

A műszerezett keménységmérés eredményének kapcsolata hagyományos anyagjellemzőkkel

Correlation of instrumented indentation testing result curve with conventional material properties

Kulcsár Benedek^a, Szávai Szabolcs^b, Dudra Judit^c

^aMiskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet, doktorandusz, kulcsar.benedek.zsolt@student.uni-miskolc.hu

^bMiskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet, egyetemi docens, szabolcs.szavai@uni-miskolc.hu

^cAEMI Atomenergia Mérnökiroda Kft., vezető mérnök, dudra.judit@aemi-tech.hu

Kulcsszavak

műszerezett keménységmérés,
szilárdsági jellemzők,
kiértékelési modellek,
irodalomkutatás

Keywords

instrumented indentation,
strength properties,
evaluation methods,
literature research

Absztrakt

A cikk a műszerezett keménységmérés eredményeiből származtatható anyagjellemzők meghatározásának módszertanát tekinti át. Összehasonlítja a rugalmassági modulus és a keménység számítására szolgáló klasszikus modellek. Emellett a cikk részletesen tárgyalja a folyáshatár, a szakítószilárdság és a törési szívósság becslési lehetőségeit, valamint a műszerezett keménységmérés eredményének kapcsolatát a kúszás és kifáradás jelenségeivel.

Abstract

The article reviews the methodology for determining material properties derived from the results of instrumented hardness testing. Classic models for calculating elastic modulus and hardness are compared. In addition, the article discusses in detail the possibilities for estimating yield strength, tensile strength, and fracture toughness, as well as the relationship between the results of instrumental hardness measurement and the phenomena of creep and fatigue.

1. Bevezetés

Az Anyagvizsgálók Lapjának 2025/I-II. lapszámában megjelent cikkünkben [1] a műszerezett keménységmérés eredményének szerszám-geometriától függetleníthető kiértékelési módszerét mutattuk be. Ennek a munka alapú mérőszám az alkalmazása a hagyományos keménységértékek egzakt összehasonlítását teszi lehetővé. A vizsgálni kívánt anyagok pontos jellemzése túlmutat a keménység értékének ismeretén, mivel az anyagot terhelő különböző igénybevételekkel szembeni ellenállás más-más paraméterekkel írható le.

Ezen paraméterek ismerete a nemzetközi gyakorlatban elterjedt mérési eljárások alkalmazásának eredménye. A mérések eltérő követelményei komplikált vizsgálati mátrixot és jelentős felhasznált anyagmennyiséget eredményeznek egy új anyagminőség tulajdonságainak meghatározásakor. Emellett a mérések költségvonzata és lefolytatásuk időtartama sem elhanyagolható. Ideális esetben elegendő lenne egy olyan mérést elvégezni, amely eredményéből képezhetőek azok a mérőszámok, amelyek hagyományosan specifikus anyagvizsgálatokból nyerhetők ki. Ehhez a mérőszámok közötti kapcsolat kutatása elengedhetetlen. Ilyen egyszerű, lineáris kapcsolat alapján készülnek a szakítószilárdság és keménység értékét megfelelő táblázatok [2]. Az ilyen összefüggések nagy hányada komplexebb kapcsolatot ír le a lineáris összefüggésnél, így kutatásuk is nagyobb erőfeszítést igényel. Az előzetesen kiértékelt anyagjellemzők korrelációjánál teljesebb megoldásra vezethet az eredménygörbe felhasználása a kívánt paraméter meghatározásához. Erre a célra megfelelő a műszerezett keménységmérésből származó erő-elmozdulás görbe. Ez a tulajdonsága teszi a műszerezett keménységmérést kiemelkedően kutatott módszeré napjainkban is.

A meghatározott anyagjellemzők pontossága lendületesen fejlődik a méréstechnológia fejlődésének és a numerikus szimuláció szélesebb körű alkalmazásának

eredményeként. Ennek a lendületnek adhat a jövőben új löketet a mesterséges intelligencia alkalmazása, amely nagy adatmennyiségek kezelése által képes összefüggéseket keresni a kívánt paraméterek és a mérési görbék adatpontjai között.

Ebben a cikkben a műszerezett keménységmérés eredményéből meghatározható anyagjellemzőket helyezzük a középpontba. Összehasonlítjuk a rugalmassági modulus és keménység meghatározásához alkalmazott kiértékelési módszereket, és ismertetjük azokat a kutatási eredményeket, amelyek a mérnöki gyakorlatban elterjedt anyagjellemzők kiértékelésével foglalkoznak.

2. A megfelelő anyagvizsgálat

A mérnöki gyakorlatban alkalmazott anyagjellemzők köre a rugalmas alakváltozás folyamataitól, a képlékeny alakváltozás vizsgálatán keresztül a rideg viselkedés leírásáig sok típusú mérőszámot foglal magába. Alap mérési eljárásnak – amely eredményéből ezek a paraméterek származtathatóak – olyan módszert érdemes választani, ahol a mérés során az igénybevétel több alakváltozási mechanizmust is eredményez a vizsgált anyagban. Emellett megfontolandó szempontok a mérés gazdaságossága, a kivitelezés egyszerűsége, gyorsasága és megismételhetősége, illetve az, hogy eredményül könnyen mérhető jellemzőket rögzítsünk, ezzel csökkentve a számítási modellek pontatlanságait. Ebből adódóan a műszerezett keménységmérés eljárását is szükséges elemezni a felsorolt követelmények szempontjából.

A keménységmérés kontinuummechanikai komplexitását már a 19. század végén is ismerték. A francia matematikus és fizikus, Boussinesq, a benyomó szerszám hatására a rugalmas féltérben ébredő feszültségek eloszlását vizsgálta 1885-ben publikált munkájában [3]. Ez a munka alapozta meg a későbbi kutatók elméleti munkáját, amelyekben az érintkező testek kontaktproblémáját tárgyalták. Felismerték, hogy a keménységmérés

kivitelezése során tisztán rugalmas, rugalmas képlékeny, illetve teljesen kialakult képlékeny alakváltozás is előidézhető a vizsgált testben. A hagyományos keménységmérés során ezek közül kizárólag a testben keletkező képlékeny alakváltozás nagyságát lehet vizsgálni a lenyomat nagyságának mérésével. A műszerezett keménységmérés azonban lehetőséget ad a további alakváltozási mechanizmus értékelésére.

Az eredmény kiértékelésére szolgáló elterjedt módszerek alapja is a rugalmas alakváltozás pontos leírása. A legtöbbször alkalmazott módszerek M. F. Doerner és W. D. Nix, illetve W. C. Oliver és G. M. Pharr neveihez kötődnek [4, 5]. A két módszer jelentősége maximális terhelésnél fennálló valódi kontaktfelület meghatározásában áll. A tényleges érintkező felület nagyságának meghatározása a pontos keménység és rugalmassági modulus számításának alapja.

Az említett mérőszámok mellett a műszerezett keménységmérés eredménye alkalmas további anyagjellemzők meghatározására is. A további fejezetekben ezeknek az anyagjellemzőknek a meghatározásával, kiértékelésük módszertanával és pontosságával foglalkozunk.

3. Anyagjellemzők meghatározási módszerei

3.1 Rugalmassági modulus

A műszerezett keménységmérés eljárásának kifejlesztésekor már az első kutatások is foglalkoztak a rugalmassági modulus meghatározásával. A vizsgált anyag rugalmassági modulusa hatással van a mérésből nyert keménység értékére is. A rugalmassági modulus minden kezdeti kutatás a maximális reakcióerő elérése után, az erő-eltvételi szakasz alapján származtatta. Felismerték, hogy összefüggés van a visszaterhelési görbe meredeksége (vagyis a teljes rendszer merevsége) és az anyag rugalmassági modulusa között Bulychev és társai munkássága nyomán [6]. A merevséget az alábbiak szerint származtatja a Bulychev-Alekhin-Shorshorov egyenlet:

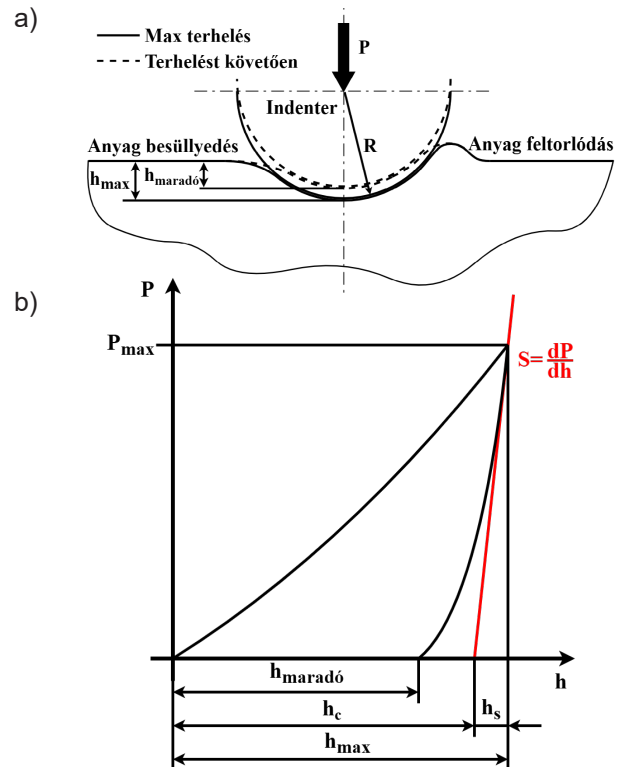
$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi}} E_r \quad (1)$$

A képletben S a rendszer merevsége (a visszaterhelési görbeszakasz meredeksége), P a terhelőerő, h a benyomódási mélység, A_c a kontaktfelület nagysága, E_r pedig a redukált rugalmassági modulus, amely a benyomó szerszám és az anyag rugalmassági modulusának eredője.

Az E_r érték a következő képlet alapján számítható a benyomó szerszám Young-modulusa és Poisson tényezője (E_i és ν_i), valamint a vizsgált anyaganyagra vonatkozó azonos paraméterek értékeinek ismeretében:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_t^2}{E_t} \quad (2)$$

A bemutatott egyenletek alkalmazásához szükséges a visszaterhelési görbe meredekségének ismerete. Sík végű benyomó szerszámok esetében, mivel a kontaktfelület nagysága az erőeltétel következtében nem kezd el csökkenni, a visszaterhelési görbeszakasz kezdeti része



1. ábra: a) Műszerezett keménységmérési eljárás sematikus rajza;

b) A műszerezett keménységmérés eredményéhez kapcsolódó benyomódási mélység definíciók

lineáris kapcsolatot ír le. A Doerner-Nix modell arra a feltételezésre épül, hogy más szerszám geometriák esetében is alkalmazható a lineáris megközelítés. Modelljükben a kontaktfelület és a meredekség meghatározásához a visszaterhelési görbeszakasz első harmadára illesztett egyenessel közelítik a vizsgált meredekséget, majd ebből határozzák meg a kontakt felülethez tartozó benyomódási mélységet (h_c) a (3) egyenlet szerint [4]. Az egyenletben h_s az anyag besüllyedésének mélysége, amely szakaszon az anyag nem érintkezik a benyomó szerszámmal, h_{max} pedig a maximális mélység (1. ábra).

$$h_c = h_{max} - h_s, \quad (3)$$

ahol a besüllyedés mélysége a Doerner-Nix modell alapján a következő szerint számítható:

$$h_s = P \frac{dh}{dP} \quad (4)$$

A lineáris modell, bár a benyomó szerszám geometriák széles skálájára alkalmazható, kis mértékű pontatlanságot eredményez a rugalmassági modulus meghatározásában. Ez a modell a kontakt felülethez tartozó benyomódási mélységet pontosan csak síkvégű szerszám alkalmazásakor, vagy teljesen képlékeny alakváltozás esetén képes meghatározni. Ezeket a megállapításokat támasztották alá kísérletekkel és analitikus számításokkal W. C. Oliver és G. M. Pharr. A róluk elnevezett modell a (4) egyenlet helyett, a benyomó szerszám geometriáját is figyelembe vevő egyenletet alkalmaz a besüllyedési mélység számításához [5]:

$$h_s = \varepsilon P \frac{dh}{dP} \quad (5)$$

Egyenletüket Sneddon munkája alapján vezették le, amelyben ε egy geometriai konstans jelöl [7]. A konstans értéke sík végű szerszám esetén $\varepsilon = 1$, kúpos szerszám esetén $\varepsilon = 0,72$, félgömb szerszám esetén pedig $\varepsilon = 0,75$.

A kontaktmélység ismeretében alkalmazható a benyomó szerszámmra kísérleti úton meghatározott alakfüggvény, amely eredménye a benyomó szerszám és a próbatest közötti tényleges kontaktfelület. Tökéletes félgömb végű szerszám esetén az alakfüggvény a következő egyenlet szerint írható fel, amelyben R a félgömb sugara:

$$A_c(h_c) = 2\pi R h_c \quad (6)$$

A mérési eredménygörbe adatai alapján alkalmazva az (1), (2), (3) és (6) egyenleteket, iteratív módon meghatározható a görbe lefutó szakaszára jellemző meredekség, a kontaktfelület nagysága és az anyag rugalmassági modulusa.

A rugalmassági modulus meghatározását nagy pontossággal lehet elvégezni a műszerezett keménységmérés eredményéből [8]. A bemutatott, széles körben elterjedt módszerek mellett további kutatásokat végeznek a pontosság növelése és az új modellek kidolgozása végett [9, 10].

3.2 Keménység

A keménység hagyományos definíciója szerint a vizsgálat során fellépő maximális reakcióerő és a mérés után mérhető lenyomat vetületi felszínének hányadosa adja a vizsgált anyag keménységét. A nem műszerezett módon végzett keménységmérés esetében nem választható el az anyag rugalmas és képlékeny alakváltozásának eredménye. A mért reakcióerő egy részét így a próbatest rugalmas alakváltozása nyeli el, a maradék része pedig a képlékeny alakváltozásból adódó, maradó lenyomatot hozza létre.

A műszerezett keménységmérés lehetőséget biztosít a maximális terhelőerő pillanatában fennálló tényleges kontaktmélység és ebből meghatározható kontaktfelület meghatározására. A 3.1. fejezetben bemutatott Oliver Pharr módszer alapján, a (6) egyenlettel számítható a teljes benyomódáshoz tartozó érintkezési felület nagysága. Ennek ismeretében számítható a vizsgált anyag keménysége (H):

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (7)$$

A műszerezett keménységmérés eredménygörbéje alapján megállapítható, hogy azonos szerszám-geometriával végzett különböző maximális reakcióerővel végrehajtott keménységmérések esetén a keménység és a reakcióerő nem állnak lineáris kapcsolatban. A keménység méréseinek eredményei csak abban az esetben hasonlíthatók össze a különböző anyagoknál, ha mérési körülmények azonosak a benyomó szerszám és reakcióerő tekintetében is. Ennek a problémának a megoldását segíti elő az Anyagvizsgálók Lapjának 2025/I-II. lapszámában megjelent cikkünkben [1] ismertetett munka alapú keménységi definíció.

3.3 Törési szívósság

A törési szívósság az anyag stabil repedésterjedéssel szembeni ellenálló képességét jellemzi. Az anyagjellemző hagyományos meghatározásához egy precízen kimunkált és előrepszett próbatest roncsolásos vizsgálatát végzik el az ASTM E1820 szabvány előírásai alapján [19].

Mivel mind a törési szívósság vizsgálat, mind a műszerezett keménységmérés statikus vizsgálati eljárás, több kutatás is alkotott modelleket az eredmények összekapcsolása érdekében. Rideg anyagok esetén (kerámiák, természetes anyagok) a repedés benyomódás általi létrehozásához Vickers féle gúlát alkalmaznak. A megfelelő mélységű benyomódás lenyomatának sarkaiban a gúla éleinek meghosszabbításaként jönnek létre repedések. Ez a módszer a múltban széles körben elterjedt volt, azonban több kutatás is megkérdőjelezi a vizsgálat alkalmazhatóságát az eredmények pontatlansága és a kiértékelés során felmerülő problémák miatt [20, 21].

Acélok esetén benyomódással nem lehet megfelelő repedést létrehozni a vizsgálat során a vizsgálati próbatest képlékeny alakváltozási képességéből adódóan. Ezekhez az anyagokhoz a törésmechanika energia alapú elméletét alkalmazzák. A módszer lényege, hogy a törés megindulásához egy feszültségi-, nyúlás- vagy anyagszerkezeti kritériumot kötnek, amely kialakulását vizsgálják a szerszám benyomódása során.

A kiértékelési módszer alkalmazhatóságát támasztja alá, hogy a repedésfront előtti és a szerszám alatti térfogatban létrejövő feszültségmező nagyon hasonló [22]. Ezt az állítást bizonyította be J.-S. Lee és kutatócsoportja, akik a feszültség triaxialitását vizsgálták végeselemes modell alkalmazásával, kiértékelési elméletük megalkotásánál [23]. Korábban T. S. Byun, illetve F. M. Haggag és kutatócsoportjaik is a koncentrált feszültség- és alakváltozási mező hasonlóságának feltételezésével alkalmazták kifejlesztett modelljeiket [24, 25].

A J.-S. Lee és kutatócsoportja által alkalmazott számítási módszer alapja a Griffith nevéhez köthető energiamodell [23]. Az energiaelmélet alapján a törési szívósság egy $2a$ hosszúságú repedés esetén számítható a testben fellépő kritikus törési feszültség (σ_c), illetve a fél repedéshossz (a) ismeretében az alábbi egyenlet alkalmazásával [26]:

$$K_{Jc} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

A Griffith-féle elmélet a kritikus törési feszültséget az anyag rugalmassági modulusából (E), a fél repedéshosszból és a γ_0 energia értékből származtatja.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_0}{\pi a}} \quad (9)$$

A γ_0 energia értéke az egyenletben a felületre vetített energia értékét jelzi, amely az egyes repedési felületek létrehozásához szükséges energia. Ez az érték képlékeny anyagok esetén azonban nehezen meghatározható [27].

A (9) egyenletet behelyettesítve a (8) egyenletbe, a törési szívósság a következő egyenlet szerint számítható:

$$K_{Jc} = \sqrt{2E\gamma_0} \quad (10)$$

Az anyag rugalmassági modulusának ismeretében szükséges a γ_0 energia értékét a műszerezett keménység-mérés benyomódási görbéjéből meghatározni. A mérés eredményeként kapott erő-elmozdulás görbe lehetőséget biztosít a γ_0 energia értékének becslésére a kontakt felületre vetített benyomódási erő ($P_{fajlagos}$) benyomódási mélység szerinti integrálása alapján. Ezt a modellt alkalmazza a J.-S. Lee és társai által közölt munka is [23]. Az alábbi képlet írja le a két mennyiség kapcsolatát félgömb végű szerszám esetén, ahol d a lenyomat átmérője.

$$2\gamma_0 = \lim_{h \rightarrow h^*} \int_0^h P_{fajlagos} dh \quad (11)$$

$$P_{fajlagos} = \frac{4P}{d^2\pi} \quad (12)$$

A törési szívósság meghatározásának T. S. Byun és kutatócsoportja által kifejlesztett modelljének alapja hasonló módon a (11) egyenlet. A képletben h^* azt a kritikus benyomódási mélységet jelzi, amely a feltételezett repedésterjedés megindulásához tartozik.

A kritikus benyomódási mélység meghatározásához kontinuummechanikai károsodási modellek alkalmazása szükséges. A Gurson nevéhez kötődő üreg térfogathányad fogalmának alkalmazásával lehet a tönkremenetel kritériumát felállítani [28]. A stabil repedésterjedés megindulásához tartozó kritikus üreg térfogathányad értékét (f^*) = 0,25 numerikus módon határozta meg képlékeny anyagok esetén Andersson, amelyet Tvergaard és Needleman is alkalmazott [29, 30].

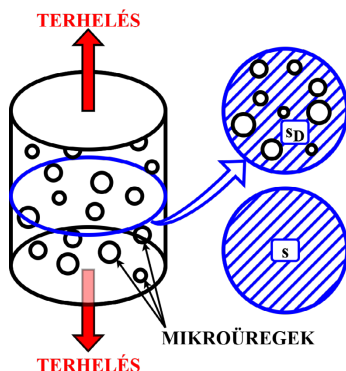
A kritikus üreg-térfogathányad értéke összeköthető a Kachanov által definiált károsodási paraméter értékével (D), amely a terhelt keresztmetszet (s) és az üregek által csökkentett tényleges keresztmetszet (s_D) arányát fejezi ki [31]:

$$D = \frac{s_D}{s} \quad (13)$$

Az (s) és (s_D) keresztmetszetek értelmezését a 2. ábra szemlélteti.

A károsodási paraméter értéke a (13) egyenlet alapján kiszámítható egy testre, amelyben az r sugarú üregek egyenletesen l távolságra helyezkednek el egymástól:

$$D = \frac{\pi r^2}{l^2} \quad (14)$$



2. ábra: A károsodási paraméter számításához használt keresztmetszetek értelmezése

Az üreg-térfogathányad értéke hasonlóan kifejezhető az előző egyenletben alkalmazott méretek alkalmazásával:

$$f = \frac{4}{3} \frac{r^3 \pi}{l^3} \quad (15)$$

A (14) és (15) egyenletekből kifejezve az üreg sugarának értékét, a károsodási paraméter felírható az üreg-térfogathányad értékének függvényében a következő egyenlettel:

$$D = \frac{\pi f^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{4}{3}\pi\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (16)$$

A stabil repedésterjedés megindulásához tartozó kritikus üreg-térfogathányad értékének ($f^* = 0,25$) felhasználásával meghatározható a károsodási paraméter kritikus értéke (D^*).

A károsodási paraméter és az anyag rugalmassági modulusának (E) ismeretében számítható az üregképződés következtében károsodott rugalmassági modulus értéke (E_D) Lemaitre munkája nyomán az alábbi egyenlet szerint [32]:

$$E_D = E(1 - D) \quad (17)$$

A műszerezett keménységmérés során a benyomódási mélység növelésével növekszik az anyagban található mikroüregek térfogat részaránya a testben, amelyből adódóan az aktuális károsodási paraméter értéke is nő, ezzel csökkentve a károsodott rugalmassági modulus értékét. A kritikus benyomódási mélység abban a pontban található, amelynél az anyag aktuális károsodott rugalmassági modulusa eléri az anyagra jellemző kritikus értéket ($E_D = E_D^*$). Ez a benyomódási mélység a vizsgálat jellemből adódóan jóval meghaladja a mérés során elérhető benyomódási mélységet, amelyből adódóan a (11) egyenlet számításához szükséges a szerszám által kifejtett, felületre vetített nyomóerő görbéjének extrapolációja.

A kritikus benyomódási mélység (h^*) ismeretében a (11) egyenlet szerint becsülhető a repedési felületek létrehozásához szükséges energia, ezt követően pedig a (10) egyenlet alapján a törési szívósság.

Egy másik megközelítést alkalmazott F. M. Haggag és kutatócsoportja a szénacélok törésmechanikai szempontból történő jellemzésére [25]. Javaslatuk szerint a hagyományos törési szívósság definíció helyett az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállását egy műszerezett keménységmérésből roncsolásmentes úton meghatározott paraméterrel lehet jellemezni. Az általuk javasolt IEF (indentation-energy-to-fracture) paramétert szintén a műszerezett keménységmérés átlagos felületi nyomásának görbéjéből határozták meg. Méréseik alapján feltételezték, hogy az erő-benyomódási görbe terhelési szakasza lineáris, valamint, hogy a húzó és nyomó igénybevételek eredményeként kapott feszültség-nyúlás görbék azonosak az általuk vizsgált atomerőművi anyagok esetén.

A számításuk alapja a (11) egyenlethez hasonló egyenlet, amely a felületre vetített benyomódási erő út szerinti

integráltja alapján számítja az IEF paramétert:

$$IEF = \int_0^{h^*} P_{fajlagos} dh. \quad (18)$$

Az alkalmazott modellben a terhelési szakasz linearitásából adódóan az (1) egyenlethez hasonlóan bevezethető a terhelési görbeszakasz meredeksége (M), amelyből számíthatóvá válik a terhelőerő értéke adott benyomódási mélység esetében: $P = M \cdot h$.

Emellett a lenyomat átmérőjét geometriai úton származtatták elhanyagolva a vizsgált anyag besüllyedését vagy kinyomódását:

$$d = 2(2Rh - h^2)^{0.5}. \quad (19)$$

Az egyenletben d a lenyomat átmérőjét ($d = 2 \cdot a_c$) jelzi. Az (1) és (19) egyenleteket alkalmazva, a (18) egyenlet integrálását elvégezve az IEF paraméter a következő egyenlet eredménye:

$$IEF = \frac{M}{\pi} \ln \left(\frac{2R}{2R - h^*} \right). \quad (20)$$

Az IEF paraméter összehasonlító vizsgálatokhoz alkalmas, illetve a rideg képlékeny átmeneti hőmérséklet vizsgálatára, meghatározására szolgál.

A T. S. Byun és kutatócsoportja által alkalmazott modell az előzőekben bemutatott két modell kombinációja, amely a műszerezett keménységmérés paramétereiből számítja a törési szívósság értékét [24]. Modelljük úttörő jelentőségű volt, azonban a vizsgált anyag paramétereinek meghatározásához még szükséges hagyományos törési szívósság meghatározási eljárások alkalmazása. Publikációjukban ezen szabványos törési szívósság vizsgálatok eredményét hasonlították össze a modelljük által számított értékekkel.

3.4 Folyáshatár, szakítószilárdság

A folyáshatár és szakítószilárdság vizsgálata esetén a műszerezett keménységmérés során tisztán rugalmas és rugalmas képlékeny alakváltozást is szükséges létrehozni a próbatestben. Az eltérő benyomó szerszám geometriák különböző feszültségeloszlást eredményeznek a próbatestben. A Berkovich és Vickers szerszám geometriák a csúcspann végződő kialakításuk eredményeként kis behatolási mélységek esetén is előidéznek képlékeny alakváltozást. Ezzel szemben a félgömb végződésű szerszám geometria kis benyomódás esetén tisztán rugalmas alakváltozást eredményez, ameddig a felületre vetített nyomóerő ($P_{fajlagos}$) kisebb, mint az anyag folyáshatárának (R_p) 110%-a ($P_{fajlagos} < 1,1 \cdot R_p$) [11, 12]. Erre a kezdeti állapotra alkalmazhatóak a Hertz által ismertett rugalmas érintkezési probléma egyenletei [13]. A teljesen képlékeny alakváltozás esetén a felületre vetített nyomóerő felső határa a folyáshatár háromszorosa ($P_{fajlagos} \sim 3 \cdot R_p$).

Ezek ismeretében a folyáshatár és szakítószilárdság vizsgálatoknál előnyös a félgömb végű benyomószerszám alkalmazása. Az anyagban a nyomóerő hatására kialakuló feszültségmező és a szilárdsági jellemzők kapcsolata a reprezentatív feszültség és nyúlás kapcsolata által írható le. A két paraméter felhasználásával ábrázolható

feszültség-nyúlás diagram a szilárdsági jellemzők műszerezett keménységmérésből történő származtatásának alapja. A következő hatványfüggvény a műszerezett keménységmérés során fennálló feszültség-nyúlás kapcsolatot írja le:

$$\sigma_r = K \cdot \varepsilon_r^n. \quad (21)$$

A függvényben σ_r a reprezentatív feszültség, ε_r a reprezentatív nyúlás, K a szilárdsági együttható, n pedig az anyag keményedési kitevője. A szilárdsági tulajdonságok meghatározásánál a műszerezett keménységmérés görbéjéből nyerhető információk felhasználásával szükséges feszültség-nyúlás értékpárokat számítani. Ezekre a pontokra görbeillesztéssel határozzák meg a K és n paramétereket, amelyek a vizsgált anyagra jellemzőek.

A feszültség meghatározásának értelmezésében összhangban vannak a témában közölt régebbi és újabb kutatások, mivel a számítás a Johnson által meghatározott feszültségi kritériumok felhasználásával adódik az alábbi egyenletek szerint [12].

$$P_{fajlagos} = \frac{P}{A_c} \quad (22)$$

Johnson munkája alapján a képlékeny alakváltozás esetén:

$$\frac{P_{fajlagos}}{R_p} = \frac{P_{fajlagos}}{\sigma_r} \cong 3 = \psi. \quad (23)$$

A (23) képletben ψ egy konstans a felületre vetített nyomóerő és a reprezentatív feszültség arányának leírására. A (22) és (23) egyenletek alapján a reprezentatív feszültség a (24) egyenlet alapján számítható a benyomódási képlékeny szakaszának pontjaiban.

$$\sigma_r = \frac{1}{\psi} \cdot P_{fajlagos} = \frac{1}{\psi} \frac{P}{A_c} \quad (24)$$

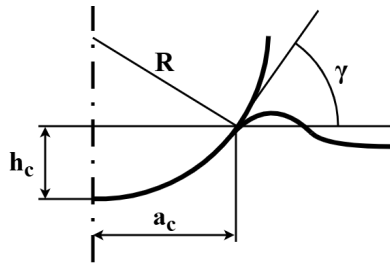
A teljes benyomódási és visszaterhelési görbeszakasz leírására alkotott modellt J. S. Field és M. V. Swain, amely egyaránt alkalmas az egy, valamint a több terhelési cikusból álló mérések jellemzésére is [14].

A reprezentatív nyúlás számítására két modellt alkalmaztak a műszerezett keménységméréssel foglalkozó kutatások. Az egyik megközelítés a Tabor által javasolt számítás, amely az alábbiak szerint felírható tapasztalati képlet [15]:

$$\varepsilon_r = 0,2 \cdot \frac{a_c}{R} = 0,2 \sin(\gamma). \quad (25)$$

Az egyenletben szereplő értékek értelmezését a 3. ábra szemlélteti. A benyomószerszám átmérőjét R , a kontakt mélységhez tartozó lenyomat sugarát a_c , a szerszám és a próbatest felületeinek érintkezési pontjában a felületek között bezárt szöget γ jelöli.

Az egyenlet jól alkalmazható kis benyomódási mélységek esetén a nyúlás és a benyomódási mélység kapcsolatának leírására, azonban a szinusz függvény sajátosságai miatt nem alkalmas a nagy alakváltozási képességű képlékeny anyagok vizsgálatához. Erre megoldásul javasolt J.-H. Ahn és D. Kwon egy olyan egyenletet, amely a



3. ábra: A benyomószerszám és a próbatest felületének találkozását jellemző paraméterek

benyomódás geometriáját a tangens függvény alkalmazásával köti össze a reprezentatív nyúlással az alábbiak szerint [16, 17].

$$\varepsilon_r = 0,14 \tan(\gamma) \quad (26)$$

Ez az egyenlet lehetővé teszi a nagyobb alakváltozással járó vizsgálatok eredményeinek kiértékelését. A reprezentatív feszültség és nyúlás értékeinek számítása a mérés adott pontjaiban lehetővé teszi az anyag folyásgörbéjének ábrázolását a (21) egyenlet paramétereinek görbeillesztéssel történő meghatározását követően. A feszültség-nyúlás görbe ismeretében, a vizsgált anyag rugalmassági modulusának felhasználásával határozható meg a 0,2%-os nyúláshoz tartozó folyáshatár, illetve a szakítószilárdság értéke.

A grafikus kiértékelés helyett alkalmazhatóak egyenletek is az anyagjellemzők meghatározásához, amelyek az alábbi formában írhatóak fel:

$$R_{p0,2} = K(0,002)^n, \quad (27)$$

$$R_m = K(n)^n. \quad (28)$$

A műszerezett keménységmérés egy gyakran alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálat a szilárdsági jellemzők meghatározásánál. Mivel a (25) és (26) egyenletekben szereplő konstansok empirikus módon meghatározott értékek, így a kutatások ezen képletek megfelelő alkalmazási területének körülhatárolására és a pontosság növelésére koncentrálnak [18].

3.5 Kúszás

A kúszás az anyagok folyáshatáránál kisebb, hosszú ideig tartó állandó terhelés hatására bekövetkező képlékeny alakváltozása. A kúszás az alakváltozási sebesség idő szerinti függvényével jellemezhető. Hagyományos jellemzéséhez nagy anyagmennyiség szükséges, a szakítóvizsgálatok elvégzési ideje pedig jelentős lehet. A műszerezett keménységmérés ebből adódóan vonzó megoldás lehet a folyamat jellemzésére, amelyet már a 20. század közepén felismertek.

A kúszás és a terhelés tartási idejének összefüggését vizsgálta T. O. Muehler és D. Tabor 1960-ban [33]. Kutatásukat – amely során hagyományos módon optikai úton határozták meg az anyag keménységét – félgömb végű benyomó szerszám segítségével végezték. Méréseik során azt tapasztalták, hogy a keménység értéke a következő egyenlet szerint csökken a terhelés tartási idejének

növekedésével.

$$H^{-(n+0,5)} = Cte^{-\frac{Q}{RT}} \quad (29)$$

Az egyenletben n a vizsgált anyag keménység kitévője, C egy anyagi konstans, t a terhelés tartási ideje, Q a kúszás aktivációs energiája, T a vizsgálati abszolút hőmérséklet, R pedig az egyetemes gázállandó.

A félgömb végű benyomó szerszám mellett más geometriák alkalmazását is vizsgálták a korai kutatások. Kiemelkedő munka ezek közül S. N. G. Chu és J. C. M. Li kutatása, akik sík végű, kör keresztmetszetű benyomószerszámmal kísérleteztek a kúszás paramétereinek meghatározása érdekében [34]. A sík végű szerszám alkalmazása a kúszási paraméterek meghatározásához előnyös, mivel a próbatestben ébredő feszültségmező jóval egyszerűbb más geometriák által létrehozott feszültségmezőhöz képest.

A műszerezett keménységmérés alkalmazásának elterjedése új lehetőségeket teremtett a próbatest időfüggő jellemzőinek vizsgálatára. A legtöbb esetben az ilyen vizsgálatokat Berkovich geometriájú szerszámmal végzik, amelynél a mérés során az átlagos feszültség, illetve a nyúlási sebesség értékeit a következő egyenletekkel számítják [35].

$$\sigma \propto H = \frac{P_{\max}}{A_c} = \frac{P_{\max}}{\xi h_c^2}, \quad (30)$$

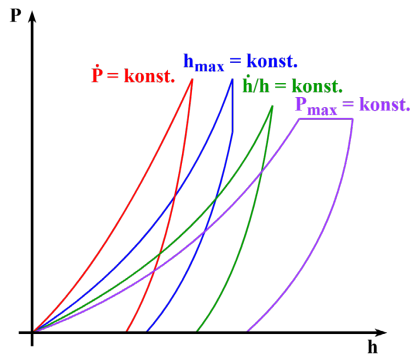
$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{\dot{h}}{h}. \quad (31)$$

A (30) egyenletben a kontaktfelület számítását a Berkovich típusú szerszám alakfüggvényének alkalmazásával lehet közelíteni, amelyben ξ konstans értéke ennél a szerszám geometriánál $\xi = 24,56$.

Az 1980-as évek óta négy különböző mérési módszert dolgoztak ki a kúszás jelenségének vizsgálatára. Az első módszer a konstans elmozdulás módszere, amely során a maximális terhelőerő elérését követően a benyomódási mélység értékét rögzítik és így monitorozzák a terhelőerő csökkenését az idő előrehaladtával ($h_{\max} = konst.$). A második módszer a konstans benyomódási sebesség alkalmazása ($\dot{P} = konst.$). A harmadik eljárás az alakváltozás sebességét rögzíti ($\dot{h} / h = konst.$), míg a negyedik a maximális terhelőerő elérését követően rögzíti a terhelőerő nagyságát és monitorozza a benyomódási mélység növekedését ($P_{\max} = konst.$). Ezeket a módszereket mutatja be a 4. ábra.

A felsorolt eljárások közül kiemelkedően népszerű a konstans benyomóerő alkalmazása, tekintve, hogy ez áll legközelebb a műszerezett keménységmérés szabványos kivitelezési folyamatához.

Azonban a kúszási folyamat műszerezett keménységmérés általi jellemzése kihívásokat is magában hordoz. A nehézségek közül megemlíthető, hogy az egytengelyű húzásnál fellépő feszültségmező jóval egyszerűbb a keménységmérés alatt kialakuló feszültségmezőnél. Emellett problémát jelent, hogy a műszerezett keménységméréssel végzett kúszásvizsgálat néhány perces



4. ábra: A kúszási folyamat jellemzésére kifejlesztett mérési eljárások

tartási ideje jóval rövidebb az egytengelyű kúszásvizsgálat esetén alkalmazott akár több ezer órás terhelési időnél. Ez azt eredményezi, hogy a vizsgált állandósult (másodlagos) kúszási jelenség kisebb hatással van a végleges eredményre, mint a hagyományos kúszásvizsgálatok esetében, amely félrevezető lehet az eredmények kiértékelésénél.

A kivitelezéssel kapcsolatos kérdések mellett az alkalmazott benyomó szerszám alakja is fontos kérdéseket vet fel. A benyomódás során az anyag nyúlása a (26) egyenlet szerint a benyomó szerszám és a vizsgált anyag felülete által bezárt szög függvénye. Ez a szög gömb alakú szerszámnál a mérés során dinamikusan változik, azonban Berkovich típusú gúla alkalmazása esetén állandó értéket vesz fel a teljes mérési időtartam alatt. Ennek eredményeként a nyúlás konstans értéket vesz fel, amely megghiúsítja a kúszás jelenségét jellemző nyúlás-idő függvény kiértékelésének eredményességét.

Mindemellett szükséges figyelmet fordítani a szerszám hegyével kapcsolatos szingularitási problémára, valamint a szerszám alatti térfogatban ébredő kiemelkedően nagy feszültségre, amely eltér a szakítógéppel végzett kúszásvizsgálat feszültségmezőjétől.

A felsorolt kihívásokból adódóan szükséges kutatásokat végezni a műszerezett keménységméréssel végzett kúszási paraméter meghatározása területén. A témával foglalkozó kutatások új megközelítéseket alkalmaznak, mint például a műszerezett keménységmérésből meghatározott nyúlás (26) egyenlet szerinti definíciójának átalakítása, vagy eltérő megközelítés alkalmazása a nyúlás és idő kapcsolatának leírására. Ezek a megoldási lehetőségek és kutatási irányok több publikációban is részletesen kifejtésre kerültek [33, 36].

3.6 Kifáradási határ

A ciklikusan ismétlődő igénybevételnek kitett szerkezetek nagy részarányát képezik az ipari berendezéseknek, gépeknek. Ebből adódóan fontos a kifáradás jellemzését szolgáló feszültség-ciklusszám diagram ismerete. Ideális esetben a szerkezet gyártását megelőzően a releváns kifáradási adatok rendelkezésre állnak, azonban a dokumentáció hiányában a meglévő szerkezetet vizsgálva lehet információt gyűjteni. A hagyományos kifáradás vizsgálat során nagy mennyiségű próbatest felhasználása

szükséges a teljes kifáradási görbe megalkotásához [40]. Ez a tulajdonság kis anyagmennyiség rendelkezésre állása esetén ellehetetleníti az ilyen típusú eredmény meghatározását.

A műszerezett keménységmérés folyamata végezhető ciklikus terhelés mellett, különböző terhelőerő szintek alkalmazásával. Ezáltal a mérés alkalmas a feszültség és a ciklusszám meghatározására, amelyből megalkotható a jellegzetes kifáradási görbe. A mérés alkalmassága ellenére a ciklikus terheléssel végzett kutatások nagy része nem tért ki a műszerezett keménységmérés és a hagyományos Wöhler-görbe kapcsolatának vizsgálatára. Egyes kutatások a ciklikus terhelés hatására történő benyomódási mélység növekedést állapították meg, amelyet a fáradásos repedésterjedés mechanizmusához hasonlítottak [37]. A felületi keménység és a fáradási tulajdonságok kapcsolatát vizsgálta A. Çelik és kutatócsoportja, amely során megállapították a fáradási szilárdság növekedését az anyag felületi keménységének növekedésével [38]. B. Xu és kutatócsoportja a hagyományos Wöhler-görbe egyenletéhez hasonló összefüggést javasoltak a kifáradás műszerezett keménységmérés által meghatározható értékekkel történő leírására [39].

A felsorolt kutatások mellett az utóbbi években kezdtek el vizsgálni annak a lehetőségét, hogy a mért értékek milyen módon kapcsolhatóak össze a kifáradási görbével. A keménységméréssel végzett kifáradásjellemzés alapja, hogy az anyag merevsége (E) – amely meghatározásával a 3.1 fejezet foglalkozik – közvetlen kapcsolatban áll a feszültségamplitúdó (σ_a) értékével [40, 41]. Ezt az összefüggést ciklikus terhelésnek alávetett próbatest vizsgálatával ismerték fel. A próbatest merevségét – ciklusonként számítva a visszaterhelési görbeszakasz alapján – a benyomódási ciklusszám függvényében ábrázolják. Ez alapján a merevség értékének csökkenése tapasztalható a ciklusszám növekedésével.

4. Összefoglalás

A műszerezett keménységmérés információhordozó képességének bemutatása céljából ismertetésre kerültek a mérés eredményéből leggyakrabban meghatározott anyagi paraméterek. Az anyagvizsgálat eredményeként kapott erő elmozdulás görbe a vizsgált anyag terhelésre adott komplex választ írja le. Ezáltal a keménység értékén kívül meghatározhatóak az anyagra jellemző statikus anyagvizsgálati mérőszámok és jellemzők, mint a rugalmassági modulus, a szakítószilárdság, a folyáshatár, a törési szívósság, kúszási paraméterek, valamint a kifáradási görbe is. A cikk során ezen jellemzők meghatározásának módszertanát ismertettük, bemutatva az alkalmazott számítási eljárások előnyeit és határait is.

A vizsgálat innovatív lehetőségei már az 1980-as években foglalkoztatta a kutatókat, azonban az eredmények precíz kiértékelése napjainkban is népszerű kutatási terület. A mérés előnye, hogy nem kizárólag a teljes szerkezet, hanem lokális paraméterek – akár bevonatok, vagy felületkezelésből adódó változások – is vizsgálhatóak a benyomódás méretéből adódóan.

A műszerezett keménységmérés eredményének mély tartalma, illetve a meghatározott anyagjellemzők széles skálája bizonyítja a mérés kiemelkedő alkalmazhatóságát a vizsgált anyag karakterizálásában. A kivitelezés nagy fokú precizitást igényel a vizsgálati berendezés kialakításánál és a mérés kivitelezésénél egyaránt. Az irodalomkutatás során bebizonyosodott, hogy a vizsgálati módszer és a meghatározható eredmények területén is szükséges további kutatásokat végezni a benyomószerszám alatt kialakuló komplex feszültségmező pontosabb modellezése érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megvalósulását az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program és a Kooperatív Doktori Program keretein belül támogatta a Kulturális és Innovációs Minisztérium, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap.

Irodalomjegyzék

- [1] Kulcsár Benedek, Szávai Szabolcs: Keménység, mint alakítási munka, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2025/I-II. lapszám, pp. 18-24.
- [2] Pavlina, E. J., Van Tyne, C. J.: Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17, 2008, pp. 888-893. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9225-5>
- [3] Boussinesq, J.: *Applications des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*. Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, 1885. Paris
- [4] Doerner, M. F., Nix, W. D.: A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *Journal of Materials Research*, 1, 1986, pp. 601-609.
- [5] Oliver, W. C., Pharr, G. M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7, 1992, pp. 1564-1583.
- [6] Borodich, F. M., Keer, L. M.: Evaluation of elastic modulus of materials by adhesive (no-slip) nano-indentation, *Proceedings of the Royal Society A*, 460, 2004, pp. 507-514.
- [7] Sneddon, I. N.: The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *International Journal of Engineering Science*, 3, 1965, pp. 47-57.
- [8] Hay, J.: Introduction to instrumented indentation testing, *Experimental Techniques*, 33, 2009, pp. 66-72.
- [9] Cagliero, R., Barbato, G., Maizza, G., Genta, G.: Measurement of elastic modulus by instrumented indentation in the macro-range: Uncertainty evaluation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 101-102, 2015, pp. 161-169.
- [10] Peng, G., Liu, Y., Xu, F., Jiang, H., Jiang, W., Zhang, T.: On determination of elastic modulus and indentation hardness by instrumented spherical indentation: influence of surface roughness and correction method, *Materials Research Express*, 10, 2023, 086503
- [11] Hay, J. L., Pharr, G. M.: *Instrumented Indentation Testing*, ASM Handbook, 8: Mechanical testing and evaluation, 2000, pp. 232-243.
- [12] Johnson, K. L.: *Contact mechanics*, Cambridge University Press, 1985
- [13] Hertz H.: On the contact of rigid elastic solids and on hardness, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Macmillan and Co., New York, 1882
- [14] Field, J. S., Swain, M. V.: A simple predictive model for spherical indentation, *Journal of Materials Research*, 8, 1993, pp. 297-306.
- [15] Tabor, D.: *The hardness of metals*, Clarendon Press, Oxford, 1951
- [16] Kim, J.-Y., Lee, K.-W., Lee, J.-S., Kwon, D.: Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach, *Surface & Coatings Technology*, 201, 2006, pp. 4278-4283.
- [17] Ahn, J.-H., Kwon, D.: Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect, *Journal of Materials Research*, 16, 2001, pp. 3170-3178.
- [18] Scales, M., Anderson, J., Komuta, J. A., Switzer, N., Gonzalez, R., Veloo, P.: Accurate Estimation of Yield Strength and Ultimate Tensile Strength through Instrumented Indentation Testing and Chemical Composition Testing, *Materials*, 15, 2022, 832.
- [19] American Society for Testing and Materials – ASTM E1820-22, 2022
- [20] Kruzic, J. J., Kim, D. K., Koester, K. J., Ritchie, R. O.: Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2, 2009, pp. 384-395.
- [21] Quinn, G. D., Bradt, R. C.: On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test, *Journal of the American Ceramic Society*, 90, 2007, pp. 673-680.
- [22] Li, J., Zhang, T., Wang, S., Cheng, J., Wang, W.: Mechanism and method of testing fracture toughness and impact absorbed energy of ductile metals by spherical indentation tests, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36, 2023, 108.
- [23] Lee, J.-S., Jang, J.-I., Lee, B.-W., Choi, Y., Lee, S. G., Kwon, D.: An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics, *Acta Materialia*, 54, 2006, pp. 1101-1109.
- [24] Byun, T. S., Kim, J. W., Hong, J. H.: A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test, *Journal of Nuclear Materials*, 252, 1998, pp. 187-194.
- [25] Haggag, F. M., Byun, T. S., Hong, J. H., Miraglia, P. Q., Murty, K. L.: Indentation-energy-to-fracture (IEF) parameter for characterization of DBTT in carbon steels using nondestructive automated ball indentation (ABI) technique, *Scripta Materialia*, 38, 1998, pp. 645-651
- [26] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 221, 1921, pp. 163-198.
- [27] Blumenauer, H., Pusch, G.: *Műszaki törésmechanika*, Műszaki Könyvkiadó, 1987, Budapest
- [28] Gurson, A. L.: Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of Engineering materials and technology*, 99, 1977, pp. 2-15.
- [29] Andersson, H.: Analysis of a model for void growth and coalescence ahead of a moving crack tip, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 25, 1977, pp. 217-233.
- [30] Tvergaard, V., Needleman, A.: Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar

- [31] Kachanov, L. M.: Rupture time under creep conditions, Izvestia Akademii Nauk SSSR, 8, 1958, pp. 26 31.
- [32] Lemaitre, J.: A course on damage mechanics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [33] Choi, I.-C., Yoo, B.-G., Kim, Y.-J., Jang, J.-I.: Indentation creep revisited, Journal of Materials Research, 27, 2012
- [34] Chu, S. N. G., Li, J. C. M.: Impression creep; a new creep test, Journal of Materials Science, 12, 1977, pp. 2200 2208.
- [35] Raman, V., Berriche, R.: An investigation of the creep processes in tin and aluminum using a depth-sensing indentation technique, Journal of Materials Research, 7, 1992, pp. 627-638.
- [36] Prach, O., Minnert, C., Johannis, K.E., Durst, K.: A new nanoindentation creep technique using constant contact pressure, Journal of Materials Research, 34, 2019, pp. 2492 2500
- [37] Li, J. C. M., Chu, S. N. G.: Impression fatigue, Scripta Metallurgica, 13, 1979, pp. 1021 1026.
- [38] Çelik, A., Arslan, Y., Yetim, A. F., Efeoglu, I.: Fatigue behaviour of duplex treated AISI 316L stainless steel, Kovove Materialy, 45, 2007, pp. 35 40.
- [39] Xu, B., Yonezu, A., Chen, X.: An indentation fatigue strength law, Philosophical Magazine Letters, 90, 2010, pp. 313 322.
- [40] Santos, L. S., Bruck, H. A.: „New method for fatigue characterization via cyclical instrumented indentation testing”, Experimental Techniques, 47, 2023, pp. 679 688.
- [41] Li, X., Bhushan, B.: Nanofatigue studies of ultrathin hard carbon overcoats used in magnetic storage devices, Journal of Applied Physics, 91, 2002, 8334.
- [42] Hoščilo, B., Molski, K. L.: Application of instrumented indentation procedure in assessing the low-cycle fatigue properties of selected heat-treated steels, Materials, 17, 2024, 2375.
- [43] Ma, Q.-P., Basterrech, S., Halama, R., Omacht, D., Měsíček, J., Hajnýš, J., Platoš, J., Petrů, J.: Application of instrumented indentation test and neural networks to determine the constitutive model of in-situ austenitic stainless steel components, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 24, 2024, 129.



NDE
IN NUCLEAR 2027

NDE in Nuclear

29 June - 1 July 2027

 **Bratislava, Slovakia**

Enhancing Nuclear Safety and Reliability
through **N**on-**D**estructive **E**xamination