

Károsodási paraméterek meghatározása small punch vizsgálat és numerikus szimuláció segítségével

Damage parameters identification with small punch test and numerical simulation

KULCSÁR Benedek¹, SPISÁK Bernadett², ERDEI Réka³

¹: gyakornok

^{2,3}: tudományos munkatárs

^{1,2,3}: Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 3519 Miskolc, Iglói út 2.

Abstract

The high demand to monitor changes in material properties in the field of nuclear power plant lifetime assessment helped the development of special material testing methods which can provide the determination of several material properties from scarce amount of material. The small punch (SP) test is one of the newest and most researched material inspection methods. In this study a numerical simulation of the SP test has been built to obtain the damage parameters of a certain material used in nuclear structures.

Keywords: small punch, simulation, damage parameters, measurement, optimization

Kivonat

Az atomerőművek élettartam gazdálkodásának területén az anyagtulajdonságok változásának követése iránti nagy igény elősegítette a speciális anyagvizsgálati módszerek kifejlesztését, amelyek segítségével több anyagjellemző határozható meg kis mennyiségű alapanyag felhasználásával. Ebben a cikkben a small punch (SP) vizsgálat kerül a középpontba, amely az egyik legújabb és legtöbbet kutatott anyagvizsgálati eljárás. Az SP vizsgálat numerikus szimulációját készítettük el egy atomerőművi berendezésekben is használt anyag károsodási paramétereinek meghatározására.

Kulcsszavak: small punch, végeelemes szimuláció, károsodási paraméterek, GTN modell, mérés, optimalizálás

1. BEVEZETÉS

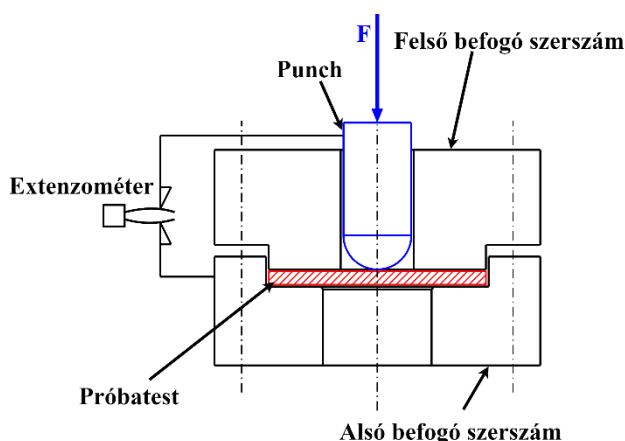
Napjaink mérnöki feladatai speciális igénybevételeknek teszik ki a tervezett szerkezeteket. A különleges iparágak egyedi feladatai olyan alapanyagokat igényelnek, amelyek minden tekintetben megfelelnek az alkalmazási terület elvárásainak. Ezeknek a követelményeknek való megfelelést minden esetben az anyagra jellemző paraméterekkel lehet ellenőrizni, amelyek mechanikai anyagvizsgálatok segítségével határozhatóak meg. Ilyen modern anyagvizsgálati eljárás a small punch (SP) vizsgálat is.

Az SP vizsgálat kutatása iránt növekvő érdeklődés mutatkozik. A modern számítógépes technológia lehetőségeit kihasználva legtöbb esetben a kutatók szimulációs modell használatával vizsgálják a módszer egyes paramétereit. Így tett M. Abendroth is, aki cikkében kifejtette, hogy a tengelyszimmetrikus modell használata a probléma megoldására kedvező, mivel megőrzi a szükséges információkat, amelyek fontosak a szimuláció szempontjából [1]. Calaf Chica és társai szerint a próbatest tetején mért elmozdulás érték használata jóval pontosabb, mint a próbatest alján mért lehajlás értéke [2]. Az SP vizsgálat kutatásában a szimuláció mellett gyakran alkalmaznak neurális hálózatot vagy genetikus algoritmust is. V. D: Vijayanand és társai megállapították, hogy az SP vizsgálat pontos szimulációjához elengedhetetlen a károsodási paraméterek ismerete is [3].

A kutatás célja a Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modell károsodási paramétereinek a meghatározása volt. A probléma vizsgálatára tengelyszimmetrikus szimulációs modell készült. Összesen 90 különböző károsodási paraméter szettel futott a szimuláció. A szimulációs eredményeket összehasonlítva a mérési eredményekkel kiválasztásra került a valóságot legjobban közelítő károsodási paraméter szett.

1.1. A small punch vizsgálat

A small punch vizsgálat egy anyagvizsgálati módszer, amelyet a 1980-as években fejlesztettek ki kifejezetten a nukleáris iparban előforduló besugárzott anyagok vizsgálatára a költségek minimalizálásának érdekében [4]. Az eljárás előnye, hogy kis mennyiségű minta felhasználásával több különböző anyagjellemző is meghatározható, továbbá a vizsgálat elvégezhető a szerkezetek működése közben is, mivel a próbatest kimunkálása nem befolyásolja a vizsgált készülék szerkezeti integritását. Ebből adódóan a módszert a kvázi roncsolásmentes kategóriába sorolják a mintavételezés szempontjából [5]. Az SP vizsgálati módszer kutatása aktuális, mivel a világon üzemelő több mint 400 atomreaktor várható élettartamának becslésénél is meghatározó az említett eljárás. Az anyagvizsgálati módszer lehetőséget ad atomreaktorok anyagjellemzőinek monitorozására, amely nagy mértékben elősegíti a biztonságos üzemelést.



1. ábra. A small punch vizsgálati berendezés

Az SP vizsgálatot általában 8 mm vagy 3 mm átmérőjű, 0,5 mm-nél nem nagyobb vastagságú kör alakú próbatesten végzik el. A próbatestet egy befogó szerkezetbe helyezik, amely közepén elhelyezkedő furaton keresztül a minta felületét egy félgömb végződésű rúddal terhelik. A vizsgálati berendezés összeállítását az 1. ábra mutatja be.

A vizsgálat eredményeként erő-szerszám elmozdulás vagy erő-lehajlás görbe regisztrálható a mért paraméterek függvényében. Ebben a kutatásban a keresztfej állandó elmozdulási sebessége mellett – amely 0,2 mm/perc volt – erő-elmozdulás függvény volt a mérés eredménye.

Az eredményeként meghatározhatóak az anyagot jellemző rugalmas és képlékeny alakváltozási zónákba tartozó paraméterek, mint a folyáshatár, a rugalmassági modulus, valamint a szakítószilárdság. Ezeket az anyagi paramétereket az erő-elmozdulás görbe erő értékeiből lehet származtatni egyenletekbe ágyazott korrelációs faktorok segítségével. A korrelációs együttható minden esetben függ a próbatest méretétől, a mérőberendezés kialakításától és magától a vizsgált anyagminőségtől is.

Az SP vizsgálat szabványosítása még kezdeti szakaszban jár. Az első műhelymegállapodást a témában 2006-ban adta ki az Európai szabványügyi bizottság (CEN). Az első szabvány a kínai GB/T 29459 számú volt, amelyet az első nemzetközileg is elfogadott szabvány követett, amely az amerikai ASTM anyagvizsgálattal foglalkozó társaság kiadásában jelent meg 2020-ban E3205-20 néven. A jelen kutatásban bemutatott mérés a CEN által 2021-ben kiadott EN 10371 hivatkozási számú szabvány szerint került kivitelezésre.

1.2. A károsodási paraméterek

A vizsgálati módszer ismertetéséből látható, hogy az SP vizsgálatához használt próbatest igen kis méretű, ezért annak érdekében, hogy a vizsgálat a későbbiekben szélesebb körben is alkalmazható legyen szükséges a mérethatás kiküszöbölése. Erre lehet egy megoldás a törésmechanika lokális megközelítésének alkalmazása, amely közé sorolható a GTN modell is. A GTN paraméterek az anyag képlékeny alakváltozásának matematikai leírására szolgáló Gurson-Tvergaard-Needleman modell elemei. Ez a nyolc paraméter írja le az anyag képlékeny alakváltozását a számítógépes szimuláció során. Mivel az SP vizsgálat során a próbatestet tönkremenetelig szükséges terhelni, így ez az eljárás alkalmas a károsodási paraméterek vizsgálatára. A folyamatot leíró matematikai modell az alábbi módon formalizálható.

$$\Phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_y^2} + 2f^* q_1 \cosh\left(\frac{3q_2 p}{2\sigma_y}\right) - [1 + (q_1 f^*)^2] \quad (1)$$

Az egyenlet elemeit megvizsgálva és további részekre bontva kapható meg a nyolc károsodási paraméter, amelyek megnevezéseit az 1. táblázat tartalmazza. Az egyenletben a σ_{eq} a redukált feszültséget, σ_y a folyáshatárt, f^* a GTN paraméterektől függő károsodási paramétert, p a hidrosztatikus feszültséget jelzi.

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

A kutatás során különböző paraméter szettek együttes hatásának vizsgálata volt a cél. Annak érdekében, hogy megfelelő eloszlással kerüljön kiválasztásra 90 különböző paraméter szett, amelynek minden paramétere adott határok közé esik, egy mintavételezési módszer használatára volt szükség. A választás a latin hiperkocka mintavételezési módszerre esett, amelynek előnye, hogy az egyes paraméterenként megadott érték tartományból egyenletes módon választ ki véletlenszerű értékeket, majd ezeket az értékeket szintén egyenletes eloszlással kombinálja, továbbá figyelembe veszi a mintavétel számát is. A nyolc károsodási paraméterből három nem változik, minden paraméter szett esetében állandó értékű, mivel így csökkenthető a változó paraméterek száma, valamint a szakirodalomban is ezeknek a változóknak az értéke állandó a vizsgált anyagtól függetlenül. A károsodási paraméterek értékeit vagy alsó és felső határértékeit a 2. táblázat tartalmazza.

A károsodási paraméterek alsó és felső határértékei

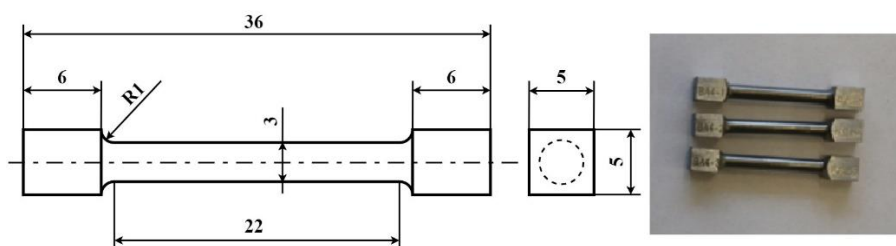
2. táblázat

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)

A határértékek kiválasztása a témával foglalkozó tudományos cikkek iránymutatása alapján történt. A mintavételezéssel készített 90 paraméter szett a szimulációs modell részét képezi, így összesen 90 erő-elmozdulás görbe készült.

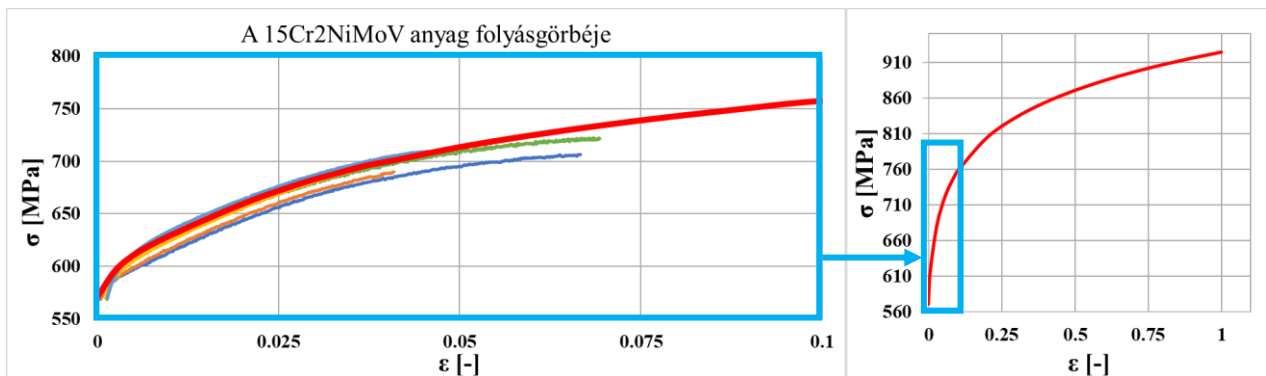
2. MÉRÉS

A SP vizsgálat kivitelezése a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. miskolci telephelyének Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában történt. Kétféle mérés került kivitelezésre: szakítóvizsgálat és SP vizsgálat. A próbatestek mindkét mérésnél 15Cr2NiMoV anyagból készültek, amely az atomerőművi környezetben megtalálható alapanyag, azon belül is a nyomottvízes reaktor tartályok anyagaként szolgál. A szakító próbatestek kialakítása az ISO 6892-1 szabvány alapján történt, amelynek méreteit és az elkészült mintákat a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A szakító próbatest

A szakítóvizsgálat eredményeiből a szimulációhoz szükséges folyásgörbe meghatározása volt a cél. A folyásgörbe az anyag alakítási szilárdságát írja le, amely megadja, hogy mekkora feszültség szükséges a képlékeny alakváltozás megindításához, valamint fenntartásához egytengelyű feszültségi állapotban. A folyásgörbe a képlékeny nyúlás-valós feszültség görbét jelenti. A szakítóvizsgálatból meghatározott mérnöki nyúlás-mérnöki feszültség értékekből először valódi nyúlás és valódi feszültség értékek számítását kellett elvégezni. Ezek után a kapott eredményeket felhasználva számításra kerültek a folyásgörbe pontjaihoz tartozó értékek. A mérések eredményeit átlagolva extrapoláció után a folyásgörbe elkészült. A különböző mérési eredményeket és a végleges folyásgörbét a 3. ábra mutatja be.



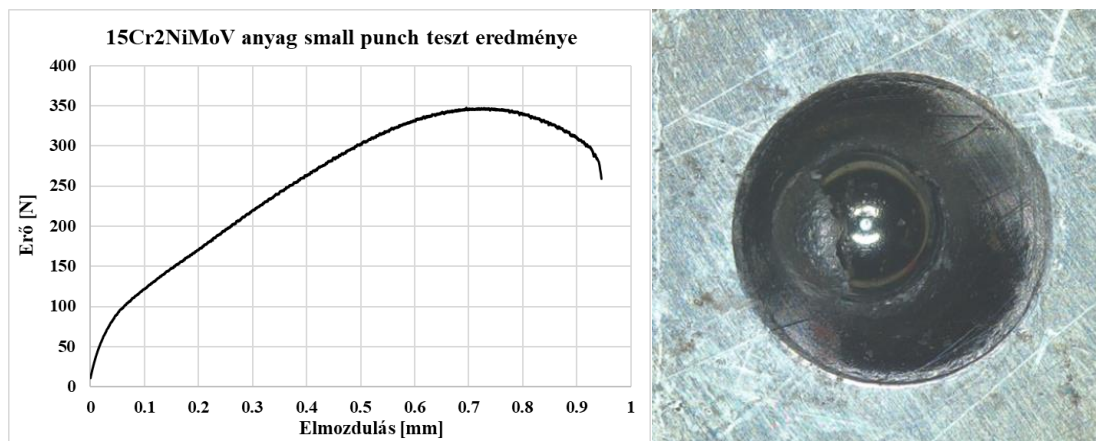
3. ábra. A mérési eredmények és az átlagolt folyásgörbe

A folyásgörbe meghatározása mellett a másik mérési feladatot maga az SP vizsgálat elvégzése jelentette. A vizsgálati berendezés egy szabványos szakítógépen került elhelyezésre, a mozgás létrehozása és a terhelés rögzítése a keresztfején valósult meg. A próbatétel négyzetes kialakítású volt, amely az EN10371-es szabvány alapján megengedett, mivel a leszorított rész nagysága megegyezett a kör alakú próbatétel leszorított részével. A vizsgálati összeállítást és a „punch” szerszámot a 4. ábra mutatja be.



4. ábra. Az SP vizsgálat laboratóriumi összeállítása

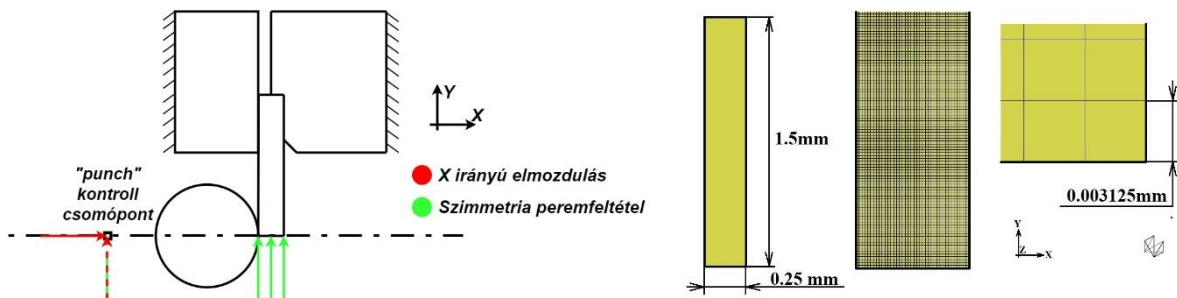
Az SP vizsgálat eredményét, valamint a tönkremenetelt szenvedett próbatestet az 5. ábra mutatja be. Megfigyelhető, hogy a próbatétel felszakadása a „punch” egyik oldalán kezdődött el, amely a központosságtól való mikrométer nagyságrendű eltérésre és a testek közötti súrlódási tényező hatására vezethető vissza. A végleges mérési eredmény több mérés átlagolásával került meghatározásra.



5. ábra. A mérési eredmény és a próbatétel

3. SZIMULÁCIÓS MODELL

A mérések elvégzése után a szimulációs modell megalkotása volt a következő lépés. A szakirodalomban található cikkek tanulmányozása alapján a károsodási paraméterek kutatásához tengelyszimmetrikus szimuláció készült, mivel így a számítási idő minimalizálható. A modell tartalmaz egyszerűsítéseket: az SP próbatest szakadásának kezdetét nem pontszerűen, hanem teljes kerületen végbemenőként értelmezi; a próbatest alakja a mérések esetében négyzet alakú volt, míg a szimuláció során kör alakú. Ezek az egyszerűsítések azonban nem voltak hatással a szimulációval vizsgált károsodási paraméterekre, mivel a szakadás kezdete azonos időpillanatban történik mindkét értelmezés szerint, valamint a négyzetes próbatest leszorított része azonos nagyságú a kör alakú próbatestével. A modellben a „punch” szerszám, valamint a próbatest befogó szerszám elemei merev testként, a próbatest pedig hálózott elemként került modellezésre. A próbatest 38400 darab, a test teljes hosszán azonos, $3,125\ \mu\text{m}$ oldalhosszúságú lineáris kvadratikus elemből épült fel. A szimulációs modell felépítését és a peremfeltételeket a 6. ábra szemlélteti.

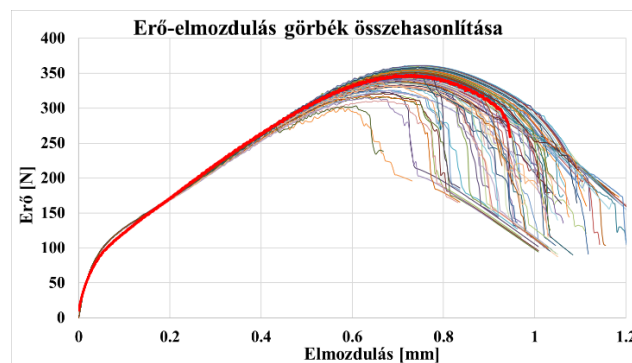


6. ábra. A szimulációs modell felépítése és az alkalmazott peremfeltételek

A 6. ábrán látható, hogy a befogó szerkezet részei minden irányban meg lettek fogva. A testek közötti súrlódási tényező értéke $0,2$ volt.

4. EREDMÉNYEK

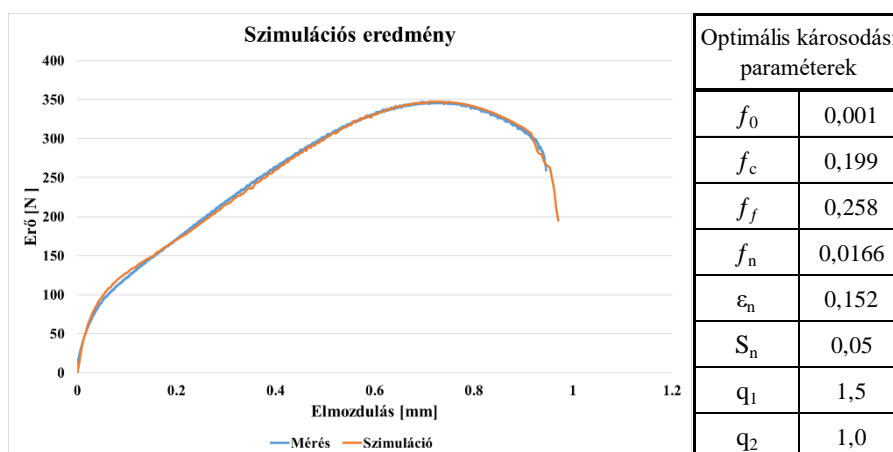
A kutatás célja a károsodási paraméterek meghatározása volt, így szükség volt a mérési és szimulációs eredmények összehasonlítására. A kilencven különböző paraméter szettel futtatott szimulációk eredményének eltérése a mért görbéhez képest minden szimulációs eredmény esetében megtörtént. A két görbe eltérésének mértéke a legkisebb négyzetek módszerének segítségével került kiszámításra. 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 összeadja, majd a vizsgált pontok számával elosztja, amely a hiba nagyságának átlagos értékét adja vissza. A szimulációs görbéket és a piros színnel kiemelt mérési eredményt a 7. ábra mutatja be.



7. ábra. Az összes szimulációs eredmény a mérési görbéhez képest

A szimulációs tapasztalatok alapján elmondható, hogy a károsodási paramétereknek legjobban a maximális erő pontjának környezetében van jelentős hatása. Ebből kifolyólag a mintavételi pontok a $0,6\ \text{mm}$ elmozdulástól kezdve $0,02\ \text{mm}$ osztással kerültek elhelyezésre. A minták vizsgálata után a kiválasztható volt a mérési görbére legjobban illeszkedő szimulációs görbe. Az eredményül kapott szimulációs eredményt a

mérési eredményhez képest a 8. ábra szemlélteti. Emellett az adott hálómérethez és a vizsgált anyaghoz legjobban illeszkedő károsodási paraméter szett is megfigyelhető.



8. ábra. A legjobban illeszkedő szimulációs eredmény és az eredményül kapott károsodási paraméterek

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy atomerőművi környezetben használt alapanyag Gurson-Tvergaard-Needleman modell szerinti károsodási paramétereinek small punch vizsgálattal történő meghatározása volt. A kutatás során laboratóriumi mérési eredmények és szimulációs eredmények összehasonlítása képezte az eredmények alapját. A probléma megoldására készített tengelyszimmetrikus modell 90 különböző paraméter szett felhasználásával adott erő-elmozdulás görbék eredményezett. A mérési eredményre a legkisebb négyzetek módszere alapján legjobban illeszkedő szimulációs eredmény bemenő károsodási paramétere voltak az optimálisak az anyag képlékeny alakváltozásának leírásához szimulációs környezetben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatás a STRUMAT-LTO projekt keretében zajlik. Ez a projekt az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programjának támogatásában részesült a No 945272 számú támogatási megállapodás keretében.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research reported in the article is performed within the framework of the STRUMAT-LTO project. This project has received funding from the Euratom research and training programme 2019–2020 under grant agreement No 945272.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Abendroth, M. *FEM Analysis of Small Punch Tests*, 2014, SSTT Konferencia előadás
- [2] 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*, Materials and Design, 2018, 148, 153-166.
- [3] Vijayanand, V. D., Mokhtarshirazabad, 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*, Journal of Nuclear Materials, 2021, 557
- [4] Manahan, M. P. *The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical behavior*, Doktori disszertáció, 1982, Massachusetts Institute of Technology
- [5] Torres, J.; Gordon, A.P. *Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials*, Journal of Materials Science, 2021, 56, 10707-10744.