

RÉGER MIHÁLY – HORVÁTH RICHÁRD – SZÉLL ATTILA – RÉTI TAMÁS –  
GONDA VIKTOR – FELDE IMRE

## Új módszer felületi rétegek keménységeloszlásának becslésére

*A fémötvözetek felületkezelésének leggyakoribb célja a felület keménységének és kopásállóságának növelése. A felületkezelés eredményeként kialakult kéregvastagság és a mélység irányú keménységeloszlás meghatározása a kezelt felületre merőleges irányú csiszolaton végrehajtott keménységméréssel és metallográfiai vizsgálattal történhet. A hőkezelés eredményességének gyors ellenőrzéséhez felületi keménységmérés is alkalmas, ennek elvégzése lényegesen egyszerűbb és olcsóbb, ugyanakkor a rétegvastagságra és keménységeloszlására vonatkozóan a felületi keménység csak közvetett információkat hordoz. A felületi és keresztmetszeti keménység az indentáció során kialakuló képlékeny zóna matematikai modelljén keresztül hozható kapcsolatba, melynek segítségével a felületi és mélységi keménységfüggvények átszámíthatók egymásba. A matematikai modell alkalmazhatóságának ellenőrzése különböző rétegvastagságú karbonitridált minták keménységi adatainak elemzésével történt. A megvizsgált esetekben a kidolgozott módszerrel a keresztmetszeten mérhető keménységeloszlás kielégítő pontossággal becsülhető a felületi keménységmérési adatok felhasználásával.*

### 1. Bevezetés

A fémek felületi rétegeinek minősítésére a legelterjedtebb eljárás a szűrő keménységmérési módszerekkel (Vickers, Rockwell) meghatározott keménységi értékek nyomon követése. A réteg minősítéséhez általában két mérőszám meghatározása, becslése szükséges. Egyrészt a felület keménységének kiemelkedő jelentősége van, hiszen a működő alkatrészekben a felületi keménység drasztikusan befolyásolja a kopás, elhasználódás folyamatát. A felületi keménység meghatározása önmagában sem triviális feladat, tekintve, hogy a mért keménységi érték függ az alkalmazott eljárástól és a terhelőerő nagyságától is. Ez utóbbinak az az oka, hogy a mért keménységi értéket nemcsak a felület keménysége, hanem a felület alatti – általában lágyabb – anyagréteg keménysége is befolyásolja. A felületen mért  $H_s$  keménység a terhelőerő függvénye, minél nagyobb a terhelés, általában annál kisebb a felületi keménység. Ugyanakkor az *1a ábrán* látható módon a  $H_s$  felületi keménység az indentációs mélység függvényének is tekinthető ( $F_1 < F_2 < F_3 < F_4$ ), a továbbiakban a felületi keménységfüggvény kifejezésen ez utóbbit értjük ( $H_s = H_s(h)$ ). A másik

mérőszám a felületi réteg vastagsága, melynek meghatározása roncsolásos vizsgálattal, a minta felületre merőleges irányú csiszolattal, általában azonos és kicsi terhelőerővel végzett keménységmérési sorozattal történik. A felülettől adott  $x$  távolságokban megállapított  $H_d$  diszkrét keménységi értékeket a folytonos – általában a felülettől monoton csökkenő – keménységletfutási függvény elemeinek tekintjük az *1b ábra* vázlatának megfelelően ( $H_d = H_d(x)$ ), így a felülettől számított távolság és a keménységi értékek közötti összefüggés, vagyis a mélységi keménységfüggvény közelítőleg meghatározható. Ezen függvény segítségével azután a vonatkozó előírások vagy szabványok alapján a rétegvastagság értéke megállapítható. A felületre merőleges helyzetű csiszolaton metallográfiai vizsgálatokat is szokás végezni, mivel a felületi kezelések általában a mikroszerkezet jellegzetes módosulásait is eredményezik.

A felületen és a felületre merőleges csiszolaton mért keménységi értékek, vagyis a  $H_s(h)$  és a  $H_d(x)$  függvények természetszerűleg összefüggnek, hiszen egyazon felületi réteg tulajdonságait „tapogatjuk le” a keménységmérő eszközzel végzett különböző irányú és pozíciójú méréssel. A

**Dr. Réger Mihály** szakmai életrajzát 2019/2. számunkban közzétettük.  
**Dr. Horváth Richárd** 2007-ben egyetemi oklevelet kapott a BME Gépészmérnöki Karán, 2015-ben doktorált ugyanott. 2004-től dolgozik az Óbudai Egyetem Bánki Karának Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézetében.

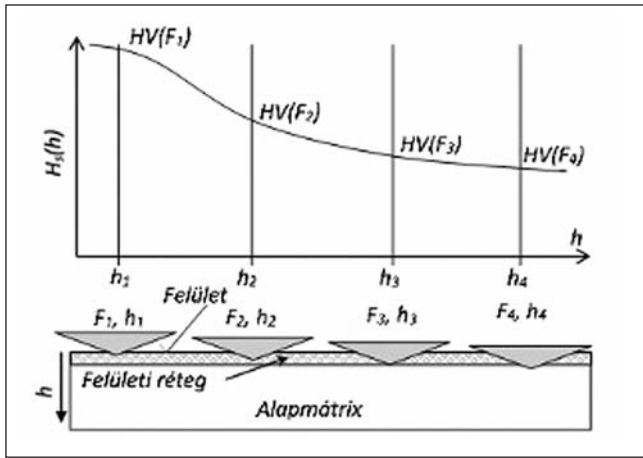
**Széll Attila** 2009-től a TS Magyarország Kft. PVD szegmensének irányítója, jelenleg a vállalat termelési vezetője. 2017 óta a Dunaújvárosi Egyetem anyagmérnök BSc-hallgatója.

**Dr. Réti Tamás** felsőfokú tanulmányait a Bánki Donát Műszaki Főiskolán és az ELTE Alkalmazott Matematika Szakán végezte.

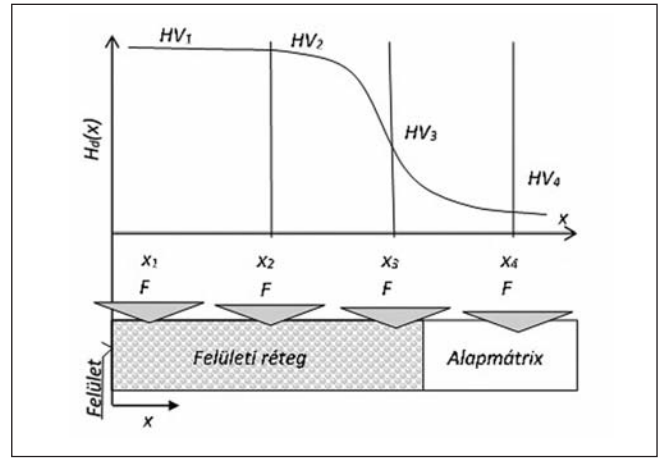
1995-ben elnyerte az MTA műszaki tudomány doktora címet. Jelenleg az Óbudai Egyetem oktatója, emeritusz professzorként.

**Dr. Gonda Viktor** gépészmérökként végzett a BME-n, 2008-ban doktorált. 2012-től dolgozik az Óbudai Egyetem Bánki Karának Anyagtechnológia Tanszékén.

**Dr. Felde Imre**, informatikus mérnök, PhD-fokozatát 2007-ben szerezte, az Óbudai Egyetemen habilitált 2018-ban. 2012-től az Óbudai Egyetem Neumann János Informatika Karának kutatási dékánhelyetteseként, 2018-tól az Egyetem rektorhelyetteseként dolgozik.



a) felületi



b) mélységi

■ 1. ábra. A  $H_s$  felületi és a  $H_d$  mélységi keménységfüggvény értelmezése

kicsi terheléssel végzett felületi keménységmérés alapvetően a kéreg felső tartományáról szolgáltat információt. Ugyanakkor ez az információ is egy felületi tartomány átlagos mechanikai viselkedését tükrözi, hiszen akármilyen kicsi is a terhelőerő, létrejön egy nullánál nagyobb méretű  $h$  indentációs mélység. A mért keménységet nemcsak a  $h$  vastagságú felületi anyagréteg, hanem az indentációs nyom körüli és alatti anyagrétegek viselkedése is befolyásolja. A réteg keménységének meghatározása során kis terhelés esetén a lenyomat mérethatását (indentation size effect, ISE) is figyelembe kell venni, mivel kis terheléseknél a terhelőerő függvényében is változhat a keménység [1, 2]. Jelen munkában az ISE hatástól eltekintünk, mivel a keménységmérések során alkalmazott legkisebb terhelés (1,962 N, HV0,2) esetén is jellemzően 2  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb  $h$  indentációs mélységek alakultak ki. A felületi keménységmérés során minél nagyobb a terhelőerő, a mért érték annál kevésbé jellemzi a legkülső felület állapotát, hiszen a támasztó réteg, illetve az alapmátrix befolyása egyre nő. Ebből adódik az az alapkérdés, hogy akkor tulajdonképpen mit is jellemez egy felületi keménységi mérőszám, és hogyan is lehet interpretálni a felületi keménységmérési eredményeket inhomogén keménységeloszlás esetén.

A jelen tanulmány elsősorban ezekre a kérdésekre keresi a választ, illetve arra, hogy egy keménységi szempontból inhomogén réteg felületi keménységmérése alapján lehet-e bármilyen megalapozott következtetést levonni a teljes kéregszerkezet mechanikai tulajdonságait illetően. Végül soron a tanulmányban arra teszünk kísérletet, hogy a felületi keménységi adatokból jó közelítéssel megbecsüljük a mélységi keménységi értékeket, vagyis a felületre merőleges síkban (csiszolaton) a felülettől mért távolság függvényében várható mélységi keménységeloszlást.

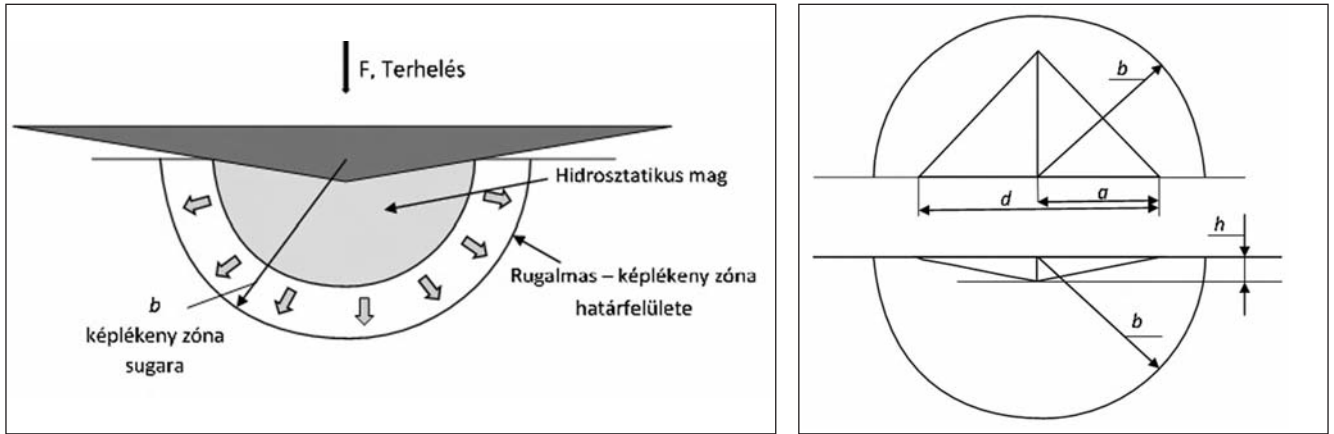
## 2. A kompozit keménység és annak értelmezése

A felületi keménység információtartalmának elemzése a vékony felületi bevonatok (pl. PVD) alkalmazásának elterjedésével vált igazán fontossá. Ezekben az esetekben a felületi bevonat (film) tényleges keménységének meghatározása nagy bizonytalansággal terhelt, mivel a szubsztrát (vagyis az alapmátrix, a hordozó) keménysége is befolyásolja a mérés eredményét. Ebben az időszakban születtek

meg azok a matematikai modellek, melyek a felületi keménység értékét ún. kompozit keménységként értelmezték, vagyis a mért keménységi értéket a szubsztrát és a bevonat egyedi keménységének kombinációjával határozták meg. A kidolgozott modellel – ha ismert a szubsztrát keménysége – a felületen mért kompozit keménységből a bevonati film keménysége megbecsülhető.

Elsőként Bückle [1] javasolt számítási módszert a film és a szubsztrát keménységének kombinációjával a kompozit keménység meghatározására. Hasonló elveken alapul Jönsson és Hogmark [3] modellje, mely a terhelés alátámasztási felületek, illetve ezek vetületeinek relatív arányából vezeti le az eredő keménység meghatározási módját. Burnett és Rickerby elviekben is új modellt publikált a kompozit keménység meghatározására, ez az indenter alatt kialakuló rugalmas-képlékeny tartomány mechanikai szempontból korrekt figyelembevételén alapul [4]. Az alakítási keményedésre hajlamos anyagok esetén a viszonyok a gömbszerű üreg belső nyomás hatására történő tágulásának mechanikai modelljével írhatók le, melynek elmélete és a keménységmérésre történő adaptálása a 70-es évek óta ismert [5–7]. Burnett és szerzőtársa ezen elméletre építve nem a felületek, hanem térfogatok arányait vette számításba a keverési szabály alkalmazásával, így ez a megközelítés az indentáció során a bevonat és az alapmátrix képlékeny alakítási munkaszükségletének arányait veszi figyelembe. Iost a Jönsson és Hogmark modell mellett annak továbbfejlesztett változatát (Korsunsky modell) [8, 9], illetve a módosított Puchi-Cabrera [10] eljárást hasonlította össze és alkalmazta a vékony rétegek valódi keménységének meghatározására [11]. Szintén Jönsson és Hogmark munkájára alapozva Coorevits és Mejias a felületi keménység alapján történő mélységi keménységeloszlás becslésére dolgozott ki eljárást, mely az indenter alatti felületek integrális figyelembevételén alapul [12].

A kompozit keménységet a jelen dolgozatban – Burnett megközelítési módszerét követve – az indenter alatt, a 2. ábra vázlatán bemutatott, félgömb alakúnak feltételezett képlékeny zóna térfogata alapján értelmezzük [4]. A Vickers alakú indenter esetén e megközelítés alkalmazhatóságát Mata végeeselemes számítási eredményei is alátámasztják [13].



■ 2. ábra. Az indenter alatt kialakuló képlékeny zóna (balra) és annak metszetei (jobbra)

A keménységmérés során kialakuló rugalmas-képlékeny állapot leírására kidolgozott elmélet (gömbszerű üreg belső nyomás hatására történő tágulása) szerint a rugalmas-képlékeny alakváltozás határfelületét jelentő félgömb alakú felület  $b$  sugara és a Vickers-lenymat  $a$  félátlója ( $a = d/2$ ) között érvényes a

$$b = a(E/H)^{1/p} \cot^{1/3} \varphi \quad (1)$$

összefüggés, ahol  $E$  a rugalmassági modulus,  $H$  a felületi keménység,  $p$  egy 2-3 közötti értékű konstans (jelen munkában  $p = 3$ ),  $\varphi$  pedig az indenter szemközti oldalélei által bezárt szög fele ( $148^\circ/2 = 74^\circ$ ). Kiemelkedően fontos ez az összefüggés a gyakorlati alkalmazás szempontjából, mivel kapcsolatot teremt az indentációs nyom és a képlékeny zóna mérete között. A Vickers-gyémánttal létrehozott lenymat  $h$  mélysége és  $d$  átlója között fennáll a  $d = 7h$  összefüggés, így a  $b$  képlékeny zóna sugár közvetlenül a  $h$  indentációs mélység függvényeként is értelmezhető ( $b = b(h)$ ).

Burnett modelljét *Ichimura* fejlesztette tovább és alkalmazta duplex bevonatú szerszámacélok PVD-rétegeinek értékelésére [14, 15]. A numerikus eljárás alkalmazásához a képlékeny zóna  $b$  sugarú félgömb térfogatát  $n + 1$  darab gömböszeletre osztotta fel a felülettel párhuzamos síkok mentén. Az így adódó  $n+1$  gömbön mindegyikére definiálta annak térfogatát és keménységét, ez utóbbi a mélységi  $H_d(x)$  keménységeloszlási függvény alapján meghatároz-

ható. *Ichimura* értelmezésében a kompozit keménység ekkor a következőképpen számítható:

$$H_{comp} = H_s(h) = (V_f / V_0)H_f + \sum_{i=1}^n (V_i / V_0)H_i \quad (2)$$

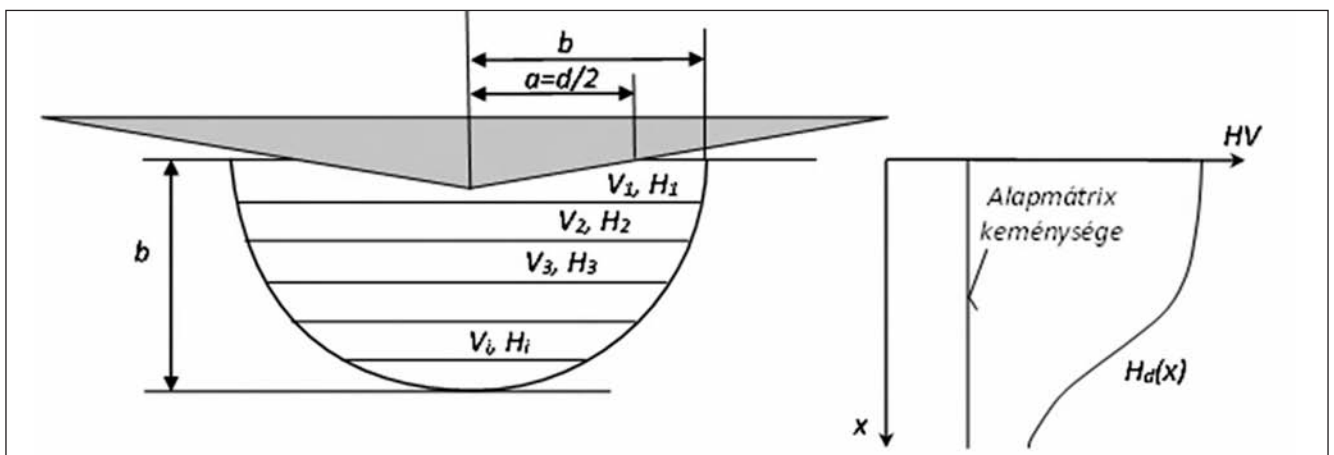
ahol  $V_f$  és  $H_f$  a felületi filmréteg térfogata és keménysége,  $V_i$ ,  $H_i$  a felület alatti  $i$ -edik gömbön térfogata és jellemző keménysége,  $V_0$  pedig a  $b$  sugarú képlékeny zóna térfogata. Ha a felületi filmréteg jelenlététől eltekintünk, akkor a (2) egyenlet a 3. ábrán bemutatott általánosított viszonyokra vonatkozóan a (3) összefüggés formájában írható fel. Megfelelő pontossággal ismert mélységi keménységeloszlás alapján egy tetszőleges  $h$  indentációs mélységhez tartozó felületi keménység az (1) egyenlet és a

$$H_{comp} = H_s(h) = \sum_{i=1}^n (V_i / V_0)H_i \quad (3)$$

összefüggés alkalmazásával becsülhető (ahol az  $i = 1$  érték a felülettel érintkező gömböt jelenti).

### 3. A keménységi függvények átszámítása

A felületkezelt rétegek  $H_d(x)$  mélységi keménységeloszlása általában monoton csökkenő jellegű. A felülettől a darab belsejének irányában haladva a gyakorlati felületkezelt alkatrészek esetében (pl. betétedzés, felületedzés, nitridálás) a keménység monoton csökkenése reálisan feltételezhető,



■ 3. ábra. A kompozit keménység értelmezése (balra) és a réteg keménységeloszlásának vázlata (jobbra)

mivel általában éppen az a cél, hogy a felületet ellenállóvá, kopásállóvá tegyük. Bizonyos esetekben előfordul, hogy a bevonatolt rétegben a keménységeloszlás maximuma nem a felületre esik (pl. maradék ausztenit megjelenése, vagy dekarbonizálódás miatt), de az esetek többségében a felületi és a maximális keménység helye és értéke között kicsi az eltérés, így a monoton csökkenő tendencia jellemzőnek feltételezhető.

A mélységirányban kialakuló keménységfüggvény (a felülettől az alapmátrix eléréséig) folytonosnak tekinthető a betétedzés és a felületedzés esetén. A nitridált felületi kéreg vegyületi réteget is tartalmazhat, ez esetben a keménységi függvény folytonossága csak a diffúziós tartományra tekinthető igaznak. Vegyületi nitridréteg, vagy pl. PVD-bevonat esetén lépcsős függvény feltételezése indokolt. A jelen tanulmányban foglaltak a folytonos és monoton csökkenő mélységi keménységfüggvényt eredményező felületkezelési esetekre tekinthetők érvényesnek (pl. betétedzett, felületedzett, vegyületi réteg nélküli nitridált kéreg).

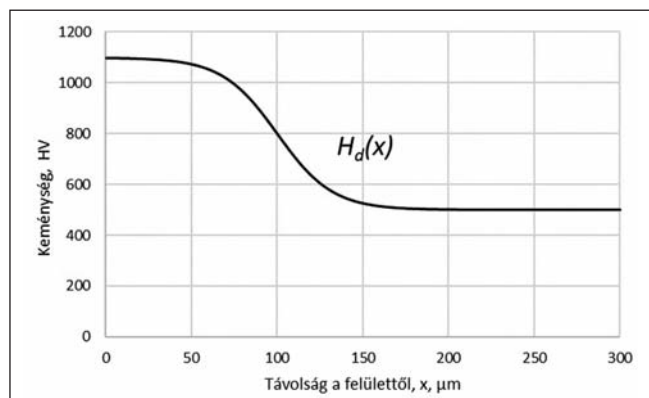
A numerikus módszerek alkalmazhatóságának érdekében célszerű a mélységi keménységeloszlást közelítő függvénnyel definiálni. Az előzetes számítások, valamint a könnyű kezelhetőség és a paraméterek fizikai értelmezhetősége okán a

$$H_d(x) = A1 + \frac{A1 - A2}{1 + e^{(x-x0)/dx}} \quad (4)$$

alakú, monoton csökkenő szigmoid függvény alkalmas a mélységi keménységeloszlás leírására. A (4) egyenletben  $A1$  a függvény felső,  $A2$  az alsó határértéke,  $x0$  a görbe inflexió pontjának  $x$  koordinátája,  $dx$  pedig időállandó, mely a függvény  $x$  tengely menti nyújtottságát fejezi ki.

### 3.1. A felületi keménységfüggvény számítása a mélységi keménységeloszlásból

A (4) egyenlettel közelített mélységi keménységeloszlásból a felületi keménység az (1) és (3) összefüggések felhasználásával határozható meg, előre definiált indentációs mélységekhez tartozóan. Tételezzük fel, hogy a mélységi keménységfüggvény ismert, és a keménység eloszlását az alábbi paraméterek definiálják:  $A1 = 1100$  HV,  $A2 = 500$  HV,  $x0 = 100$   $\mu\text{m}$ ,  $dx = 12,5$   $\mu\text{m}$ . Az  $x0/dx$  arány értéke fentiek alapján 8. Erre az esetre a függvény alakját a 4. ábra szemlélteti.



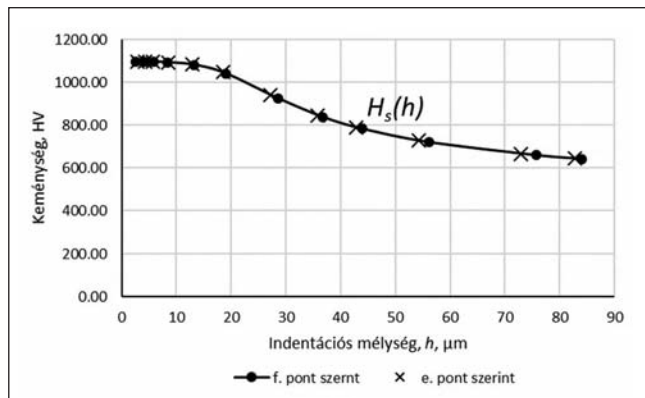
■ 4. ábra. A  $H_d(x)$  mélységi keménységeloszlást reprezentáló szigmoid függvény

Rögzítsük azon diszkrét  $h$  indentációs mélység értékeit, melyekhez tartozóan a várható felületi keménységet keressük. Az indentációs mélység sorozat kiválasztásának fontos szempontja, hogy  $h$  illeszkedjen a Vickers keménységmérés indentációs mélység tartományához és a várható rétegvastagsághoz. A jelen számításban a  $h$  indentációs mélység tartománya 3 és 82  $\mu\text{m}$  között változik, ez  $d \sim 7h$  feltételezése esetén 21-574  $\mu\text{m}$  lenyomatátlló tartománynak felel meg.

Tekintettel arra, hogy az (1) egyenletben szerepel a kiszámítandó  $H$  felületi keménység értéke is, így a  $b$  képlékeny zóna sugár függvény meghatározása többciklusú rekurziós számítással végezhető el az alábbi lépésekben:

- Legyen adott  $d$ , illetve  $h$  érték esetén  $H_0$  a  $H_s(h)$  felületi keménységfüggvény egy kezdeti, becsült értéke (pl. 500 HV egységesen).
- Határozzuk meg ezen feltétel mellett a  $b$  értékét az összes kiválasztott  $h$  indentációs mélységre, majd a számítás elvégzése után az eredményül adódó felületi keménységi érték sorozatot tekintsük a következő számítási ciklus kezdeti értékének.
- A számítási ciklus többszöri ismétlése során a ciklushoz tartozó kezdeti érték és a végeredmény konvergál egymáshoz.
- Képezzük a ciklusban minden  $h$  értékhez tartozóan a kezdeti és végérték különbségét, melyek hibahatáron belüli eltérése esetén kapjuk a felületi keménységérték sor végeredményét. A tapasztalatok szerint 0,01 HV értéknél kisebb eltérés adódik értékpáronként 6-8 számítási ciklus elvégzése után.
- A lenyomat méretéből és a fentiek szerint meghatározott keménységből a szükséges terhelőerő a Vickers-keménység definíciója alapján számítható.
- Mivel a keménységmérő berendezéseken a terhelés diszkrét, előre meghatározott értékekre választható, így célszerű a szokványos terhelésekre (HV0,2, HV0,5, HV1...HV120) korrigálni (pl. lineáris interpolációval, extrapolációval) az e pontban kapott eredményeket. A számítási módszer alkalmazásával kapott felületi keménységi értékeket az 5. ábra diagramja ábrázolja.

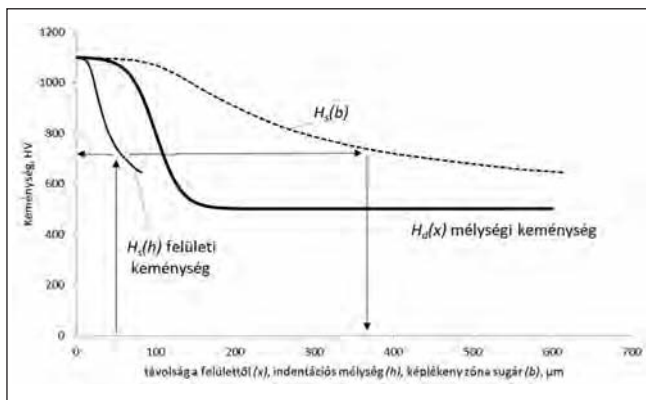
A 6. ábra a számítás fontosabb eredményeit összefoglalóan mutatja be. A kiindulópont tehát a mélységi vagy keresztmetszeti keménységeloszlás, ennek alakulását a felülettől mért  $x$  távolság függvényében a vastag vonal jelzi (azonos a 4. ábrán bemutatott függvénnyel). A végered-



■ 5. ábra. A  $h$  indentációs mélység–felületi keménység összefüggés alakulása ( $H_s(h)$ )



mény a vékony vonallal jelzett felületi keménységi értéksor, mely a  $h$  indentációs mélység függvényében látható (azonos az 5. ábrán bemutatott függvénnyel). A bemutatott esetben tehát például az 50  $\mu\text{m}$  mélységű felületi keménységi indentációs nyom a 730 HV keménységi értékhez tartozik, vagyis 50  $\mu\text{m}$  mélységű lenyomatot létrehozó terhelés esetén adódik a 730 HV felületi keménység. A 6. ábrán szerepel még egy szaggatott vonallal jelzett függvény, mely az adott  $H_s(h) = H_s(b)$  felületi keménységhez (és  $h$  értékhez) tartozó  $b$  képlékeny zóna sugarát reprezentálja. A felületi keménység (vékony vonal) egyes értékeinek meghatározása a szaggatott vonallal jelzett sugarú félgömb térfogatrész mélységi keménységi értékeinek figyelembevételével történt. Például a 730 HV értékhez tartozó pont esetén (melynél a felületi keménységmérés lenyomat mélysége 50  $\mu\text{m}$ ), a képlékeny zóna sugara 370  $\mu\text{m}$  körüli érték. Ez azt jelenti, hogy a felületi keménységfüggvény e pontjának értéke a 370  $\mu\text{m}$  sugarú félgömbnek feltételezett képlékeny zóna térfogatának és keménységének figyelembevételével volt számítható a 3. ábra vázlatával összhangban.



■ 6. ábra. A mélységi és felületi keménységfüggvény, valamint a képlékeny zóna sugarának alakulása a vizsgált esetben

### 3.2. A mélységi keménységeloszlás becslése a felületi keménységi értékekből

Ebben az esetben a méréssel meghatározott  $H_s(h)$  felületi keménység az input adatsor, a mélységi keménységeloszlást jellemző  $H_d(x)$  függvény pedig az output, az eredmény. A felületi keménységi értékekből a mélységi keménységeloszlás meghatározása visszavezethető a 3.1. fejezetben ismertetett fordított irányú számításra. Az inverz eljárás alkalmazása során a mélységi keménységi célfüggvény (szigmoid függvény) paramétereit célszerűen megválasztott tartományban változtatva minden paraméterkombinációban meghatározható a visszaszámított és a mért felületi keménységi értéksor különbsége, azaz a hibafüggvény (lásd (5) egyenlet). Keressük tehát a (4) egyenlet paramétereinek azon kombinációját, melyből a visszaszámított felületi keménység hibafüggvénye minimumot ér el. Az így meghatározott függvény lesz a – vizsgált paramétertartományban a felületi keménységértéket a legkisebb hibával közelítő –  $H_d(x)$  mélységi keménységeloszlás reprezentációja.

Az inverz feladat hatékony megoldásához a feltérképezendő paramétertartomány szűkítése célszerű. Mivel a (4) egyenlet paramétereinek fizikai jelentéssel is bírnak, így az alapanyag és a felületkezelés jellegének ismeretében a

vizsgálandó tartomány viszonylag nagy biztonsággal kijelölhető. Az  $A1$  paraméter a mélységi keménységeloszlás maximális értéke, melynek várható értéktartománya a gyakorlati felületkezelések esetében jól becsülhető. Az alapmátrix  $A2$  keménysége az esetek többségében ismert, így akár konstans értékűnek is tekinthető. Az  $x_0$  érték a görbe inflexió pontjának felülettől való távolsága szabad változó, értéktartománya a várható rétegvastagsághoz igazodik. Az  $dx$  az  $x_0/dx$  arányból számítható, ez az arány a felületi rétegek esetében általában 2 és 40 közé esik. Minél nagyobb az  $x_0/dx$  arány, annál élesebben változik a keménység az inflexió pont környezetében.

## 4. Vizsgálati anyagok

A felületi keménység és felületre merőleges csiszolaton mérhető keménységeloszlás összefüggésének ellenőrzése karbonitridált megalakító szerszámacél mintákon történt, melyek hőkezelése ipari körülmények között valósult meg [16]. A próbatestek alapanyaga 1.2344 ESR/ESU elektro-salakos átolvasztással készült, nagytisztaságú, finom karbideloszlású megalakító szerszámacél, (C 0,39%, Cr 5,2%, Mo 1,4%, V 0,95%, Si 1,1%), mely elsősorban nyomásos öntőszerszámok, töltőkamrák, műanyag fröccsszerszámok készítésére használatos.

A szerszámacél minták alapanyagának hőkezelése az anyagminőségre vonatkozó előírások szerint történt, nevezetesen ausztenítés 1050 °C-on vákumban, hűtés nagy nyomású nitrogén-gázban, háromszoros megeresztés nitrogén védőgázban 530, 600 és 570 °C-on. A hőkezelést követően a próbatesteken mért keménységi értékek átlaga 50,6 HRC (521 HV) érték volt. A minták karbonitridálására cianidmentes sófürdőben került sor. A 380 °C hőmérsékletű 60 perces előmelegítés után a karbonitridálás 580 °C-on történt, szignifikánsan eltérő kéregvastagságok elérése érdekében 60, 120 és 480 perces időtartammal. A hőkezeléssel megcélzott nitridált rétegvastagság 0,08, 0,1 és 0,18 mm volt a növekvő karbonitridálási idők sorrendjében [16].

A hőkezelés végén a nitridált felületi vegyületi réteg kémiai úton eltávolításra került, ennek megfelelően a mélységi keménységfüggvény folytonos monoton csökkenő jellege feltételezhető.

A felületre merőleges síkban kimunkált polírozott csiszolaton a mélységi irányú keménységeloszlás mérése HV0,2 (1,962 N) terheléssel, Vickers keménységmérés eljárással történt 50  $\mu\text{m}$ -es lépésközzel [16]. A felületi keménység meghatározása érdekében növekvő terhelések alkalmazása mellett szintén Vickers keménységmérés sorozatot végeztünk. A mikrokeménység mérése 0,2, 0,5, 1, 2, a makrokeménység megállapítása 5, 10, 20, 30, 40, 60, 100, 120 kg-os terheléssel történt. A felületi keménységmérés terhelési tartománya ennek megfelelően közel három nagyságrendet ível át. A keménységméréseket Zwick 3212 és hagyományos univerzális keménységmérő berendezéssel hajtottuk végre.

## 5. Felületi és mélységi keménységátszámítás karbonitridált réteg esetén

A karbonitridált, vegyületi rétegtől mentes minták kemény-

ségmérési adatainak feldolgozása keretében a mélységi keménységeloszlás alapján a felületi keménységi értékek becslését a 3.1. fejezetben, a felületi keménységből a mélységi keménységeloszlás meghatározását a 3.2. fejezetben leírt módon végeztük. A mélységi és felületi keménységmérés adatai alapján a mért és számított adatok összehasonlítására mindkét számítási irányban lehetőség van. Az eltérés jellemzésére a

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{i,mért} - H_{i,szám})^2}{n}}$$

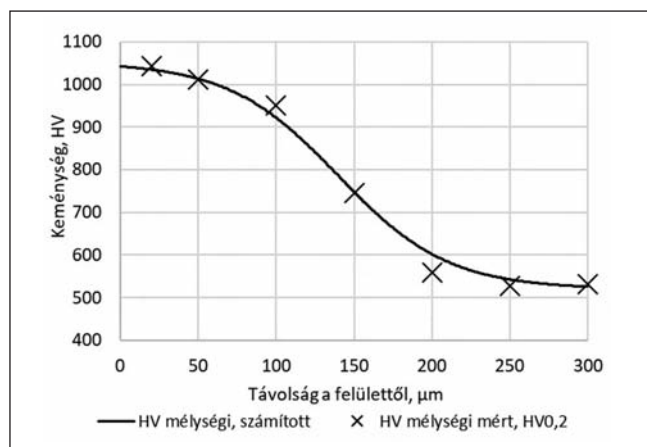
összefüggéssel definiált szórási jellemzőt alkalmaztuk (n a mért és számított adatpárok száma).

### 5.1. A mélységi keménységeloszlásból becsült felületi keménység

A  $H_d$  mélységi keménységeloszlás felülettől mért  $x$  távolság függvényében ábrázolt mérési adatai, illetve az adatokra kereskedelmi szoftverrel illesztett szigmoid függvény a 7a ábra diagramján látható, példaként a leghosszabb idejű, 480 perces karbonitridálási esetre nézve. A mélységi keménységeloszlás alapján a 3.1. fejezetben leírt módon számított felületi keménységfüggvény a 7b ábra diagramján követhető nyomon, melyen – az összehasonlíthatóság érdekében – a felületi keménység méréssel meghatározott értékeit is feltüntettük. A felületi keménységet a lenyomat átlójából számított  $h$  indentációs mélység függvényében ábrázoltuk. Mindhárom karbonitridálási esetre a közelítő függvény illesztési paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

**1. táblázat.** A mélységi keménységeloszlás közelítésére alkalmazott (4) egyenlet szerinti szigmoid görbe paramétereit a különböző karbonitridálási variációk esetén

Paraméter	Karbonitridálási idő, perc		
	60	120	480
A1, HV	1052,7	1049,2	1052,1
A2, HV	528,5	539,2	520,1
$x_0$ , $\mu\text{m}$	58,4	76,2	139,9
$dx$ , $\mu\text{m}$	10,9	11,2	27,4
$x_0/dx$	5,4	6,8	5,1



a

**2. táblázat.** A mért és számított felületi keménység értékei közötti szórás

		Karbonitridálási idő, perc		
		60	120	480
Átszámítás iránya	Szórás, HV			
	mélységi keménység	11,94	15,68	20,76
mélységi → felületi átszámítás	felületi keménység	18,30	25,74	10,98
	felületi keménység	10,98	14,61	7,13
felületi → mélységi átszámítás	felületi keménység	18,15	27,69	13,06
	mélységi keménység			

(5) A számított és mért adatok közötti szórásokat a 2. táblázat „mélységi → felületi átszámítás” sora tartalmazza.

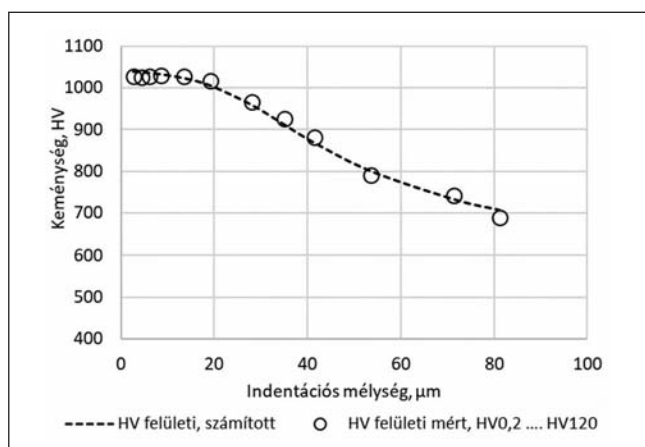
### 5.2. A felületi keménységből becsült mélységi keménységeloszlás

A  $H_s$  felületi keménységi adatokból a  $H_d$  mélységi keménységeloszlás inverz módon történő meghatározásához (3.2. fejezet) a (4) egyenlet paramétereit az alábbi határok között változtattuk:

- A1 maximális (felületi) keménység: 1000-1100 HV között, 10 HV lépésekben,
- A2 minimális (alpmátrix) keménység: 500-550 HV között, 10 HV lépésekben,
- $x_0$  inflexió pont  $x$  koordinátája: 30-200  $\mu\text{m}$  között, 1  $\mu\text{m}$  lépésenként,
- $x_0/dx$  arány: 4-30 között, egységnyi lépésközből.

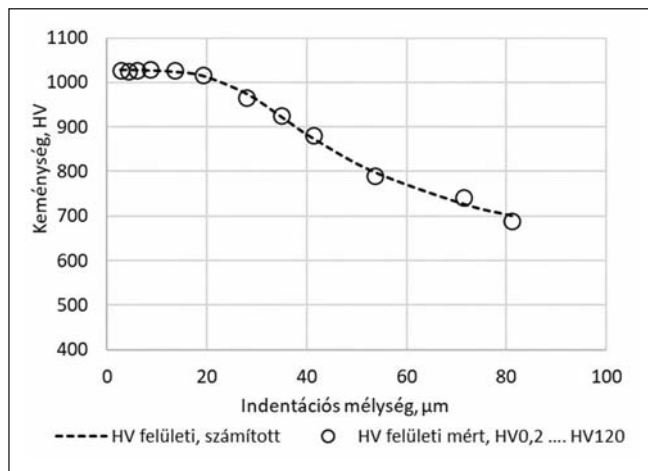
Minden paraméterkombináció, vagyis mélységi keménységeloszlás definiál egy felületi keménységi érték sorozatot, mely a 3.1. fejezetben foglaltak alapján határozható meg. A becsült értékek és a mért felületi keménységi adatok eltéréseinek (szórásának) minimumához tartozik a keresett – a vizsgált tartományon belüli –, legjobb illeszkedést eredményező paraméteregyüttes.

A 8. ábra az inverz számítás eredményeit mutatja be, ismét a 480 perces karbonitridálási technológiára vonatkozóan. A 8a ábra diagramja a 4. fejezetben definiált terhelések alkalmazása mellett mért felületi keménységi értékeket mutatja az indentációs mélység függvényében. A diagramban a fentiek szerint meghatározott, a felületi keménységi mérés adatsoraira legjobban illeszkedő  $H_s(h)$  függvényt is ábrázoltuk. A 8b ábra diagramja a legjobb felületi keménység illeszkedéshez tartozó  $H_d(x)$  mélységi keménységeloszlást reprezentálja. Ugyanezen diagramban a mélységi

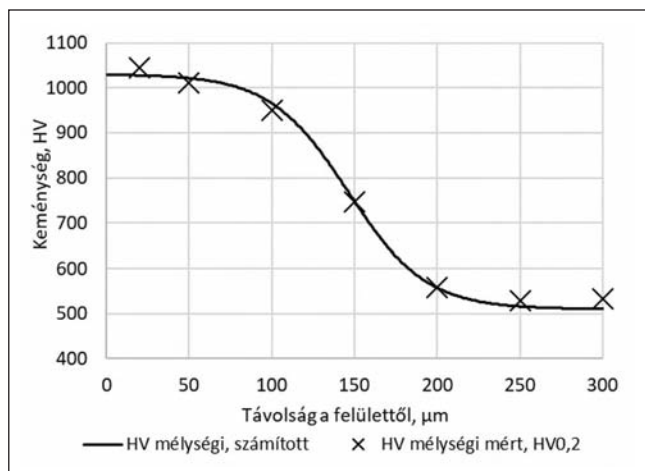


b

**7. ábra.** A mélységi keménységi értékek (a), és az ebből számított felületi keménység (b) alakulása a 480 perces karbonitridálás esetére



a



b

■ 8. ábra. A felületi keménységi értékek (a) és az ebből számított mélységi keménységeloszlás (b) alakulása 480 perces karbonitridálás esetén

keményység méréssel megállapított értékei is láthatóak. A mérési és inverz számítási eredmények eltérését, szórását a 2. táblázat „felületi → mélységi átszámítás” sora tartalmazza. Az inverz számítás végeredménye, vagyis a felületi keménységből származtatott mélységi keménységeloszlást leíró függvény paramétereit a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. táblázat. A felületi keménységből származtatott mélységi keménységeloszlási függvény paramétereit a három karbonitridálási variáció esetében

Paraméter	Karbonitridálási idő, perc		
	60	120	480
A1, HV	1030	1050	1030
A2, HV	530	530	510
$x_0$ , $\mu\text{m}$	55	80	146
$dx$ , $\mu\text{m}$	2,75	4	18,25
$x_0/dx$	20	20	8

## 6. Az eredmények értékelése

Az indenter alatt kialakuló képlékeny zóna Ichimura megközelítésében interpretált matematikai modellje a 3. fejezetben leírtak alapján egyértelmű kapcsolatot hoz létre a  $H_s(h)$  felületi és a  $H_d(x)$  mélységi keménységi függvények között. Egy adott mélységi keménységeloszlási függvény egyértelműen leképezhető felületi keménységi függvényre, illetve egy felületi keménységfüggvény egyértelműen meghatározza a mélységi keménységeloszlás függvényét.

Az 5. fejezet az elméleti modell gyakorlati alkalmazhatóságát elemzi a mélységi és felületi keménységek méréssel meghatározott adataira támaszkodva. Ez a megközelítés lehetőséget ad annak megítélésére, hogy a mélységi és felületi keménységfüggvények egyértelmű leképezése illeszkedik-e a vonatkozó mérési adatokhoz. A 2. táblázatban összefoglalt szórési értékek relatíve alacsony szintje első közelítésben valószínűsíti az elméleti modell gyakorlati alkalmazhatóságát, vagyis azt, hogy a felületi keménységből a mélységi keménységeloszlás – keresztmetszeti csiszolat készítése nélkül – kielégítő pontossággal becsülhető.

Az eredeti mélységi keménység adatokra illesztett függvény (1. táblázat), illetve a felületi keménységi értékek vonatkozásában a legjobb illeszkedést eredményező függvény (3. táblázat) paramétereinek összevetése arra mutat rá, hogy a felületi ( $A1$ ) és az alpmátrix ( $A2$ ) keménysége elfogadható pontossággal becsülhető a bemutatott eljárással. Hasonló megállapítás tehető az inflexiós pont helyzetére ( $x_0$ ) vonatkozóan, tekintve, hogy az eltérés maximuma 6-7  $\mu\text{m}$  körüli. A keménységi függvény  $x$  irányú nyújtottságát jelző  $x_0/dx$  paraméter alakulásában viszont szisztematikus különbség azonosítható, a felületi → mélységi átszámításból rendre nagyobb  $x_0/dx$  érték adódik (3. táblázat). Ez azt jelenti, hogy a felületi mérési adatsor meredekebb keménységi átmenetet prognosztizál az inflexiós pont környékére, mint az a mélységi adatokból következne. Az eltérés magyarázatának egyik eleme bizonyosan az, hogy a mélység irányú, keresztcsiszolaton végzett mérés során a keménységgradiens meghatározását a lenyomat mérete is befolyásolja, leginkább éppen az inflexiós pont környékén. A HV0,2 lenyomatátló 700 HV értéknél 23  $\mu\text{m}$ , így a két átlóvég között a lenyomat alatti anyagréz keménységében 150-200 HV különbség is lehet.

A bemutatott eljárás alkalmazhatósági határainak felmérése érdekében számos kérdés további vizsgálata szükséges. Tisztázandó például, hogy a keménységmérés jól ismert és a gyakorlatban tapasztalt eredendő mérési bizonytalansága hogyan befolyásolja a becslés pontosságát, illetve az, hogy az igen változatos típusú, szerkezetű, vastagságú és keménységeloszlású felületi rétegek esetére milyen módosításokkal alkalmazható a számítási eljárás.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatási eredmények létrejöttét a 1.3.1-VKE-2017-00025 azonosítószámú projekt támogatása tette lehetővé.

## Irodalom

- [1] Buckle, H., J. Westbrook and H. Conrad: The science of hardness testing and its research applications. American Society for Metals, 1973. 453.

- [2] Burnett, P. and T. Page: Surface softening in silicon by ion implantation. *Journal of materials science*, 1984. 19(3): p. 845–860.
- [3] Jönsson, B. and S. Hogmark: Hardness measurements of thin films. *Thin solid films*, 1984. 114(3): p. 257–269.
- [4] Burnett, P. J. and D. Rickerby: The mechanical properties of wear-resistant coatings: I: Modelling of hardness behaviour. *Thin Solid Films*, 1987. 148(1): p. 41–50.
- [5] Johnson, K.: The correlation of indentation experiments. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1970. 18(2): p. 115–126.
- [6] Marsh, D.: Plastic flow in glass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1964. 279(1378): p. 420–435.
- [7] Tabor, D.: The hardness of solids. *Review of physics in technology*, 1970. 1(3): p. 145.
- [8] Tuck, J., et al.: Modelling of the hardness of electroplated nickel coatings on copper substrates. *Surface and Coatings Technology*, 2000. 127(1): p. 1–8
- [9] Tuck, J. R., et al.: On the application of the work-of-indentation approach to depth-sensing indentation experiments in coated systems. *Surface and Coatings Technology*, 2001. 137(2-3): p. 217–224.
- [10] Puchi-Cabrera, E.: A new model for the computation of the composite hardness of coated systems. *Surface and Coatings Technology*, 2002. 160(2-3): p. 177–186.
- [11] Iost, A., et al.: A comparison of models for predicting the true hardness of thin films. *Thin Solid Films*, 2012. 524: p. 229–237.
- [12] Coorevits, T., et al.: An integral approach of indentation of Functionally Graded Materials. *Surface and Coatings Technology*, 2020. 381: p. 125–176.
- [13] Mata, M., O. Casals and J. Alcalá: The plastic zone size in indentation experiments: The analogy with the expansion of a spherical cavity. *International Journal of Solids and Structures*, 2006. 43(20): p. 5994–6013.
- [14] Ichimura, H., F. Rodriguez, and A. Rodrigo: The composite and film hardness of TiN coatings prepared by cathodic arc evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 2000. 127(2-3): p. 138–143.
- [15] Ichimura, H., Y. Ishii and A. Rodrigo: Hardness analysis of duplex coating. *Surface and Coatings Technology*, 2003. 169: p. 735–738.
- [16] Széll Attila: Melegalakító szerszámacélon kialakított karbonitridált réteg mikroszerkezetének optimalizálása továbbí pvd bevonatoláshoz, Dunaújvárosi Egyetem, TDK dolgozat, 2019.

HLAVÁCS ADRIENN – SCHWEITZER BENCE – MERTINGER VALÉRIA – BENKE MÁRTON

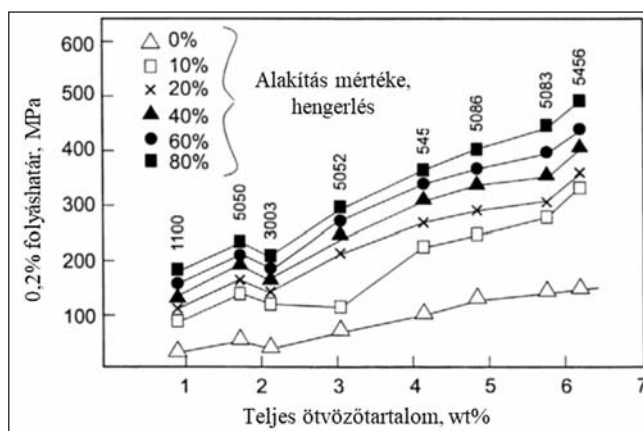
## Melegen hengerelt alakítható alumínium-ötvözetek fülesedése és a fő ötvözők hatása

*Jelen kutatásban melegen hengerelt állapotú, új összetételű, alakítható (3xxx-es és 5xxx-es típusú) alumínium-ötvözetek fülesedését vizsgáljuk. A lemezek vastagságából adódóan a konvencionális csészehúzó vizsgálatok nem alkalmazhatóak, ezért az általunk kidolgozott fülesedést becsülő módszert alkalmazzuk, melyhez kizárólag textúravizsgálatok eredményeire van szükség. Az eredményekből megállapítható, hogy a két ötvözet másképp viselkedik a meleghengerlés után, illetve, hogy az ötvöztartalom az egyik ötvözet esetében befolyásolja, a másik ötvözet esetében nincs hatással a fülesedés értékeire.*

### Bevezetés

Az alumínium (Al) alapú ötvözetek felhasználás szempontjából nemesíthető és alakítható ötvözetek csoportjára bonthatók. Az alakítható alumínium-ötvözetek családjába tartoznak az ötvöztelen (1xxx-es), a mangán- (Mn) tartalmú (3xxx-es), a magnézium- (Mg) tartalmú (5xxx-es) és az egyéb ötvözőket tartalmazó Al (8xxx-es) ötvözetek. Ezen ötvözetekből készült félkész termékek végső tulajdonságait nagymértékben befolyásolja a felhasznált alapanyag ötvöztartalma és az előállítás módja [1–5]. Az alakítás és az ötvöztartalom hatását a folyáshatárra alakítható alumínium-ötvözetek esetében a 1. ábra mutatja.

A hengerléssel előállított félkész termékek tulajdonságaiban fontos szerepet játszik az alakíthatóság irányfüggése is, amelyet a meleg-, illetve hideghengerlés, valamint az alkalmazott lágyító hőkezelések során kialakuló kristálytani



1. ábra. A folyáshatár változása a hidegalakítás mértéke és az ötvöztartalom függvényében [3]

**Hlavács Adrienn** szakmai életrajzát a 2019/1. számunkban közzétük.

**Schweitzer Bence** 2019-ben szerzett anyagmérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg ugyanott kohómérnöki MSc-képzésén 3. féléves hallgató. Főbb kutatási területei: röntgendiffrakciós textúravizsgálatok, fülese-

dés becsülő módszer alkalmazása FKK és TKK rácsú fémek esetén.

**Dr. Mertinger Valéria** szakmai életrajzát a 2017/2. számunkban közzétük.

**Dr. Benke Márton** szakmai életrajzát a 2019/1. számunkban közzétük.