

Az ütővizsgálat információtartalmának növelése

Ritfingér János

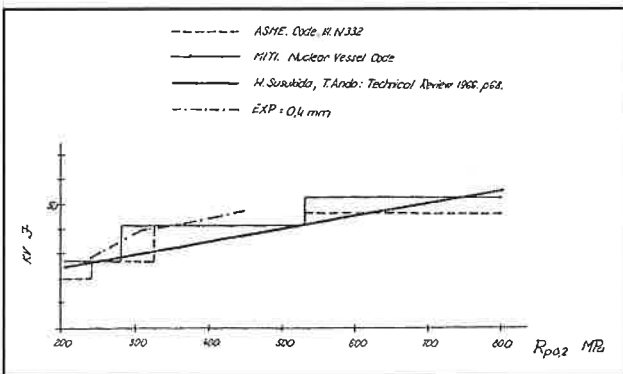
Bevezetés, rövid visszatekintés

Az ütővizsgálat bevezetése George Charpy (1865–1925) nevéhez fűződik. A vizsgálati módszert 1901-ben Budapesten ismertette az Anyagvizsgálók Nemzetközi Egyesületének kongresszusán [1]. Az ütővizsgálat jelenlegi formája hamar kialakult. Megjelentek a 750, illetve a 300 J maximális energiájú ütőművek. Hosszabb időt vett igénybe a próbatestek méretének és bemetszésük alakjának kialakulása. Ez a folyamat párhuzamosan ment végbe a rideg törést szenvedett káresek elemzésével. Kezdetben keresték azt a próbatest típust, illetve követelményt, amely a legjobban leírja a káreseményt. Ezek a vállalkozások kudarcával végződtek. Sajnálatos, hogy a kudarcból sokan a vizsgálati módszerre vontak le hibás következtetést.

A hegesztett szerkezetek acéljainak rideg törési kategóriákba sorolása az ütővizsgálat eredménye alapján az MSZ 6280:1965 szabványban látott napvilágot. Ezt követték az ütővizsgálat megbízható alkalmazásához szükséges, a vizsgálat eredményét befolyásoló tényezők hatásvizsgálatai. A bemetszés, a próbavétel irányának, a próbatest méretének és az öregítés módjának hatásával a [2–4] munkák foglalkoztak. A hazai vizsgálatok hozzájárultak az ütővizsgálat eredményeinek szórás-elemzéséhez [5–6]. Az ütővizsgálat módszertani kérdéseinek tisztázása tette lehetővé az acél-kiválasztási rendszer kidolgozását két, jelentős szerkezettípusra [7–9].

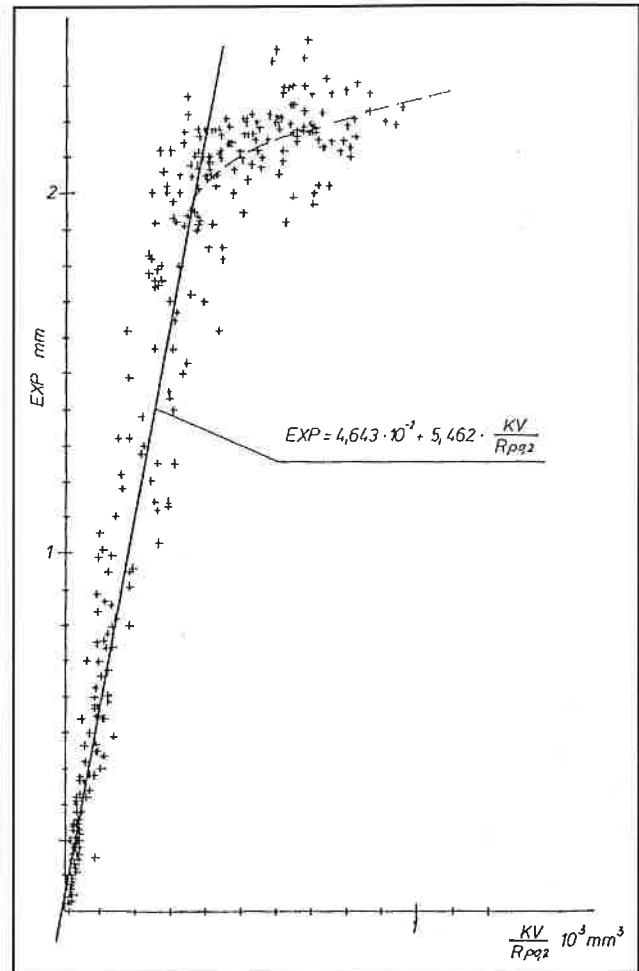
A törésre fordított munka (KV) meghatározása mellett bevezették az ütőpróbatest töretfelületén a keresztirányú expanzió mérését [3]. Több kísérlet történt a töretfelület értékelésére, de ennek a mérőszámnak a meghatározása, elsősorban a leolvasás bizonytalansága miatt, csak korlátozottan terjedt el hazánkban.

A törésre fordított energia függ az acél folyáshatárától. Az eltérő folyáshatárú acélok rideg törési kategóriákba sorolása csak akkor tekinthető egyenértékűnek, ha az átmeneti hőmérséklet kijelöléséhez választott energiaszintet a folyáshatártól függően választjuk meg. Lágy ($R_m < 470$ MPa) acélokon végzett ütővizsgálatok eredményét értékelve a $KV = 27$ J energiaszinthez 0,4 mm expanzió tartozott [3]. Az expanzió értékét folyáshatártól független mérőszámnak tekintve, a 0,4 mm expanzióhoz tartozó ütőmunka és a folyáshatár kapcsolatát az 1. ábra szemlélteti. Ezt az összefüggést felhasználva írta elő az MSZ 6280 szabvány az átmeneti hőmérséklet kijelöléséhez az ütőmunka folyáshatártól függő értékét, mégpedig: $KV = 27$ J, ha $R_m \leq 470$ MPa, illetve $KV = 40$ J, ha $R_m > 470$ MPa.



1. ábra. A 0,4 mm expanzióhoz tartozó ütőmunka változása az acél folyáshatárának függvényében

A folyáshatárra vonatkoztatott ütőmunka és az expanzió között lineáris kapcsolat van (2. ábra). Ennek ismerete jelentős segítséget nyújt a hegesztési varratok törésmechanikai vizsgálatának értékeléséhez, mivel ehhez az értékeléséhez szükséges a folyáshatár ismerete. Vizsont



2. ábra. Az expanzió és a folyáshatárra vonatkoztatott ütőmunka kapcsolata

a hegesztési varratok folyáshatárát sok esetben nem határozzák meg (illetve nem tudják meghatározni), ám értékére becslés tehető a 2. ábra szerinti kapcsolat ismeretében, ha a varratban bemetszett ütőpróbatest vizsgálatával meghatározzuk az ütőmunka és az expanzió értékeit. A bemetszés hatására, a próbatest méretére, a próbavétel irányára, az átmeneti hőmérséklet kijelölési feltételére (töretfelület, expanzió, ütőmunka) vonatkozó vizsgálatok eredményeinek szintézisét évtizedek óta szabványok (pl.: MSZ 4308) tartalmazzák.

Műszerezett ütővizsgálat

Az ütővizsgálat során az erő időbeli változásának regisztrálására mérőrendszert helyeztek üzembe a Vaskutban 1971-ben [11]. A rendszer alapját egy 300 J maximális energiájú, 5,5 m/s maximális ütési sebességű ingás ütőmű képezte. Az ütőfej élére ragasztott, fél hidat alkotó nyúlásmérő bélyegek érzékelték az erőt, melynek változását az idő függvényében a Tectronix 76023 memória oszcilloszkóp regisztrálta. A vizsgálat eredményéhez a regisztrátumról készített felvétel (3. ábra) kiértékelésével jutottunk. Az erőmérő cella kalibrálásához a regisztrátum területét összevetettük az ütőmunka értékével. A műszerezett ütőművel 1971–1974. között elvégzett nagyszámú vizsgálat eredményeinek értékelése az erőmérés pontatlanságára mutatott rá. Az erőmérés egyre pontatlanabbá vált a berepezített próbatestek $> 10^5$ MPa·m^{0,5}·s⁻¹ sebességű vizsgálataikor. Az erőmérés pontatlanságára tett megfigyelés-



3. ábra. Az erő változása az idő függvényében; műszerezett ütővizsgálat seinek a szakirodalom is alátámasztotta [12]. A pontos erőméréshez szükségessé vált az ütés során lejátszódó folyamatok megismerése. Az ütközéskor az erőmérő testben rugalmas hullámok keletkeznek, amelyek periódus ideje:

$$\tau = 1,68 \cdot [S \cdot E \cdot B \cdot C_s]^{0,5} \cdot V_0^{-1}$$

ahol $S = 4W$ a támaszköz, E a rugalmassági tényező, B a próbatest vastagsága, C_s a próbatest (compliance) állandója és V_0 a hang terjedési sebessége a vizsgált anyagban.

Acél esetén, ha $W = 10$ mm: $\tau = 7 \cdot 10^{-6} [E \cdot B \cdot C_s]^{0,5}$. A próbatest dimenziómentes állandója: $E \cdot B \cdot C_s = 72 \cdot g(a/W) - 20$, ahol

$$g(a/W) = 1,68(a/W)^2 - 3,95(a/W)^3 + 16,38(a/W)^4 - 37,23(a/W)^5 + 77,55(a/W)^6 - 128,87(a/W)^7 + 172,53(a/W)^8$$

Abban az esetben, ha az erőt $t > 3\tau$ idő elteltével kell mérni – mely a repedés hosszától, az a/W értéktől függ –, akkor a rugalmas hullámok jelentős mértékben csillapodnak, és az erőmérő cella hűen követi az erő változását az idő függvényében. Ha az erőméréshez tartozó idő $1,42\tau < t < 3\tau$ tartományba esik, akkor az erő jelét szűrni kell. Az RC felülvágó (alul áteresztő) szűrő frekvenciája: $f_{0,9dB} = 0,35/1,1\tau$.

A módszertani kísérletek eredményeinek felhasználásával új műszerezett ütőművet helyeztek üzembe a Vaskutban. Az ütőmű maximális energiája: 750 J. A DIN 51222 szerinti élkiképzésű erőmérő testen a teljes hídra kapcsolt 2 db 120 Ω -os, 3 mm-es jeltávú nyúlásmérő bélyeg jelét a fentiek szerint megválasztott frekvenciájú felülvágott szűrő szűrte, majd az erősítést követően a jelet a Gould OS 4000 típusú tranzienzi rekorderrel egybeépített tárolós oszcilloszkóp rögzítette. Az ütőmű energiája lehetővé tette, hogy nemcsak az 5,8 m/s legnagyobb ütési sebességgel, hanem a 3,8 és az 1,9 m/s sebességekkel is végezhessünk vizsgálatokat. Ezzel a műszerezett ütőművel végeztük az atomerőmű szerkezeteinek anyagain a vizsgálatokat [13; 14].

A módszertani fejlesztések új fejezetét a számítógéppel összekapcsolt ütőmű nyitotta meg. Ezzel lehetőség nyílt az elektronikus szűrők helyett a matematikai szűrőprogramok alkalmazására, a jelfeldolgozás és a kiértékelés folyamatának a felgyorsítására. Ezek a munkák elsősorban a Miskolci Egyetem munkatársainak nevéhez fűződnek. Az Erőkar Rt. Anyagvizsgáló és Állapotellenőrző Laboratóriumában létesített, max. 750 J ütési energiájú műszerezett ütőmű már a Miskolci Egyetem munkatársainak közreműködésével készült [15].

Példák a vizsgálatok eredményeiből

A dinamikus folyáshatár

Az ütővizsgálat során regisztrált erő–idő függvényből meghatározható a dinamikus folyáshatár:

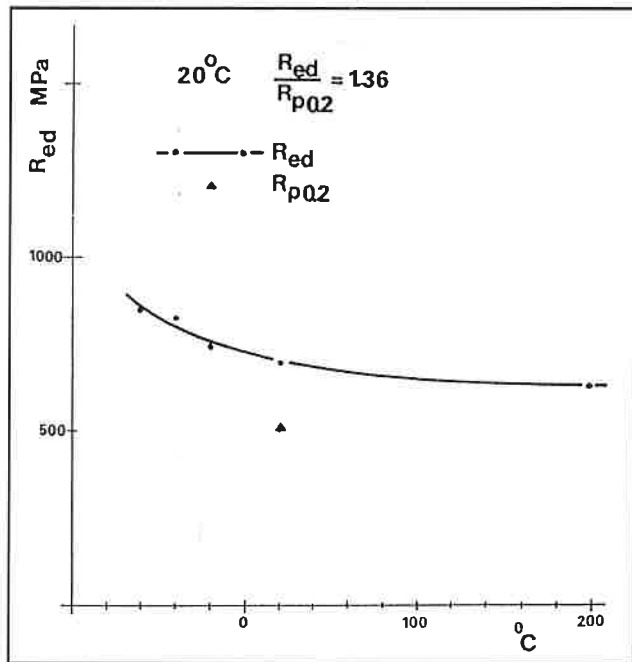
$$R_{ed} = \frac{4 \cdot M}{c \cdot (W - a)^2}$$

illetve a nyomatékot (M) a folyáshoz tartozó erőből számolva és behelyettesítve az ISO-V próbatest méreteit:

$$R_{ed} = 4,67 \cdot 10^{-2} \cdot F_{ed} \quad \text{N/mm}^2$$

ha F_{ed} értéke N-ban van helyettesítve:

A reaktortartály 15H2MFA jelű szerkezeti acélja műszerezett ütővizsgálaton meghatározott dinamikus folyáshatárának változását a hőmérséklet függvényében szemlélteti a 4. ábra.



4. ábra. A műszerezett ütővizsgálaton meghatározott folyáshatár változása a hőmérséklet függvényében; 15H2MFA jelű acél

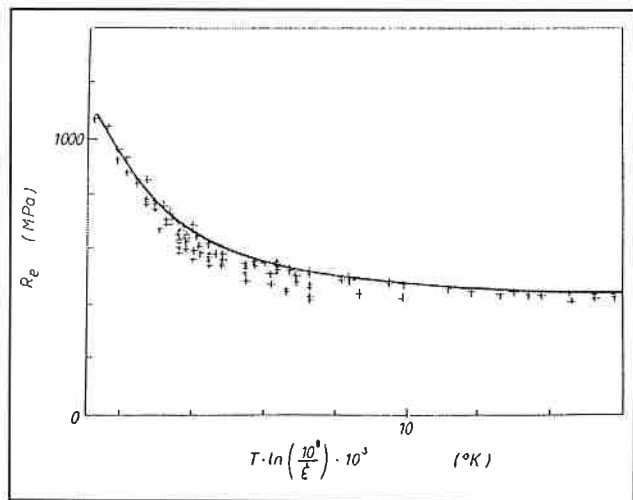
Az alakváltozás sebessége: $\dot{\epsilon} = A \cdot \exp\left(-\frac{H}{T}\right)$,

ahol A állandó ($A \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ a felületen középpontos köbös rácsú fémekre), H a jelenség aktivációs energiája, T a hőmérséklet.

Kifejezve az alakváltozási sebességből a H aktivációs energiát:

$$H = T \cdot \ln\left(\frac{A}{\dot{\epsilon}}\right), \text{ a dinamikus folyáshatár hőmérséklet- és alakváltozási sebesség-függésére írható: } R_{ed} \approx f\left[T \cdot \ln\left(\frac{A}{\dot{\epsilon}}\right)\right]$$

Króm-molibdén-vanádium ötvöztetésű acél dinamikus folyáshatárának változását a hőmérsékletet és az alakváltozás sebességét tartalmazó paraméter függvényében az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra. A folyáshatár változása a hőmérsékletet és az alakváltozási sebességet tartalmazó paraméter függvényében; Cr-Mo-V-ötvöztetésű, nemesített állapotú acélok

Egyes törésmechanikai jellemzők meghatározása

A dinamikus törési szívósság: $K_d = \frac{F_{Qd}}{B \cdot W^{0.5}} \cdot Y(a/W)$

A $K_d \equiv K_{Id}$ teljesülésének feltétele a statikus vizsgálatokhoz hasonló:

$$B(W-a), a \geq \alpha \left[\frac{K_d}{R_{ct}} \right]^2$$

Az α értékét 0,3 – 1 között ajánlják. Az $Y(a/W)$ megegyezik a statikus vizsgálatok értékeléséhez használttal.

A K_d jelölés helyett gyakran használják a $K(PCI)$ jelölést, amely a vizsgálati módszerre utal (PCI = precracked Charpy impact).

A dinamikus J integrál: $J_d = \frac{2\Delta\bar{E}_m}{B + (W-a)}$

ahol $\Delta\bar{E}_m = \Delta E_m - \frac{F_m^2}{2} C_M$, és $C_M = C_T - C_S$, illetve $C_T = V_0 \cdot t_m / F_m$

ΔE_m az erő maximumának eléréséig felhasznált energia az ütőfej lassulásának figyelembevételével, C_M az ütőmű állandója, C_T a vizsgálat és C_S a próbatest állandója.

A J_d -ből számított K_{Id} összevetése a K_d értékével a vizsgálat jószágának ellenőrzése mellett a mérőszámok érvényességének eldöntéséhez is felhasználható.

Az ekvivalens energia [19] módszerével a K_d^E dinamikus törési szívósság a következők szerint határozható meg:

$$K_d^E = \frac{F^*}{B \cdot W^{0.5}} Y(a/W), \text{ ahol } F^* = \left[\frac{2 \cdot \Delta\bar{E}_m}{C_S} \right]^{0.5}$$

A repedés kinyílása: $\delta_D = V_0 \cdot t_m \left[1 - \frac{\Delta E_m}{4E_0} \right] - \delta_M$, ahol $\delta_M = F_m \cdot C_M$

A $J_d = m \cdot \delta_D \cdot R_{ed}$ lineáris kapcsolat a mérés pontosságának ellenőrzését teszi lehetővé.

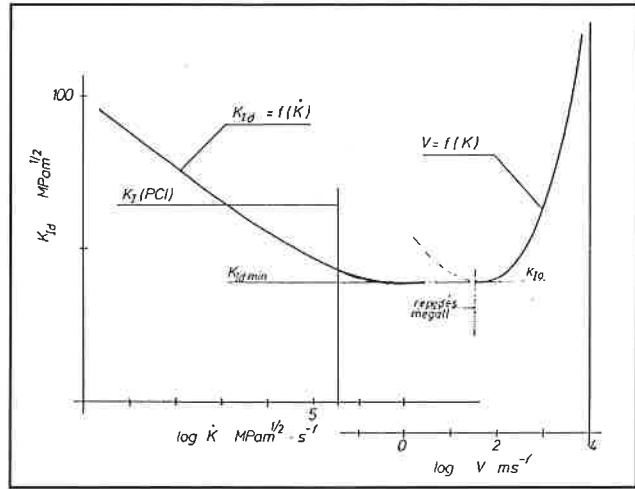
A dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők ismeretének jelentősége

A műszerezett ütővizsgálat és segítségével a dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározása még ma is szép feladatokat tartalmazó nagy kihívás az anyagvizsgálók számára. Ahhoz, hogy a módszertani fejlesztéseknek értelme legyen, tisztában kell lenni a dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők jelentőségével.

A statikus törésmechanikai anyagjellemzők érvényességi határa: $\dot{K} < 2,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ A \dot{K} növekedésével a törésmechanikai anyagjellemző csökken, és az eddigi ismereteink szerint $\dot{K} = 10^5 - 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ tartományban minimumot ér el. Szerkezeteken (főleg csövezetéseken) és szerkezetek modelljein végzett törési kísérletek eredményei szerint, ha a repedés tövében csökken a feszültségintenzitási tényező, a repedés terjedési sebessége csökken, illetve a repedés megáll. Feltételezik, hogy a $\dot{K} = 10^5 - 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ tartományban mért K_{dmin} feszültségintenzitási tényező értéke azonos a repedés megállásához tartozó értékkel. Ezt a gondolatot foglalja össze a 6. ábra.

Abban az esetben, ha egy szerkezet törésmechanikai méretezését a K_{dmin} feszültségintenzitási tényező felhasználásával végzik, akkor a figyelembe vett terhelés és a feltételezett méretű hiba esetén nem következik be instabil repedésterjedés. De a méretezésnél figyelembevétnél nagyobb terhelésnél, például véletlen esemény hatására fellépő igénybevételnél bekövetkezhet a repedés terjedése. Ennek hatására viszont a feszültségintenzitási tényező értéke a K_{dmin} értékre csökken, és a repedés megáll. Ez az esetek túlnyomó többségében kizárja a szerkezet katasztrófális rideg törését. Ebben van a dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározásának a jelentősége.

A törésmechanikai méretezéshez (ellenőrzéshez) használt referencia görbéknél is megkülönböztetik a repedés megállásához tartozó statikus: $K_{IR} = a_1 + b_1 \cdot \exp[c_1 \cdot \Delta T]$, $\dot{K} < 2,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$, illetve dinamikus: $K_{Id} = a_2 + b_2 \cdot \exp[c_2 \cdot \Delta T]$, $\dot{K} = 10^5 - 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ eseteket [20].



6. ábra. A feszültségintenzitási tényező változása a terhelési sebesség függvényében

Összefoglalás

Közleményünkben áttekintettük a műszerezett ütővizsgálat bevezetésétől 1985-ig a Vaskutban elvégzett fejlesztésről. A külföldi és a hazai közlemények közül csak azokra hivatkoztunk, amelyeket felhasználtunk a fejlesztéshez és az alkalmazás során.

Az acélok rideg törési érzékenységének meghatározásához az ütővizsgálat ma már általánosan elfogadott módszer. Az átmeneti hőmérséklet pontos kijelölése lehetővé teszi az acélok és hegesztett kötések rideg törési érzékenységének összehasonlítását. A szabványokban, szabályzatokban rögzített acél-kiválasztási rendszerek az ütővizsgálatot meghatározott átmeneti hőmérsékletet tekintik anyagjellemzőnek.

Az ütővizsgálat információtartalma műszerezéssel növelhető. Ehhez megbízható erőmérésre és pontos kalibrálásra van szükség. Műszerezett ütővizsgálatot meghatározhatók az acélok folyáshatára a nagy alakváltozási sebesség ($\dot{\epsilon}$) és hőmérséklet (T) tartományában, továbbá a dinamikus törésmechanikai anyagjellemzői a $\dot{K} = 10^5 - 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$ tartományban.

Hivatkozások

Tóth, L.: Az anyagvizsgálat rövid története, MTS Training Center User Club, Miskolc (1994)
 Rittinger, J.: Ölvözellen és gyengén ölvözött acélok hegeszhetőségi vizsgálata, Kutatási jelentés, Vaskut (1966)
 Rittinger, J., Fehérvári, A.: Az 52C, 52D és 58C jelzésű acélok tulajdonságainak megismerése, Kutatási jelentés, Vaskut (1968)
 Gállik, I.: Hegesztett híd szerkezetek rideg törése és az új acélananyagok: UKI 38, Kiadvány, Budapest (1970)
 Fehérvári, A.: Scatter of impact test results of weld metal made by gas shielded and submerged arc processes, Advances in Welding Proc. Conf., Harrogate (1970) 261/262.
 Fehérvári, A., Rittinger, J.: Observation on scatter of impact energy, Doc. 2912-1971 (IIW) MSZ 6441: Hegesztett acélszerkezetek. Hegesztett kötések és szerkezeti elemek tervezése. Műszaki követelmények (hatályon kívül; részletei megtalálhatók az MSZ 15024 szabványban)
 Fehérvári, A., Rittinger, J.: Acélok kiválasztása nyomástartó szerkezetekhez rideg töréssel szembeni érzékenység alapján, BKL Kohászati 104 241 (1971)
 Fehérvári, A., Rittinger, J.: Stahlauswahl für druckausgesetzte Konstruktionen auf Grund ihrer Sprödebruchempfindlichkeiten, Neue Hütte 18 209 und 245 (1973)
 MSZ 13802: Nyomástartó edények tervezése. Az acél-kiválasztási tervezési követelményei a rideg törés elkerülésére
 Fehérvári, A., Rittinger, J.: A törési folyamat megismerése az erő változásának regisztrálásával ütő-hajlító vizsgálat során, BKL Kohászati 104 273 (1971)
 Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563 (1974)
 Rittinger, J.: Hazai vizsgálatok a 15H2MFA jelű reaktortartály szerkezeti acélon és hegesztett kötésein, Kutatási jelentés, Vaskut (1980)
 Szilárdági ellenőrzések és ismétlődő vizsgálatok a berendezések állapotának és becslött élettartamának meghatározásához, OKKFT A/11-4 Alprogram, Vaskut-KFKI-VEIKI (1981-85)
 Lenkeyné dr. Biró Gy. et al: Módszer honosítása erómi anyagok dinamikus törésmechanikai vizsgálatához, Jelentés, Miskolci Egyetem (1993)
 Rittinger, J., Tóth, K., Macsári, K.: Dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározása műszerezett ütővizsgálatokkal, I. Országos Törésmechanikai Szeminárium, Aggtelek (1981)
 Rittinger, J., Tóth, K., Macsári, K.: Dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározása műszerezett ütővizsgálatokkal, Gép XXXIV 191 (1982)
 Rittinger, J.: Módszerek a statikus és a dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározásához, Kutatási jelentés, Vaskut (1981)
 Witt, F. S.: The equivalent energy method for calculating elastic plastic fracture, 4th National Symposium on Fracture Mechanics, Pittsburg (1970)
 Rittinger, J.: A referencia görbék jelentősége a törésmechanika gyakorlati alkalmazásánál, Gép XXXIV 393 (1982)