11.2 Ábrajegyzék

5-1. ábra: Korábbi modellkísérlethez meghatározott próbatest kialakítás.....	7
5-2. ábra: Qform szimuláció modellje (jobb oldali kép a feszültségeloszlást mutatja)	8
5-3. ábra: Qform szimuláció vágóerő út diagramja	9
5-4. ábra: Végeselemes szimuláció és valóságban mért eredmények összehasonlítása [2]	9
6-1. ábra: Egy vágási elrendezés, a „Z” méret mutatja a vágórést.....	11
6-2. ábra: A kialakuló zónák a vágás során	12
6-3. ábra: Vágóerő-út diagram [4]	12
6-4. ábra: A rugalmassági modulusz csökkenése szakítóvizsgálat közben [6. forrás]	15
7-1. ábra: Különböző hálósűrűségű végeselemes háló lemezvágás modellezéshez [2]	17
8-1. ábra: Vágóerő-út diagram Johnson-Cook modellel	22
8-2. ábra: Első Marc modell	23
8-3. ábra: A tönkremeneteli folyamat az első Marc modellben	23
8-4. ábra: Eredmények összehasonlítása	24

8-5. ábra: Hálózás előkészítése.....	25
8-6. ábra: A háló kialakítása.....	26
8-7. ábra: Anyagparaméter létrehozása	27
8-8. ábra: Anyagparaméterek beállítása.....	27
8-9. ábra: Tönkremenetel lejátsszódása, Marc	28
8-10. ábra: A 2 háló összehasonlítása.....	29
8-11. ábra: Tönkremenetel acélban Latham-Cockroft kritérium szerint, Marc	30
8-12. ábra: Qform és Marc szoftverekkel meghatározott eredmények összehasonlítása acélra próbatestre.....	31
8-13. ábra: Tönkremenetel acél alapanyagra Bonora modellel, Marc	32
8-14. ábra: Vágóerő-út diagram Latham-Cockroft és Bonora modellre acél alapanyagra, Marc	32