

Folyáshatár meghatározásának nehézségei mini Small Punch vizsgálat során

Challenges of determining yield strength with mini Small Punch test

CSITKÓ Zsolt¹, SPISÁK Bernadett¹, GÁL Viktor¹

¹Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Anyagvizsgáló Osztály, H-3519 Miskolc, Iglói út 2.,
e-mail: zsolt.csitko@bayzoltan.hu, web: www.bayzoltan.hu

Abstract

The Small Punch Test (SPT) provides information on the material properties of structural components in nuclear power plants using a small amount of material. The objective of this paper is to investigate the applicability of a mini-SPT specimen with a non-standard square geometry. In this paper, the design of the tools required for testing mini specimens with new geometries and the analysis of the standard method for determining the yield strength will be presented.

Keywords: Small Punch Test (SPT), Mini Small Punch Test

Kivonat

A Small Punch Test (SPT) kis anyagmennyiség felhasználásával biztosít információt az atomerőművekben üzemelő szerkezeti elemek anyagtulajdonságairól. Jelen cikk egy a szabványostól eltérő négyzet alakú mini SPT próbatest alkalmazhatóságát vizsgálja. Bemutatjuk az új geometriájú mini próbatestek vizsgálatához szükséges szerszámok tervezését, valamint a vizsgálatok kiértékelésének bemutatásával felülvizsgáljuk a folyáshatár szabványos meghatározásának érvényességét.

Kulcsszavak: Small Punch Test (SPT), Mini Small Punch Test

1. BEVEZETÉS

Az atomerőművek hosszútávú üzemeltetése jelentős hatást gyakorolhat a szerkezeti anyagokra, módosíthatja azok tulajdonságait és mechanikai anyagjellemzőit. Ennek következtében elengedhetetlen a kulcsfontosságú anyagparaméterek folyamatos monitorozása és az esetleges eltérések kvantitatív értékelése. A mechanikai tulajdonságok – például a szakítószilárdság, a folyáshatár vagy a törési szívósság – meghatározására szabványos vizsgálati eljárások állnak rendelkezésre. Ugyanakkor ezek a módszerek jellemzően nagyobb méretű próbatesteket igényelnek, amelyek kimunkálása az üzemelő szerkezeti elemekből azok integritásának sérülésével járhat. Az atomenergia-iparban ezért széles körben alkalmazzák [1] az ilyen esetekben – a roncsolásmentes vizsgálati eljárások mellett – a Small Punch vizsgálatot (Small Punch Test – SPT). A vizsgálat során egy kisméretű, elmozdulásában gátolt, vékonylemez próbatestet síkjára merőlegesen terhelünk szakadásig egy félgömb végződésű bélyeggel az erő és bélyeg elmozdulás értékek regisztrálása mellett. Ennek az eljárásnak – amely alkalmazásának módját szabvány [2] írja elő – egyik kiemelkedő előnye, hogy a vizsgálati minták alapanyagának kimunkálása nem gyakorol jelentős hatást a működésére.

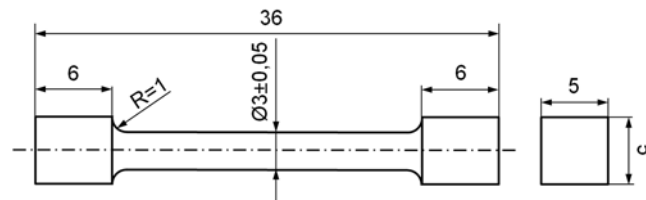
A STRUMAT-LTO (Structural Materials For Nuclear Safety and Longevity) projekt célja atomerőművekben használt anyagok hosszú távú üzemeltetés utáni tulajdonságváltozásainak vizsgálata volt. A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Ltd. (BZN) egyik feladata a projektben mini próbatestes vizsgálatok elvégzése volt, a rendelkezésünkre bocsátott hat különböző atomerőművi alapanyagon. A projekt keretein belül a SPT előtt kisméretű szakító és törésmechanikai vizsgálatokat kellett elvégeznünk.

Mivel a számunkra elérhető alapanyag nem adott lehetőséget a szabványos méretű SPT próbatestek kimunkálására a vizsgálat miniatürizált változatának végrehajtása mellett döntöttünk. A cikkben először

bemutatjuk a vizsgálatokhoz szükséges szerszámok tervezését, majd ismertetjük a próbatetek gyártása során tapasztalt nehézségeket. A vizsgálatok alapvető célja a hagyományos szakítóvizsgálattal meghatározható főbb anyagi jellemzők (szakítószilárdság és folyáshatár) meghatározása volt. A szakítószilárdság SPT vizsgálattal történő meghatározásával kapcsolatos tapasztalatainkat és eredményeinket egy korábbi cikkünkben [3] már ismertettük így jelen tanulmány a folyáshatár meghatározása során tapasztalt problémáinkat foglalja össze.

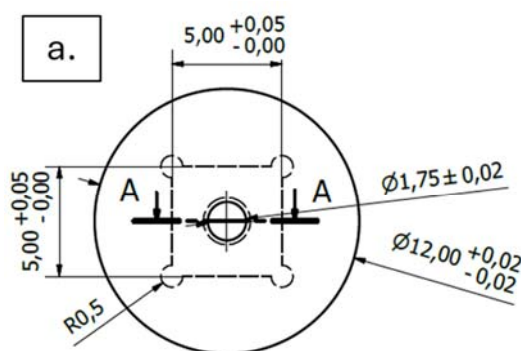
2. SZERSZÁMTERVEZÉS

Az SPT vizsgálathoz a szabvány alapvetően egy 8 mm átmérőjű és 0,5 mm vastagságú, szabályos kör alakú korong próbatestet definiál. Az elvégzendő SPT vizsgálat első nehézségét az jelentette, hogy nem állt rendelkezésre külön alapanyag a próbatetek kimunkálására, a vizsgálatokat az 1. ábra szemléltetett hengeres mini szakító próbatetek vizsgálat utáni törött darabjaiból kimunkált próbatesteken kellett elvégezni. Az ábrán egyértelműen látszik, hogy a próbatest legnagyobb kiterjedésű része az 5x5 mm keresztmetszetű fejrész, amely nem alkalmas a szabványos 8 mm átmérőjű korong alakú próbatest kimunkálására. Mivel a hagyományos SPT vizsgálat elvégzésére így nem volt lehetőségünk, a szabványban szintén definiált mini próbatest alkalmazása mellett döntöttünk. Az SPT kicsinyített változatával, amelyben egy – jellemzően transzmissziós elektronmikroszkópokhoz alkalmazott – 3 mm átmérőjű és 0,25 mm vastagságú próbatesten végzik a vizsgálatokat, már a 80-as években is foglalkoztak [4], ugyanis a kisebb anyagtérfogattal való munka kedvezőbb besugárzott minták esetén [5].



1. ábra. A STRUMAT-LTO projektben alkalmazott hengeres mini szakító próbatest

Napjainkban az Ø3 mm próbatetek vizsgálatához szükséges szerszámok megvásárolhatók, azonban a próbatetek alapanyagát a vizsgálat utáni mini szakító próbatetek adják, amelyek legnagyobb alakváltozásnak ki nem tett – terhelés tengelyére merőleges – mérete, a befogórészen található 5x5 mm-es keresztmetszet, amelyből a szabványos mini próbatetek gyártása bonyolult és költséges lett volna. A szabvány kiter arra, hogy a próbatest kontúrja eltérhet a körtől abban az esetben, ha a próbatest aktív része lapos, kör alakú és a leszorított rész felülete megegyezik vagy nagyobb, mint a szabványban definiált méret. Ez vezetett egy olyan eszköz tervezésének lehetőségéhez, amely képes 5x5 mm-es négyzet alakú próbatetek befogására, miközben a vizsgált tartomány szabványos geometriai méretei megmaradnak.



2. ábra. A négyzet próbatest fogadására alkalmas a.) matrica aktív szerszámeleme; b.) golyó végződésű bélyeg

Az új szerszám aktív elemeit a 2. ábra szemlélteti. A próbatestet fogadó matrica tervezésénél fontos szempont volt, hogy a próbatesttel érintkező, szigorú tűrésekkel rendelkező rész cserélhető legyen. Ennek megfelelően a matrica két részből, egy tartóból és a matrica aktív szerszámeleméből – amelyet a 2. ábra a.)

része szemléltet – került legyártásra. A terhelést szolgáltató bélyeg aktív felületére vonatkozóan a szabvány két lehetőséget biztosít: a szerszám anyagából készülő félgömb végződés, vagy olyan végződés, amely alkalmas egy megfelelő átmérőjű golyó fogadására. Figyelembe véve a méretekből következő gyártási nehézségeket, valamint a felületi érdességekre vonatkozó előírásokat az utóbbi mellett döntöttünk (a golyó végződésű bélyeg kialakítását a 2. ábra b.) része szemlélteti).

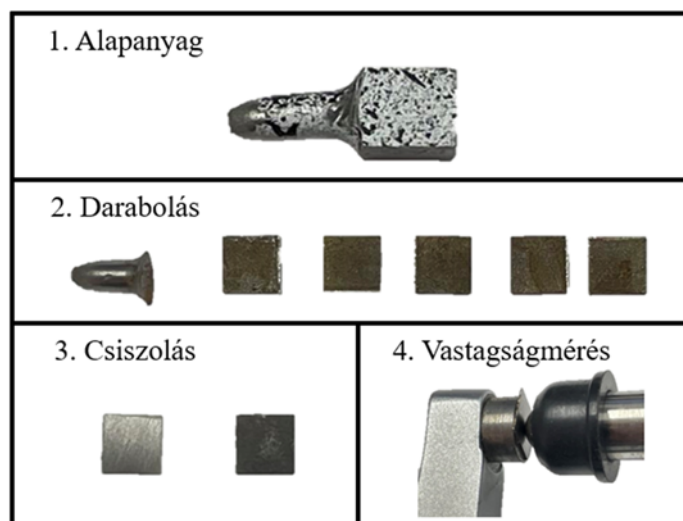
3. ANYAGOK ÉS PRÓBATESTEK

Ahogy azt a bevezetésben már említettük hat különböző alapanyagon kellett mini SPT vizsgálatot végeznünk. Az alapanyagok a B, C, D, E, F, G jelöléseket kapták, az egyes anyagok vegyi összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A hat vizsgált alapanyag vegyi összetétele

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P
B	0,11	0,26	0,38	2,19	0,99	0,7	0,1	0,1	0,008	0,01
C	0,12	0,24	0,38	2,13	2	0,69	0,1	0,1	0,008	0,01
D	0,11	0,23	0,83	2,13	2	0,68	0,1	0,09	0,008	0,009
E	0,12	0,33	0,77	2,16	1,02	0,7	0,1	0,1	0,008	0,009
F	0,12	0,33	1,37	2,15	1,02	0,7	0,1	0,1	0,008	0,01
G	0,11	0,32	1,36	2,06	1,99	0,69	0,1	0,1	0,008	0,009

A mini SPT próbatestek gyártásának folyamatát a 3. ábra szemlélteti. A szakítópróbatestek fejrészét a szabvány előírásainak megfelelően oldalanként 0,05 mm ráhagyással számolva 0,35 mm vastagságú szeletekre vágtuk fel huzalszikkra forgácsolással. Az így kapott darabok mind a két síkját csiszoltuk, a végleges, szabványban megadott $h_0 = 0,25 \pm 0,0025$ mm méretre, a megfelelő felületi érdességet P2500 papírral értük el.



3. ábra. A négyzet alakú mini SPT próbatestek gyártásának folyamata az elszakított mini szakító próbatestekből

Mindegyik alapanyagból 4 db próbatest került legyártásra, a próbatestek vastagságát 5 pontban (a négy sarokban és a próbatest közepén) mértük mikrométerrel, a vékonylemezek vizsgálata során általánosan alkalmazott módszerrel. A vizsgálatok kiértékeléséhez használt h_0 érték az így meghatározott 5 mérési pont átlaga volt.

4. A VIZSGÁLAT LEÍRÁSA

A vizsgálatokat a korábban bemutatott szerszámokkal és a legyártott próbatestekkel egy Instron E10000 berendezéssel végeztük. Korábbi vizsgálataink azt mutatták, hogy a szorítóerő, amelyet a próbatest

elmozdulástól mentes rögzítésére alkalmazunk, befolyásolhatja az erő-elmozdulás görbék kezdeti szakaszát. Az összehasonlíthatóság eléréseért, ezért a leszorító erő kifejtésére szolgáló M6 csavarokat egységesen 10-12 Nm nyomatékra húztuk meg, nyomatékkulcs segítségével. A próbatest rögzítése után a vizsgálat előtt előterheltük a próbatestet 10 N-nal. A próbatest terhelését a bélyeg 0,2 mm/min elmozdulási sebessége adta. A vizsgálati elrendezést a 4. ábra szemlélteti.

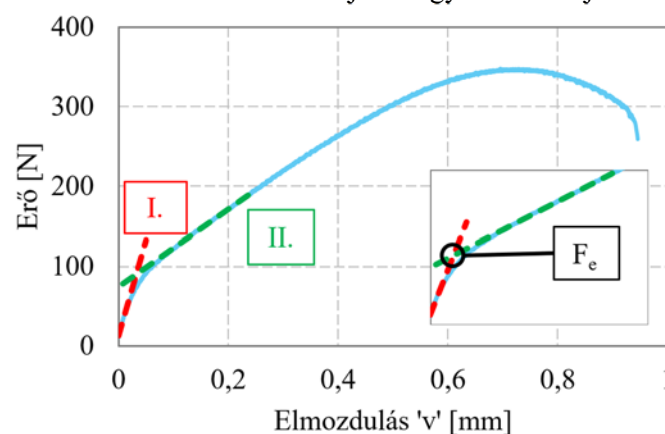


4. ábra. A mini SPT vizsgálati elrendezés elmozdulás méréssel

A vizsgálat leírásakor a szabvány lehetőséget biztosít a lehajlás vagy az elmozdulás mérésére. A szerszámelemek és a próbatest geometriai kiterjedését figyelembe véve nem volt mód egy, olyan elem beillesztésére, amely a próbatest alatt, a bélyeggel ellentétes oldalon helyezkedik el, ezért a lehajlás helyett az elmozdulás mérését választottuk. A vizsgálat végét a próbatest szakadása jelentette. Mindegyik anyagminőség esetében 3 ismétlést végeztük a vizsgálatokból.

5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A mérések során rögzítésre kerültek az erő (F [N]) és bélyeg elmozdulás (v [mm]) értékek, a kiértékelés folyamatát ezen pontok ábrázolásával kezdtük (5. ábra). A következő lépésben a szabvány által definiált bilineáris módszerrel határoztuk meg a rugalmas-képlékeny átmenethez tartozó erőértékeket (F_e [N]). A rugalmas alakváltozási tartományt minden esetben 10...50 N tartományban közelítettük lineáris egyenessel, ezt az ábrán I.-el jelölt egyenes szemlélteti. Ezután az egyenletes nyúlás tartományát is lineáris közelítettük, a tartomány alsó határa 0,1 mm volt, a felső pedig 0,25 mm (ez megegyezik a kezdeti lemezzvastagsággal), ezt a közelítést az ábrán a II.-vel jelölt egyenes mutatja.

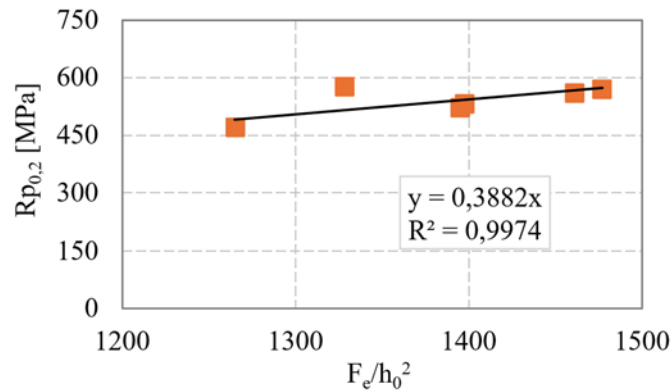


5. ábra. Az erő-elmozdulás értékek egy B anyagból készült próbatesten és az F_e meghatározásának módja

A két egyenes metszéspontja által kijelölt F_e erőértékből a folyáshatárt a következő (1) összefüggéssel származtattuk:

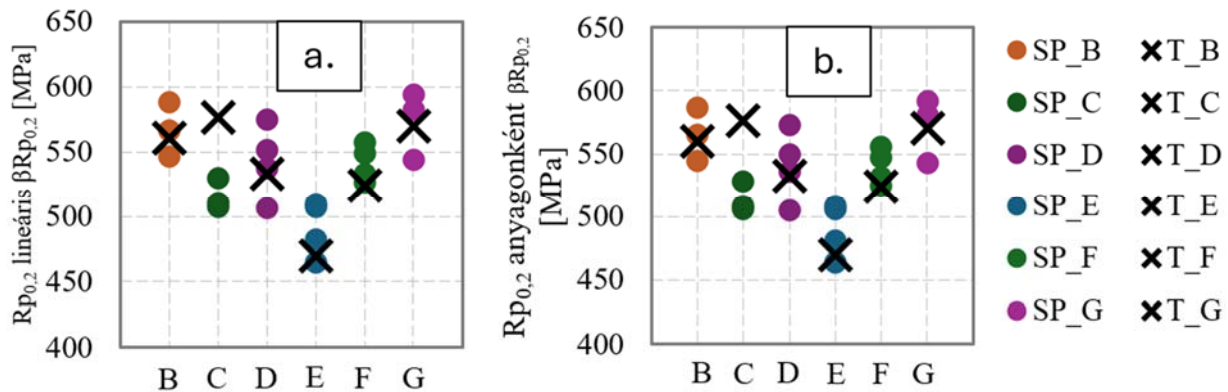
$$R_{p0.2} = \beta_{Rp0.2} \cdot (F_e / h_0^2) \quad (1)$$

Ahol $\beta_{Rp0.2}$ a szabvány által meghatározott korrelációs tényező, h_0 pedig a próbatest kezdeti vastagsága. A $\beta_{Rp0.2}$ egy empirikus tényező, amely a próbatest kezdeti méretétől, és a próbatest vizsgálatára legyártott szerszámok geometriájától függ [2]. A szabványban szereplő értéket egy kiterjedt 9 anyagra vonatkozó vizsgálatsorozat alapján határozták meg, és értékét a 200...1000 MPa közötti folyáshatárú anyagokra kalibrálták. A problémát a $\beta_{Rp0.2}$ együttható geometriától való függősége jelenti, ugyanis a szabvány csak a nagyméretű 8 mm átmérőjű próbatestre vonatkozóan definiálja ennek értékét. Mivel a projekt keretén belül 6 különböző atomerőművi anyagon végeztünk méréseket, megfelelő információmennyiséggel rendelkezünk ahhoz, hogy egy saját $\beta_{Rp0.2}$ értéket határozzunk meg.



6. ábra. Saját $\beta_{Rp0.2}$ meghatározása a mérési eredmények alapján

A mini SPT vizsgálat kiértékeléséhez szükséges korrelációs együttható meghatározásának módját a 6. ábra szemlélteti. Első lépésben az egyes anyagokra vonatkozóan definiáltuk a szakítóvizsgálatokkal meghatározott $R_{p0.2}$ értékeket. Második lépésben ezeket az értékeket ábráztuk az adott anyagokra vonatkozóan a mini SPT vizsgálatnál meghatározott F_e/h_0^2 értékek átlagának függvényében. Harmadik lépésben a hat anyagra így kapott pontot lineárisan közelítettük. A $\beta_{Rp0.2}$ értékét a lineárisnak a meredeksége adja.



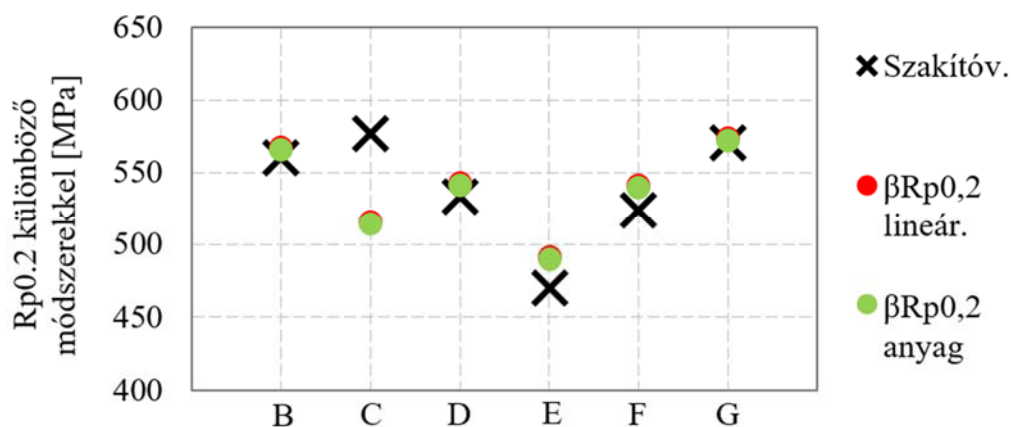
7. ábra. A különböző $\beta_{Rp0.2}$ értékekkel meghatározott $R_{p0.2}$ értékek: a.) lineáris közelítés; b.) anyagonkénti közelítés átlaga

A 7. ábra a. része a lineáris közelítéssel meghatározott $\beta_{Rp0.2}$ -vel definiált $R_{p0.2}$ értékeket (az ábrán ponttal jelölve) veti össze a szakítóvizsgálattal meghatározott értékekkel (az ábrán x-el jelölve). Fontos megjegyezni, hogy az ábrán a szakítóvizsgálattal meghatározott $R_{p0.2}$ értékek konkrétan azoknak a próbatesteknek a folyáshatárai, amelyekből a mini SPT próbatestek kerültek kimunkálásra. Bár a szabványos módszerrel meghatározott $\beta_{Rp0.2}$ értékkel számított folyáshatárértékek közelítik a szakítóvizsgálatok eredményeit majd minden esetben túlbecsülik azt. A jobb eredmények elérése érdekében megvizsgáltuk, hogy milyen eredményeket kapunk, ha a $\beta_{Rp0.2}$ -t más módszerrel, az egyes anyagokra vonatkozó $F_e/h_0^2/R_{p0.2}$ értékének átlagaként határozzuk meg. Az anyagonként meghatározott $\beta_{Rp0.2}$ felhasználásával kapott SPT $R_{p0.2}$ értékeket a szakítóvizsgálattal meghatározott $R_{p0.2}$ értékekkel az 7. ábra b. része veti össze. Az SPT eredményei ebben az esetben jobban közelítették a szakítóvizsgálattal meghatározott értékeket.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmány az atomerőművek állapotfelmérésében gyakran alkalmazott SPT egy módosított változatának a mini SPT alkalmazhatóságát tárgyalja. Annak ellenére, hogy a vizsgálat végrehajtását szabvány határozza meg, a gyakorlati megvalósítás során több problémával kellett szembenézni. A vizsgálatokhoz rendelkezésre álló alapanyag egy 5x5 mm keresztmetszetű szakítópróbatest fejrész volt, amely nem tette lehetővé a szabványban elsődlegesen meghatározott 8 mm átmérőjű próbatest alkalmazását. Ennek megfelelően a vizsgálat kicsinyített verzióját alkalmaztuk, és a gyártási folyamatok megkönnyítése érdekében módosítottuk a hagyományosan kör keresztmetszetű próbatesteket, majd megterveztük és legyártottuk az új kisméretű próbatestek vizsgálatára alkalmas szerszámokat. A vizsgálati próbatesteket a korábban elszakított mini szakítópróbatestek fejrészének darabolásával majd csiszolásával és polírozásával gyártottuk le.

A folyáshatár meghatározásának folyamatát nehezítette, hogy a szabvány a kis méretű próbatestre vonatkozóan nem definiál $\beta_{Rp0.2}$ együtthatót. Ahhoz, hogy a folyáshatár értékét az SPT vizsgálatokkal is meg tudjuk határozni saját $\beta_{Rp0.2}$ együtthatót definiáltunk. Először a szabvány által leírt módszer szerint a szakítóvizsgálattal meghatározott $R_{p0.2}$ értékeket ábrázoltuk az F_e/h_0^2 értékek függvényében és az így kapott pontokat lineárisan közelítettük. Második esetben az egyes anyagokra vonatkozóan határoztuk meg az $F_e/h_0^2/R_{p0.2}$ értékeket és ezeknek vettük az átlagát.



8. ábra. Különböző módszerekkel meghatározott $RP02$ értékek összevetése

A 8. ábra a szakítóvizsgálattal meghatározott $R_{p0.2}$ értékeket veti össze az SPT-vel, különböző $\beta_{Rp0.2}$ értékekkel meghatározott $R_{p0.2}$ értékek anyagokra vonatkozó átlagával. Ahogy az az ábrán is látszik, hangsúlyos eltérés csak a C anyag esetében figyelhető meg a szakítóvizsgálat és a SPT-vel meghatározott eredmények között. Ahhoz, hogy a két $\beta_{Rp0.2}$ meghatározásának eredményességét számszerűen is össze tudjuk venni meghatároztuk az egyes anyagok esetében a szakítóvizsgálattal meghatározott $R_{p0.2}$ -től való eltérést majd adott módszerre vonatkozóan átlagoltuk ezeket. A 6 anyagra vonatkozóan a lineáris módszer esetén az eltérés 19,9 MPa volt. Ezzel szemben az anyagonkénti közelítésnél az eltérés mindössze 18,8 MPa-ra adódott.

Összefoglalva tehát az EN 10371:2021 szabvány alapján a mini SPT vizsgálat elvégezhető, az eredmények kiértékelésével hatékonyan kaphatunk egy általános képet a vizsgált alapanyag tulajdonságairól. A szabvány alkalmazásának hátránya, hogy mini SPT esetére nem definiálja a korrelációs együtthatót a folyáshatár számítására, de a megfelelő mennyiségű információ rendelkezésre állása esetén lehetőség van egy adott anyagcsoportra vonatkozó érték meghatározására. Bár jelen tanulmányban kiküszöböltük a szabvány hiányosságát, amely nehezítette a mini SPT-ből az $R_{p0.2}$ értékek meghatározását, az általunk meghatározott $\beta_{Rp0.2}$ értékekkel az eltérés még mindig 20 MPa közeli. Az F_e értékének meghatározására az utóbbi időben új, a jelenleg bemutatottól eltérő módszerek is kidolgozásra kerültek [6]. Mivel a folyáshatár értékét a $\beta_{Rp0.2}$ mellett az F_e értéke is jelentősen befolyásolja (a h_0 állandó) jövőbeni terveink közé tartozik, hogy az F_e különböző megközelítéseit felhasználva egy a jelenleginél pontosabb eredményt adó módszert dolgozzunk ki.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] P. Čížek, L. Kander, Š. Stejskalová.: Industrial application of small punch test. Ubiquity Proceedings, 1(S1): 13
DOI:<https://doi.org/10.5334/uproc.13>
- [2] EN 10371:2021: Metallic materials- Small Punch test method
- [3] Csitkó Zs., Gál V.: Mini Small Punch vizsgálat: problémák és megoldások; Anyagvizsgálók lapja; 2024/II-III
lapszám; ISSN: 1215-8410
- [4] Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling.: The developement of a miniaturized disk bend test for the determination of
post irradiation mechanical properties; Journal of Nuclear Materials. 1981. Vol. 104. pp. 1545-1550.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(82\)90820-0](https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90820-0)
- [5] X. Mao, H. Takahashi.: Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (ø 3 mm)
small punch tests, Journal of Nuclear Materials, Volume 150, Issue 1, 1987, Pages 42-52,
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4)
- [6] Torres, J., Gordon, A.P. Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing
materials. *J Mater Sci* **56**, 10707–10744 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05929-8>