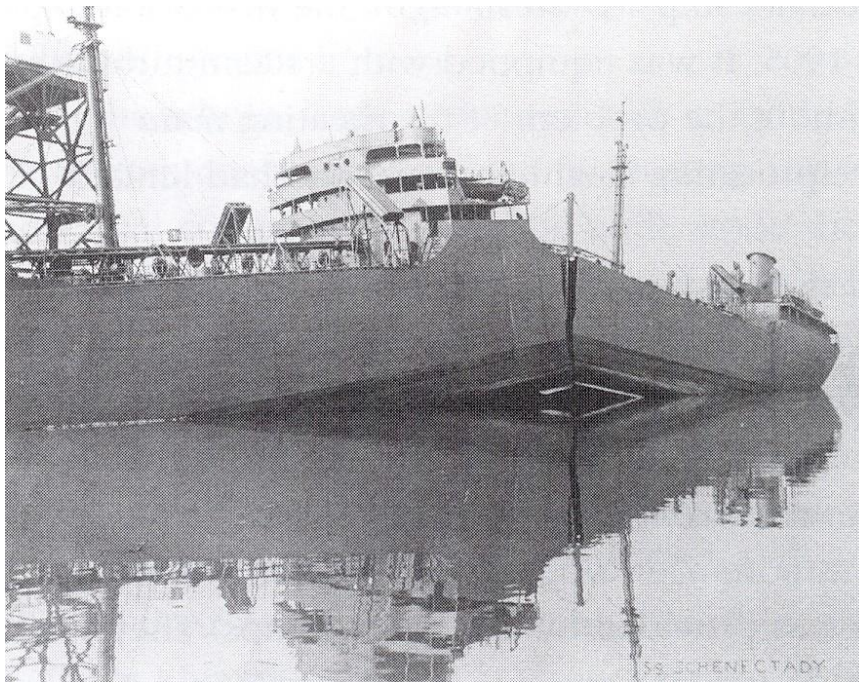


ÁLLAPOTTÉNYEZŐK

1943. január 16-án a Swan Island-i (Portland, Oregon) kikötőben békésen horgonyzó *SS Schenectady* tankerhajó (amely épp a próbaútjáról tért vissza) minden előzetes jel nélkül kettétört (1.ábra).



1. ábra. A kikötőben kettétört *SS Schenectady* tankerhajó, 1943. január 16., Swan Island

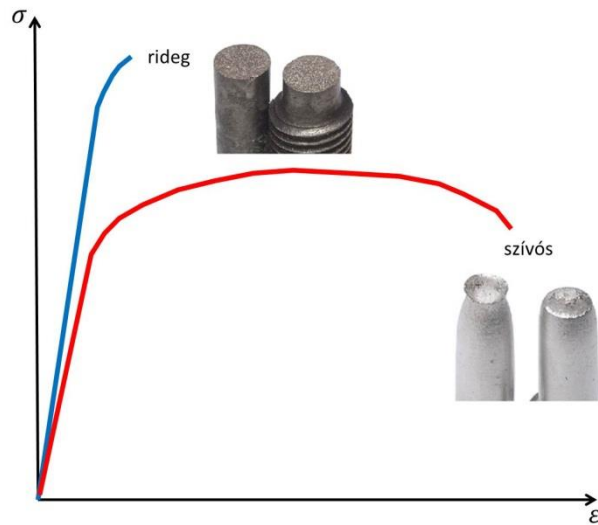
A szakértők a hegesztett kötések elégtelenségére gyanakodtak, mint kiváltó ok, mivel azokban az időkben a háború miatt jószerével csak képzetlen hegesztőket tudtak alkalmazni. A vizsgálatok azonban egyértelműen kimutatták, hogy a repedések a hajó testét alkotó, kis karbon tartalmú acéllemezeken (amely anyag szobahőmérsékleten szívósan viselkedik) mentek keresztül, nem pedig a hegesztett kötéseken. Megfigyelték, hogy a tönkremenetel gyakorlatilag az anyag képlékeny alakváltozása nélkül ment végbe, vagyis rideg törés történt.

Többek között ez a káreset mutatott rá arra, hogy a szerkezeti anyagaink bizonyos körülmények mellett ridegen, bizonyos körülmények mellett pedig szívósan viselkednek. Ebből az is következik, hogy az anyagok rideg illetve képlékeny viselkedése az anyagnak nem abszolút tulajdonsága, hanem annak csak egy állapota, ez pedig az úgynevezett mechanikai állapottényezőktől függ.

Három mechanikai állapottényezőt különböztetünk meg, amelyek a vizsgálati (üzemelési) körülményekkel illetve a szerkezet geometriájával, terhelésével hozhatók kapcsolatba:

- Hőmérséklet
- Alakváltozási sebesség
- Feszültségi állapot

A 2. ábrán egy ridegen és egy szívósan viselkedő anyag mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramja látható, valamint az egyes próbatetek törés utáni képei. A görbék alapján látható, hogy a rideg viselkedés kicsi, míg a szívós viselkedés nagy fajlagos törésmunka értékkel párosul. Ez annak köszönhető, hogy a rideg viselkedéshez nem párosul a törést megelőzően képlékeny alakváltozás (ami egy nagy munkaigényű folyamat).



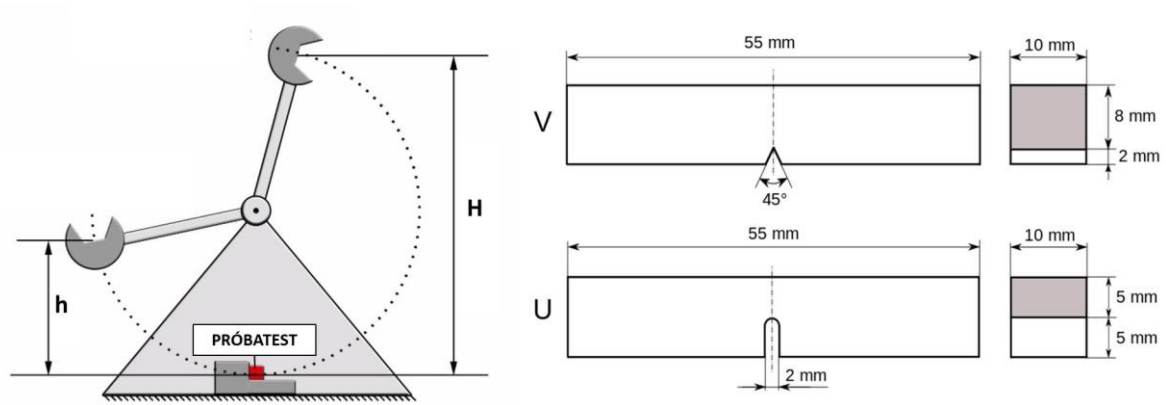
2. ábra. Egy ridegen (kék) és egy szívósan (piros) viselkedő anyag mérnöki feszültség mérnöki alakváltozás diagramja a töretfelületek képével.

A következőkben részletesen bemutatjuk a három mechanikai állapottényező fémes anyagokra gyakorolt hatását.

Hőmérséklet hatása

A hőmérséklet, mint állapottényező hatását legegyszerűbben az úgynevezett Charpy-féle ütvehajlító vizsgálattal figyelhetjük meg (3. ábra). A vizsgálat során egy „ H ” magasságra felemelt, adott tömegű* kalapács egy körpályán haladva megüti a „ 0 ” magasságban lévő próbatestet, amelyen a becsapódással átellenes oldalon egy bemetszés található (3. ábra). A próbatest deformációjához (töréséhez) szükséges energiát a kalapács energiája biztosítja. A megmaradt energia a kalapács továbbhaladására fordítódik, amely azt „ h ” magasságig lendíti fel. Amennyiben a próbatest szívósan viselkedik, vagyis a törés során nagymértékű képlékeny deformáció lép fel (amelyhez nagy energia befektetés szükséges), úgy a kalapács sokat veszít kezdeti energiájából és így „ h ” értéke kicsi lesz a kezdeti „ H ”-hoz képest. Viszont ha egy ridegen viselkedő anyagot vizsgálunk, ami a törése során nem szenved jelentősebb képlékeny alakváltozást, úgy a kalapács szinte alig veszít a kezdeti energiájából és így a „ h ” közel meg fog egyezni a „ H ” értékkel.

Egyértelmű, hogy a kalapács kezdeti (mgH) és végső (mgh) helyzeti energiájának különbsége lesz az az energia, ami a próbatest törésére fordítódott. Ezt a mennyiséget nevezzük ütőmunkának, jele KV (V-bemetszésű próbatestnél), mértékegysége Joule.



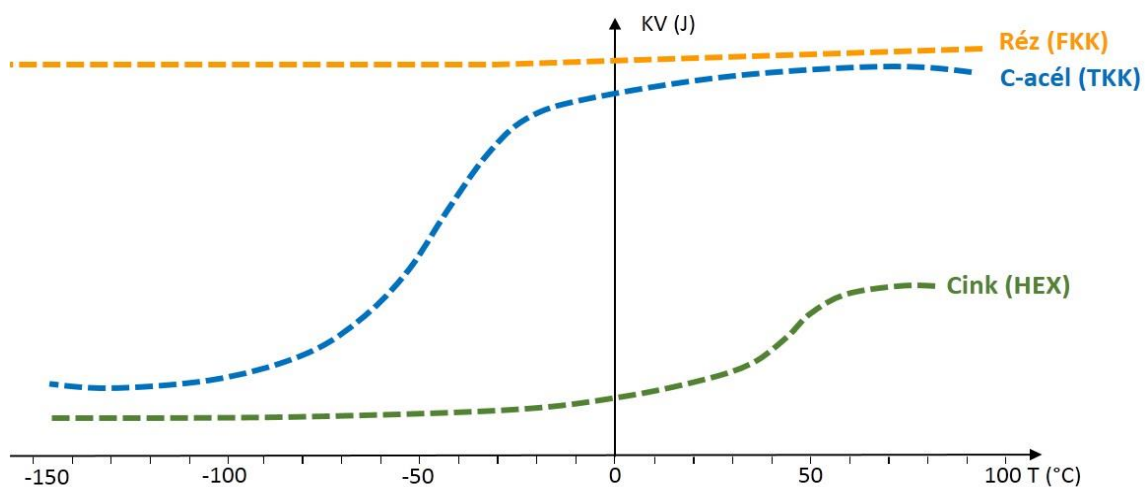
3. ábra. A Charpy-féle ütő berendezés elvi ábrája (balra) és a mérésekhez használt, bemetszett próbatestek: V-bemetszésű (fent) és U-bemetszésű (lent).

$$KV=mg(H-h) \text{ (J)} \quad (\text{V-bemetszésű próbatest esetén})$$

$$KU=mg(H-h) \text{ (J)} \quad (\text{U-bemetszésű próbatest esetén})$$

*A kalapács tömege szabja meg a maximálisan kifejthető energiát. 300J-os méréshatárral rendelkező berendezés esetében a kalapács tömege (a gép kialakításától függően) ~30 kg.

A mérést megismételjük különböző hőmérsékleteken, így végeredményben kapunk egy, az adott anyagra jellemző $KV-T$ diagramot. A 4. ábrán egy felületen középpontos köbös, egy térben középpontos köbös és egy hexagonális kristályráccsal rendelkező anyag $KV-T$ görbéi láthatóak. Megfigyelhető, hogy van egy hőmérséklet tartomány, ahol az ütőmunka számottevően lecsökken a TKK és a HEX rácsú anyagok esetében. Mivel a „nagy” ütőmunkához szívós, míg a „kis” ütőmunkához rideg állapotú anyag társul, ezért azt a hőmérsékletet, ahol az ütőmunka jelentősen lecsökken, képlékeny-rideg átmeneti hőmérsékletnek nevezzük. Ennek jele TTKV vagy DBTT (*Ductile-Brittle Transition Temperature*). Az (adott anyagra jellemző) átmeneti hőmérséklet alatt az anyag ridegen, felette pedig szívósan fog viselkedni. Az FKK térrácsú anyagok esetében az ütőmunka változása nem jelentős az üzemi hőmérséklet csökkenésekor, vagyis az ilyen kristályszerkezetű fémek kis hőmérsékleten is szívósabban viselkednek, mint a TKK vagy HEX rácsú anyagok. Emiatt kis üzemi hőmérsékleten (pl. kriogén technológia, űrtechnika, stb.) FKK rácsú anyagokat használnak.



4. ábra. FKK, TKK és HEX kristályrácsú anyagok $KV-T$ görbéi.

Mivel az ütőmunkában történő csökkenés egy hőmérséklet tartományban következik be, ezért a TTKV számszerűsítésére különböző módszerek terjedtek el:

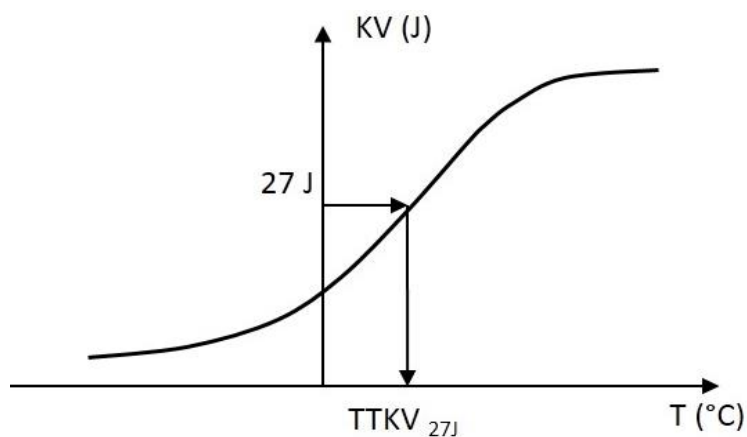
- Előírt ütőmunka alapján
- Inflexiós pont alapján
- Lineáris expanzió alapján
- Töretfelület alapján

Az egyik legegyszerűbb módszer, hogy egy előírt ütőmunka értékkel definiáljuk a TTKV-t: az a hőmérséklet lesz a TTKV, ahol az anyag az előírt (pl. 27 J) ütőmunkával rendelkezik (5. ábra).

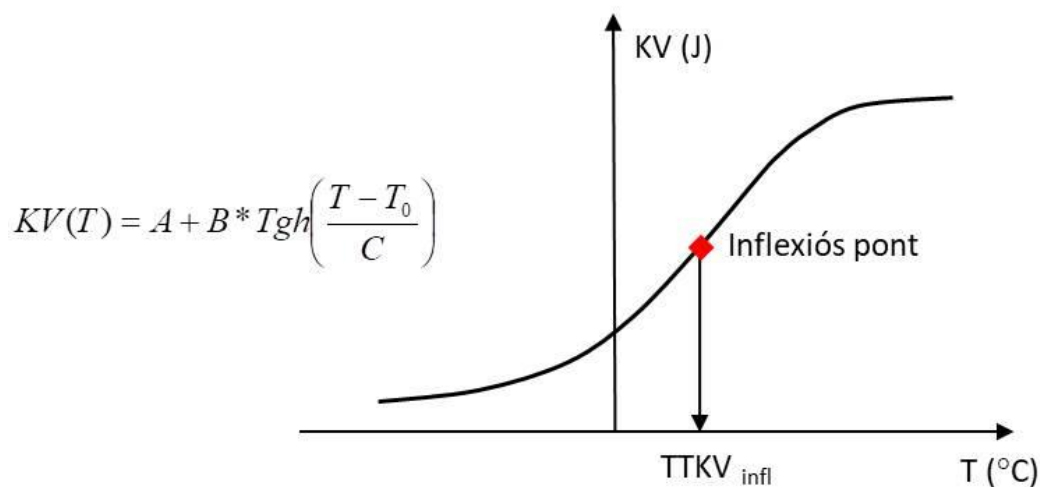
Megfelelő számú mérés alapján a kapott pontseregre ráilleszthetünk egy 4 paraméteres (A, B, C, T_0) görbét, amelynek inflexiós pontja is szolgálhat a TTKV meghatározására (6. ábra).

A képlékeny alakváltozás miatt a próbatest „ x_0 ” mérete „ x' ” méretűre változik, amelyek különbsége az ún. lineáris expanzió (jele: e , mértékegysége mm). Egy előírt nagyságú lineáris expanzió érték (pl. 0,9) segítségével definiálható a TTKV (7. ábra).

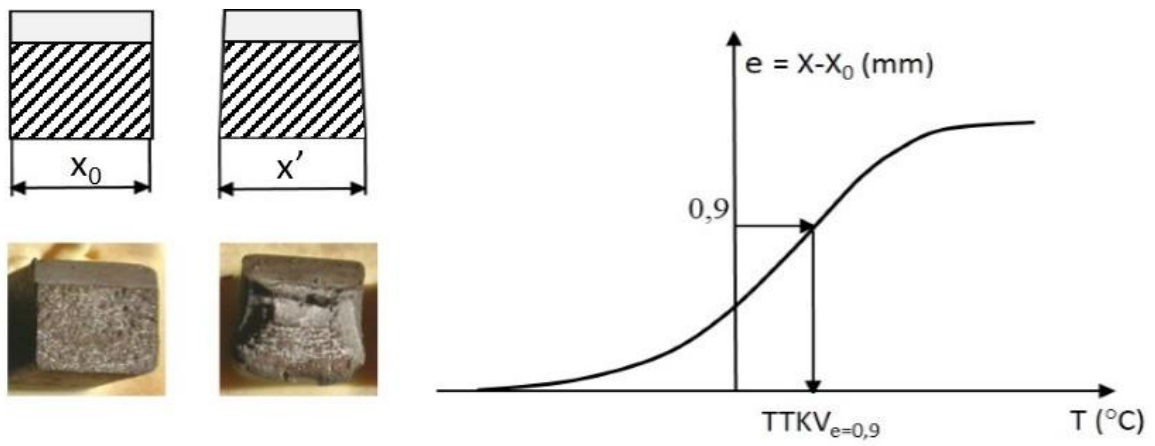
A rideg, illetve képlékeny viselkedés a töretfelületeken a rájuk jellemző struktúrát fog létrehozni. A TTKV egyik (legnehezebb és legszubjektívebb) meghatározási módszere, hogy megkeressük azt a hőmérsékletet, ahol a töretfelület 50%-ban szívós, 50%-ban rideg jelleget mutat (8. ábra).



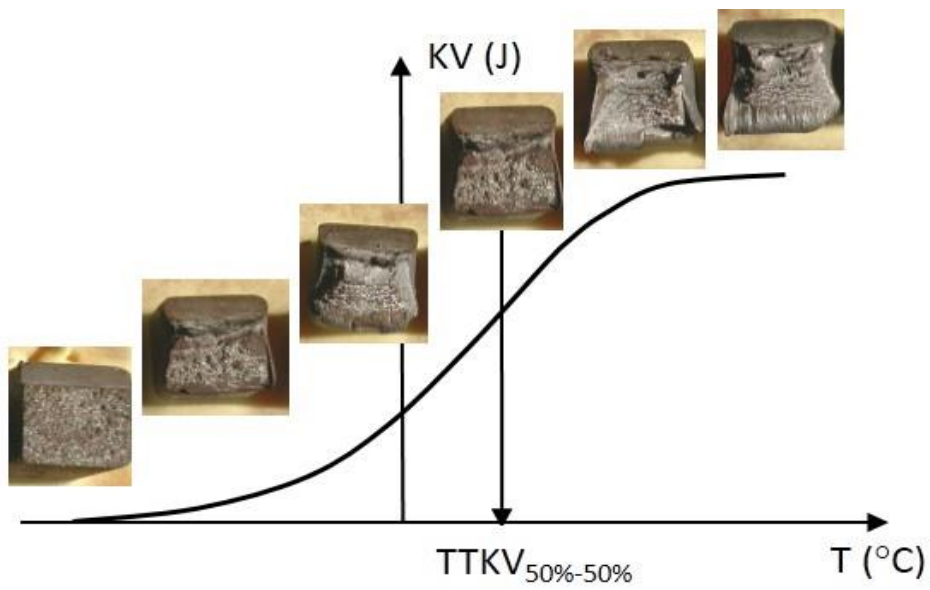
5. ábra. TTKV meghatározása előírt ütőmunka alapján.



6. ábra. TTKV meghatározása inflexiós pont alapján.



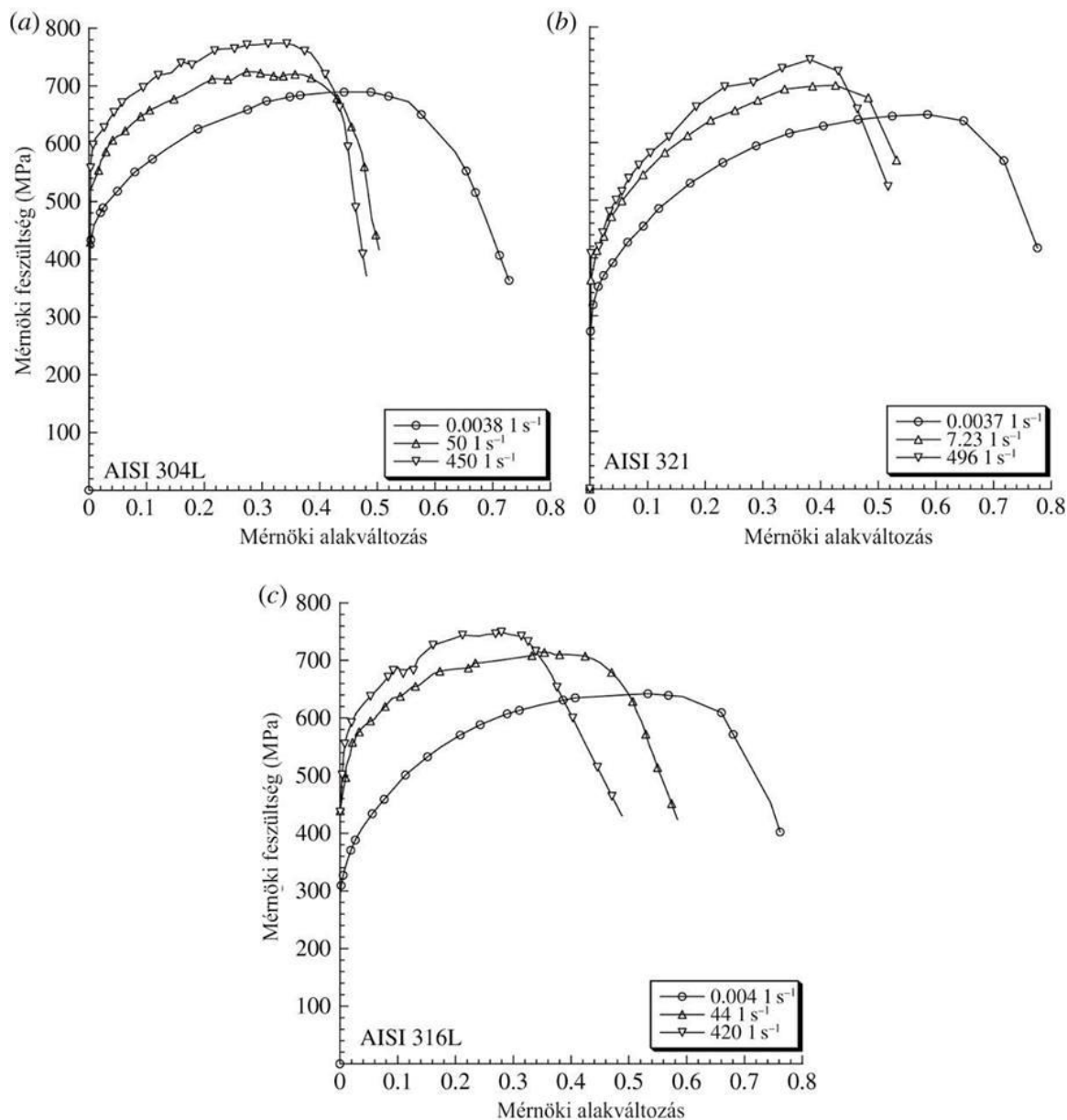
7. ábra. TTKV meghatározása előírt lineáris expanzió alapján.



8. ábra. TTKV meghatározása a töretfelületek jellege alapján.

Alakváltozási sebesség hatása

Az alakváltozási sebesség hatását mutatja be a 9. ábraszorozat, amelyen három különböző acél ötvözet, eltérő alakváltozási sebességek mellett végzett szakítóvizsgálatának eredményei láthatóak*.



9. ábra. Az alakváltozási sebesség hatása az anyag rideg-képlékeny viselkedésére, AISI 304L (a), AISI 321 (b) és AISI 316L ausztenites korrózióálló acélok esetében.

A 9. ábra alapján megfigyelhető, hogy az igénybevétel (terhelés) sebességének növelése az anyag elridegedését okozza. Ezért a hirtelen túlterhelések, dinamikus igénybevételek fokozzák a ridegtörés kockázatát.

Szembevetve, hogy a nagyobb sebességgel végzett szakítóvizsgálat esetében az alakváltozás mértéke (nyúlás) csökkent, míg a maximális erő nőtt. A fajlagos törésmunka, vagyis a görbe alatti terület nagysága az alakváltozási sebesség növekedésével csökken. Ez azt jelenti, hogy a rideg állapotú anyaghoz kisebb Wc érték párosul, míg egy szívós anyag esetében a fajlagos törésmunka értéke nagyobb.

A sebesség hatását egyébként a Prandtl egyenlet írja le a következők szerint:

Prandtl egyenlet

$$F_1 = F_0 + m \cdot \ln \frac{c_1}{c_0} \quad \text{ahol } c_0 \text{ és } c_1 \text{ nyúlássebességek}$$

m pedig anyagi állandó

Az egyenletes nyúlás tartományán belül a valódi feszültségekre kifejezve adódik

$$\sigma_1 = \sigma_0 + a \cdot \ln \frac{c_1}{c_0}$$

Acélra	a = 45 MPa
Rézre	a = 12 MPa
Alumíniumra	a = 1 MPa

Hasonlóan a korábbiakhoz, itt is jól érzékelhető, hogy az FKK kristályrácsú anyagok a deformáció sebességére kevésbé érzékenyek, mint a TKK, vagy HEX ráccsal bíró fémek

* A cikk elérhető itt: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2015/20130197> (2020.12.10)

Feszültségi állapot hatása

Eltérően egy szakítóvizsgálattól, ahol az anyagra csak egytengelyű húzó feszültség hat, a mindennapi szerkezetekre a többtengelyű feszültségi állapot jellemző. Mechanikai szempontból megkülönböztetünk húzó, nyomó, illetve nyíró (csavaró) feszültségeket.

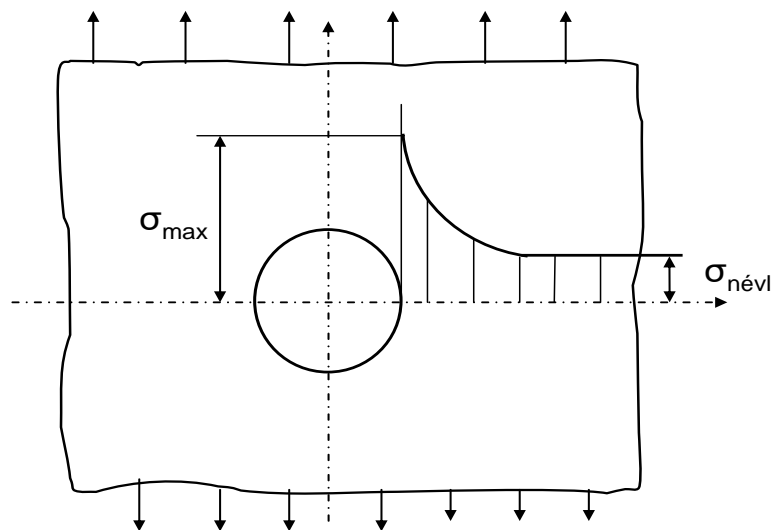
A képlékeny állapot szempontjából a 3 tengelyű nyomófeszültség a legkedvezőbb, vagyis ha az anyagot minden oldalról nyomjuk, mivel ilyenkor az anyagban lévő mikroszkopikus folytonossági hibák (amelyekből a repedések keletkeznek) nem tudnak növekedni. Ilyen feszültségi állapot folyadéknyomás segítségével könnyen létrehozható. A leginkább rideg állapotot a 3 tengelyű húzófeszültségi állapot eredményezi, amely a mikroszkopikus hiba növekedését minden irányban elősegíti. A mindennapi életben ritkán fordulnak elő a fentebb ismertetett szélsőséges állapotok.

A szerkezetek geometriájától függően egy anyagi pont környezetében lévő lokális feszültség különbözhet a szerkezet egészére értelmezett névleges feszültségtől. Ezt a következő példákon keresztül mutatjuk be.

Tekintsünk egy furatot tartalmazó végtelen kiterjedésű lemezt, melyet egyenletes húzófeszültség terhel, aminek hatására a furattól távol az anyagban $\sigma_{névl}$ feszültség ébred. A furat környezetében a feszültség eloszlást a 10. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a furat környezetében nő az anyagban lévő húzófeszültség, amely a furat tövében éri el a maximális σ_{max} értéket.

A névleges és a ténylegesen ébredő maximális feszültség arányát az úgynevezett feszültségkoncentrációs tényezővel (α_k , *angol irodalomban* K_t) fejezhetjük ki:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{névleges}}$$

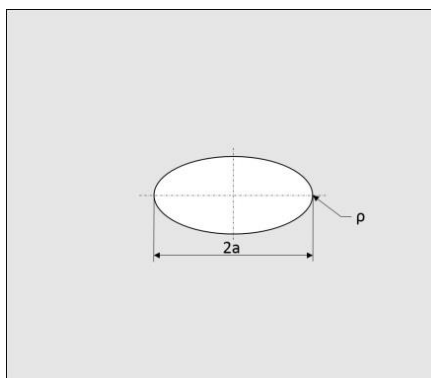


10.ábra. Egy furatot tartalmazó lemezben ébredő, a húzás irányával párhuzamos feszültségkomponens eloszlása a furat középtengelyének síkjában.

Értelemszerűen, ha a fentebbi példában a lemez nem tartalmazna furatot, akkor a maximális és névleges feszültség értékei megegyeznének, így a feszültségkoncentrációs tényező értéke 1 lenne.

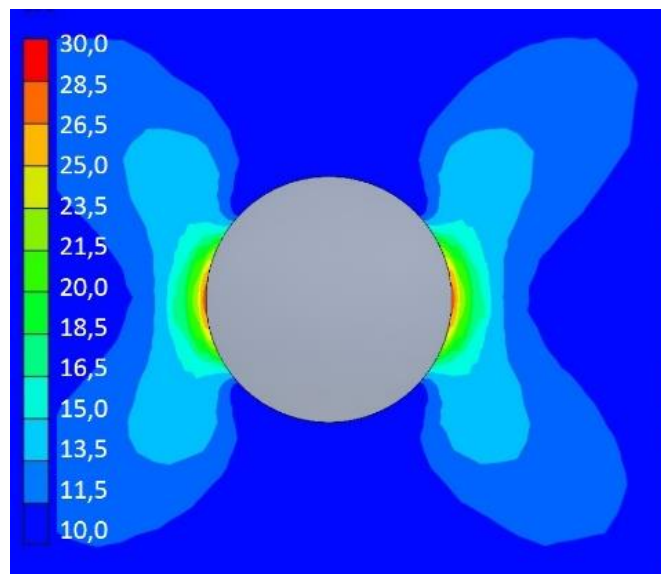
Ha egy végtelen kiterjedésű lemezben egyenletes ($\sigma_{névl}$) húzófeszültség ébred, és a lemez egy $2a$ szélességű, ρ lekerekítési sugarú ellipszis alakú hibát (anyaghiányt) tartalmaz (11. ábra), akkor a feszültségkoncentrációs tényező értéke az alábbi egyszerű képlettel számítható:

$$\alpha_k = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$



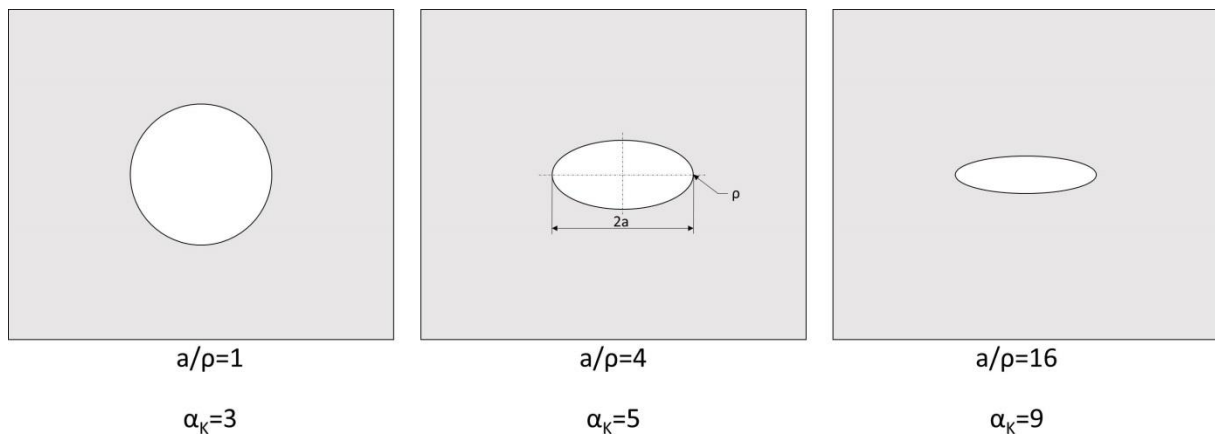
11.ábra. Az „a” szélesség és a „rho” lekerekítési sugár értelmezése egy ellipszis alakú anyaghiba esetében.

Egy egyszerű furat esetében, ahol $a=\rho$ a feszültségkoncentrációs tényező értéke $\alpha_k=3$. A 12. ábrán egy $a/\rho=1$ viszonytal rendelkező elliptikus hibát tartalmazó lemez húzása (a húzás \downarrow irányú) esetén ébredő (egyenértékű) feszültségeloszlás látható a furat környezetében.



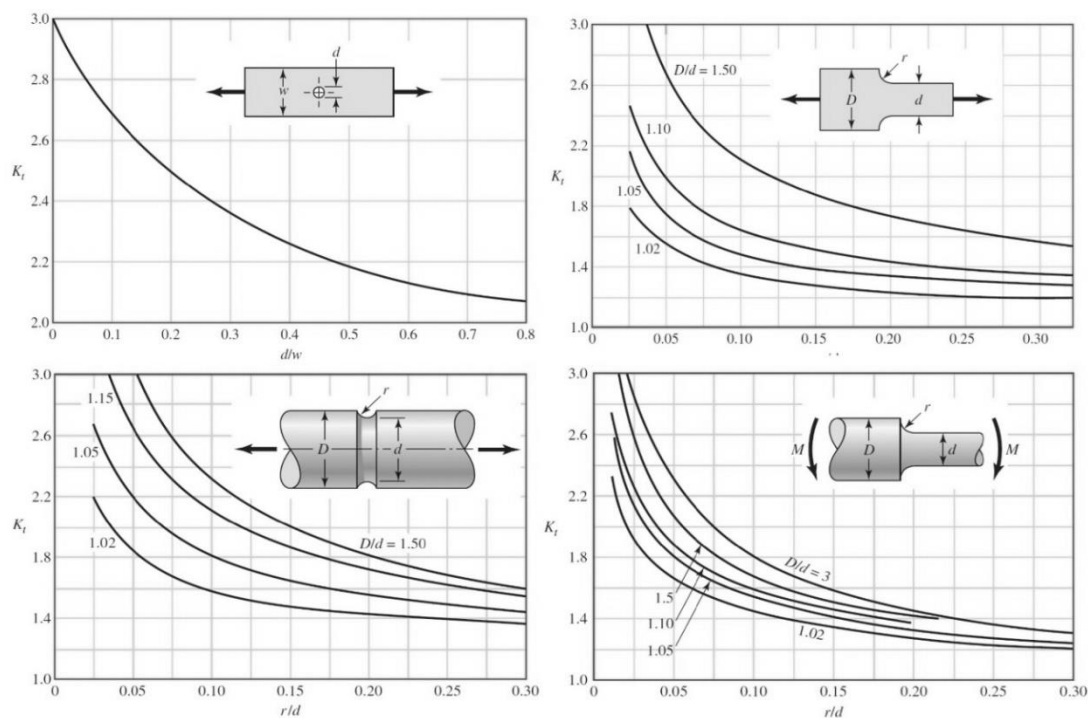
12.ábra. Egy $a/\rho=1$ viszonyal rendelkező elliptikus hibát tartalmazó lemez húzása esetén ébredő egyenértékű feszültségek, $\sigma_{névl}=10$ MPa, VEM analízis.

A 13. ábrán különböző a/ρ viszonyú folytonossági hiányokat tartalmazó lemezek láthatóak a számolt feszültségkoncentrációs tényező értékek feltüntetésével. Mikroszkopikus repedések esetében, ahol $\rho \ll a$ ez az összefüggés már nem érvényes. Ebben az esetben a törésmechanika összefüggéseiből kaphatunk információt a repedés csúcsának közelében létrejövő feszültségállapotról.



13.ábra. Különböző a/ρ viszonyal rendelkező elliptikus hibát tartalmazó lemezek húzása esetén számolható feszültségkoncentrációs tényezők értékei.

Sok esetben a feszültségkoncentrációs tényező értéke nem számolható ki egy egyszerű képlet alapján, mivel konkrét értéke több paraméter függvénye. Az ilyen (egyszerűbb) esetekre léteznek úgynevezett nomogramok, aminek segítségével a geometria függvényében meghatározható a feszültségkoncentrációs tényező értéke az adott kialakításra. A 14. ábrán* néhány egyszerű esetre vonatkozó nomogram látható.



14.ábra. Néhány egyszerű esetre vonatkozó nomogram.

*forrás: Budynas-Nisbett: Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition. ISBN: 0-390-76487-6

Felkészülést segítő kérdések:

- Ismertesse a mechanikai állapot tényezőket és azok rideg/szívós viselkedésre gyakorolt hatásukat!
- Rajzolja fel egy rideg és egy szívós anyag szakítási diagramját!
- Ismertesse a Charpy-féle ütővizsgálatot!
- Ismertesse a FKK, TKK és a HEX rácsú fémek ütőmunkájának és a hőmérsékletnek a kapcsolatát!
- Ismertesse a TTKV hőmérséklet meghatározási módszereit!
- Ismertesse a feszültségkoncentrációs tényező fogalmát és képletét!
- Ismertesse a feszültségkoncentrációs tényező és a fajlagos törésmunka értékének kapcsolatát!

Felhasznált és ajánlott irodalom:

- W.D Callister: Materials Science and Engineering – An Introduction. 7th edition John Wiley & Sons, 2006, 2007
- Tisza Miklós: Anyagvizsgálat. Miskolci Egyetemi Kiadó, 2001
- Prohászka János: Bevezetés az anyagtudományba. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997
- Dr. Gillemot László: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, 1972
- C. Albertini, E. Cadoni, Ge. Solomos: Advances in the Hopkinson bar testing of irradiated/non-irradiated nuclear materials and large specimens. Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. DOI: 10.1098/rsta.2013.0197
- Budynas-Nisbett: Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition. ISBN: 0-390-76487-6

KEMÉNYSÉGMÉRÉS

Elméleti áttekintés

A korai keménységmérési eljárások (1822) a természetes ásványokon alapultak, mégpedig azon a jelenségen, hogy a keményebb anyag karcolta a lágyabbat. Meghatározott anyagok ezen tulajdonságát sorba rendezve az úgynevezett Mohs-skála adódik, amelynek tetején a gyémánt található (keménységindexe 10), míg a skála alján a zsírkö helyezkedik el (keménységindexe 1). A bázisnak választott ásványokkal elvégezve a karcolási tesztet, az adott anyag viszonylag egyszerűen besorolható két ásvány közé (az egyik ásványt az adott anyag már nem karcolta, a Mohs-skálán alatta elhelyezkedő ásványt pedig már igen). A pontosabb, mennyiségi vizsgálatok a későbbiek során alakultak ki, amelyek adott geometriájú (nagy keménységű) behatolótestet definiált körülmények között (erőhatás, sebesség, időtartam) a mérendő anyagból készült próbatest felületébe kell nyomni. A behatolótest által okozott képlékeny alakváltozás nyomát lemérve, egyszerű összefüggésekkel meghatározható a keménységre jellemző számérték, amely relatív mennyiség, ami azt jelenti, hogy pontosan csak az azonos eljárással meghatározott mennyiségek hasonlíthatók össze.

A többi mechanikai anyagvizsgálathoz képest, a keménységmérési eljárások:

- egyszerű, viszonylag gyors eljárások, valamint a próbatest előkészítése általában nem igényel különleges módszert.
- alapvetően roncsolásmentes eljárásokról van szó, mivel a keménységmérés minimális felületi nyomot hagy a darabok felületén.
- más mechanikai tulajdonságok is származtathatók a keménységmérési adatokból.

A keménységmérő eljárásokat az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- Statikus mérések: Brinell-, Vickers-, Knoop-, Rockwell-eljárások
- Dinamikus mérések: Poldi-eljárás, Szkleroszkóp, Duroszkóp
- Különleges mérések: Műszerezett mérés

Statikus mérések

Brinell-eljárás

A keménységmérés során keményfémből készített golyót kell F erővel a próbatest előkészített és síknak tekinthető felületébe nyomni (1. ábra). A mérőszerszám által

okozott lenyomatról feltételezhető, hogy egy gömbsüveg (2. ábra). A Brinell-keménységmérés mérőszáma a terhelőerő és a lenyomat felületének a hányadosa:

$$HBW = \frac{F}{D\pi h}$$

ahol D - golyóátmérő (mm), F - a terhelő erő (kp). Mivel a fenti keménységdefiníció megfogalmazásakor a geometriai adatokat mm-ben az F terhelőerőt kp-ban mérték (ma N-ban) az azóta eltelt időszakban óriási adatmennyiség halmozódott fel, és azért hogy a régebben és a ma mért adatok könnyen összevethetők legyenek, a fenti képletet az alábbi alakban használjuk:

$$HBW = \frac{0,102F}{D\pi h} = \frac{0,204F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

ahol D - golyóátmérő (mm), h - gömbsüveg magassága (mm), d - a gömbsüveg átmérője (mm) és F - a terhelő erő (N). A kp és N közötti átváltás:

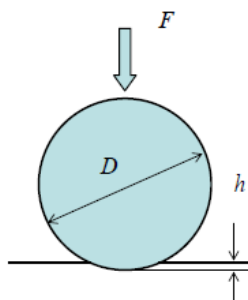
$$1(kp) = 1(kg) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2} \right) = 9,81(N)$$

Ebből kifejezhető:

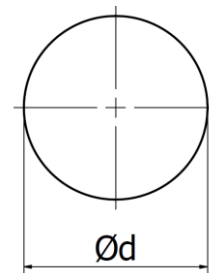
$$1(N) = 0,102(kp)$$

Mivel az 1 kp, az 1 kg tömegű test súlyát adja meg. A következőkben ismertetésre kerülő eljárásoknál, szintén ezt az átváltást alkalmazom részletesebb magyarázat nélkül.

A vizsgálattal foglalkozó szabványok pontos előírást tartalmaznak a méréshez használt golyók méretére (1-10 mm), a terhelő erőre (9,807 N – 29,42 kN), a vizsgálat időtartamára és a próbatest minimális vastagságára vonatkozóan. Ezeket az adatokat jelen segédlet nem tartalmazza, a vonatkozó szabvány családban (MSZ EN ISO 6506:2006) lelhetők fel.



2. ábra A Brinell mérés elrendezése



3. ábra A Brinell mérés lenyomata

A Brinell mérés során azonos anyag vizsgálatakor is különböző számértéket kaphatunk eredményül. Jellemző a terhelőerőnek a mérés eredményére gyakorolt hatása (3. ábra). Egy megadott átmérőjű golyóval különböző nagyságú erővel végezve a kísérleteket, a kapott lenyomatok és a terhelő erő közötti kapcsolat

$$F = ad^n$$

alakban adódik, amelyet Meyer-féle hatványtörvénynek nevezünk. Az a és n paraméterek, anyagtól függő állandók. A kísérleti eredmények alapján n értéke különböző anyagokra különböző és általában 1,8-2,4 közé adódik. Az erő kifejezését az visszahelyettesítve az alábbi egyenletet kapjuk:

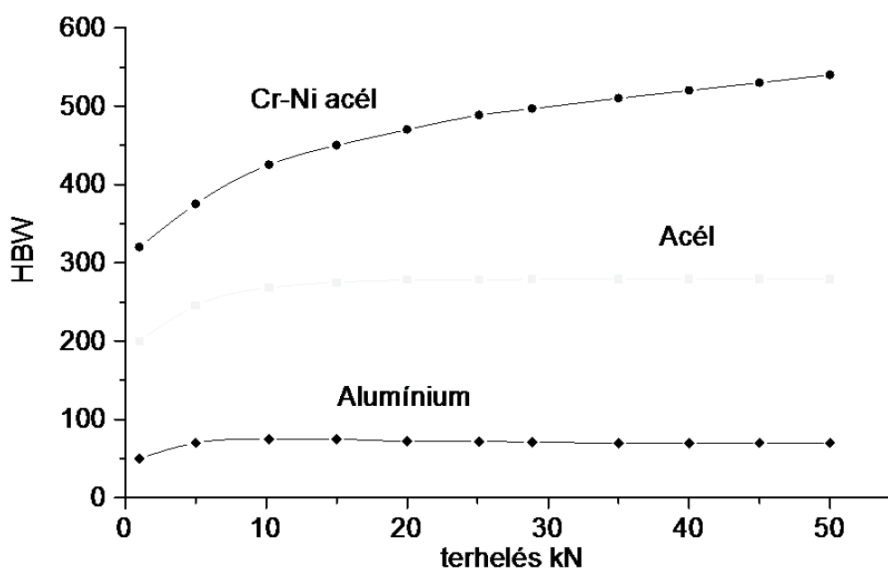
$$HBW = \frac{0,204F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - \left(\frac{F}{a} \right)^{\frac{2}{n}}} \right)}$$

amiből látható, hogy az F érték nem esik ki az egyenletből, tehát a keménység értéke az erőtől függő érték. Amiatt, hogy egyértelmű legyen a keménység megadása a számértéket a $HBW/D/F/t$ (Brinell-keménységérték/ golyóátmérő (mm) / terhelőerő (kp) / terhelés időtartama (s)) jelölés követi. Például a 120 HBW/10/3000/10 jelölés azt jelenti, hogy a vizsgált anyag keménysége 120 volt, melyet egy 10 mm átmérőjű keményfém golyóval mértek, 3000 kp terheléssel és 10 másodperces terheléssel.

Az előre kiválasztott golyóátmérőhöz (1 mm, 2,5 mm, 5 mm vagy 10 mm) a terhelőerőt úgy kell megválasztani, hogy a lenyomat átmérője, a behatolótest átmérőjének a 0,24-szerese és 0,6-szorosa közé essen.

A többi eljárással összehasonlítva a Brinell-módszernél keletkezik a legnagyobb (mély és széles) lenyomat. Ennek megfelelően a mérési eredmény mintegy átlagolja a lenyomat alatt elhelyezkedő anyag keménységét. Tipikusan öntöttvasak, színes- és könnyűfémek valamint ötvözeteik, továbbá lágyacélok vizsgálatára alkalmazzák.

Mivel a keményfémeket szűrőszerszámként viszonylag nem régóta használják és nagyon sok helyen még acélgolyót is alkalmaznak, ezért ebben az esetben a Brinell-mérőszámot HBS-sel jelöljük (S - steel, acél).



4. ábra A Brinell-keménységérték és a terhelőerő közötti kapcsolat bemutatása acél és alumínium minták esetén

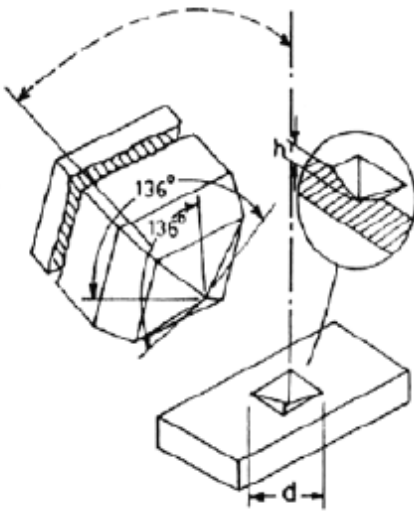
Vickers-eljárás

A Vickers-eljárásnál (4. ábra) alkalmazott szűrőszerszám gyémántgúla, amelynek lapszöge 136° -os. A keménység mérőszámának definíciója hasonlít a Brinell-keménységéhez és számszerű értékét a következő összefüggés adja:

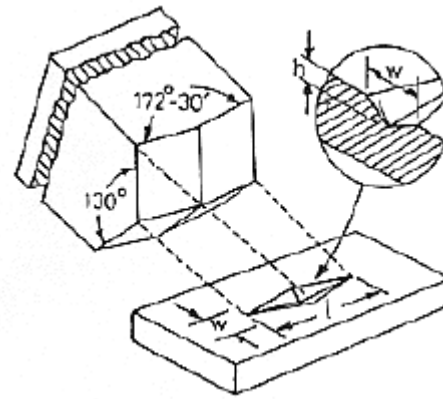
$$HV = \frac{0,102F}{A} = \frac{0,189F}{d^2}$$

ahol F - terhelő erő (N), A -lenyomat felület (mm^2), d - a lenyomat átlóinak átlaga (mm). A lenyomatra felülről ránézve egy négyzetet látunk, mely sok esetben torzult. A Brinell-keménységméréssel összehasonlítva, a Vickers-eljárás során alkalmazott terhelőerő jóval kisebb (9,81 N - 1177,2 N), ennek megfelelően a lenyomat is kisebb. Emiatt a lenyomat leolvasásához 50-100 szoros nagyítású mikroszkópra van szükség, és a mérés előtt gondosan elő kell készíteni a felületet. A Meyer-törvény a Vickers-mérés esetén is érvényes, csak a golyóátmérő helyett a lenyomatátlót kell a képletbe helyettesíteni. Mivel az n kitevő nagyon közel van a kettőhöz, emiatt a Vickers-keménységi érték gyakorlatilag független a terhelő erőtől. A pontos keménységmegadáshoz a számértéket követően a $HV/F/t$ (Vickers-keménységérték/terhelőerő (kp)/mérési időtartam (s)) adatokra van szükség. Ez az eljárás a Brinell-keménységgel szemben, sokkal inkább a vizsgált anyagi környezet lokális jellemzőjét szolgáltatja. Mindenféle anyagminőséghez használható.

A fentiekhez képest még kisebb terhelőerő tartományokban ($1,961 \leq F < 49,03$ N és $0,09807 \leq F < 1,961$ N) kialakították, az úgynevezett mikrokeménység mérést, amellyel az anyag mikroszerkezeti jellemzői határozhatók meg (pl. szemcse keménység, egymás melletti eltérő fázisok keménysége) illetve nagyon vékony réteg mechanikai tulajdonsága vizsgálható. Mikrokeménység mérésnél a keménység érték mellett fontos megadni az alkalmazott terhelés nagyságát, HV jelet követően kp-ban, valamint a mérési időtartam értékét másodpercben kifejezve.



5. ábra Vickers mérés elrendezése



6. ábra Knoop mérés elrendezése

Knoop-eljárás

Egy másik mikrokeménységmérő eljárás a Knoop-keménységmérés, amelynél szintén gyémánt gúlát használnak. A mérőelem alakja az 5. ábrán látható. A gúla élei páronként 130° és 172,5°-kal hajlanak egymáshoz. A lenyomat vetülete egy olyan rombusz, amelynek hosszabbik átlója 7,11-szer nagyobb, mint a rövidebbé. A keménységi mérőszámot változatlanul a terhelő erő/lenyomat felület definíciónak megfelelően határozzuk meg:

$$HK = \frac{0,102F}{A} = \frac{1,451F}{l^2}$$

ahol F - terhelő erő (N), A - lenyomat felület (mm²), l - lenyomat hosszabbik átlója (mm). A mérésnél alkalmazott maximális erő 19,614 N. A keménységi mérőszám megadását követően a HK jelet valamint a terhelő erőt kp-ban és a mérési időtartamot másodpercben kifejezve kell megadni. A megbízható mérés a felület gondos előkészítését kívánja meg.

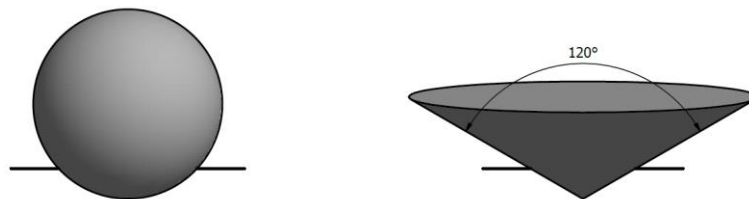
A Vickers- és Knoop-mikrokeménységmérő eljárásokat összehasonlítva a következők állapíthatók adott terhelés és anyag esetén:

- a Vickers-behatolótest kb. kétszer mélyebbre hatol az anyagba, mint a Knoop-behatolótest
- a Vickers-lenyomat átlójának hossza kb. harmada a Knoop-lenyomat nagy átlójának
- a Vickers-eljárás jobban érzékeny a mérési hibákra, mint a Knoop-eljárás
- a Knoop-eljárás alkalmasabb nagyon kemény, rideg anyagok vizsgálatára (pl. kerámia, üveg) mint a Vickers-eljárás, mivel kisebb a behatolási mélysége

- a Knoop-eljárás alkalmasabb elnyújtott mikroszerkezeti jellemzőkkel (szemcse, szövetelem) rendelkező anyag vizsgálatára, mint a Vickers-eljárás

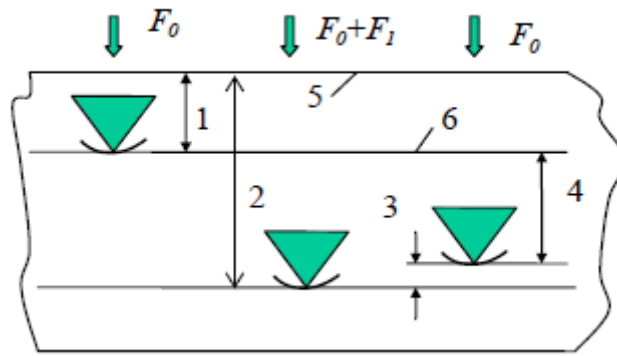
Rockwell-eljárás

A Rockwell-eljárás a mérés egyszerűségével tűnik ki a többi eljárás közül. Nincs szükség a felületi lenyomat geometriájának meghatározására, a szúrószerszám behatolási mélysége van közvetlenül kapcsolatban a keménységi számmal. A próbatest felületi előkészítésével kapcsolatban kisebbek a követelmények, mint az előző eljárásoknál. A mérőelem kétfajta kialakítású (6. ábra). Az egyik 120°-os csúcsszögű gyémántkúp, a másik edzett acél vagy keményfém golyó, amelynek átmérője az eljárás típusától függ. Mindegyik eljárás az előterheléssel kezdődik (F_0) ami biztosítja, hogy a felületet nem kell gondosan megmunkálni, majd ezt követi a főterhelés (F_1) ami a mérőelem további benyomódását okozza. A mérés utolsó fázisában a főterhelést meg kell szüntetni, aminek következtében a behatolótest az előző pozíciójából visszarugózik (7. ábra). A benyomódási és visszarugózási folyamat egy, a keménységre kalibrált mérőórával követhető.



7. ábra Rockwell-behatolótestek

A Rockwell-keménység mérőszáma a maradó benyomódás mélysége 0,002 mm-ben, vagy 0,001 mm-ben kifejezve. Ha a keménység mérőszámát a benyomódással kapcsolnánk közvetlenül össze, akkor a "lágyabb" anyag nagyobb mérőszámot eredményezne, mint a "keményebb anyag" és ez ellentétes lenne az eddigi keménységi mérőszámokkal. Ezért egy kellően megválasztott számból kell kivonni a benyomódás értékét ahhoz, hogy megfelelő mérőszámot kapjunk. A keménység értéke a benyomódást mérő óra megfelelő skáláján közvetlenül leolvasható.



8. ábra Rockwell-keménységmérés lefolytatásának elvi vázlata 1- a lenyomat mélysége az F_0 előterhelésnél; 2- A lenyomat mélysége az F_1 főterhelésnél; 3- a rugalmas visszarugózás az F_1 főterhelés levétele után; 4- a maradó lenyomat h mélysége; 5- a mintadarab felülete; 6- a mérés referencia síkja

A különböző eljárások adatai a következő táblázatban találhatóak. A gépészetben a legelterjedtebbek a HRB illetve a HRC mérések.

Keménységi jel	Szűrőszerszám	Előterhelés, N	Főterhelés, N	Keménység
HRA	Gyémánt kúp	98,07	490,3	$100 - \frac{h}{0,002}$
HRB	Golyó 1,5875 mm	98,07	882,6	$130 - \frac{h}{0,002}$
HRC	Gyémánt kúp	98,07	1373	$100 - \frac{h}{0,002}$
HRD	Gyémánt kúp	98,07	882,6	$100 - \frac{h}{0,002}$
HRE	Golyó 3,175 mm	98,07	882,6	$130 - \frac{h}{0,002}$
HRF	Golyó 1,5875 mm	98,07	490,3	$130 - \frac{h}{0,002}$
Keménységi jel	Szűrőszerszám	Előterhelés, N	Főterhelés, N	Keménység
HRG	Golyó 1,5875 mm	98,07	1373	$130 - \frac{h}{0,002}$
HRH	Golyó 3,175 mm	98,07	490,3	$130 - \frac{h}{0,002}$
HRK	Golyó 3,175 mm	98,07	1373	$130 - \frac{h}{0,002}$
HR15N	Gyémánt kúp	29,42	117,7	$100 - \frac{h}{0,001}$
HR30N	Gyémánt kúp	29,42	264,8	$100 - \frac{h}{0,001}$
HR45N	Gyémánt kúp	29,42	411,9	$100 - \frac{h}{0,001}$

HR15T	Golyó 1,5875 mm	29,42	117,7	$100 - \frac{h}{0,001}$
HR30T	Golyó 1,5875 mm	29,42	264,8	$100 - \frac{h}{0,001}$
HR45T	Golyó 1,5875 mm	29,42	411,9	$100 - \frac{h}{0,001}$

A golyót használó skáláknál acél golyó esetén „S”, míg keményfém golyó esetén „W” betűvel kell a keménységi jelet kiegészíteni. Az egyes Rockwell-eljárások különböző alkalmazási területei a következő táblázatban vannak összefoglalva.

Eljárás	Alkalmazási terület
HRA	Vékony acéllemezek, vékony kérgék, cementált rétegek
HRB	Lágyacélok, réz és alumínium ötvözetek, temperöntvények
HRC	Acélok, cementált acélok, titán ötvözetek, öntöttvasak, perlites temperöntvények
HRD	Vékony acéllemezek, cementált acélok, perlites temperöntvények
HRE	Öntöttvasak, alumínium és magnézium ötvözetek, csapágyfémek
HRF	Lágy rézötvözetek, vékony, lágy lemezek
HRG	Foszforbronzok, berilliumbronzok, temperöntvények
HRH	Alumínium, cink, ólom
HRK	Csapágyfémek, nagyon lágy anyagok
HRN	Ugyanaz, mint az A, C és D skáláknál, de vékonyabb rétegekhez
HRT	Ugyanaz, mint a B, F és G skáláknál, de vékonyabb rétegekhez

Dinamikus mérések

Gyors, lökésszerű erőhatással végzett méréseket hívjuk dinamikus eljárásoknak. Az egyik csoportba tartozó eljárások alapvetően nem különböznek a szűrőkeménységi módszerektől, mivel ebben az esetben is a benyomódás következtében létrejött képlékeny alakváltozásból határozzák meg a mérőszámot.

Poldi-eljárás

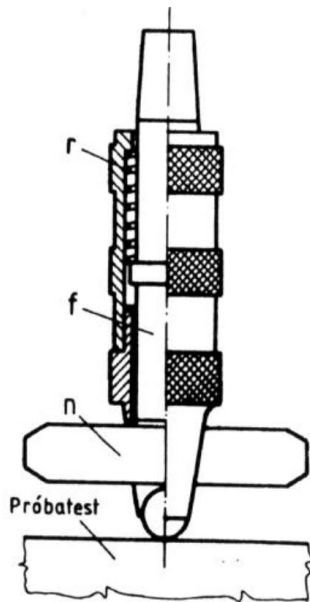
Legelterjedtebben alkalmazzák a Brinell-keménységmérésen alapuló Poldi-eljárást. A mérés lényege, hogy a mérendő tárgy keménységét egy ismert keménységű etalonnal való összehasonlítás alapján határozzák meg oly módon, hogy azonos nagyságú erő hat a próbatestre és az etalonra egyaránt. A mérés vázlata az 8. ábrán látható, ahol a Poldi-kalapács acélgolyót tartalmaz. A mérés kiértékelése az alábbi egyenlet alapján végezhető el:

$$HB_x = HB_e \frac{d_e^2}{d_x^2}$$

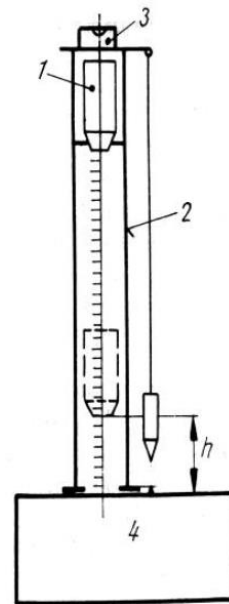
ahol HB_x, HB_e - a próbatest és az etalon keménysége, d_x, d_e - a próbatest és az etalon lenyomatának átmérője.

Szkleroszkóp

A dinamikus keménységmérési eljárások másik csoportja, a rugalmas visszahatás elvén alapul. Az egyik berendezés a szkleroszkóp (9. és 10. ábra) amelynek alkalmazása során egy gyémántfejjel ellátott kistömegű hengert ejtenek a vizsgálandó darab felületére egy függőleges csőben. A cső falán látható skálán mérhető a darabról visszapattant henger pozíciója. A szerszám gyakorlatilag nem hagy nyomot a munkadarab felületén. A mérendő tárgy tömege jelentősen befolyásolja a mérés eredményét. Minél kisebb a vizsgálandó darab tömege, annál nagyobb esély van arra, hogy a leeső szerszám rezgést keltsen a munkadarabban, csökkentve a visszapattanás energiáját. Ezért alapvetően nagytömegű tárgyak vizsgálatára alkalmazzák ez az eljárást.



9. ábra A Poldi-eljárás vázlata, ahol r- a rugó, f- acél henger, n- az etalon.



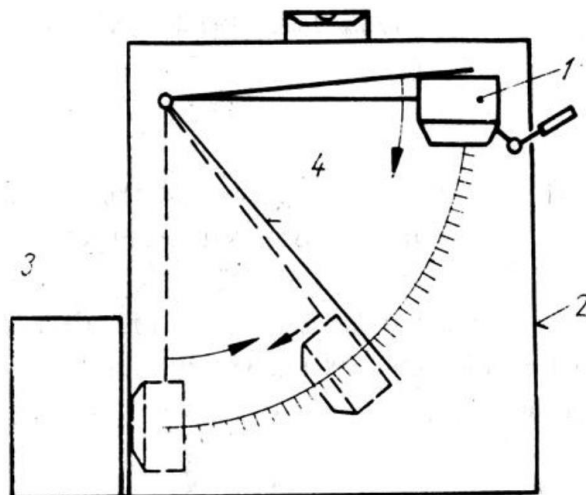
10. ábra Szkleroszkóp mérési elve: 1 - mérósúly, 2 - üvegcső, 3 - indító gomb, 4 - próbatest



11. ábra Napjainkban használt szkleroszkóp digitális kivitelben

Duroszkóp

A duroszkóp mérési elrendezése látható a 11. ábrán. A vizsgálat kezdetén a mérőkalapács a felső pozícióban helyezkedik el, adott helyzeti energiával rendelkezve. A kalapácsot a mérendő darab felületére ejtve, a visszapattanás szöge jellemzi az anyag keménységét. A próbadarab tömege és a vizsgált felület érdessége befolyásolja a mérés eredményét.

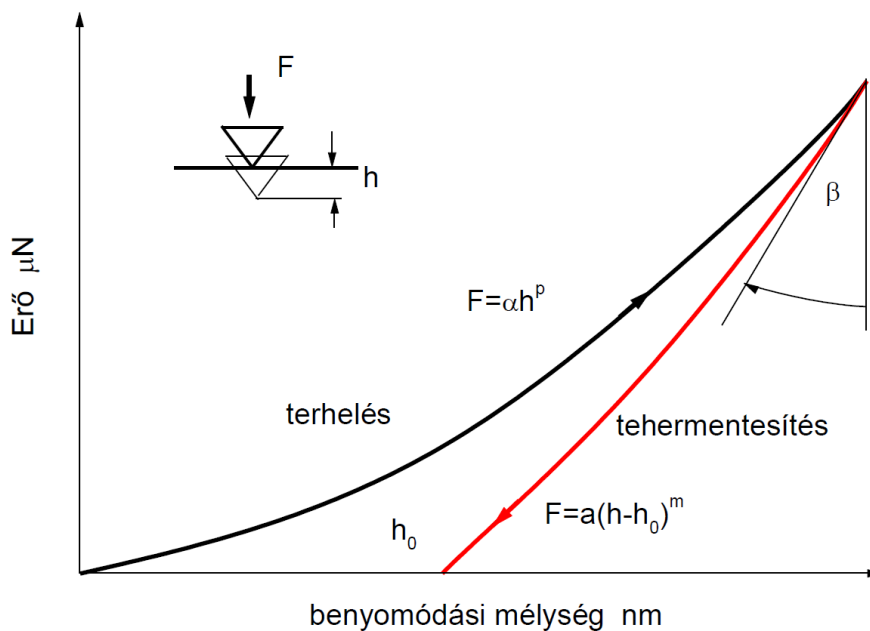


12. ábra Duroszkóp mérési elve: 1 - mérőkalapács, 2 - mérődoboz, 3 - próbatest, 4 - mutató

Különleges mérések

Műszerezett keménységmérés

Az eddig ismertetett eljárások során a mérőszerszám és az anyag kölcsönhatásának folyamata helyett csak a folyamat végeredményét elemeztük, mivel az eljárások nem adtak lehetőséget a folyamat vizsgálatára. Az utóbbi évtizedekben kifejlesztettek olyan, jellemzően igen kis terhelésű eljárásokat, amelyeknél az erő-benyomódás folyamatos regisztrálását lehet elvégezni, és amely alapján komplexebb mérőszámok határozhatók meg. A műszerezett keménységvizsgálatnál villamos erőmérő cellával és útdóval folyamatosan mérik a terhelő erőt (F) valamint az anyagba behatoló szúrőszerszám elmozdulását (h) és az így kapott adatokat számítógépes adatgyűjtő és feldolgozó rendszer segítségével kiértékelik. Egy jellegzetes erő benyomódási mélység diagram látható az 12. ábrán. A terhelés kis szintje (mN, μ N) és a benyomódás kis értéke (nm) nagyon pontos regisztrálást igényel, és emiatt az eljárás csak laboratóriumi körülmények között használható.



13. ábra A műszerezett mérés esetén rögzített erő - benyomódási mélység diagram

A görbe kiértékelése a mérési eredmény analitikus feldolgozásán alapul. A terhelés és tehermentesítés egyenletei az alábbi alakban írhatók fel.

$$F = \alpha h^p,$$

$$F = a(h - h_0)^m$$

ahol α , p és a , m a görbék illesztésére szolgáló paraméterek, h_0 - a nanoindenter benyomódási mélysége tehermentesített állapotban. A tehermentesítési görbe kezdeti szakaszához (h_{max}) kapcsolható a vizsgált anyag rugalmassági modulusza.

$$\tan \beta = \left. \frac{\partial F}{\partial h} \right|_{h_{max}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A}$$

ahol A - a lenyomat felülete, E_r - redukált rugalmassági modulusz, amelynek értéke az alábbi egyenlettel számolható:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$$

ahol E és ν a próbatest- , E_i és ν_i az indenter rugalmas paraméterei. Az anyag keménysége, hasonlóan a szűrőkeménység definíciós egyenletéhez az alábbi módon határozható meg:

$$H = \frac{F_{max}}{A}$$

Összefoglalás

A különböző eljárásokkal meghatározott keménységértékek között átváltásra van lehetőség. Az alábbi táblázat erre ad egy példát:

Szakítószilárdság (N/mm ²)	Vickers- keménység HV	Brinell- keménység HB	Rockwell-keménység	
			HRB	HRC
210	65	62		
255	80	76		
320	100	95	56	
350	110	105	62	
400	125	119	69	
450	140	133	75	
510	160	152	81,5	
560	175	166	86	
610	190	181	89,5	
705	220	209	95	
800	250	230	99,5	22
900	280	266		27
1020	317	301		32
1110	345	328		35
1200	373	354		38
1300	403	383		41
1530	473	449		47
1730	527	501		51
1910	578	549		54
2200	655	622		58

A keménységmérés egyszerű és gyors eljárás, mely olyan mutatószámok meghatározására szolgálhat, melyek alapján közelítő és összehasonlító adatok nyerhetők, a sokkal bonyolultabb szakítóvizsgálattal nyert paraméterekre. Azonban nyomatékosan meg kell jegyezni, hogy a keménységmérés alapján becsléssel számolt folyáshatár vagy szakítószilárdság, soha nem fogadható el olyan bizonyossággal, mint a szakítással meghatározott értékek. A keménységmérés mutatószámai nemcsak a szilárdságról adnak tájékoztatást, hanem arra is következtetni engednek, hogy a munkadarab milyen hőkezeltségi állapotban van, ill. milyen képlékenyalakításon ment keresztül. Ezen kívül a keménységérték és a kopásállóság között is szoros kapcsolat áll fenn.

Felkészülést segítő kérdések:

- Rajzolja fel a Brinell-keménységmérés elrendezését.
- Adja meg a Brinell-keménység kiszámítására vonatkozó képletet.
- Rajzolja fel a Vickers-keménységmérés elrendezését.
- Adja meg a Vickers-keménység kiszámítására vonatkozó képletet.
- Adja meg a Brinell- illetve a Vickers-keménységmérések esetén a szabványos jelöléseket.
- Hasonlítsa össze a Vickers- és a Knoop-eljárásokat.
- Adja meg a HRB keménység kiszámítására vonatkozó képletet.
- Rajzolja fel a HRC keménységmérés elrendezését.
- Adja meg a HRC keménység kiszámítására vonatkozó képletet.
- Hasonlítsa össze a HRB és HRC mérések alkalmazhatósági területeit.
- Írja fel a lenyomatok ismeretében a próbatest és az etalon keménysége közötti kapcsolatot Poldi-kalapáccsal való mérés esetére.
- Írja le a szkleroszkóp mérési elvét.
- Írja le a duroszkóp mérési elvét.
- Adja meg a műszerezett mérés esetén a rugalmassági modulusz és a tehermentesítési görbe kezdeti szakaszához húzható érintő közötti kapcsolatot.

Felhasznált és ajánlott irodalom:

- Dr. Gillemot László: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat.
- Prohászka János: Bevezetés az anyagtudományba.
- W. D. Calister, D.G. Rethwisch: Materials Science and Engineering. 9th edition John Wiley & Sons, 2013
- Az alkalmazott szabványok:
 - MSz EN ISO 6506-1:2014
Fémek. Brinell-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás (ISO 6506-1:2014)
 - MSz EN ISO 6507-1:2006
Fémek. Vickers-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás (ISO 6507-1:2005)
 - MSz EN ISO 4545-1:2006
Fémek. Knoop-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás (ISO 4545-1:2006)
 - MSz EN ISO 6508-1:2016
Fémek. Rockwell-keménységmérés. 1. rész: Mérési eljárás (ISO 6508-1:2016)
 - MSz EN ISO 18265:2014
Fémek. A keménységi értékek átszámítása (ISO 18265:2013)