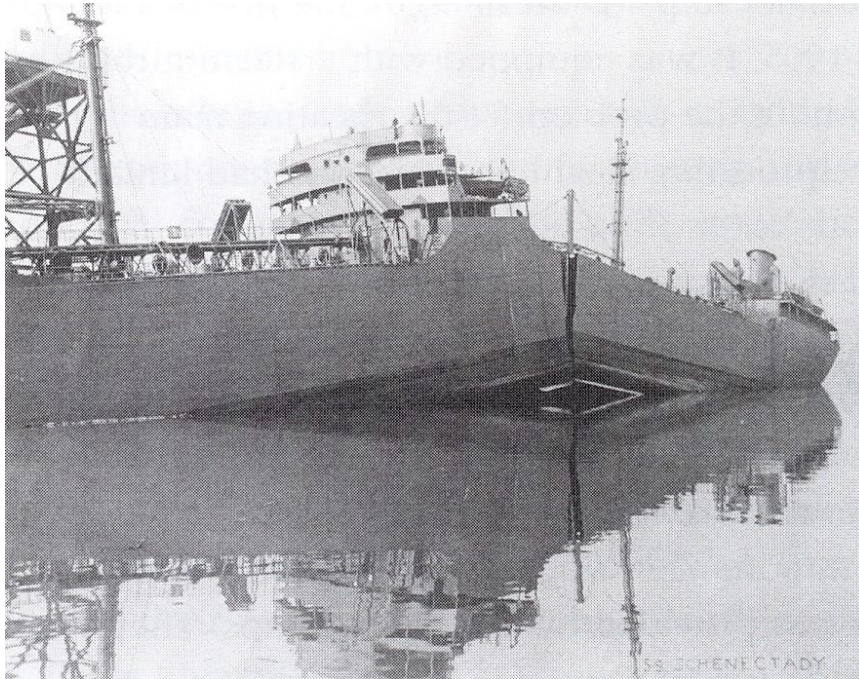


ÁLLAPOTTÉNYEZŐK

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

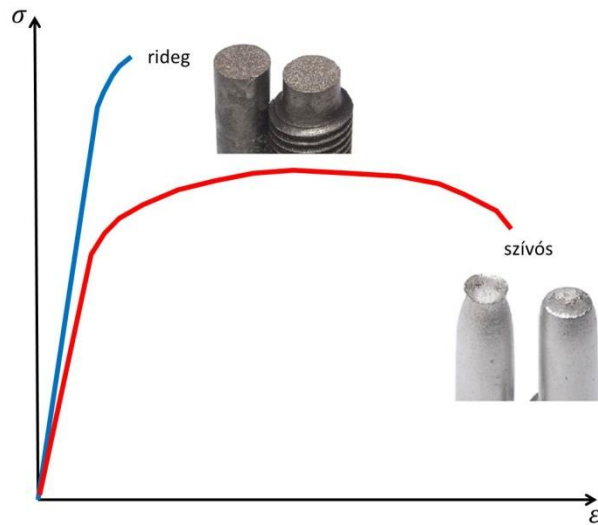
A szakértők a hegesztett kötések elégtelenségére gyanakodtak, mint kiváltó ok, mivel azokban az időkben a háború miatt jószerével csak képzetlen hegesztőket tudtak alkalmazni. A vizsgálatok azonban egyértelműen kimutatták, hogy a repedések a hajó testét alkotó, kis karbon tartalmú acéllemezeken (amely 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).



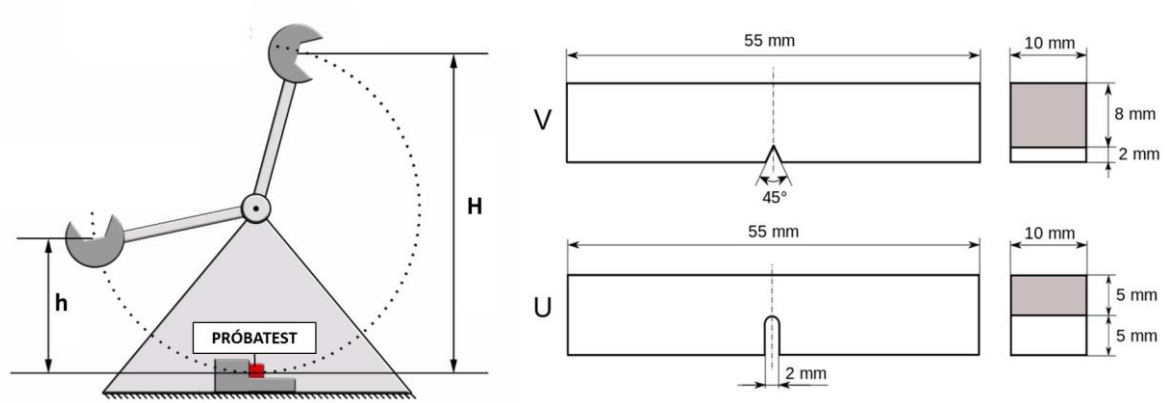
2. ábra. Egy ridegen (kék) és egy szívósan (piros) viselkedő anyag mérnöki feszültség mérnöki alakváltozás diagramja a töretfelületek képével.

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.



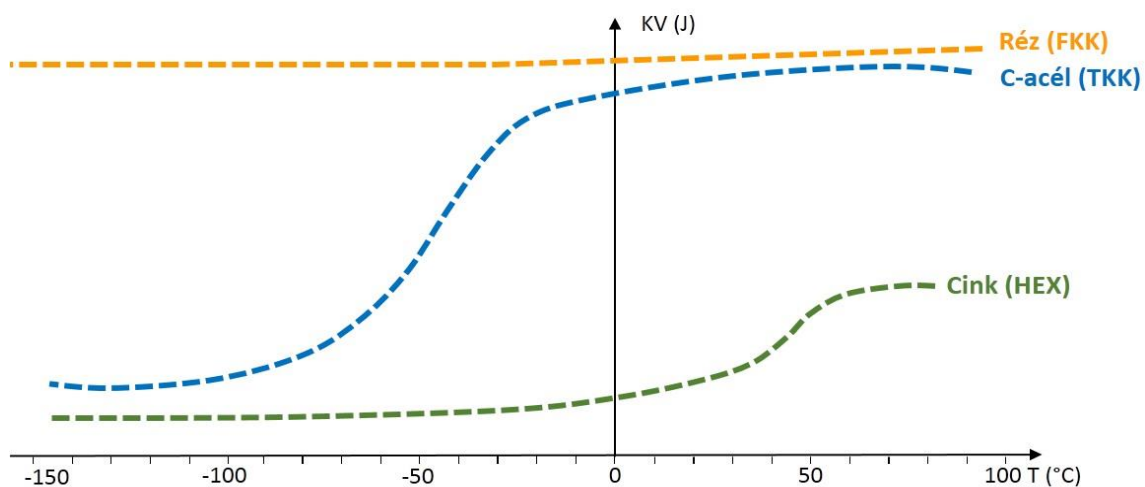
3. ábra. A Charpy-féle ütő berendezés elvi ábrája (balra) és a mérésekhez használt, bemetszett próbatestek: V-bemetszésű (fent) és U-bemetszésű (lent).

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

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

*A kalapács tömege szabja meg a maximálisan kifejtendő 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:

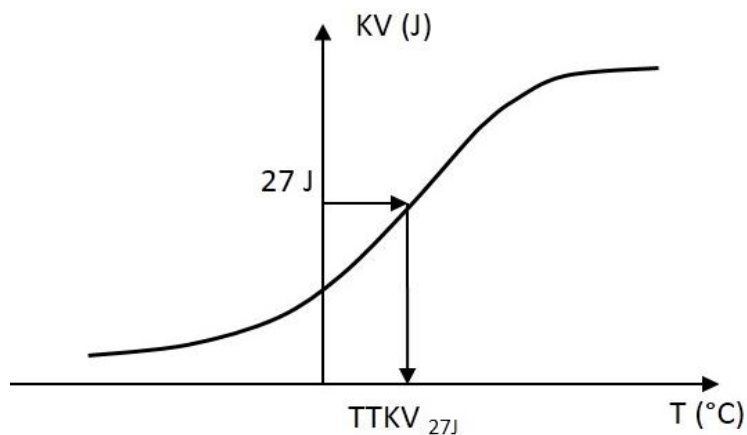
- Előírt ütőmunka alapján
- Inflexiós pont alapján
- Lineáris expanzió alapján
- Töretfelület alapján

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).

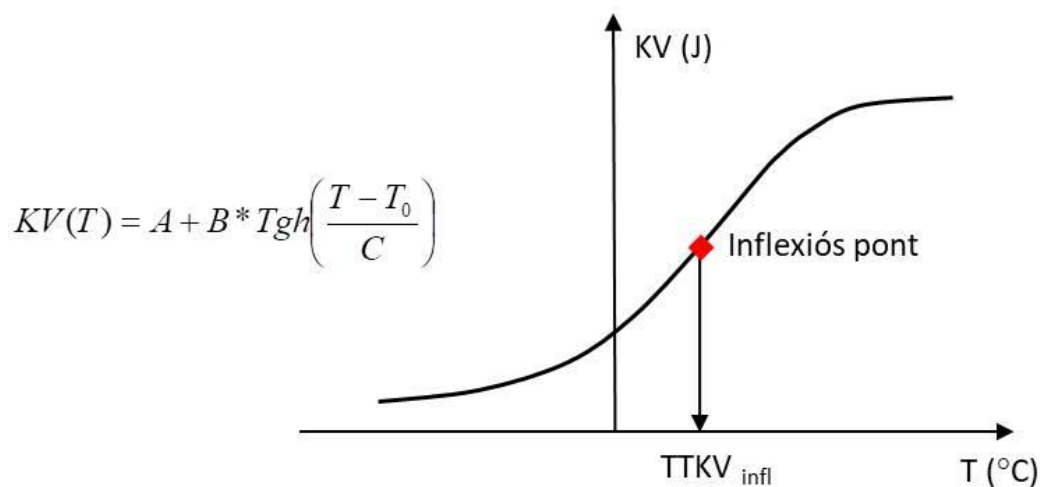
Megfelelő számú mérés alapján a kapott pontseregre ráilleszthetünk egy 4 paraméteres (A, B, C, T_0) görbét, amelynek inflexiós pontja is szolgálhat a TTKV meghatározására (6. ábra).

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).

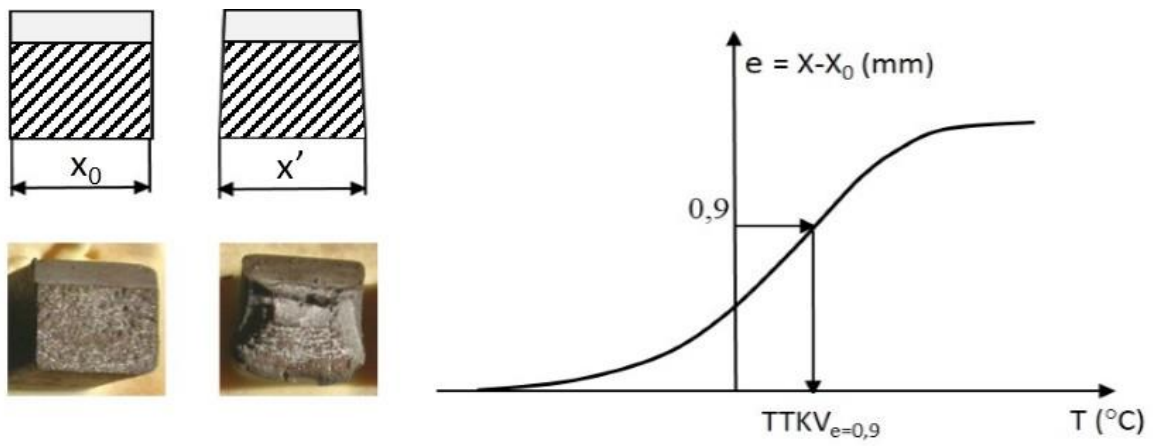
A rideg, illetve képlékeny viselkedés a töretfelületeken a rájuk jellemző struktúrát fog létrehozni. A TTKV egyik (legnehezebb és legszubjektívebb) meghatározási módszere, hogy megkeressük azt a hőmérsékletet, ahol a töretfelület 50%-ban szívós, 50%-ban rideg jelleget mutat (8. ábra).



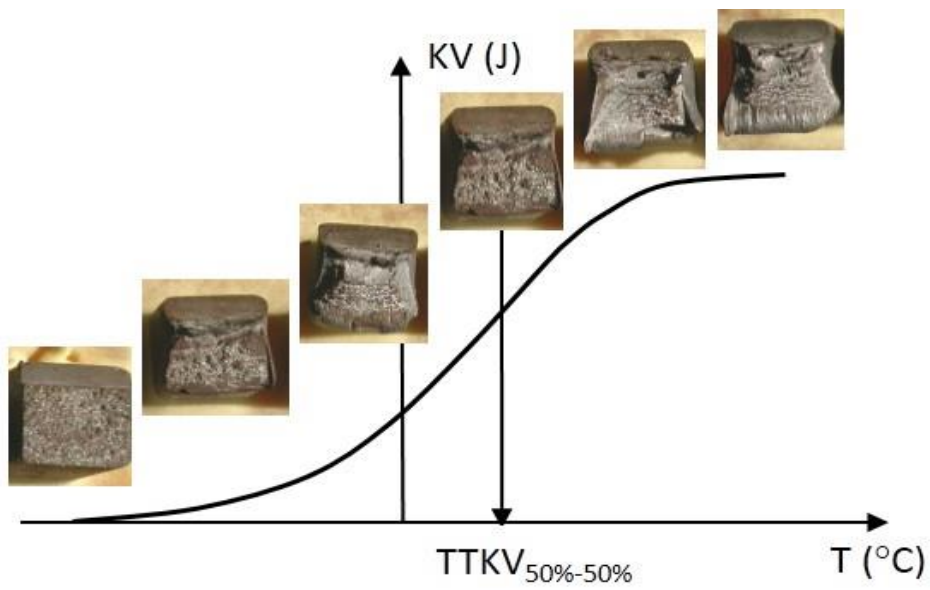
5. ábra. TTKV meghatározása előírt ütőmunka alapján.



6. ábra. TTKV meghatározása inflexiós pont alapján.



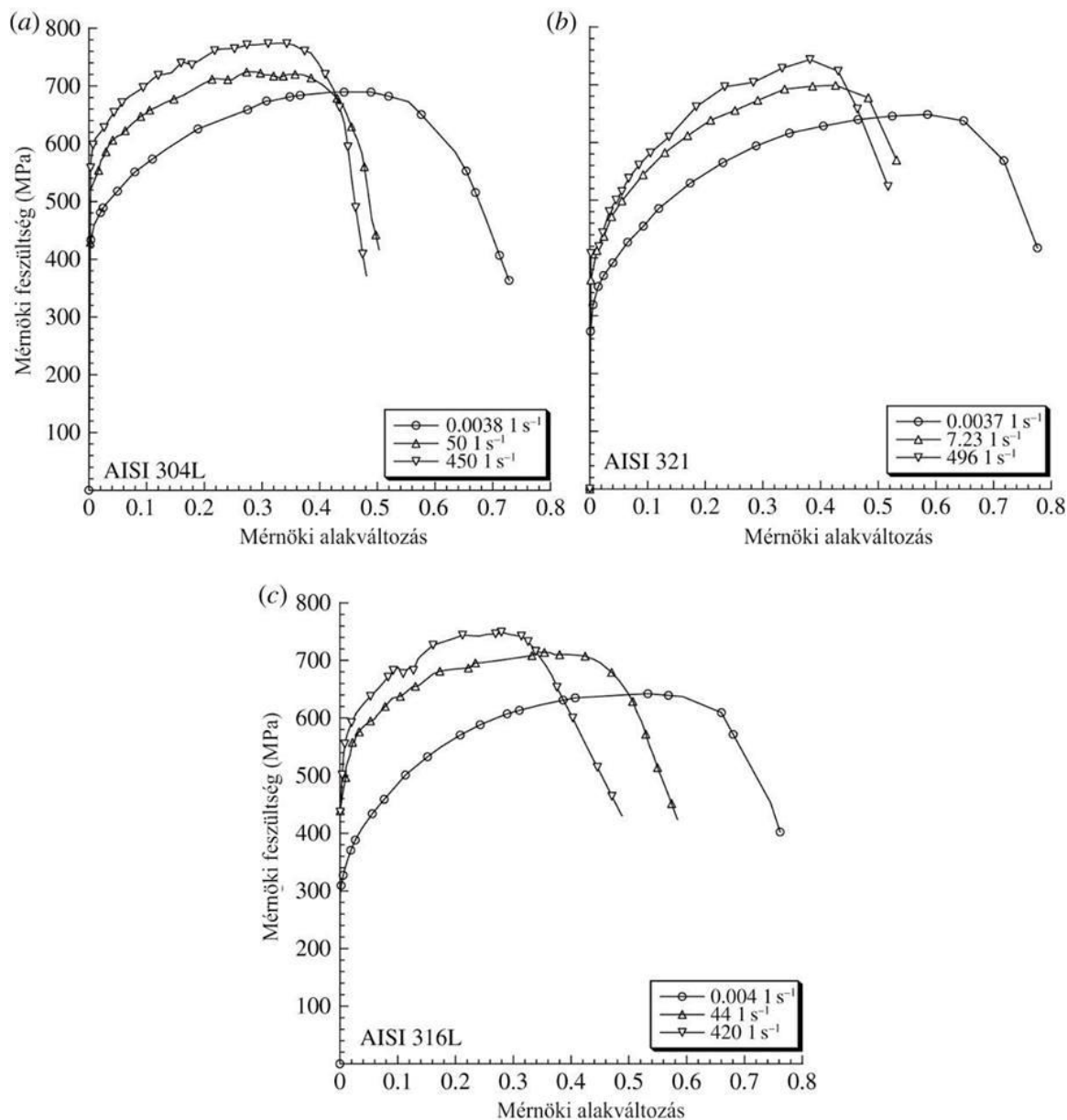
7. ábra. TTKV meghatározása előírt lineáris expanzió alapján.



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.

Szembevetendő, 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.

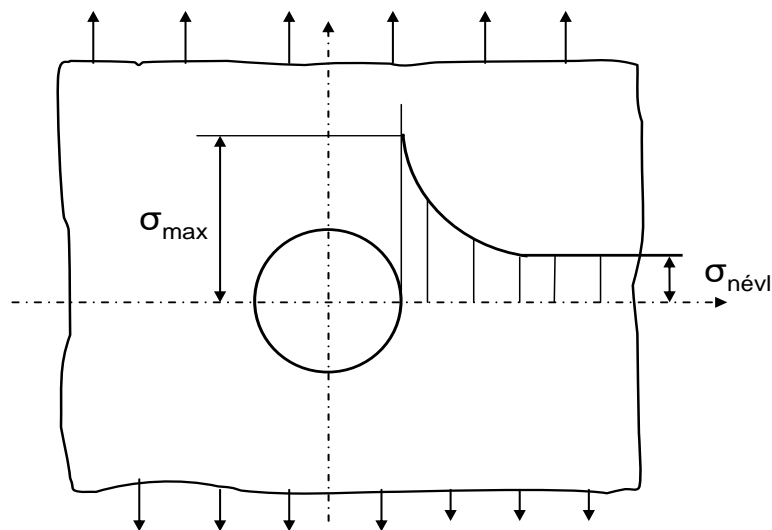
A képlékeny állapot szempontjából a 3 tengelyű nyomófeszültség a legkedvezőbb, vagyis ha az anyagot minden oldalról nyomjuk, mivel ilyenkor az anyagban lévő mikroszkopikus folytonossági hibák (amelyekből a repedések keletkeznek) nem tudnak növekedni. Ilyen feszültségi állapot folyadéknyomás segítségével 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:

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

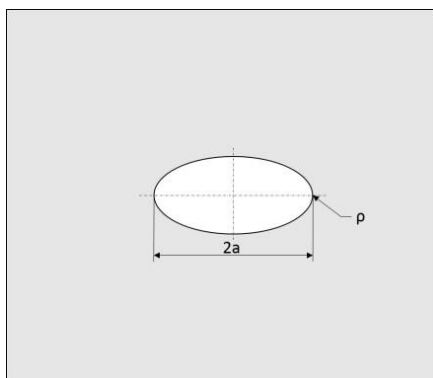


10.ábra. Egy furatot tartalmazó lemezben ébredő, a húzás irányával párhuzamos feszültségkomponens eloszlása a furat középtengelyének síkjában.

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.

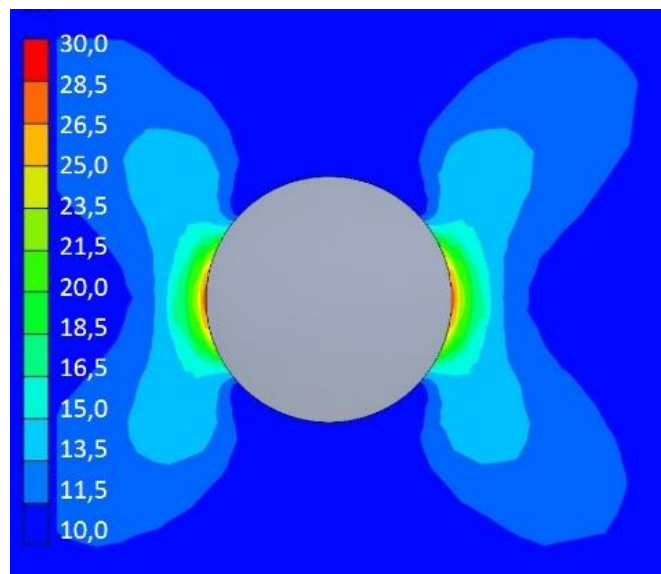
Ha egy végtelen kiterjedésű lemezben egyenletes ($\sigma_{névl}$) húzófeszültség ébred, és a lemez egy $2a$ szélességű, ρ lekerekítési sugarú ellipszis alakú hibát (anyaghiányt) tartalmaz (11. ábra), akkor a feszültségkoncentrációs tényező értéke az alábbi egyszerű képlettel számítható:

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



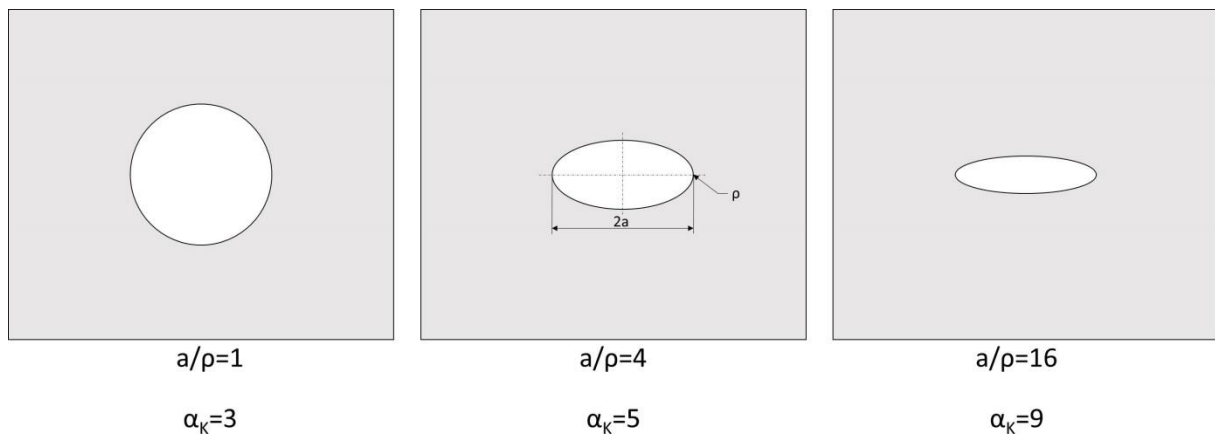
11.ábra. Az „a” szélesség és a „rho” lekerekítési sugár értelmezése egy ellipszis alakú anyaghiba esetében.

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 \uparrow irányú) esetén ébredő (egyenértékű) feszültségeloszlás látható a furat környezetében.



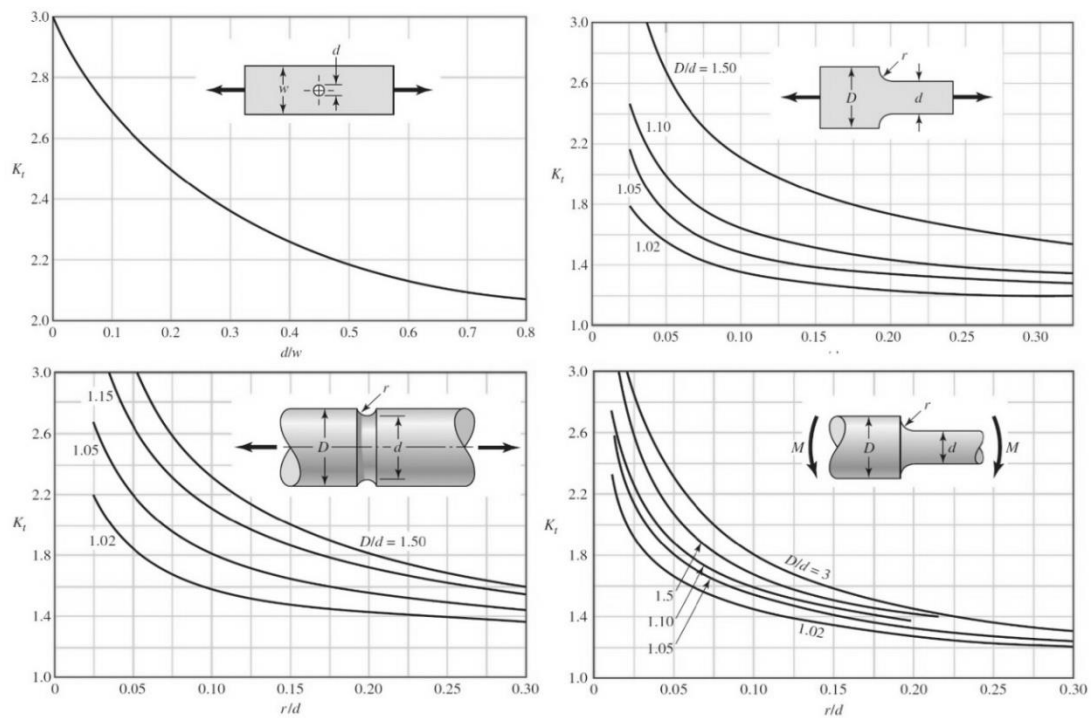
12.ábra. Egy $a/\rho=1$ viszonyal rendelkező elliptikus hibát tartalmazó lemez húzása esetén ébredő egyenértékű feszültségek, $\sigma_{névl}=10$ MPa, VEM analízis.

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