

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI- ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET

TDK DOLGOZAT

**Károsodási paraméterek meghatározása small punch vizsgálat és numerikus szimuláció
segítségével**

KÉSZÍTETTE:

Kulcsár Benedek

vegyipari gépész mesterszakos hallgató

KONZULENSEK:

Pusztai-Spisák Bernadett

tanársegéd

Juhász-Erdei Réka

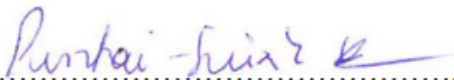
tudományos munkatárs

Miskolc, 2023.

A konzulensek nyilatkozatai

Alulírott, Pusztai-Spisák Bernadett a Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetének oktatója a „Károsodási paraméterek meghatározása small punch vizsgálat és numerikus szimuláció segítségével” című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2023.11.07.


.....
a konzulens aláírása

Alulírott, Juhász-Erdei Réka a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. tudományos munkatársa a „Károsodási paraméterek meghatározása small punch vizsgálat és numerikus szimuláció segítségével” című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2023.11.07.


.....
a konzulens aláírása

Eredetiség nyilatkozat

"Alulírott Kulcsár Benedek, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2023.11.07.



.....
a hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Térmaterületi bevezetés.....	7
2.1. A small punch vizsgálat bemutatása.....	7
2.2. A small punch vizsgálat szabványosítása	11
2.3. Korábbi kutatások.....	12
2.3.1. Anyagtulajdonságok meghatározása SP vizsgálatból	13
2.3.2. SP vizsgálatok számítógépes kutatása.....	14
2.3.3. A károsodási paraméterekkel kapcsolatos kutatások	15
2.3.4. Az irodalomkutatás összegzése	16
2.4. Károsodási paraméterek ismertetése	16
3. Mérés.....	18
3.1. A folyásgörbe meghatározása.....	19
3.2. A small punch vizsgálat kivitelezése	21
4. Szimuláció felépítése	24
4.1. Szimulációs modell.....	24
4.2. GTN paraméterek meghatározása	29
5. Szimulációs eredmények	30
6. Összefoglalás	34
7. Summary	35
Köszönetnyilvánítás	37
Felhasznált irodalom	38

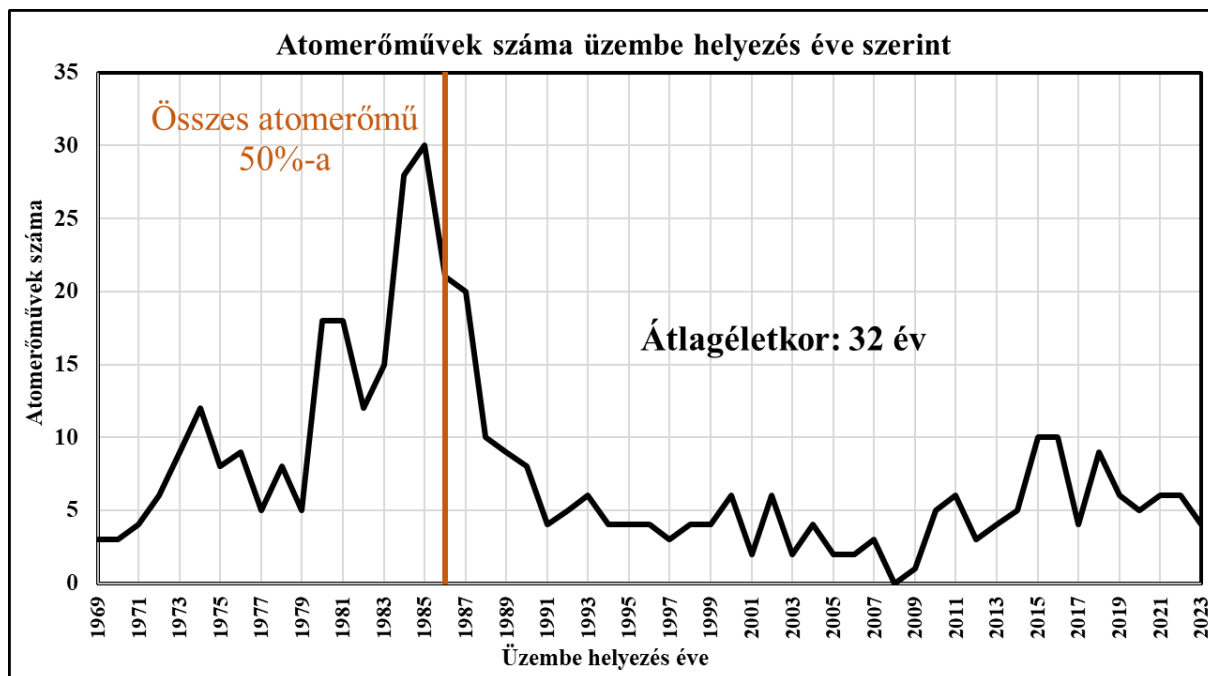
1. Bevezetés

Napjaink mérnöki feladatai speciális igénybevételeknek teszik ki a tervezett szerkezeteket. A különleges iparágak egyedi feladatai olyan alapanyagokat igényelnek, amelyek minden tekintetben megfelelnek a felhasználó elvárásainak. Ezeknek a követelményeknek való megfelelést minden esetben az anyagra jellemző paraméterekkel lehet ellenőrizni. Az anyagparaméterek mechanikai anyagvizsgálatok segítségével határozhatóak meg, amelyek kivitelezésére és fejlesztésére már évszázadok óta nagy figyelmet fordítottak. Így tett Leonardo da Vinci is, amikor szerkezetet tervezett különböző hosszúságú és vastagságú drótok szakítószilárdságának meghatározására, ezzel megalkotva az első szakítóvizsgálati eljárást [1]. Az anyagok keménységének meghatározását már a 18. században is fontosnak tartották, amikor 1722-ben Réaumur francia tudós kifejlesztette a karcolásos anyagvizsgálatot [2]. A vizsgálat során egy változó keménységű rúd felületét karcolták fel a vizsgált anyaggal, amely a sajátjával megegyező keménységig hagyott nyomot a rúd felületén. Az első széleskörűen elfogadott és szabványosított keménységmérési eljárás Johan August Brinell nevéhez kötődik, aki 1900-ban megalkotta a mai napig használatos edzett acél golyóval végzett vizsgálatot [3]. Ezek az anyagvizsgálati módszerek jelentős mennyiségű alapanyagot igényelnek az eredmények meghatározásához. Ez a probléma az idő előrehaladtával növelte az eljárások korszerűsítése és a roncsolásmentes anyagvizsgálatok iránti érdeklődést. A korábbi anyagvizsgálati módszerek fejlesztése mellett a technológia innovációja segítette a kutatókat új módszerek megalkotásában. Ilyen új eljárás a small punch (SP) vizsgálat is, amelynek kezdeti verzióját az amerikai Massachusetts Institute of Technology (MIT) egyetemen dolgozták ki. Az 1980-as években Manahan doktori disszertációjában fejtette ki az akkor még „kisméretű lemez hajlító vizsgálatnak” nevezett anyagvizsgálati módszer hátterét és működési mechanikáját [4]. Ennek az anyagvizsgálati módszernek a megalkotását ösztönözte az atomreaktorok számának növekedése. Az ilyen szerkezetek működésük során fokozott hő- és sugárterhelésnek vannak kitéve, vizsgálatuk pedig körülményes a radioaktivitás miatt. Ennek a problémának az egyik megoldása lehet a small punch vizsgálat. A vizsgálati módszer fejlesztése azonban a mai napig fontos feladata a kutatóknak a módszer speciális alkalmazhatósági lehetőségei miatt. Az eljárás iránti növekvő érdeklődést a 2006-ban a témában megjelent műhelymegállapodás váltotta ki, amely új kutatási területeket vetett fel a módszer szabványosításával összefüggésben. Az első szabvány a small punch vizsgálatról 2020-ban, a legújabb változat pedig 2021-ben jelent meg.

Az anyagvizsgálati eljárások fejlesztése kiemelten fontos feladat, mivel így növelhető az általuk meghatározható anyagi paraméterek pontossága. Emellett egyre több adat nyerhető ki,

minimális anyagfelhasználás mellett. A modern számítógépes technológia használatával napjainkban az anyagvizsgálati módszerek tökéletesítése új kihívások elé állítja a kutatókat. Ahhoz, hogy a modern szimulációs és numerikus számítási programok eredményeiből jó következtetéseket lehessen levonni, a vizsgálni kívánt mechanizmusokat meg kell érteni, és a valóságnak megfelelően kell definiálni a programok számára. Ezek mellett meg kell találni a számítások eredményeit befolyásoló tényezőket, és ezek működését a szabványosítás megkönnyítése végett.

A 21. század mérnöki feladatai nem csak új szerkezetek tervezésére korlátozódnak. A már megépített, öregedő mérnöki szerkezetek legalább ugyanannyi, ha nem több figyelmet igényelnek. Az Egyesült Államok közlekedési minisztériumának adatai szerint az általuk épített mintegy 600.000 híd közel 40%-a 50 évesnél is idősebb, továbbá 15%-a 40 és 49 év közötti szerkezet [5]. Egy másik, üzemelési biztonság szempontjából kiemelt területet megfigyelve, az atomerőművek életkorának az eloszlásán is hasonló figyelhető meg. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) adatai alapján a világon épített, és jelenleg is működő atomerőművek fele legalább 38 éve üzemel [6]. A teljes üzemelő atomerőmű állomány átlagéletkora pedig 32 év. Az üzembe helyezett atomerőművek száma az üzembe helyezés évének függvényében az 1. ábrán figyelhető meg.



1. ábra. Atomerőművek száma az üzembe helyezés évének függvényében [6]

Az öregedő szerkezetek karbantartásához elengedhetetlen a felhasznált anyagok mechanikai tulajdonságainak ismerete. Ezek az információk hozzájárulnak a szerkezetek várható

élettartamának becsléséhez is, mivel az anyagtulajdonságok monitorozása lehetővé teszi az öregedési folyamatok matematikai módszerekkel történő leírását is. A szerkezetek rendszeres és precíz karbantartása hosszú várható élettartamot eredményez. Azokban az iparágakban, amelyeknél a kivitelezési költség magas, és az építési idő is jelentős, az élettartam növelése gazdaságosabbá teszi az üzemeltetést. Azonban a legfontosabb érv a szerkezetek változásainak vizsgálata mellett a biztonságos működtetés garanciája, valamint a meghibásodások előre jelezhetősége.

A dolgozatom középpontjába a már említett SP vizsgálatot helyezem. A témában végzett irodalomkutatásom alapján, amelyet a 2.3 fejezet tartalmaz, számos kevésbé, vagy egyáltalán nem kutatott téma van az anyagvizsgálati módszerrel kapcsolatban. Ilyen téma a próbatestek mérethatásának vizsgálata, a próbatestek alakjának jelentősége vagy az anyagokra jellemző károsodási paraméterek meghatározása és alkalmazása. Ebben a dolgozatban ezek közül a károsodási paraméterek meghatározásával foglalkozok részletesebben. A dolgozatom célja, hogy meghatározzam egy adott anyagra jellemző Gurson-Tvergaard-Needleman-féle (GTN) károsodási paramétereket. Hagyományosan ezek bemetszéssel rendelkező, egytengelyű, hengeres szakítópróbatestekből adhatók meg mérések és numerikus számítások segítségével. A dolgozatomban annak a lehetőségét vizsgáltam meg, hogy ezen értékek meghatározhatók-e small punch vizsgálat segítségével. Ehhez a szimulációkhoz szükséges anyagi jellemzőket szakítóvizsgálat eredményeiből nyertem ki, majd ezt követően az anyagra jellemző GTN paramétereket a small punch próbatesteken elvégzett vizsgálatok és numerikus számítások segítségével állapítom meg.

2. Téma területi bevezetés

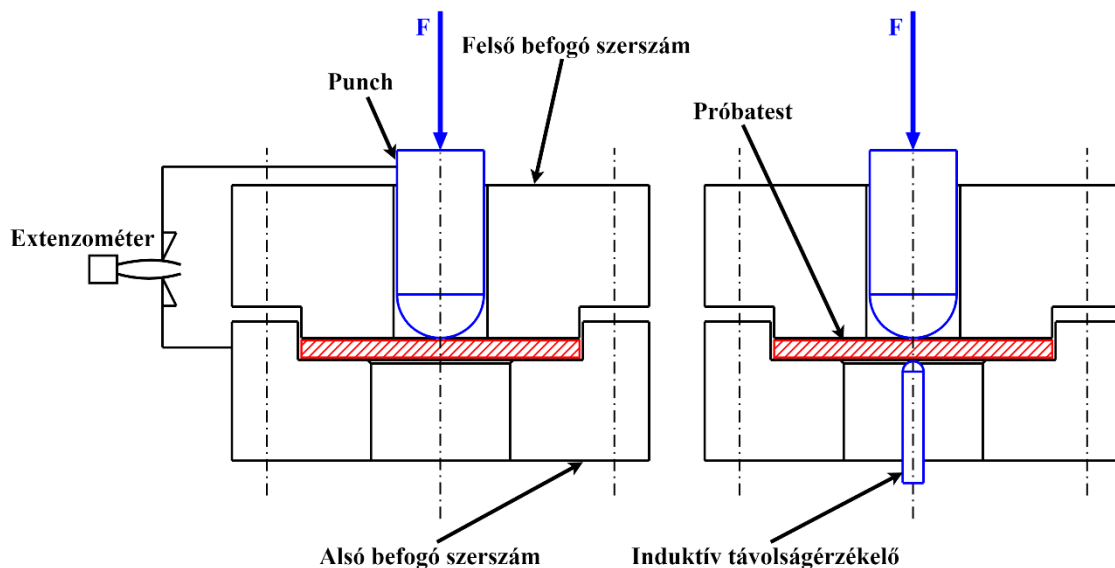
2.1. A small punch vizsgálat bemutatása

Az SP vizsgálat egy anyagvizsgálati módszer, amely során számos mechanikai tulajdonság határozható meg kis méretű próbatestek felhasználásával. Az eljárás alkalmazása különösen kedvező olyan iparágakban, ahol az alkatrészek vizsgálatát működés közben kell elvégezni (például nukleáris vagy petrokémiai berendezések) vagy nagyon kevés alapanyag áll rendelkezésre az anyagvizsgálatok elvégzéséhez (fejlesztés alatt álló repülőgép motorok, turbina ház alkatrészek alapanyagai) [7] [8] [9]. Emellett a vizsgálat lehetőséget ad anizotróp viselkedést mutató anyagrészek, például a hegesztett kötések vizsgálatára is [10]. Az eljárást a roncsolásmentes vizsgálatok csoportjába sorolják, mivel a felhasználni kívánt minták kimunkálása nem befolyásolja a szerkezet integritását [11]. Magyarországon ennek a vizsgálati

módszernek még nincs hagyománya, így magyar terminológia sincs még erre az eljárásra. A dolgozat folyamán ebből kifolyólag az angol megnevezéssel hivatkozom az anyagvizsgálati módszerre és a vizsgálati berendezés egyes elemeire.

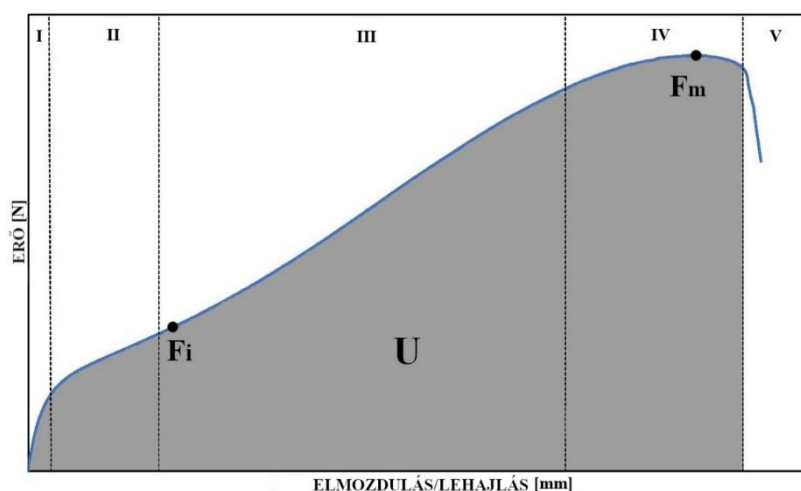
Az SP vizsgálatot általában egy kör alakú próbatesten végzik el. Indokolt esetben a vizsgálat elvégezhető más formájú próbatesten is, ha a próbatest aktív része kör alakú, valamint az összeszorított rész legalább akkora területű, mint amekkora a szabványban fel van tüntetve. Az EN 10371-es szabvány két próbatest méretet különböztet meg: a „miniature”, azaz miniatűr 3 mm átmérőjűt, illetve a „standard”, azaz sztenderd 8 mm átmérőjűt [12]. A próbatesteket egy abrazív szemcsékkel bevont élű hengeres vágófejjel munkálják ki a szerkezetből. A kimunkált anyag körülbelül 25 mm átmérőjű és 4 mm vastag [13]. A kivágott anyagból akár 12 darab SP próbatest is készíthető. A felületi érdesség hatásának elkerülése érdekében a próbatestet a kívánt vastagságtól 0,1 mm-rel vastagabbra kell munkálni, majd egy előre meghatározott csiszolópapír sorozat segítségével kell a megfelelő vastagságra csiszolni. Minden esetben a próbatestnek legalább 5 szemcsét kell tartalmaznia vastagság irányban, de ez alól kivételt képeznek a durvaszemcsés anyagok, az egykristályok és az irányított kristályosítással létrehozott anyagok.

A mintát egy befogó szerkezetbe helyezik, majd a befogószerkezet közepén elhelyezkedő furaton keresztül egy szferikus végű rúddal terhelik a felületét. Alternatív esetben megengedett sík végű rúd használata, amely végére a rúddal azonos átmérőjű acélgolyót helyeznek. A vizsgálatot két módon lehet végrehajtani: állandó nagyságú terhelés ráadásával, valamint a gép fejének állandó elmozdulási sebessége mellett. A vizsgálat eredménye a kivitelezéstől függ. A gép fejének állandó sebességű elmozdulása során ezzel szemben egy erő-elmozdulás függvény az eredmény, amelyből a próbatest anyagának rugalmas és képlékeny tulajdonságai nyerhetők ki [14]. Az állandó terhelési nagyságú esetben egy elmozdulás-idő függvény az eredmény, amely a vizsgált anyag kúszási tulajdonságainak meghatározását teszi lehetővé. A dolgozat további részében azzal az esettel foglalkozom, amely során a mérő berendezés fejét állandó sebességgel mozgatjuk. Az eredmények rögzítésének is több módja van. A vizsgálat során mérhető a próbatest lehajlása egy induktív távolságérzékelő segítségével közvetlenül a próbatest aljánál vagy alternatív esetben rögzíthető a mérő berendezés fejének elmozdulása is. A szabvány mindkét módszert megengedi, de előnyben részesíti a lehajlás mérését. Az alábbi 2. ábra ezt a két mérési elrendezést szemlélteti.



2. ábra. Az SP vizsgálat konfigurációja

A vizsgálatok eredményeit jelentő erő-lehajlás görbéket öt nagyobb szakaszra lehet osztani: rugalmas hajlítás (I), képlékeny hajlítás (II), membrán nyúlás (III), rugalmas instabilitás (IV) [15]. A próbatest tönkremenetele az utolsó ötödik szakaszban (V) történik meg. Az egyes szakaszokhoz különböző erő és lehajlás értékek rendelhetők, amelyek az alapját jelentik további számításoknak. Ezek a számítások teszik lehetővé, hogy az SP vizsgálat eredményéből a hagyományos szakítóvizsgálattal összehasonlítható anyagi jellemzőket határozzunk meg. Az első, illetve második szakasz határánál határozható meg az az erő, amely a rugalmas-képlékeny átmenethez tartozik. Ennek az erőnek a segítségével később az anyag folyáshatára határozható meg. Az ábra harmadik szakaszában F_i , a negyedik szakaszban pedig F_m erő határozható meg, amelyek a szakítószilárdság meghatározásához szükségesek. Ezek a szakaszok a 3. ábra görbéjén láthatóak.



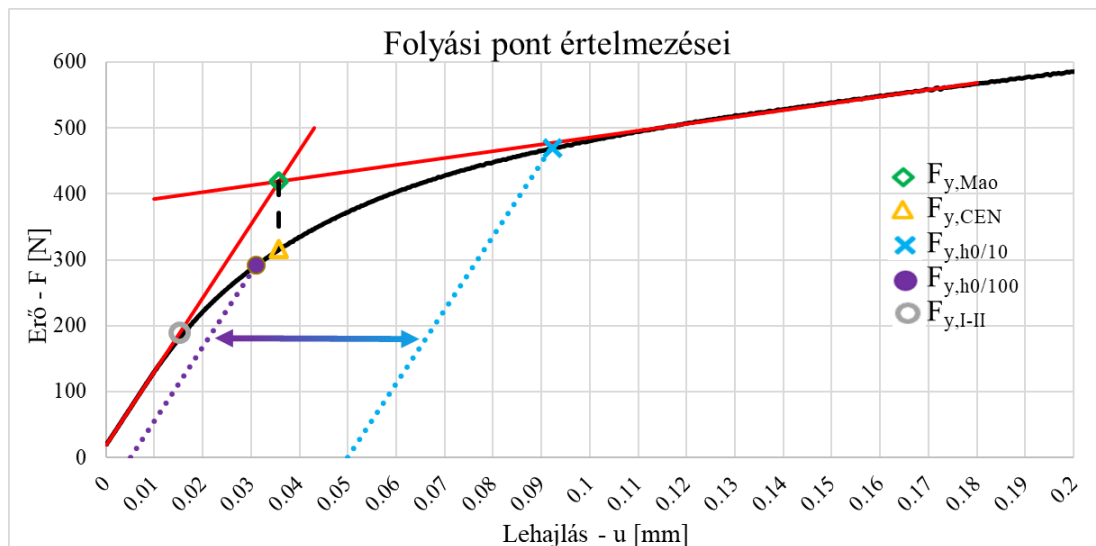
3. ábra. Az SP vizsgálat eredménye és jellegzetes tartományai

A vizsgálat elvégezhető a környezetinél magasabb, illetve alacsonyabb hőmérsékleten is. Az általam használt EN 10371 szabvány a kriogenikus (-150°C alatti) hőmérsékletektől egészen 1100°C feletti hőmérsékletekig engedélyezi a vizsgálat kivitelezését. Fontos, hogy alacsony hőmérsékleti tartományokban a vizsgálatot ne befolyásolja az esetleges jégképződés. A magas hőmérsékleti tartományokban a vizsgáló berendezés oxidációnak való ellenállása a szabvány elvárása. A tényleges vizsgálati hőmérséklet mérése elengedhetetlen a teszt helyes kiértékeléséhez. A hőmérséklet mérését a próbatest aljához érintett kerámia hőelem segítségével kell elvégezni.

A folyáshatárhoz tartozó erő és lehajlás értékének meghatározásához több megközelítést is használtak az elmúlt évtizedekben. Az alábbi jelöléseket rendelik az egyes értelmezésekhez:

- $F_{y,Mao}$
- $F_{y,h0/10}$
- $F_{y,h0/100}$
- $F_{y,CEN}$
- $F_{y,I-II}$

Ezekhez a jelölésekhez tartozó értelmezések elhelyezkedését az erő-elmozdulás görbéhez képest a 4. ábra mutatja be. A legelterjedtebb módszer Mao és Takahashi nevéhez fűződik, akik az erő-lehajlás görbe első és második szakaszára illesztett egyenesek metszéspontjához rendelték a folyáshatárhoz tartozó erő értékét ($F_{y,Mao}$). Az általam használt EN 10371-es szabvány is ezt az értelmezést részesíti előnyben. Egy másik megközelítés a görbe első szakaszával azonos meredekségű egyenes rajzolása az eredeti h_0 vastagság 1/100-ad és 1/10-ed értéke között ($F_{y,h0/10}$ és $F_{y,h0/100}$). Ebben az esetben a ferde egyenes metszéspontja az eredeti görbével adja a keresett pontot [16]. Mao és Takahashi módszerére alapozva a későbbiekben egy új módszert is definiáltak a folyási pont megkeresésére. A két illesztett egyenest a minimális négyzetösszegek módszerével a lehető legjobban közelítették az eredeti görbéhez, majd a metszéspontjukat függőlegesen levetítették az erő-lehajlás görbére ($F_{y,CEN}$). Ezek mellett egyes esetekben a görbe első és második szakaszának határára helyezték el az anyag folyáshatárára jellemző erő értéket ($F_{y,I-II}$). A leggyakrabban használt folyáshatár értelmezéseket az alábbi 4. ábra mutatja be.



4. ábra. A small punch vizsgálatból nyert folyáshatárhoz tartozó erő értelmezései

2.2. A small punch vizsgálat szabványosítása

A small punch vizsgálat szabványosítása napjainkban a témával foglalkozó szakemberek egyik legfontosabb feladata. A szabályozás története 2006-ig nyúlik vissza, mivel ekkor jelent meg az első műhelymegállapodás, amelyet az Európai Szabványügyi Bizottság (CEN) adott ki. Ezt a dokumentumot referenciának hozták létre a későbbi szabványosítás elősegítése végett. A CWA 15627-es szabványnak két verziója van: a 2006-ban kiadott és a 2007-ben megjelent változat. Az újabb verzió csak egy javított kiadása az első műhelymegállapodásnak, nincs többlettartalma. Az európai megközelítés mellett létrejött a kínai GB/T 29459 szabvány is. A későbbiekben ezekre a dokumentumokra épülően megjelent az első nemzetközileg elfogadott szabvány az ASTM amerikai anyagvizsgálattal foglalkozó társaság kiadásában 2020-ban E3205-20 néven [17]. Ezt követően 2021-ben az Európai Szabványügyi Bizottság kiadta az első szabványát a témában EN 10371 hivatkozási számon, amelyre több európai nemzeti szabvány is épült. A különböző szabványokban nagy hasonlóság fedezhető fel, mivel hivatkozási alapként szinte az összes az európai műhelymegállapodás gyakorlataira épít. Ebben a dolgozatban az EN 10371-es szabvány alapján dolgoztam, így ezt fogom részletesebben is bemutatni. Az említett szabvány összefoglalja a small punch vizsgálatokkal kapcsolatos legfontosabb részleteket. Azért esett erre a szabványra a választásom, mivel sok hasonló kutatási munkában erre a szabványra hivatkoznak. Emellett lényegi különbség, hogy az amerikai szabvány csak a sztenderd 8 mm átmérőjű próbatestet említi meg, míg az európai előírás megkülönböztet miniatűr próbatesteket is 3 mm átmérővel. A próbatestek megkülönböztetése mellett érdemes kiemelni, hogy az amerikai szabvány a próbatestek elvárt felületi érdessége mellett az alsó befogó szerszám, illetve a mozgó fejnek, vagyis a „punch”

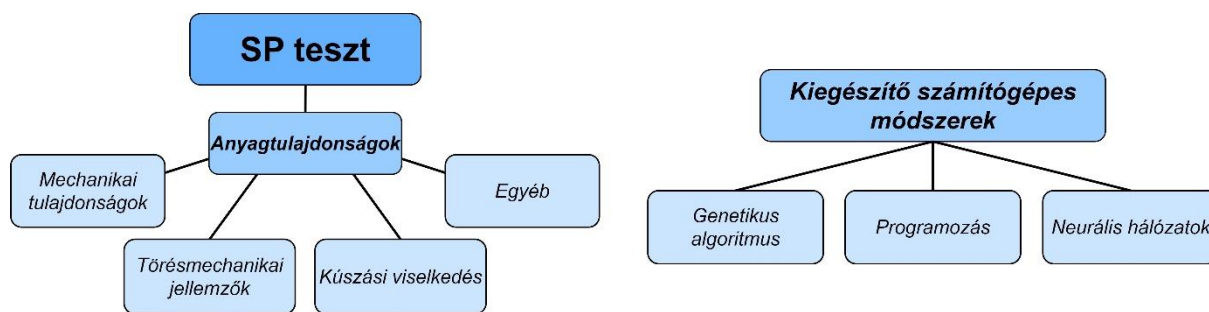
felületének elvárt érdességét is feltűnteti. Különbség lelhető fel továbbá a két szabvány között a befogó szerszám méreteinek meghatározásában. Az európai szabvány az alsó befogó szerszám bemeneti nyílását letöréssel látja el, míg az amerikai szabvány lekerekítést használ. Ennek azért van jelentősége, mivel több kutatás is kimutatta, hogy a letörés vagy lekerekítés geometriája nagy jelentőséggel bír az eredmények szempontjából. A kiértékelésnél is található különbség a szabványok között: az amerikai szabvány csak egyféle kiértékelési módot mutat be, míg az európai szabvány alkalmazza a „bilinear” vagyis két egyeneses, valamint a „trilinear” három egyeneses módszert is. Az amerikai szabvány emellett definiálja a tönkremenetelhez tartozó erő értéket is, amelyet az európai szabvány nem határoz meg. Mindezek mellett a szabványok különböző módokon értelmezik a folyáshatárhoz tartozó erő értékét is. Az európai szabvány a két vagy három egyeneses módszer alapján a görbére illesztett egyenesek metszéspontjához tartozó elmozdulás és erő értéket veszik alapul a további számításokban. Ezzel szemben az amerikai szabvány az egyenesek metszéspontjának elmozdulásához tartozó lehajlás-erő függvény értékét használják fel alapadatként.

A szabványok azonban hiányosságokkal küzdenek, amelyek mielőbbi megoldásra várnak. Ilyen hiányosságok az európai EN 10371 szabványban az eredmények kiértékelésénél az ismert anyagi paraméterek meghatározásához használt korrelációs együtthatók. Az első eltérés a két szabvány között, hogy az európai értelmezésben ezek az együtthatók anyagfüggetlenek, viszont az ASTM szabvány szerint minden anyagnak más a korrelációs faktora [17]. A korrelációs együtthatók értékét szakítószilárdság meghatározásánál a szabvány megadja mindkét szabványos próbatest méret esetén, azonban a folyáshatár meghatározásához még nem definiáltak együtthatót a 3 mm átmérőjű próbatestekhez. Ezek mellett a megadott együtthatók alkalmazhatósági területei sem konkrétak, a vizsgált alapanyag tekintetében. Ez azt eredményezi, hogy az SP teszt során meghatározott anyagi paraméterek kis mértékben eltérnek a hagyományos szakítóvizsgálattal meghatározott értékektől. Az európai szabvány nem határozza meg a „punch” elvárt felületi minőségét, amely szintén jelentősen befolyásolhatja a vizsgálat eredményét.

2.3. Korábbi kutatások

Az új módszerek eredményeinek megbízható alkalmazása sok kutatást igényel az élet minden területén. Különösen így van ez a mérnöki szakterületen belül, így az SP vizsgálat fejlesztésénél is. Az anyagvizsgálati eljárások kutatása kiemelten fontos a próbatest és a vizsgálati berendezés viselkedésének feltérképezése érdekében, hogy a vizsgálat eredményei következetesek és összehasonlíthatóak legyenek. Ezekből az okokból adódóan az SP vizsgálattal kapcsolatosan is

részletes kutatásokat végeztek az elmúlt két évtizedben. A megjelent cikkek témái változatosak, mivel a vizsgálathoz kapcsolódó kutatási területek száma nagy. Ebben a fejezetben ezekből a kutatási témákból csoportosítva mutatok be cikkeket, amelyek fontos információkat tartalmaznak a későbbi fejezetekben bemutatott vizsgálatokhoz. Az SP vizsgálat segítségével meghatározható anyagjellemzőkből néhányat feltüntettem az 5. ábra bal oldalán. Ilyenek a vizsgált anyag mechanikai tulajdonságai, mint a folyáshatár vagy a szakítószilárdság. Meghatározhatóak törésmechanikai jellemzők is, például a törési szívósság, vagy a töréshez tartozó alakváltozás értéke. Speciális kivitelezés esetén, emelt hőmérsékleten, a keresztfej állandó elmozdulása mellett a vizsgálati eredmények az anyag kúszási tulajdonságai lehetnek. Az ábra jobb oldalán a kutatásokban nagy szerepet játszó számítógépes technológiákat soroltam fel. A következő alfejezetekben ezeknek az anyagjellemzőknek a meghatározásával foglalkozó cikkeket fogok bemutatni.



5. ábra. Az SP vizsgálat eredményei és a kutatásokat segítő számítógépes módszerek

2.3.1. Anyagtulajdonságok meghatározása SP vizsgálatból

Az SP vizsgálat célja, hogy megbízható anyagjellemzőket szolgáltatson új, illetve üzemben használt anyagokról. Az adatmeghatározás módszerének azonban egyértelműnek kell lennie, hogy az eredmények összehasonlíthatóak legyenek. Ebből kifolyólag több kutatás is foglalkozott az SP vizsgálat eredményének függvényéből meghatározható paraméterek kinyerésével.

A rugalmas-képlékeny átmenethez tartozó erő, vagy másnéven a folyáshatár meghatározása az egyik legjobban kutatott témája az SP vizsgálat eredmény függvényének. A helyes összefüggések megtalálása az SP vizsgálat és a hagyományos anyagvizsgálati módszerek között nagyban növelné ennek az eljárásnak a népszerűségét, és elősegítené a módszer elterjedését az egész világon. Ennek okán több megközelítést is tanulmányoztak az elmúlt évtizedekben. A különböző anyagvizsgálati eljárásokkal kapott folyáshatár és szakítószilárdság értékek összehasonlítása és megfeleltetése az SP vizsgálat eredményével nagy hangsúlyt kapott az eddigi kutatásokban [18] [19]. García és társai egy cikkükben azt írják, hogy a

szakítószilárdság meghatározásához a maximális terhelő erő értékét el kell osztani a próbatest vastagságával és a maximum erőhöz tartozó elmozdulás értékkel [20]. Ezzel szemben azonban Altstadt és társai azt állították, hogy a szakítószilárdság értékének meghatározása az SP vizsgálatból nagyban függhet az anyagra jellemző korrelációs faktortól is [21].

A törésmechanikai anyagjellemzők meghatározása egyaránt fontos a műszaki alapanyagok ismerete és a mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltetése érdekében. Gyakran azonban empirikus egyenleteket használnak a meghatározásukra, mivel általános összefüggéseket nehéz alkalmazni [22]. Wang és társai egy kutatásukban megállapították, hogy a próbatest vastagságának növelésével a törési szívósság (az anyag töréssel szembeni ellenálló képessége törés esetén) és a szakadási nyúlás (vagyis a törésig elszenvedett alakváltozás) értéke is nő [23].

Az SP vizsgálat segítségével az anyagok kúszási tulajdonságai is vizsgálhatóak. Ehhez a próbatestet és az azt körülvevő befogó szerkezetet a szükséges hőmérsékletre kell felmelegíteni a vizsgálat elvégzéséhez. Az SP vizsgálat eredményeül szolgáló elmozdulás-idő függvényből a szabványos kúszásvizsgálathoz hasonló kúszási karakterisztika nyerhető ki. Yang és társai kutatásukban megállapították, hogy a small punch kúszásvizsgálat a jövőben potenciálisan kiválthatja a hagyományos egytengelyű kúszásvizsgálatot [24]. Wu és társai inverz módszer segítségével határozták meg a kúszási paramétereket az elmozdulás-idő függvényből [25]. Emellett kimutatták, hogy a szimuláció számítási ideje csökkenthető, előre meghatározott időlépésköz alkalmazásával. Dawson és társai kimutatták, hogy a vizsgálati környezet (például az argon gázban történő vizsgálat) befolyásolja az anyag kúszási tulajdonságait [26]. A kutatásukban az argon gázban való tesztelés megnövelte a tönkremenetelig eltelt időt, és a tönkremenetelhez tartozó lehajlás érték is nagyobb volt az eredetinel.

2.3.2. SP vizsgálatok számítógépes kutatása

Napjainkban a számítógépek széleskörű elterjedése és a számítási kapacitások növekedése lehetővé tették, hogy a kutatók szimulációs modelleket fejleszthessenek ki komplex problémák kutatására. Ezek a modellek alkalmasak további nem ismert anyagvizsgálati eredmények számítására is. Ezek a modellek mindig nagy mennyiségű vizsgálati adatahalmaz segítségével készülnek. Hasonlóképpen az SP vizsgálatoknál is hasonlóan egyre nagyobb számú számítógépes program és számítási módszert használnak fel az SP vizsgálat megbízhatóságának és egységességének fejlesztésére. Ebből adódóan sok publikáció tartalmaz programozást, végelelemes modelleket vagy más numerikus számítási módszert.

A tématerület legnagyobb csoportja a végeselemes analízissel (VEM) készített modelleken történő vizsgálatok. M. Abendroth szerint a tengelyszimmetrikus modell használata a probléma megoldására kedvező, mivel megőrzi a szükséges információkat, amelyek fontosak a szimuláció szempontjából [27]. Simonovski és társai a kutatásukban kijelentették, hogy a „punch” és a próbatest közötti súrlódási tényező szinte egyáltalán nincs hatással az erő-lehajlás görbe elejére a második szakasz feléig [15]. Calaf Chica és társai szerint a próbatest tetején mért elmozdulás érték használata jóval pontosabb, mint a próbatest alján mért lehajlás értéke [28]. Ugyanezen kutatócsoport egy másik tanulmányban végeselemes modellt készített a rugalmassági modulusz becslésére [29]. A cikkben meghatározták a korrelációs faktorokat egy adott geometriához, valamint kijelentették, hogy az SP vizsgálat szabványosításának előrehaladásával más geometriák is vizsgálhatóak lesznek.

Az SP vizsgálat kombinációja a programozással egy ígéretes párosítás a kutatások szempontjából. A számítógépes algoritmusok nagy számú szimuláció elvégzését teszik lehetővé. A három legfőbb SP vizsgálatral összekapcsolt programozáshoz köthető módszer a szimpla programkód írás, a genetikus algoritmusok (GA) használata és a neurális hálózatok (NN) alkalmazása. A következőkben bemutatott cikkek a három nagy csoport valamelyikébe tartoznak. Egy kutatásban A. Lotfolahpour és társai megállapították, hogy a befogó szerkezet merevsége idealizált, a valóságban rugalmas alakváltozást is szenvedhet, amely hibákat eredményezhet a numerikus szimulációkban [14]. Ez a kutatás kombinálta a GA és NN módszereit. Ezzel szemben M. Abendroth és társai kijelentették, hogy a numerikus szimulációk során a befogó szerkezet mindkét része modellezhető merev testként [30]. V. D: Vijayanand és társai azt állították, hogy az SP vizsgálat pontos szimulációjához elengedhetetlenek az anyagi paraméterek és a károsodási paraméterek (GTN) ismerete is [31].

2.3.3. A károsodási paraméterekkel kapcsolatos kutatások

A Gurson-Tvergaard-Needleman modell károsodási paramétereket használ fel az anyagok pontos leírásához. A modell a képlékeny alakváltozási szakaszban az anyag belsejében végbemenő folyamatok, vagyis a mikroszerkezeti viselkedés matematikai leírása. A leírási mód alapja az alapanyagban keletkező, növekvő és összeolvadó üregek viselkedése. Ebből adódóan a károsodási modell használata olyan numerikus szimulációkban, amelyekben képlékeny alakváltozás történik elengedhetetlen a pontos eredmények érdekében. A károsodási modell paramétereket tartalmaz, amelyek anyagonként eltérőek. A számítógépes technológiákkal történő kutatások egy optimalizációs folyamaton keresztül lehetővé teszik a kutatók számára a tökéletes károsodási paraméterek meghatározását az egyes anyagokra. Egy tanulmányban K. Li

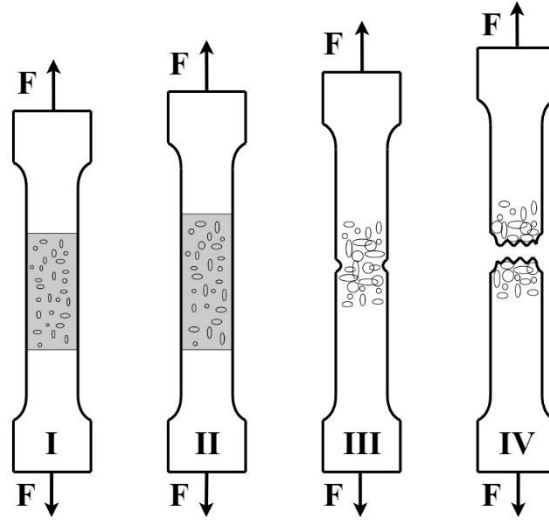
és társai egy inverz numerikus szimuláció segítségével sikeresen meghatározták az 1.4404-es anyag károsodási paramétereit [32]. H. S. Lai és társai a P91-es anyag törési szívósságát határozták meg szimulációval, amely modellje tartalmazott károsodási paramétereket is [33]. D. Chen és társai az NN és GA módszerek ötvöztetésével egy hatékony számítási modellt fejlesztettek ki anyagok károsodási paramétereinek meghatározására [34]. Arra a következtetésre jutottak, hogy a feleslegesen széles határok között megválasztott bemenő paraméterek rossz eredményeket produkálhatnak.

2.3.4. Az irodalomkutatás összegzése

Az itt bemutatott cikkek alapján elmondható, hogy az SP vizsgálat az elmúlt évtizedek egy fontos és érdekes kutatási témája. Ehhez a pár fejezethez hasonlóan korábban más cikkek is születtek, amelyek egy átfogó irodalomkutatást adtak az SP vizsgálatról [11]. Napjainkban az SP vizsgálatok alkalmazási területei kiszélesednek, amely új kutatási területeknek ad lehetőséget [35] [36] [37]. Ilyen kutatási terület lehet a próbatestek mérethatásának vizsgálata.

2.4. Károsodási paraméterek ismertetése

A vizsgálati módszer ismertetéséből látható, hogy az SP vizsgálatához használt próbatest igen kis méretű, ezért annak érdekében, hogy a vizsgálat későbbiekben szélesebb körben is alkalmazható legyen szükséges a mérethatás kiküszöbölése. Erre lehet egy megoldás a lokális megközelítés alkalmazása, amely közé sorolható a GTN modell is. A GTN paraméterek, másnéven a károsodási paraméterek az anyag képlékeny alakváltozásának matematikai leírására szolgáló Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modell elemei. A GTN modell az anyagban képlékeny alakváltozás során bekövetkező változásokat írja le matematikai úton, amelyet így a végeselemes szimulációkban fel lehet használni. Minden belső mikroporozitással rendelkező anyag képlékeny törése 4 szakaszra bontható fel. Az első szakasz a terheletlen szakasz, amikor a testben még csak a gyártási folyamatból adódó belső zárványok találhatók meg. A második szakaszban a terhelés ráadása után kialakul egy képlékeny zóna. Ekkor, a húzófeszültség értékek maximumainál megindul a kezdetben is jelen levő mikroüregek növekedése, illetve új mikroüregek kialakulása is. Egytengelyű húzóterhelés során a nyakképződés miatt háromtengelyű húzófeszültség alakul ki a csökkent keresztmetszetű részen. A negyedik szakaszban az üregek nagy mértékű növekedéséből adódóan az egymás mellett elhelyezkedő üregek összenyílnak. Ez a folyamat addig tart, ameddig a teherviselő keresztmetszet annyira le nem csökken, hogy az anyag atomjai közti kötések nem tudják ellensúlyozni a kialakuló terhelést, így az anyag elszakad. Ennek a folyamatnak a négy szakasza a 6. ábrán látható.



6. ábra. A képlékeny alakváltozás szakaszai

A GTN károsodási modell ezt a folyamatot írja le. A három kutató által megalkotott matematikai modell az alábbi módon írható fel.

$$\Phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_y^2} + 2f^*q_1 \cosh\left(\frac{3q_2p}{2\sigma_y}\right) - [1 + (q_1f^*)^2] \quad (1)$$

Az egyenletben σ_{eq} a redukált feszültség, σ_y a vizsgált anyag folyáshatára, p a hidrosztatikus feszültség, f^* pedig a károsodási paraméter. Az egyenletekben szereplő konstansok megnevezését az alábbi 1. táblázat tartalmazza.

q_1	folyási felület paraméter	f_n	új mikroüregek keletkezésének száma
q_2	triaxialitási paraméter	f_f	mikroüreg térfogat részarány a törésnél
f_0	kezdeti üreg térfogathányad	ε_n	átlagos nyúlás a mikroüregek keletkezésének kezdetén
f_c	mikroüreg térfogat részarány a mikroüreg keletkezés kezdetén	S_n	üregképződések szórása

1. táblázat. A károsodási paraméterek megnevezései

A károsodási paraméter a mikroüregek térfogati részarányának a függvénye, amely az alábbiak szerint módosítja a paramétert.

$$f^* = \begin{cases} f & \text{ha } f \leq f_c \\ f_c + \left(\frac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c}\right)(f - f_c) & \text{ha } f > f_c \end{cases} \quad (2)$$

Az egyenletben f_c a kritikus mikroüreg térfogathányad, f_f a tönkremenetelhez tartozó térfogathányad, és f_u^* a folyási felület paraméter reciproka. A mikroüregek összegének

térfogathányada változó érték mivel az értéke a már meglévő üregek növekedéséből (f_g), és az új üregek keletkezéséből (f_n) adódik össze. Ezt az összefüggést az alábbi egyenlet írja le.

$$\dot{f} = \dot{f}_g + \dot{f}_n \quad (3)$$

Tovább bontva az egyenleteket az alábbi módon alakul a mikroüregek növekedésének és keletkezésének folyamata matematikai modellel leírva.

$$\dot{f}_g = (1 - f) \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (4)$$

$$\dot{f}_n = \frac{f_n}{S_n \sqrt{2\pi}} \left(\sigma_{eq} + \frac{1}{3} p \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\left(\sigma_{eq} + \frac{1}{3} p \right) - \sigma_n}{S_n} \right)^2 \right] \quad (5)$$

A (4) egyenletben szereplő $\dot{\varepsilon}^{pl}$ a képlékeny alakváltozási sebesség matematikai felírása. Ezek az egyenletek alapján tehát kijelenthető, hogy a Gurson-Tvergaard-Needleman modell összesen 8 paramétertől függ, amelyek anyagonként különbözőek. Ezt a függvényt egyszerűsítve az alábbi módon lehet felírni.

$$\Phi = \Phi(q_1, q_2, f_0, f_c, f_n, f_f, \varepsilon_n, S_n) \quad (6)$$

A numerikus szimulációk során ez az egyenletrendszer van a szimulációs modellbe bevezetve, amely képlékeny alakváltozást is tartalmazó szimulációk esetében pontos szimulációs eredményhez vezet. Ennek viszont fontos feltétele a fent leírt nyolc anyagra vonatkozó paraméter ismerete. Mivel az én esetemben nem ismertek ezek a paraméterek, így ebben a dolgozatban inverz módon fogom meghatározni ezeket a paramétereket. Erre lehetőséget ad az anyagon elvégzett SP vizsgálat. Az SP vizsgálatból kinyert erő-elmozdulás függvényt fogom közelíteni a károsodási paraméterekkel ellátott numerikus szimulációkkal. A legjobban illeszkedő szimulációból nyert függvény fogja megadni az anyagra jellemző károsodási paramétereket.

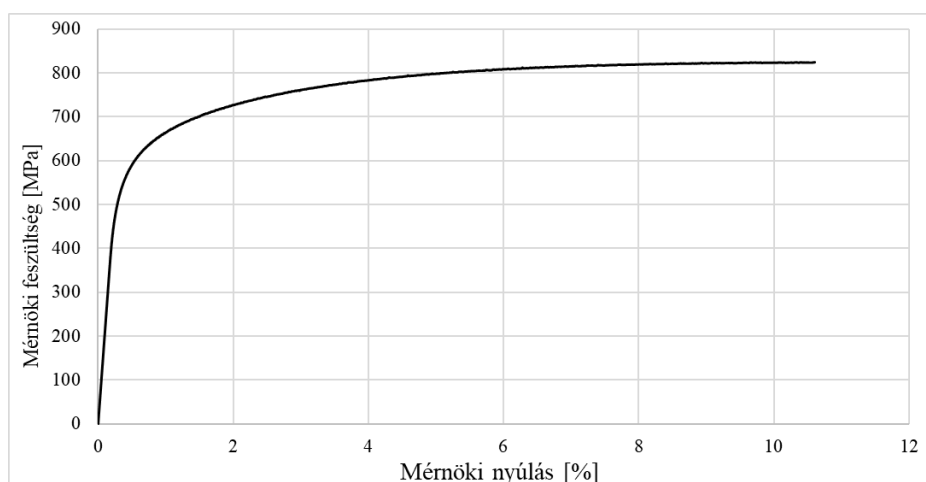
3. Mérés

A károsodási paraméterek meghatározásához szükségem volt mérési eredményekre. Az összehasonlíthatóság végett SP vizsgálatokat végeztem el, valamint a szimulációhoz szükséges adatokat szakítóvizsgálatból nyertem ki. Ebben a fejezetben bemutatom ezeknek a méréseknek

a végrehajtását és a vizsgálati körülményeket. A fejezet végén ismertetem a mérésekből kapott eredményeket.

3.1. A folyásgörbe meghatározása

Az anyagok jellemzése fontos része a numerikus szimulációknak. Ezeket az anyagi jellemzőket legtöbbször hagyományos anyagvizsgálati módszerek segítségével szokás meghatározni. Ilyen anyagi jellemző a folyásgörbe is. Az anyag folyásgörbéje az anyag alakítási szilárdságát írja le. Az anyag alakítási szilárdsága megadja, hogy mekkora feszültség szükséges a képlékeny alakváltozás megindításához, valamint fenntartásához egytengelyű feszültségi állapotban. A folyásgörbe a mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás diagram értékeiből számítható, amelyet szakítóvizsgálatok eredményeként kaphatunk meg. Az alábbi 7. ábra, egy általános mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás görbét ábrázol.



7. ábra. Mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás görbe

A görbe értékeiből először valódi nyúlás ($\varepsilon_{valódi}$) és valódi feszültség ($\sigma_{valódi}$) értékeket szükséges számolni. A következő egyenletek segítségével végeztem el a számításaimat.

$$\varepsilon_{valódi} = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_{mérnöki}}{100} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{valódi} = \sigma_{mérnöki} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_{mérnöki}}{100} \right) \quad (8)$$

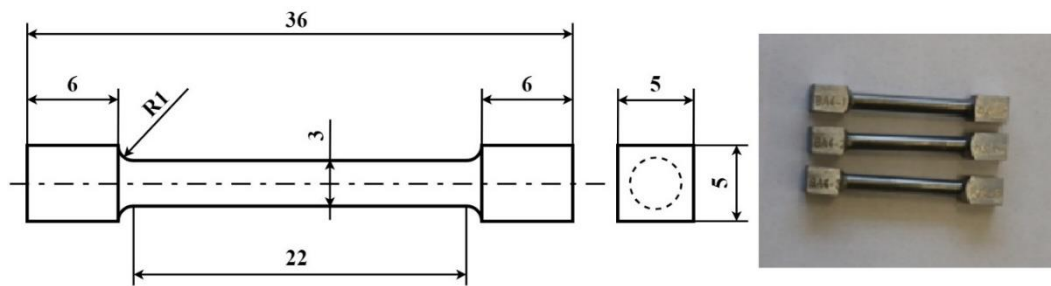
A kapott eredményekből felrajzolható a valódi feszültség-valódi nyúlás görbe. A görbe első lineáris szakaszának iránytangense, vagyis meredeksége adja a továbbiakban felhasznált rugalmassági modulusz (E) értéket. Ezek után képezni kell a képlékeny feszültség ($\sigma_{képlékeny}$) és képlékeny nyúlás ($\varepsilon_{képlékeny}$) értékeket. Ezt az alábbi módon számítottam ki.

$$\varepsilon_{képlékeny} = \varepsilon_{valódi} - \frac{\sigma_{valódi}}{E} \quad (9)$$

$$\sigma_{képlékeny} = \sigma_{valódi} \quad (10)$$

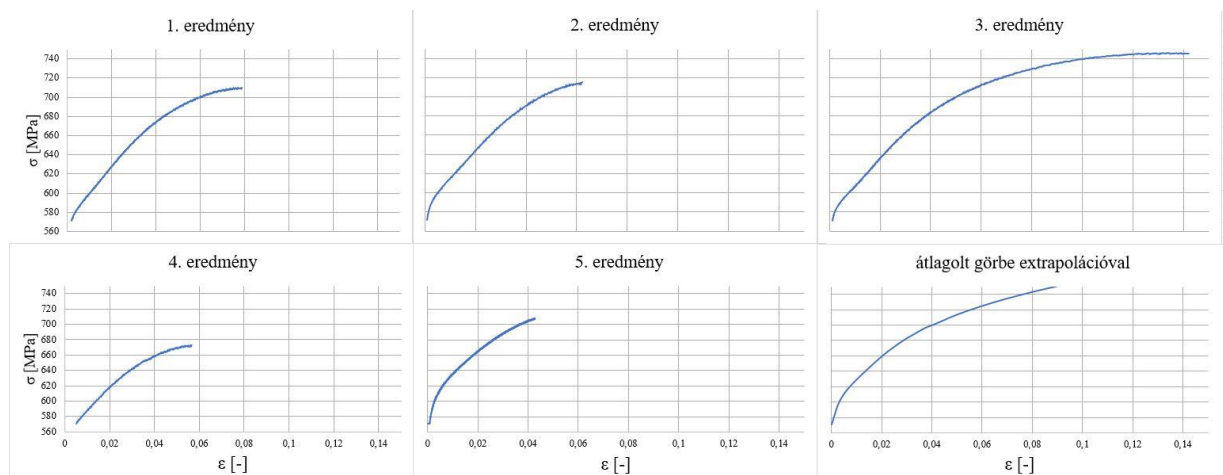
Ezeket az értékeket egy diagramban összesítve kaptam meg az anyagom folyásgörbéjét. Fontos, hogy a folyásgörbét attól a ponttól kell értelmezni, amelytől kezdve a függvény értelmezési tartománya csak a nullánál nagyobb számokból áll, vagyis ahol az $\varepsilon_{képlékeny} \geq 0$ feltétel teljesül. A folyásgörbe kezdőpontja (a függvénygörbe értéke az $\varepsilon_{képlékeny}=0$ pontban) megadja az anyag folyáshatárát.

Ezt a folyamatot végeztem el az általam használt 15Cr2NiMoV anyagon. Az anyagból az ISO 6892-1 szabvány alapján szakító próbatestek kerültek kimunkálásra [38]. A próbatestekről készült műszaki rajz a 8. ábrán látható.



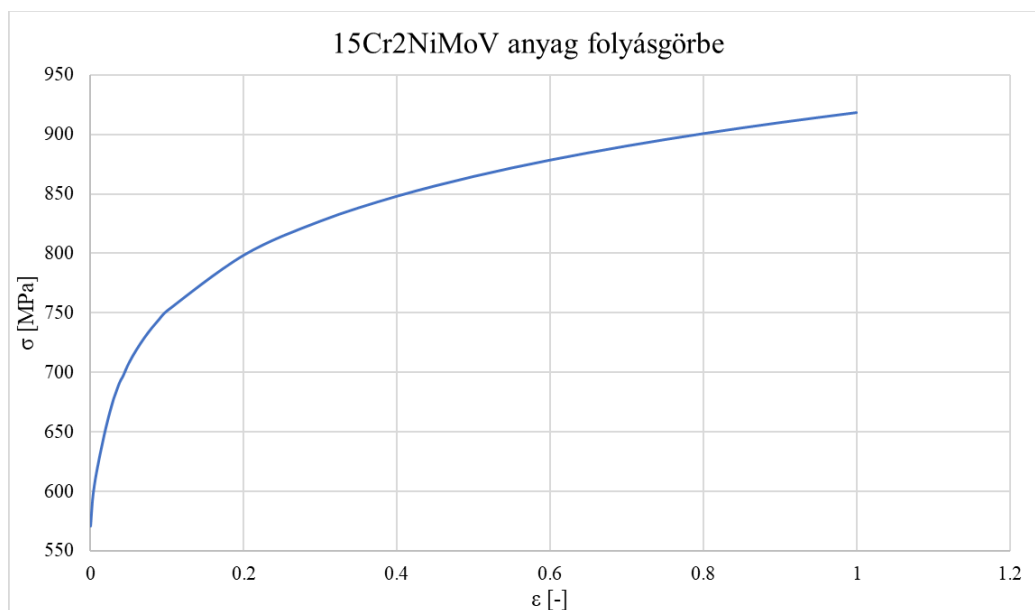
8. ábra. A kimunkált szakító próbatest méretei

A szakítóvizsgálatból kapott mérnöki feszültség-mérnöki nyúlás görbéket átlagoltam, amelyből megkaptam az anyagra jellemző görbét. A szakítóvizsgálatokból kapott eredmény és az átlagolt görbe a 9. ábrán látható.



9. ábra. A szakítóvizsgálatból kapott eredmények és az átlagolt folyásgörbe

A 10. ábrán a 15Cr2NiMoV anyag folyásgörbéje látható. Mivel a mérési eredmények nem voltak elegendőek a teljes görbe meghatározásához, extrapoláció segítségével számítottam ki a hiányzó értékeket.



10. ábra. Az általam használt anyag folyásgörbéje

3.2. A small punch vizsgálat kivitelezése

Az SP vizsgálatot a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztem el. A mérés során 15Cr2NiMoV anyagból készült próbatesten készítettem el az SP vizsgálatot. Ez az acél megtalálható olyan területeken, ahol az SP vizsgálatoknak nagy jelentősége van, mint például atomerőművi környezetben a nukleáris reaktortartályok alapanyagaként. A próbatest nem kör, hanem négyzet alakú volt, amely az EN 10371 szabvány alapján megengedett, mivel a próbatest aktív része a befogó kialakítása miatt kör alakú maradt, a leszorított rész nagysága pedig azonos volt a szabványos próbatest leszorított részével [12]. A próbatest méretét tekintve 5x5 mm nagyságú, mivel a szakítóvizsgálathoz használt próbatest fejrészből került kialakításra, valamint 0,25 mm vastagságú volt. A fejrészből történő kimunkálást a 11. ábra mutatja be. Az I jelű szakaszba az elszakadt próbatest látható, amelynek a fejből kimunkálásra kerültek a próbatestek. A II jelű fázisban a vágások utáni állapot tekinthető meg. A III jelű szakaszban a próbatest megfelelő vastagságra történő csiszolás előtt (jobb) és után (bal) látható.



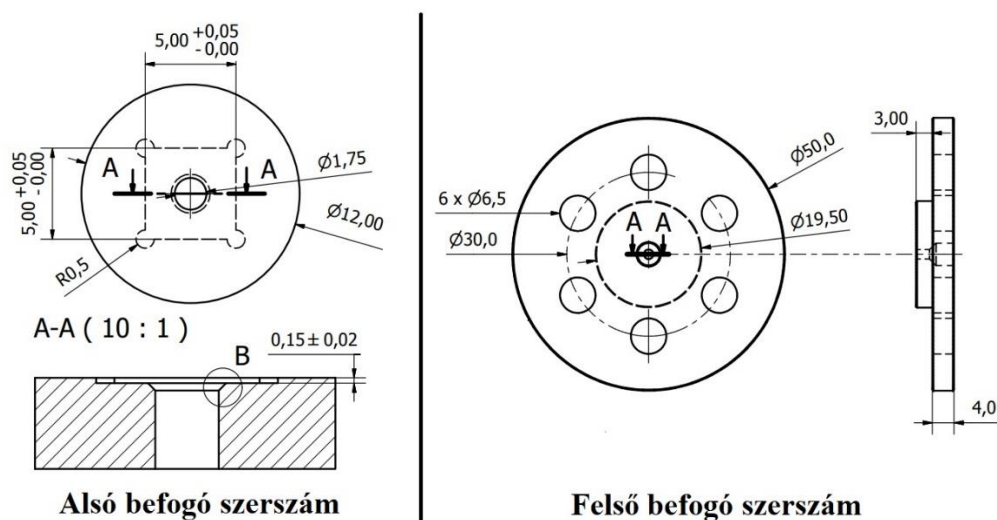
11. ábra. A szakító próbatest feldolgozásának szakaszai

A próbatest méretének összehasonlítása egy százforintos érmével az alábbi ábrán látható.



12. ábra. A próbatest méretének összehasonlítása egy százforintos érme méretével

A próbatest befogó szerkezete az EN 10371-es szabvány szerint volt kialakítva. Az összeállítás alsó és felső befogó szerkezetét a 13. ábra mutatja be.



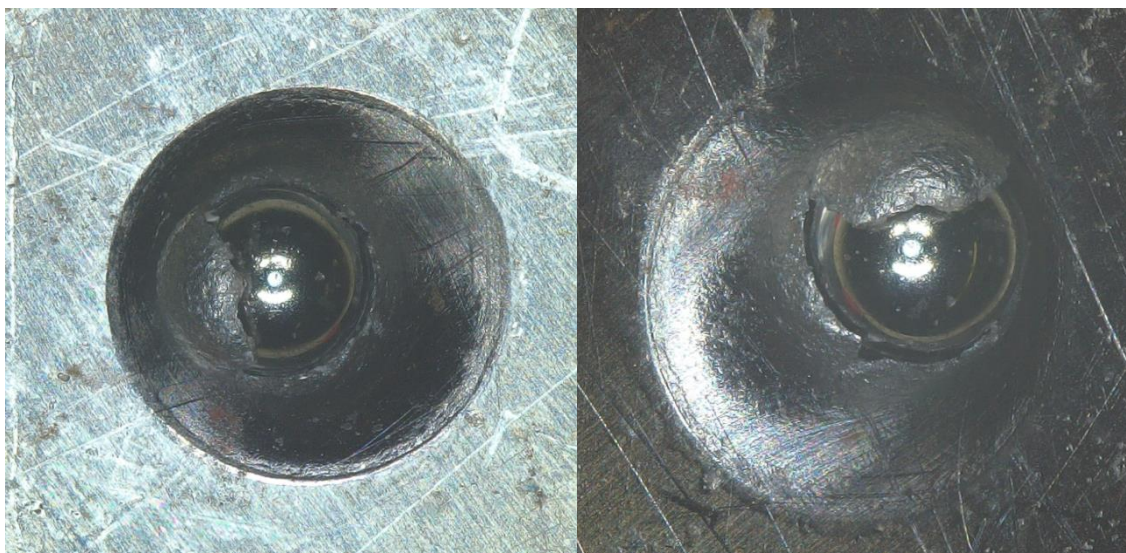
13. ábra. A small punch vizsgálat befogó szerszámai

A vizsgálat egy Instron 8874 biaxiális univerzális szervohidraulikus anyagvizsgáló berendezésen került kivitelezésre. A „punch” egy sík végű rúdból és a végén elhelyezett acél golyóból állt, amely az alábbi ábrán tekinthető meg. A mérő berendezés olyan kialakítású volt, hogy a próbatest alsó részén nem lehetett lehajlást mérni. Így a vizsgálat eredménye „erő”-„golyó elmozdulás” diagram lett. A 14. ábrán látható a vizsgálati berendezés összeszerelt állapotban.



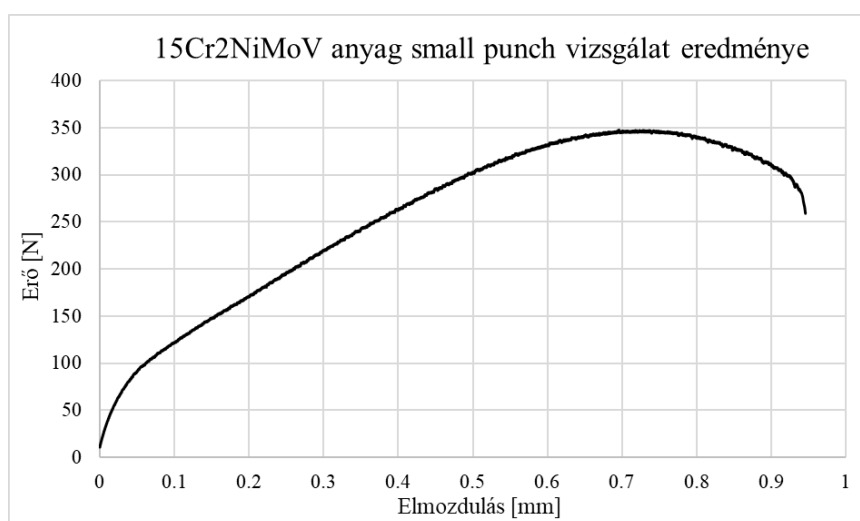
14. ábra. A mérési összeállítás a laboratóriumban, valamint a „punch” kialakítása

A mérés elején szükséges egy előterhelés alkalmazása, hogy a vizsgálat kezdetekor már a tényleges erőt és elmozdulást regisztrálhassam. Az előterhelő erőt 10 N-nak állítottam be. A vizsgálat kezdetekor a próbatest alsó és felső befogó szerszám közötti elhelyezése után a befogó szerkezeteket csavarok segítségével összeszorítottam. Az összeszorításhoz a csavarok 10-12 Nm nyomatékkal kerültek meghúzásra. A vizsgálatot szobahőmérsékleten végeztem el a keresztfej állandó 0,2 mm/perc elmozdulási sebessége mellett. A próbatestet tönkremenetelig terheltem, majd a vizsgált próbatesteket a szabványban is előírt utólagos szemrevételezésnek vettem alá. A szemrevételezés során az alábbi felvételek készültek a próbatestek vizsgálat utáni állapotáról.



15. ábra. A small punch vizsgálat végeredménye

A 16. ábrán látható a mérés eredményeként kapott görbe.



16. ábra. A small punch vizsgálat eredménye

A későbbiekben ezt a mérési eredményt fogom felhasználni a szimulációk összehasonlításánál.

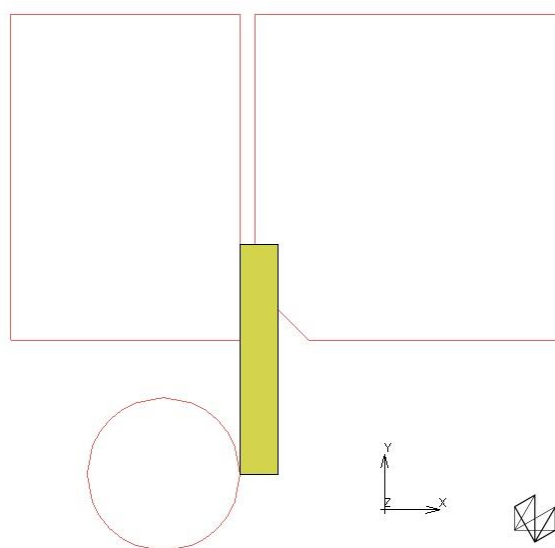
4. Szimuláció felépítése

A mérések elvégzése után a szimulációs modell megalkotásával folytattam a kutatást. A szimuláció felépítésének lépéseit és a számításokban felhasznált alapadatokat a következő alfejezetben ismertetem.

4.1. Szimulációs modell

A dolgozatban a károsodási paraméterek meghatározása volt a célom. A szimulációs modelletem tehát úgy alakítottam ki, hogy ennek a kutatási célnak megfeleljenek. A

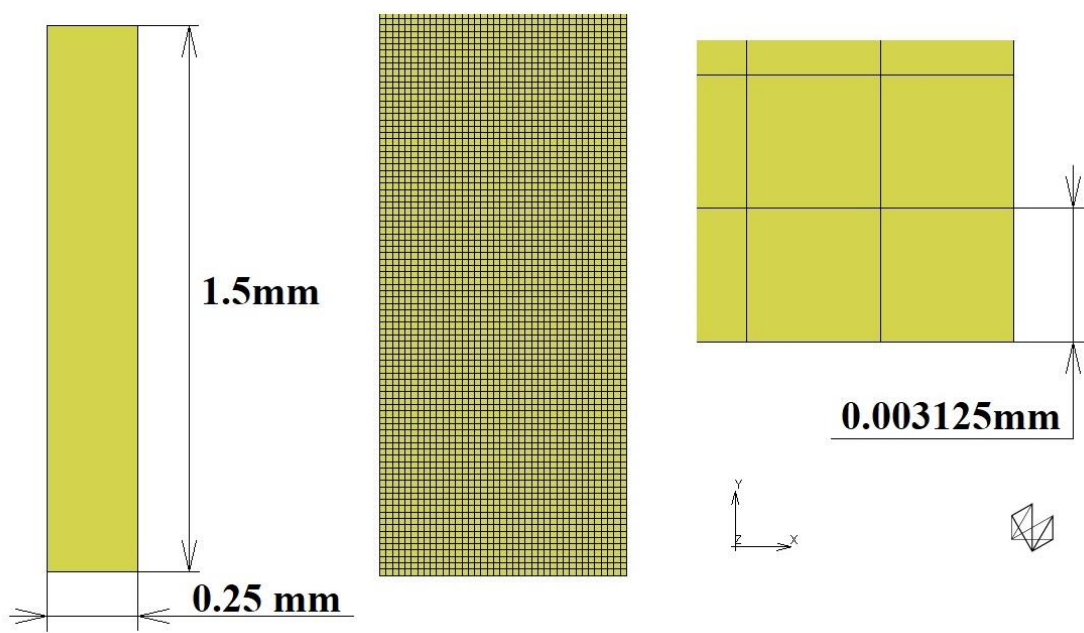
szimulációimat az MSC Marc programban készítettem és futtattam. Az irodalomkutatás során számos cikkben szimulációk eredményeit vizsgálták, amely segített abban, hogy a feladat megvalósítására alkalmas geometriát alkossam meg [15] [28] [29]. A feladat kivitelezéséhez elegendő volt egy tengelyszimmetrikus modellt készítenem. Ennek a modellnek az az előnye, hogy a számítási idő a töredéke az azonos geometriáról készített háromdimenziós végeselemes modell futtatási idejéhez képest. Hátránya, hogy kevesebb nézetből vizsgálható a probléma, viszont számomra ez is elegendő volt az eredmények meghatározásához. Az összeállítás félnézetét elegendő volt elkészíteni a szimulációhoz, amelyet koordináta geometriai feladatként oldottam meg. A geometria szimmetriatengelye az „x” tengely volt. A tengelyszimmetrikus szimulációból adódóan, a próbatest kör alakú volt, míg a mérés során négyzet alakú próbatestet használtam. Ezt az egyszerűsítést azért lehetett megtenni, mivel a próbatest összeszorított részének nagysága közel azonos volt, valamint a próbatest kialakítása nem változtatta meg az alakváltozó rész jellemzőit. Ezeket a tényeket figyelembe véve a kör alakú próbatesttel készült szimuláció jól közelíti a négyzet alakú próbatesttel készült mérést. A szimulációs modellt az EN10371-es szabványban leírt méretekkkel készítettem el. A 17. ábrán látható az elkészült geometria.



17. ábra. A szimulációs modell

A modell bal oldalán látható a felső befogó szerszám, a jobb oldalán pedig az alsó befogó szerszám metszeti képe. A kör metszetű alkatrész a „punch” rúd végén elhelyezkedő golyót modellezi. Ezeket a testeket merev testként modelleztem. Ezek után következett a modell hálózása, vagyis az a folyamat, amikor a teljes testet felosztottam kisebb részegységekre. Ezeket a részegységeket másnéven elemeknek hívjuk, amelyek típustól függően más-más

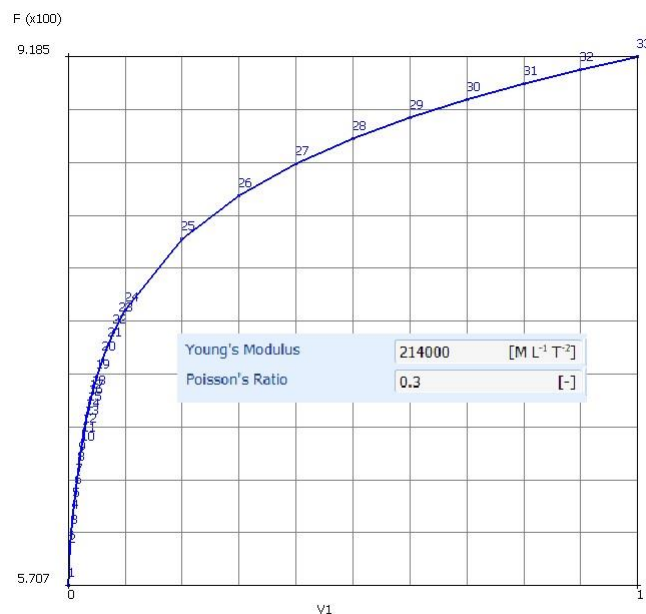
számítási csomópontszámmal és egyéb tulajdonsággal bírnak. A számítás során ezekben a részegységekben a szoftver külön-külön kiszámítja az elem által lefedett térrészben ébredő feszültségeket és alakváltozásokat. A sárga színnel jelölt elem a próbatestet szemlélteti. A modellben csak a próbatestet volt szükséges hálózni, mivel a többi alkatrész rugalmas alakváltozásától el lehet tekinteni. A hálózási feladatnál a várható alakváltozást figyelembe véve szükséges megválasztani a megfelelő elemméretet. Ez olykor azt is eredményezheti, hogy egy testen belül több különböző elem méret is megtalálható. A modell megalkotása során több elemmérettel is végeztem szimulációkat és ezek alapján megtaláltam a számomra megfelelőt, amely a 18. ábrán látható.



18. ábra. A próbatest hálózása és a használt elem méret

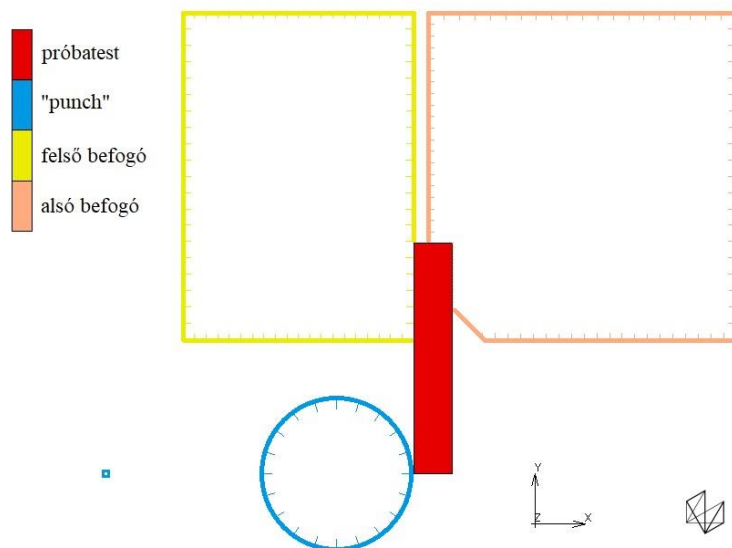
Ahogy az ábrán is látszik, ezzel az elrendezéssel összesen 38400 elemet és 38966 csomópontot hoztam létre. Az elemek négyzet alakúak, így mindkét oldaluk $3.125\ \mu\text{m}$ hosszúsággal rendelkeztek. Az elemtípusnak kvadratikus 4 csomópontos elemeket állítottam be. A hálózást az anyagtulajdonságok definiálása követte. A szimulációhoz szükséges megadni az anyag rugalmassági modulusát és Poisson tényezőjét. Ezen felül mivel képlékeny alakváltozást szenved a próbatest megadtam az anyagra jellemző folyásgörbét.

A saját anyagomnál is a 3.1 fejezetben leírt folyamat elvégzésével meghatároztam a folyásgörbét. Ennek azért volt jelentősége, mivel a szimuláció során a képlékeny alakváltozás leírásához ezt a folyásgörbét adtam meg. A 19. ábrán a saját anyagomra vonatkozó folyásgörbe és az egyéb anyagjellemzők tekinthetők meg.



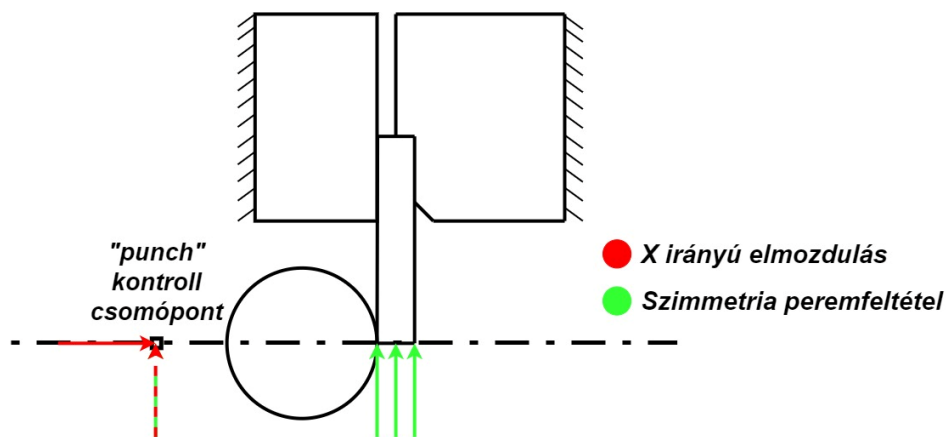
19. ábra. A szimulációban használt folyásgörbe és anyagtulajdonságok

Ezeket az anyagtulajdonságokat szakítóvizsgálatból határoztam meg, amelyből a folyásgörbét is származtattam. A folyásgörbe meghatározásához több szakítóvizsgálatból kapott eredmény értékeit átlagoltam, így az egyes méréseknél fellépő esetleges hibák miatt módosuló értékeket ki tudtam zárni a kutatásból. Az anyagtulajdonságok megadása után a kontakt testeket vettem fel. A tengelyszimmetrikus modelletem 4 különböző test alkotta: a felső befogó, az alsó befogó, a „punch” és a próbatest. Mindegyiket külön kontakt testként adtam meg. Érintkezés valósult meg a próbatest és az alsó befogó, a próbatest és a felső befogó, valamint a próbatest és a „punch” között. Minden esetben érintkezéssel kapcsolatot adtam meg, amelyeknél a testek közötti súrlódási tényezőt 0,2-nek állítottam be az irodalomkutatás alapján. A különböző kontakt testeket a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra. A szimuláció kontakt testjei

A szimuláció felépítését a peremfeltételek megadásával folytattam. A tengelyszimmetrikus szimulációból adódóan a program alapvetően szimmetriatengelyként értelmezte az „x” tengelyt. Emellett a tengelyszimmetria „y” tengely irányában megfogásként hatott. A „punch” mozgását korlátoztam az „x” tengely irányára, a többi test mozgását pedig korlátoztam azzal, hogy „pozíció” típusú kontakt testekként viselkedjenek. Így a forgás megkötésével teljesen fixáltam ezeknek a merev testeknek a mozgását. A 21. ábra a peremfeltételeket mutatja be.



21. ábra. A szimuláció peremfeltételei

Az eddigiekben részletezett bemenő paraméterek megadása után már csak a szimuláció futtatását kellett elvégezni. A szimuláció 500 időlépést tartalmazott. A futtatás befejeztével már csak a szimulációs eredmények kinyerése volt a feladatom.

4.2. GTN paraméterek meghatározása

Ahogy a károsodási paraméterek bemutatásánál kifejtettem, a szimuláció képlékeny alakváltozásának pontos modellezéséhez szükség van a károsodási paraméterek bevezetésére. A nyolc károsodási paraméter mindegyikének meghatározása nagyon nagy mintaszámot generálna, így a paraméterek közül hármat, a q_1 , q_2 és S_n együtthatókat konstansnak fogom tekinteni. Ezeket az együtthatókat a szakirodalomban is az esetek döntő többségében állandónak tekintik minden anyag esetében. A fennmaradó öt együtthatót előre meghatározott határértékek között egy mintagyűjtő algoritmus segítségével fogom változtatni. A 2. táblázat tartalmazza a paraméterek érték tartományát, vagyis azokat a határokat, amelyek közötti értékeket vehet fel az adott paraméter.

Károsodási paraméter	f_0	f_c	f_f	f_n	ε_n	S_n	q_1	q_2
Érték tartomány	0,0002-0,002	0,1-0,35	0,15-0,5	0,001-0,05	0,1-0,4	0,05 (állandó)	1,5 (állandó)	1,0 (állandó)

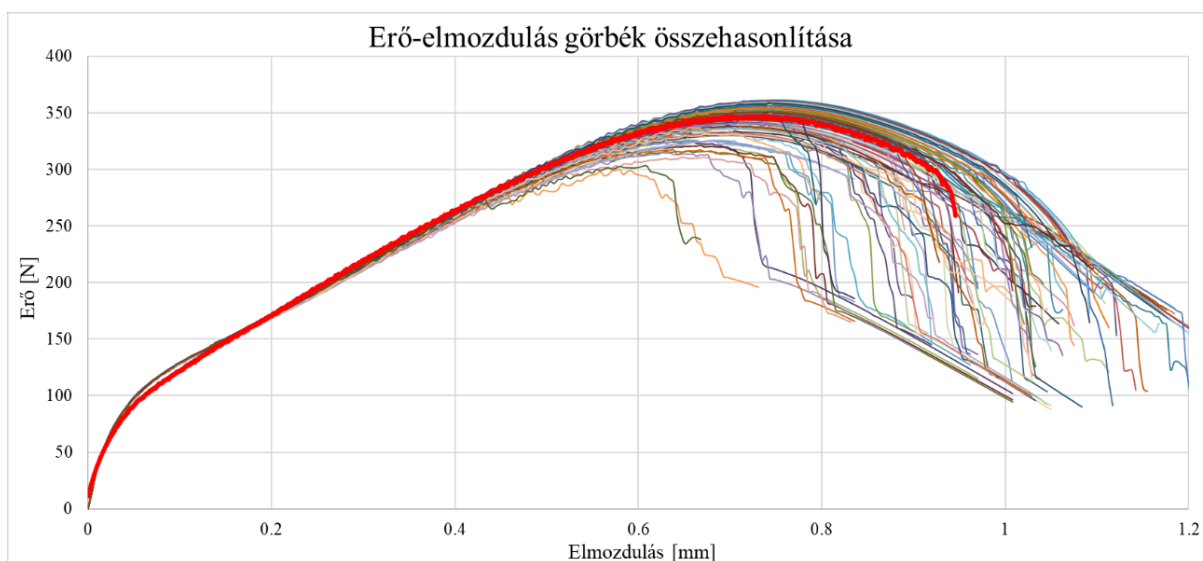
2. táblázat. A károsodási paraméterek tartományai

A táblázatban feltüntetett érték tartományokból mintákat hoztam létre. Minden minta egy paraméter csoportot tartalmaz. A mintákat random módon terveztem létrehozni, amelyhez valamilyen eloszlás generálási eljárást kellett felhasználnom. Megvizsgáltam tehát ezeknek a módszereknek az előnyeit, illetve hátrányait. Az első általam vizsgált módszer a random mintavételezés volt. Az eljárás alkalmazása esetén jó becsléssel megállapíthatjuk a várható értéket és annak szórását. Hátránya azonban ennek a módszernek, hogy üres foltokat, illetve csomósodást generál, amely azt jelenti, hogy egyes egymáshoz számértékekben közeli mintákat gyakrabban választunk ki véletlenszerűen, míg más tartományba eső mintákat szinte egyáltalán nem. Emiatt a hátrány miatt, más módszerrel generáltam a mintákat, az egyenletes minta eloszlás érdekében. A mintákat latin hiperkocka mintavételezési módszer segítségével állítottam elő. Az előnye, hogy az egyes paraméterenként megadott érték tartományból egyenletes módon választ ki véletlenszerű értékeket, majd ezeket az értékeket szintén egyenletes eloszlással kombinálja. A paraméterek értékeinek meghatározásakor felosztja az értéktartományt azonos valószínűségű részekre. Ezek után ezeket összerendezi egy sakktábla-szerű elrendezésbe. A módszer az érték kiválasztásakor figyelembe veszi a többi paraméter értékeit is, és ügyel arra, hogy a sakktábla új pontját olyan oszlopba tegye a változó sorában, amely oszlopban előtte még nem volt választott érték. Bár a teljesen véletlenszerűen kiválasztott minta kivitelezése lehetetlen, ezzel a módszerrel elérhető egy „kvázi random” eloszlás. Az említett latin hiperkocka módszerrel összesen 90 különböző mintát generáltam.

Ezeket a mintákat egyesével beillesztettem a szimulációs modellbe, és így 90 erő-elmozdulás görbét kaptam eredményül.

5. Szimulációs eredmények

A szimulációk futtatása után az eredményeket Excel táblában gyűjtöttem össze. Regisztráltam mind a 90 károsodási paraméter szettel végzett szimuláció eredményét. Mivel a valós mérések során a „punch” elmozdulását regisztráltam, így a szimulációk eredményeként is erő-elmozdulás görbéket kaptam. Ezeket a görbéket összegeztem egy diagramon. A 22. ábra ezt az összehasonlítást mutatja be.



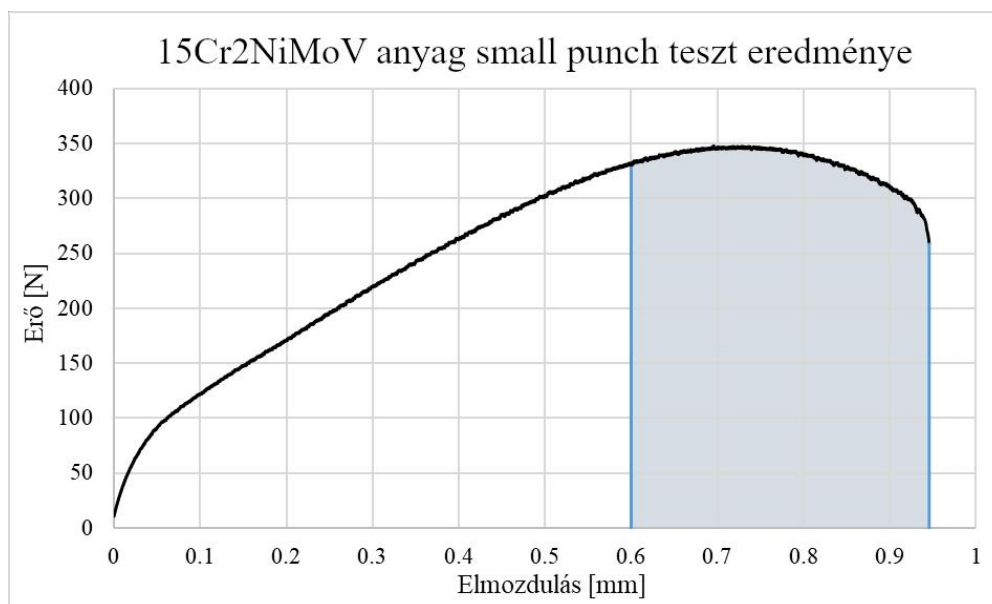
22. ábra. A szimulációból nyert és mért erő-elmozdulás görbék összehasonlítása

Az ábrán megfigyelhető, hogy az eredmények között nagy volt a szórás. A következő lépésben meg kellett határoznom, hogy melyik görbe illeszkedik a legjobban az eredetileg mért erő-elmozdulás görbére. A görbe illeszkedés mértékének számítására a legkisebb négyzetes hibaátlag módszert használtam. A módszer adott pontokban kiszámítja az eredeti (mért) függvénygörbe és a vizsgált (szimulációból kapott) görbe értékei közötti különbséget, majd ezt a különbséget a négyzetre emeli. Az adott pontokban mért különbségek négyzetét összegzi, majd a vizsgált pontok számával elosztja, amelyet a hiba nagyságának átlagos értékét adja vissza. Ennek matematikai formalizációja az alábbi módon alakul.

$$\text{átlagos négyzetes hiba} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (11)$$

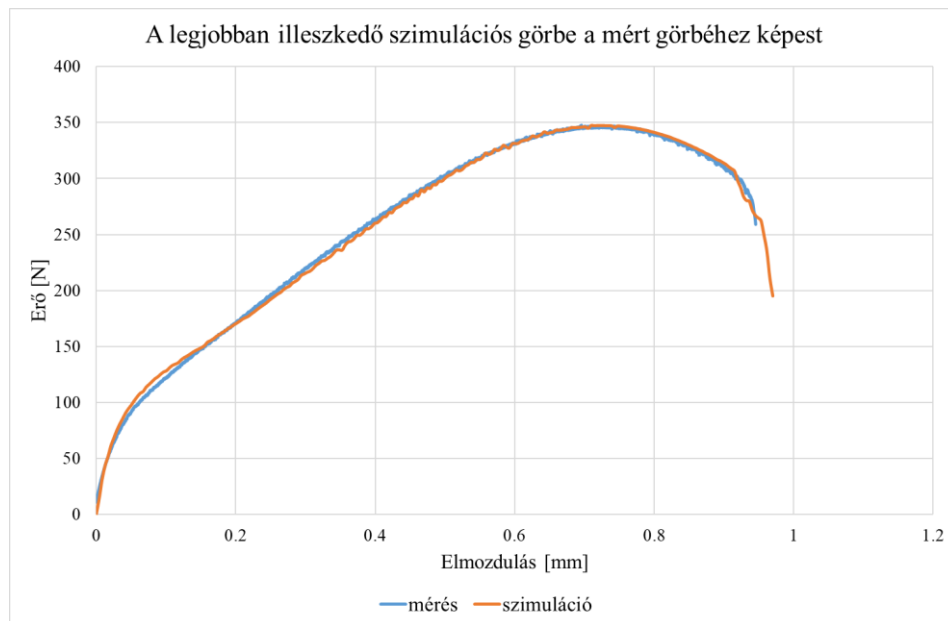
Az egyenletben az n a mintavételi pontok számát, Y_i az eredeti (mért) függvénygörbe értékét, $\hat{Y}_i$ a vizsgált (szimulációból kapott) függvénygörbe értékét jelöli az adott mintavételi pontban.

Mivel a károsodási paramétereket vizsgáltam, a mintavételi pontok helyeit úgy jelöltem ki, hogy a paraméterek hatása érezhető legyen. A szimulációs tapasztalatok alapján elmondható, hogy a károsodási paramétereknek legjobban a maximális erő (F_m) pontjának környékétől van jelentős hatása. Ebből kifolyólag a mintavételi pontokat a 0,6 mm elmozdulástól kezdve jelöltem ki, egyenletes 0,02 mm osztással. A mintavételi pontok közé tartozott a mérésből származó görbe utolsó pontja is. A 23. ábrán látható az az érték tartomány a mérési görbén, amelyből a mintavételi pontokat kijelöltem. Összesen 19 mintavételi pontot határoztam meg. Mivel Excel programban gyűjtöttem össze a mért és szimulációból kapott adatokat, így egy makró segítségével a 90 szimulációból kapott görbe mindegyikénél lineáris interpolációval meghatároztam a mintavételi pont elmozdulás értékéhez tartozó erő értéket.



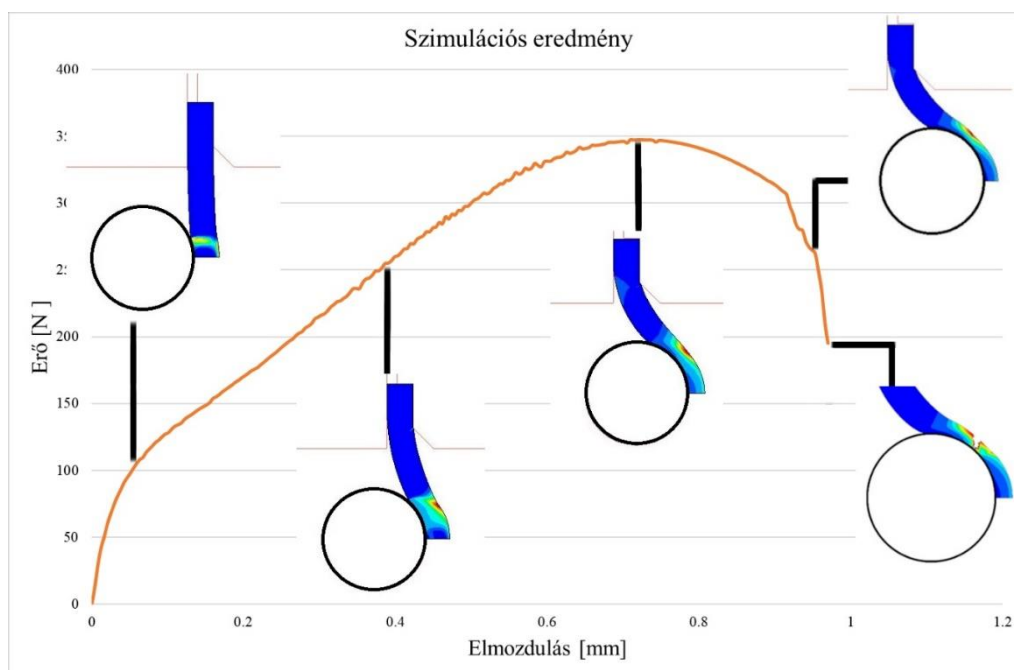
23. ábra. A mintavételi pontok értéktartománya

Az összehasonlításom alapjai ezek az erő értékek voltak. A fejezetben már említett legkisebb négyzetes hibák átlagának módszerével összevetettem az egyes görbéket a mért görbével. Ezek után megkaptam a legjobban illeszkedő görbét, az átlagos hibaértékek minimumának megkeresésével. A módszerrel meghatározott károsodási paraméterekkel ellátott szimulációt a 24. ábra mutatja be az eredeti mért görbéhez képest.



24. ábra. A legjobban illeszkedő szimulációs görbe összehasonlítása a mért görbével

A szimulációt az egyes időpillanatokban megállítva össze tudtam vetni a mérési eredmény pontjait a próbatest aktuális kinézetével. A 25. ábra a mérési görbe egyes pontjaihoz tartozó időpillanatokban készített képeket mutatja be. A próbatest színei az anyag belsejében található mikroüregek részarányát mutatják be a test adott zónáin belül. Az ábrán megfigyelhető, hogy a próbatest szakadása kizárólag a tönkremeneteli szakasz legvégén történt meg. Megfigyelhető továbbá, hogy az üregképződés (és ezzel a szakadás is) a próbatest alsó oldalának irányából indult meg.



25. ábra. A szimulációs eredmény és a modell alakváltozása

A görbéhez tartozó károsodási paramétereket a 3. táblázat tartalmazza. Fontos megjegyezni, hogy ezek a paraméterek csak a vizsgálat anyag esetében használhatóak fel. Emellett mivel ezek a paraméterek „lokális” károsodási paraméterek, így amennyiben a paramétereket más feladat szimulációs modelljében alkalmazzuk, azonos háló elemméret használata mellett fognak hasonló módon működni. Ezek a paraméterek nem hálófüggetlenek.

Károsodási paraméter optimális értéke	f_0	f_c	f_f	f_n	ε_n	S_n	q_1	q_2
	0.001	0.199	0.258	0.0166	0.152	0,05	1,5	1,0

3. táblázat. Az optimális károsodási paraméterek 15Cr2NiMoV anyag esetén

6. Összefoglalás

A kutatásban a small punch vizsgálattal foglalkoztam. Az SP vizsgálat olyan iparágakban népszerű anyagvizsgálati módszer, amelyekben az alkatrészek vagy szerkezetek vizsgálatát üzemelés közben kell elvégezni, vagy nagyon kevés anyag áll rendelkezésre az anyagtulajdonságok meghatározására. A dolgozatban bemutattam a small punch vizsgálatot. A vizsgálat elvét, kivitelezési módját, illetve kiértékelési lehetőségeit is összegeztem. Mivel egy még kevésbé elterjedt anyagvizsgálati mód, így a szabványosítás is fontos kérdése a témakörnek. Az SP vizsgálat különböző földrajzi területeken használatos szabványait mutattam be. Emellett összehasonlítottam két számomra relevánsabb szabványt, az EN 10371, illetve az ASTM E3205-20 jelűeket, és kiemeltem a fontosabb eltéréseket a szabályozásban [12] [17]. A dolgozatom fő feladata a károsodási paraméterek meghatározása volt a 15Cr2NiMoV anyagra. Ez az anyag előfordul atomerőművi környezetben, vagyis valós szituációban is alapanyagát képezheti SP vizsgálatnak. Az anyagból kimunkált próbatesteken szakítóvizsgálatot és small punch vizsgálatot hajtottam végre. A szakítóvizsgálat eredményéből meghatároztam az anyag folyásgörbéjét. A károsodási paraméterek meghatározásához tengelyszimmetrikus szimulációs modellt alkottam. A modell hálózásánál figyelembe vettem a szakirodalmi ajánlásokat. Az anyag definiálásához megadtam a szakítóvizsgálatból meghatározott folyásgörbét, hogy pontos számításokat végezhesen a program a képlékeny alakváltozás szakaszában. Emellett, hogy a károsodás szakaszát is valósághűen lehessen szimulálni, így a modellbe beépítettem előre meghatározott károsodási paraméter szetteket. Az öt általam kiválasztott károsodási paraméternek megadtam egy-egy intervallumot, amelyből értékeket vehet fel az adott paraméter. Ezek után egy random mintagenerálási módszerrel, a latin hiperkocka módszerrel létrehoztam 90 mintát. Minden minta tartalmazta az 5 változó károsodási paraméter egy generált értékét. Ezzel a kilencven mintával futtattam egy-egy szimulációt. A szimulációkból kapott eredményeket Excel táblában gyűjtöttem össze. A célom az volt, hogy meghatározzam, melyik szimulációból kapott görbe illeszkedik a legjobban a mérésből származó görbére. Ennek a számítására a legkisebb átlagos hibanégyzetek összege módszert alkalmaztam. A módszer megadja, hogy mintavételi pontonként átlagosan mekkora mértékben tér el a vizsgált görbe a vonatkoztatási görbéhez képest. A számítások alapján megtaláltam azt a görbét, amely szinte teljes mértékben illeszkedik az SP mérésből származó görbére. Az optimális szimulációból ezek után kinyertem azt a paraméter szettet, amely a 15Cr2NiMoV anyag károsodási paramétereit adta. Fontos, hogy ezek lokális károsodási paraméterek, vagyis nem hálófüggetlen értékek. A károsodási paraméterek meghatározásával kiküszöbölhető a próbatestek méretéből származó

mérethatások, és ennek segítségével a jövőben tervezem az anyagra vonatkozó törési szívósság szimulációval történő meghatározását. A GTN modellnek már létezik egy nem-lokális változata is, amely kiküszöböli a modell elemméret függőségét. A jövőben célom az általam vizsgált anyagra ezen nem-lokális GTN modell paramétereinek a meghatározása is, mivel így a nagyobb méretű próbatestek (például normál CT vagy SENB) esetében nagyobb elemméretek is alkalmazhatók válnak, amely meggyorsíthatja a szimulációk lefutását.

7. Summary

In this research I focused on the small punch test. SP testing is a popular material testing method in industries where parts or structures need to be tested during operation, or where a very small amount of materials are available to determine material properties. In this study, I have presented the small punch test. I have also summarised the principle of the test, the method of its implementation and its evaluation possibilities. As it is a less common material testing method, standardisation is an important issue in this field. I presented the standards for SP testing used in different geographical areas. In addition, I compared two of the more relevant standards for this paper, EN 10371 and ASTM E3205-20, and highlighted the main differences in the regulations [12] [17]. The main task of my research was to determine the damage parameters for the 15Cr2NiMoV material. This material occurs in a nuclear power plant environment, therefore in a real situation it can be the sample material for SP testing. Tensile tests and small punch tests were performed on specimens made of the material. From the tensile test results, the flow curve of the material was determined. To determine the damage parameters, I created an axisymmetric simulation model. The meshing of the model took the recommendations in the literature into account. To define the material, I have given the flow curve determined from the tensile test, so that the program can perform accurate calculations during the plastic deformation phase. Additionally, to simulate the damage stage in a realistic way, I have included predefined damage parameter sets in the model. For each of the five damage parameters I selected, I gave an interval of values that the parameter could take. I then generated 90 samples using a random sample generation method, the Latin hypercube sampling method. Each sample contained one generated value of the 5 variable impairment parameters. With these ninety samples I ran a simulation. I compiled the results from the simulations in an Excel spreadsheet. My goal was to determine which curve from the simulation best fit the curve from the measurement. To calculate this, I used the method of root-mean-squares. This method gives the average deviation of the curve under test from the reference curve at each sampling point. Based on the calculations, I found a curve that matches the curve from the SP

measurement almost perfectly. From the optimal simulation, I then extracted the parameter set that gave the damage parameters for the 15Cr2NiMoV material. It is important to note that these are local damage parameters, not mesh independent values. By defining the damage parameters, the size effects due to the size of the specimens can be eliminated, and I plan to use this to determine the fracture toughness of the material by simulation in the future. A non-local version of the GTN model already exists which eliminates the element size dependence of the model. In the future, I also aim to determine the parameters of this non-local GTN model for the material I am investigating, as it will allow larger element sizes to be used for larger specimen sizes (e.g., standard CT or SENB), which may reduce the runtime of the simulations.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni konzulenseimnek, Pusztai-Spisák Bernadettnek és Juhász-Erdei Rékának, hogy a konzultációk során nyújtott tanácsaikkal és szakértelmükkel támogattak, valamint, hogy a végeselemes szimulációkkal kapcsolatos útmutatásukkal segítették munkámat.

Köszönettel tartozom továbbá a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nek, hogy biztosította számomra a szükséges számítástechnikai háttérrel, valamint a Szerkezetintegritási és Gyártástechnológiai Osztály és az Anyagvizsgálati Osztály munkatásainak, akik magas szintű szaktudásukkal mindig készségesen segítettek a kutatásom során.

Felhasznált irodalom

- [1] Lund, J. R.; Byrne, J. P. „*Leonardo da Vinci's tensile strength tests: implications for the discovery of engineering mechanics*” (2001), A Civil Engineering and Environmental Systems folyóiratban, 00. kötet, 1-8. oldal
- [2] Chandler, H. „*Hardness testing*” című könyve (1999), ASM International kiadó
- [3] Herrmann, K. „*Hardness testing - principles and applications*” című könyve (2011), ASM International kiadó
- [4] Manahan, M. P. „*The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical behavior*” (1982), Doktori disszertáció, Massachusetts Institute of Technology
- [5] ASCE 2017 Infrastructure report card – Bridges (<https://www.infrastructurereportcard.org/wp-content/uploads/2017/01/Bridges-Final.pdf>), Megtekintés dátuma: 2023.08.11.
- [6] IAEA Power Reactor Information System – Age Distribution (<https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx>), Megtekintés dátuma: 2023.08.11.
- [7] Čížek, P.; Kander, L.; Stejskalová, Š. “*Industrial applications of small punch test*” (2018), A 6th International Small Sample Test Techniques Conference konferencián, Ubiquity Proceedings kiadó
- [8] Lancaster, R. J.; Banik, R.; Hurst, R. C.; Bache, M. R. “*Application of Small Punch Test Methods to Advanced Manufactured Structures*” (2014), A 3rd International Conference on Small Scale Test Test Techniques konferencián
- [9] Bulloch, J. H. “*A study concerning material fracture toughness and some small punch test data for low alloy steels*” (2004), Az Engineering Failure Analysis folyóiratban, 11. kötet, 635-653. oldal
- [10] Zhao, L.; Jing, H.; Xu, L.; Han, Y.; Xiu, J.; Qiao, Y. „Evaluating of creep property of distinct zones in P92 steel welded joint by small punch creep test” (2013), A Materials and Desig folyóiratban, 47. kötet, 677-686. oldal
- [11] Torres, J.; Gordon, A.P. “*Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials*” (2021), A Journal of Materials Science folyóiratban, 56. kötet, 10707-10744. oldal
- [12] EN 10371: Metallic materials - Small punch test method szabvány (2021)
- [13] Rolls Royce, Scoop Sampling - Extraction of material samples for examination and analysis dokumentum (2010) webcím: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/scoop-sampling-tcm92-50918.pdf>, megtekintés ideje: 2023.10.26.
- [14] Lotfolahpour, A.; Soltani, N.; Ganjiani, M.; Baharlouei, D. “*Parameters identification and validation of plastic-damage model of 304 stainless steel by small punch test at ambient temperature*” (2018), Az Engineering Fracture Mechanics folyóiratban, 200. kötet, 64-74. oldal

- [15] Simonovski, I.; Holström, S.; Bruchhausen, M. *“Small punch tensile testing of curved specimens: Finite element analysis and experiment”* (2017), Az International Journal of Mechanical Sciences folyóiratban, 120. kötet, 204-213. oldal
- [16] Janca, A.; Siegl, J.; Haušild, P. „Small punch test evaluation methods for material characterisation” (2016), A Journal of Nuclear Materials folyóiratban, 481. kötet, 201-213. oldal
- [17] ASTM E3205-20: Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials szabvány (2020)
- [18] Leclerc, N., Khosravani, A., Hashemi, S., Miracle, D. B., Kalidindi, S. R. „*Correlation of Measured Load-Displacement Curves in Small Punch Tests with Tensile Stress-Strain Curves*” (2021), Az Acta Materialia folyóiratban, 204. kötet
- [19] Song, M., Guan, K., Qin, W., Szpunar, J. A. „*Comparison of mechanical properties in conventional and small punch tests of fractured anisotropic A350 alloy forging flange*” (2012), A Nuclear Engineering and Design folyóiratban, 247. kötet, 58-65. oldal
- [20] García, T. E., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Suárez, C. „*Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test*” (2014), A Journal of Alloys and Compounds folyóiratban, 582. kötet, 708-717. oldal
- [21] Altstadt, E., Houska, M., Simonovski, I., Bruchhausen, M., Holmström, S., Lacalle, R. „*On the estimation of ultimate tensile stress from small punch testing*” (2018), Az International Journal of Mechanical Sciences folyóiratban, 136. kötet, 85-93. oldal
- [22] Mao, X., Takahashi, H. „*Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk (3mm) small punch tests*” (1987), A Journal of Nuclear Materials folyóiratban, 150. kötet, 42-52. oldal
- [23] Wang, Z. X., Shi, H. J., Lu, J., Shi, P., Ma, X. F. „*Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses*” (2008), A Nuclear Engineering and Design folyóiratban, 238. kötet, 3186-3193. oldal
- [24] Yang, S., Ling, X., Zheng, Y. „*Creep behaviours evaluation of Incoloy800H by small punch creep test*” (2017), A Materials Science & Engineering A folyóiratban, 685. kötet, 1-6. oldal
- [25] Wu, W., Xiaozhe, J., Hao, L., Wei, S. „*Determination of creep damage properties from small punch creep tests considering pre-straining effect using an inverse approach*” (2019), A Mechanics of Materials folyóiratban, 139. kötet
- [26] Dawson, H., Richardson, M., Gorley, M., Surrey, E. „*The effect of testing environment on small punch creep*” (2018), A 6th International Small Sample Test Techniques Conference Konferencián, Ubiquity Proceedings
- [27] Abendroth, M. „*FEM Analysis of Small Punch Tests*” (2014) SSTT Konferencia előadás
- [28] Calaf Chica, J., Díez, P. M. B., Calzada, M. P. „*Development of an improved prediction method for the yield strength of steel alloys in the Small Punch Test*” (2018), A Materials and Design folyóiratban, 148. kötet, 153-166. oldal
- [29] Calaf Chica, J., Díez, P. M. B., Calzada, M. P. „*Improved correlation for elastic modulus prediction of metallic materials in the Small Punch Test*” (2017), Az International Journal of Mechanical Sciences folyóiratban, 134. kötet, 112-133. oldal

- [30] Abendroth, M., Kuna, M. „*Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks*” (2006), Az Engineering Fracture Mechanics folyóiratban, 73. kötet, 710-725. oldalak
- [31] Vijayanand, V. D., Mokhtarishirazabad, M., Wang, Y., Gorley, M., Knowles, D. M., Mostafavi, M. „*Estimating damage parameters of a CuCrZr alloy subjected to two varying heat treatments using small punch test*” (2021), A Journal of Nuclear Materials folyóiratban, 557. kötet
- [32] Li, K., Peng, J., Zhou, C. „*Construction of whole stress-strain curve by small punch test and inverse finite element*” (2018), A Results in Physics folyóiratban, 11. kötet, 440-448. oldalak
- [33] Lai, H. S., Jiang, X. „*Determination of fracture toughness through small punch test of notched-tube specimen*” (2023), Az Engineering Fracture Mechanics folyóiratban, 279. kötet
- [34] Chen, D., Li, Y., Yang, X., Jiang, W., Guan, L. „*Efficient parameters identification of a modified GTN model of ductile fracture using machine learning*” (2021), Az Engineering Fracture Mechanics folyóiratban, 245. kötet
- [35] Álvarez, G., Arniella, V., Belzunce, F J., Rodríguez, C. „*Study of the influence of current density and displacement rate on hydrogen embrittlement using small punch tests*” (2023), A Theoretical and Applied Fracture Mechanics folyóiratban, 125. kötet
- [36] Lai, H. S., Wang, R., Zhong, Y., Du, P., Guo, J., Huang, Q. „*A modified small punch testing scheme to investigate the circumferential mechanical behaviour of nuclear fuel cladding tubes*” (2023), A Journal of Nuclear Materials folyóiratban, 583. kötet
- [37] Sithole, K., Taylor, C. L., Rouse, J. P., Hyde, C. J. „*Multi-scale modelling of the mechanical behaviour of a CoNiCrAlY bond coat alloy during small punch testing*” (2023), A Materials & Design folyóiratban, 226. kötet
- [38] ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing szabvány (2016)