

Törési vizsgálatok a BME Mechanikai Technológia Tanszéken

Czoboly Ernő^{1,a}, Havas István^{1,b}, Orbulov Imre Norbert^{1,c}

Kulcsszavak: törés, törésmechanika, törési munka

Absztrakt: Rövid cikkünkben összefoglaljuk a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia Tanszékén, a későbbiekben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékén végzett kutatásaink eredményeit. Cikkünk a hagyományos, tudományos cikkekől eltérően kronológiai sorrendben mutatja be a Tanszéken végzett kutatások módszertanát és eredményeit. Az első bekezdések a törésmechanika kialakulásához vezető mérnöki igények, káresetek ismertetésével kezdődik, majd a klasszikus elemek mentén haladva összefoglalásunkat a törési munka alapján meghatározott törési szívósságok elemzésével zárjuk.

Egy szerkezetnek, vagy gépnek váratlan törése minden mérnök rémálmai körébe tartozik, mert egy ilyen esemény nemcsak komoly anyagi veszteséget, de sok esetben emberek halálát is okozhatja. A teljes törést általában egy szerkezeti elem, vagy alkatrész meghibásodása váltja ki. Bár törések sajnos, korunkban is előfordulnak, jelenlegi ismereteinkkel mégis sokkal megbízhatóbban lehet gyártmányainkat tervezni, gyártani és üzemeltetni, mint kereken fél évszázaddal ezelőtt.

Az anyagok töréssel szembeni ellenállásával, e tulajdonság *számításkora is alkalmas anyagjellemző mérőszámának* megalkotásával körülbelül ez idő tájt kezdtek világszerte foglalkozni. Az hamarosan tisztázódott, hogy amint azt már korábbi vizsgálatok alapján is megállapították [1, 2], a törés bekövetkezését egyedül csak feszültség dimenziójú mérőszámmal nem lehet jellemezni.

A világban ez idő óta elterjedt és általánosan elfogadott kutatási irányzat, a *törésmechanika* abból indult ki, hogy az egyébként szívósnak vélt szerkezeti acélok meghatározott, szerencsétlen üzemi körülmények között nagymértékben elridegnek és ilyenkor a szerkezetben lévő kisebb – nagyobb hibák (repedések) jelentős alakváltozás nélküli törést okozhatnak. Ezért kutatásaink az azt a szélsőséges esetet vették alapul, hogy az anyag teljesen rideg, így a repedések környezetét a rugalmasságtan alapképleteivel lehet jellemezni [3]. Ez a megközelítés néhány valós esetenél igen jó, főleg nagyszilárdságú acélokból készített, nagyméretű szerkezeteknél, amelyeknél a törésmechanikai számításokra vonatkozó követelmények kielégülnek. Ezeknek a számításoknak az alapja a *feszültségintenzitási tényező* ($K=f(\sigma, c, X)$), amely a geometrián (X) kívül csak az átlagos feszültségtől (σ) és a repedés méretétől (c) függ. Ezt a számított értéket kell összevetni az anyagvizsgálatok által szolgáltatott kritikus értékkel, amely már *anyagjellemző*. (K_{Ic}) Ezt *törési szívósságnak* nevezik és dimenziója MPam^{1/2}.

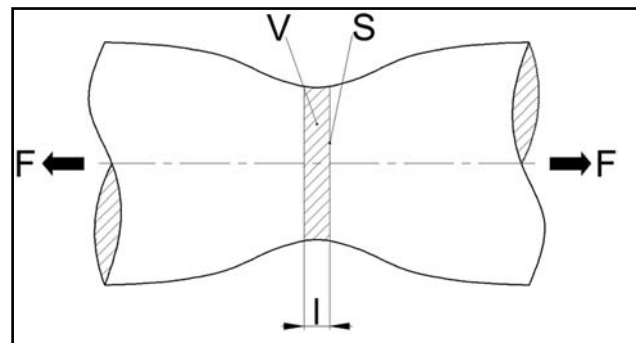
A gyakorlati esetek többségében azonban a szerkezeti anyagok nem viselkednek teljesen ridegen, a repedés terjedését több – kevesebb képlékeny alakváltozás kíséri, ami a viszonyokat alapvetően változtatja meg. Ezért a törésmechanika érvényességi tartományát a képlékeny anyagok irányába igyekeztek kiterjeszteni és új anyagjellemzőket vezettek be. E téren úttörő volt Wells [4]. A *képlékeny törésmechanika* fogalmát ő hozta köztudatba. Az általa javasolt anyagjellemző a *repedés kinyílás* volt, angol nevéből rövidítve: *COD (Crack Opening Displacement)*. Kissé zavaró, hogy az egyes anyagok töréssel szembeni ellenállását hosszegységgel mérjük, a *COD* mérőszám dimenziója ugyanis *mm*. Igaz, a *COD* kapcsolata a K_{Ic} -vel a G_{Ic} -vel jelölt, felületre számított, fajlagos, elnyelt munkán keresztül valósul meg [J/mm²].

Ugyanígy, a törési felületre vonatkoztatott, fajlagos energia a jelenleg leginkább elfogadott képlékeny törésmechanikai mérőszám, a *J-integrál* fizikai jelentése is. Bár a *J-integrál* a gyakorlatban jól beválik és egyszerű

kapcsolata a K_{Ic} -vel a törésmechanika alkalmazását nagyban kiterjesztette, két okból is kritizálható. A *J* integrál Rice [5] által közölt levezetése úgyszintén a *rugalmasságtan* fogalmait használja, a képlékenységtan fogalmaival nem foglalkozik. Továbbá a dimenziója szerint *felületi* energiaként veszi számításba a próbatést által a törés során elnyelt munkát. Ez pedig csak durva közelítésként állja meg a helyét, mivel az energia egy vékony *felületi rétegben* nyelődik el.

A törésmechanika kidolgozásával hozzávetőlegesen egy időben Gillemot László professzor figyelme is a törés jelensége felé fordult [6]. Ő azonban a *képlékeny és szívós* anyagok törését vizsgálta, kutatva továbbá a terhelés körülményei által okozott ridegítő hatások mértékét is. Gillemot elmélete szerint a szívós anyag egy rá jellemző munka-, vagy energia-mennyiség elnyelődésének hatására törik el. Ez a munka 3 részre tagozódik: a rugalmas munka, a képlékeny alakváltozás munkája és az új felület képződésének munkája. A rugalmas munka a szakadás után felszabadul, a felületi energia pedig elhanyagolhatóan kicsi a képlékeny alakváltozás munkájához képest. Ez utóbbit fajlagosan, a munkát elnyelő *térfogatra* vonatkoztatva fizikailag helyes mérőszámot kapunk

Az így definiált *törési munka*, W_c (J/cm³) egyszerű szakitókísérlettel meghatározható (1. ábra).



1. ábra. Kontrahált szakitópróbatést részlete

Az 1. ábra szerint tehát

$$W_c = \int_{l_0}^{l_u} \frac{F}{V} dl = \int_{l_0}^{l_u} \frac{F}{AV} dl = \int_0^{\varphi_u} \sigma d\varphi \quad (1)$$

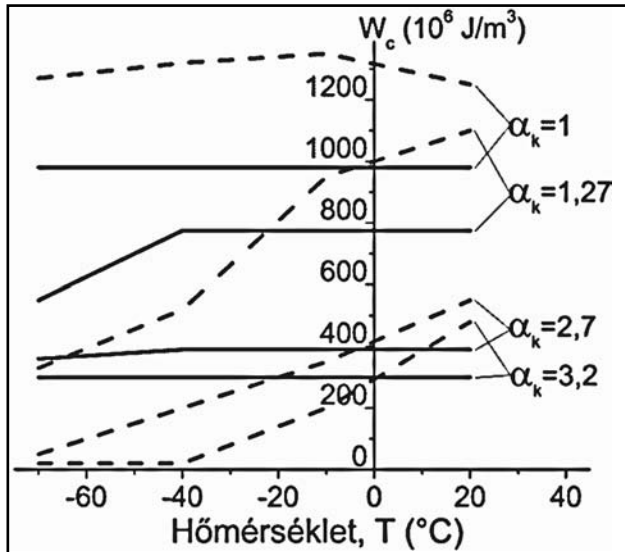
ahol σ a valódi feszültséget, φ a valódi nyúlást jelenti [7]. A kutatómunka kezdetén a σ - φ görbék alatti területet planimetráltuk, mert a valódi feszültség görbe analitikai meghatározása meglehetősen bonyolult volt [8]. Később, tapasztalataink alapján közelítő képletekkel határoztuk meg a törési munkát. Ilyen közelítő megoldásokat több hazai és külföldi kutató is ajánlott [8-10].

A törési munka sajátosságaival, különböző körülmények közötti változásával, a befolyásoló tényezők hatásával sokan foglalkoztak. Elsősorban a közismert állapot tényezőknél, a hőmérsékletnek (T), a terhelés sebességének ($d\sigma/dt$) illetve a feszültségi állapot többtenge-lyűségének ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) hatását vizsgálták. Egy mérőszámot jellegzetes eredményeit mutatja a 2. ábra [11].

A feszültségek háromtengelyűségét a szakitópróbatések egyre élesedő bemetszésével értük el, és a Neuber-féle alaktényezővel, α_K val számszerűsítettük. Látható, hogy a dinamikus igénybevétel a nagyobb hőmérsékleteknél az anyag viselkedése szempontjából kedvezőbb, de ez a tartomány a bemetszések hatására rohamosan toódik a nagyobb hőmérsékletek felé, azaz a kis hőmérséklet, a bemetszések és a dinamikus igénybevétel együttesen az anyagot gyorsan elridegítik.

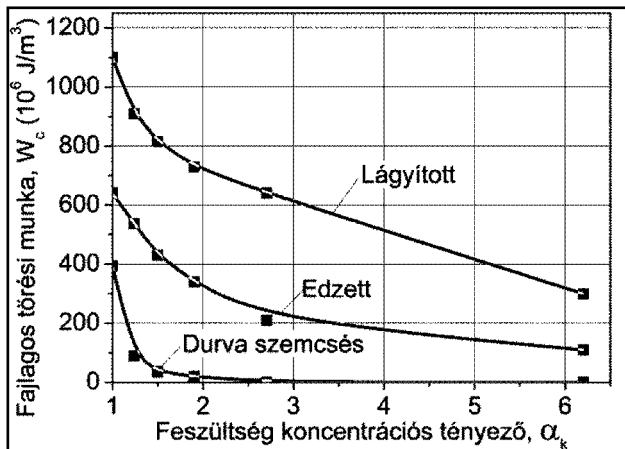
¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111, Budapest, Bertalan Lajos utca 7.

^a ernocczoboly@gmail.com, ^b havaspp@t-online.hu, ^c orbulov@eik.bme.hu



2. ábra. A fajlagos törési munka változása a hőmérséklet függvényében statikus (folytonos vonal) és dinamikus (szaggatott vonal) vizsgálat esetén, különféle α_k értékek mellett

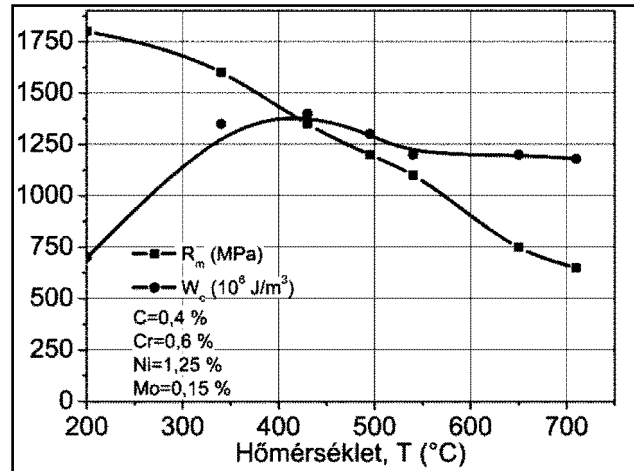
A feszültségek háromtengelyűségének eltérő hatását szemlélteti a 3. ábra egy kiválasztott varratfém különbözőképpen hőkezelt állapotában. Mivel a különböző hegesztési hibák igen jól jellemezhetők az α_k -val, adódik a lehetőség, hogy a varrat egyes részeiben létrejött hibák hatását a törési hajlamra ilyen módon egyértelműen meg lehet határozni és a veszélyes eseteket ki lehet választani [12, 13].



3. ábra. Varratfém fajlagos törési munkájának változása a hőkezeltégi állapot függvényében

A törési munka, mint anyagparaméter más anyagválasztási, vagy technológiai feladatok optimalizálásánál is felhasználható. Valamennyi vizsgálat ismertetése helyett itt csak néhány jellegzetes, eltérő kutatást említünk meg: Ivanova és társai a törési munka alapján jellemezték különböző kazán anyagok kúszás állóságát [14], míg Romvári és Tóth a fáradásos repedésterjedés sebességét hozták a törési munkával összefüggésbe [15]. Czoboly és szerzőtársai az előzetes hidegalakítás hatását vizsgálta a törési munka alapján [16]. Artinger a szerszám-anyagok optimális megeresztési hőmérsékletét ajánlotta az alábbiak alapján megválasztani [17]. Mérései szerint a törési munka a megeresztési hőmérséklet függvényében eleinte gyorsan nő, majd egy maximum elérése után közel állandó marad. A folyáshatár viszont folytonosan csökken. Egy CrNiMo acélra vonatkozó mérés eredményeit mutatja be a 4. ábra.

Az ajánlott megeresztési hőmérséklet tartomány 425°C környékében van. Ebben az esetben a szívósság a maximum környékén mozog, míg a folyáshatár értéke még elegendően nagy. Végül Gillemot Ferenc [18] a neutron sugárzás hatását mérte ki a törési munka

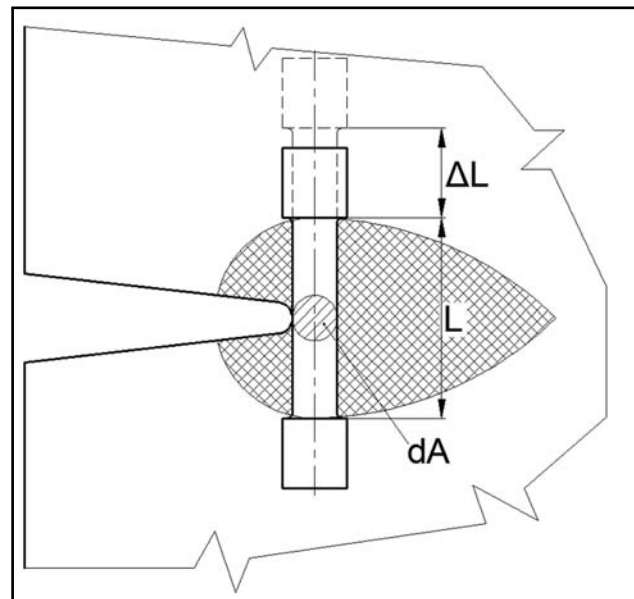


4. ábra. CrNiMo ötvöztésű acél szakítószilárdságának és fajlagos törési munkájának változása a megeresztés hőmérsékletének függvényében

változása segítségével. E vizsgálatoknak különös jelentőséget ad, hogy a mérésekhez nincs szükség nagyméretű próbatestekre, amelyek csak nehezen sugározhatók be, a vizsgálatnál veszélyesek és a radioaktív hulladékot feleslegesen növelik.

A törési munka felhasználásának újabb területét nyitotta meg az a felismerés, hogy a törésekkel foglalkozó két alapvető elmélet: a *törésmechanika* és a *törési munka* a valós anyagok esetében, amelyek nem teljesen ridegek, de nem is túlzottan képlékenyek, összekapcsolhatók. Az ezzel kapcsolatos kutatómunka lényegében két részletben, két helyszínen folyt és a Tanszék két munkatársa által elnyert állami ösztöndíjakkal volt köszönhető. Czoboly Ernő 1969-ben 6 hónapot dolgozott Londonban, az Imperial Collegeban, míg Havas István 1973-ban töltött egy félévet a düsseldorfi Max Planck Intézetben.

Az általuk kidolgozott koncepció az 5. ábrán látható közismert modellen alapul. Az ábra egy feszültség koncentrációs helyet, röviden „bemetszést” mutat, amely kellően kis bemetszési sugár esetében egy repedés is lehet.



5. ábra. Feszültségkoncentrációs hely a hozzá tartozó képlékeny zónával és fiktív szakítópróbatesttel

A darabot húzó feszültséggel terhelve a bemetszés tövében egy képlékeny zóna jön létre, amelyben jelentős energia nyelődik el. A darabot a repedés megindulásáig terhelve, ennek az energiának az értéke E . A képlékeny zónán át gondolatban egy kis próbatestet fektetünk keresztül, amelynek L hossza, a zóna vastagságával,

keresztmetszete tetszőlegesen választott dA -val egyenlő. Az L méret az anyagi tulajdonságoktól és a bemetszés élességétől függ. Egy repedés esetében L értéke minimális lesz, L_0 és egyben az elnyelt energia is a legkisebb, E_0 .

Ez az E_0 a kétféle törési elmélet szerint kétféle módon határozható meg, de mivel valójában ugyanarról az energiáról van szó, a két eredménynek egymással meg kell egyeznie [19].

A törésmechanika szerint a képlékeny zónában a törésig elnyelt energia az újonnan keletkezett repedés felületével, azaz a képzeletbeli kis próbatest keresztmetszetével aránvos. azaz

$$E_0 = dAG_{Ic} \text{ vagy } E_0 = dAJ_{Ic} \quad (2)$$

attól függően, hogy Wells vagy Rice által megadott törési paraméter kívánjuk használni. A törési munka elmélete szerint az energia a képzeletbeli próbatest térfogatában nyelődik el, azaz

$$E_0 = dAL_0W_c \quad (3)$$

Összevetve a fenti egyenleteket, egyszerűsítés után kapjuk, hogy

$$G_{Ic} = J_{Ic} = L_0W_c \quad (4)$$

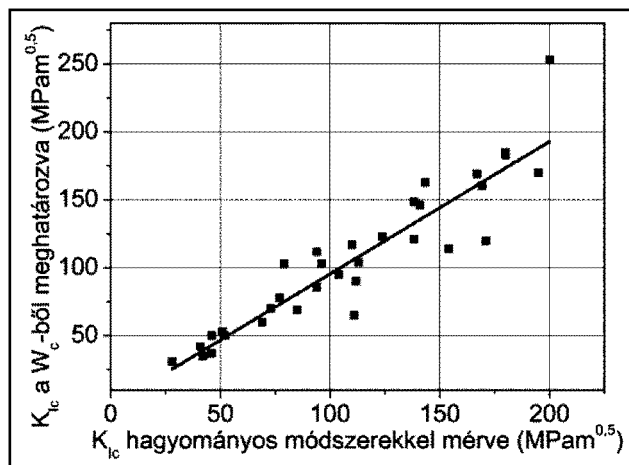
Hasonló gondolatmenetet lehet követni az alakváltozással kapcsolatban is. Ilyenkor a törésig bekövetkező megnyúlást kell számításba venni (5. ábra). A ΔL értéke is az anyagi tulajdonságokat leszámítva nyilvánvalóan az L függvénye. Így a repedés esetén a ΔL -nek is minimuma van. Ez a ΔL_0 egyenlő kell, hogy legyen a Wells által bevezetett COD-vel, feltételezve, hogy a fiktív próbatest törési nyúlása a törési munkához analóg módon megegyezik a szakítópróbatessz kontrakciós helyén mért nyúlással [20]. Ebből a további törésmechanikai paraméterek a szokásos módon származtathatók.

Természetesen az L_0 értékének meghatározása közvetlenül (repedésnél) nem lenne egyszerű feladat, ezért közvetett módszereket dolgoztunk ki. Egy sorozat különböző bemetszési sugárral készített próbatestet használva extrapolációval kaptuk meg a keresett értéket [21, 22]. Ez a módszer főleg ott előnyös, ahol a vizsgálandó termékből a törésmechanikai mérésekhez szükséges méretű próbatestek nem munkálthatók ki [23].

A módszer használhatóságát többféle anyaggal ellenőriztük, amennyiben az extrapolációs méréseket hagyományos vizsgálatok eredményeivel vetettük össze. Ezeknek a hagyományos vizsgálatoknak egy részét nem is a Tanszéken, hanem más kutatóhelyeken végezték el. Az összehasonlító eredményeket a 6. ábra foglalja össze [24].

Látható, hogy az egyezés teljesen kielégítő, főleg ha figyelembe vesszük a törésmechanikai vizsgálatok eredményeinek nagy szórását is, amit főleg nem a vizsgálatok bizonytalansága, hanem az anyag okozta sajátosságok okoznak.

Az itt bemutatott vizsgálatok és módszerek a tanszéken végrehajtott, töréssel kapcsolatos kutatásoknak csak egy kiragadott szegmense volt. Igyekeztünk azonban, hogy a sokoldalúságot, a különféle felhasználási területeket is valamelyest érzékeltessük.



6. ábra. Összevetés a hagyományos módszerekkel mért és a fajlagos törési munkából meghatározott törési szívósságok között

Hivatkozások

- [1] Griffith AA: The Phenomenon of Fracture and Flow. Solid. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A-221. (1920) 163-179
- [2] Orowan E: Energy Criteria of Fracture. Welding Journal Research Supplement 20 (1955) 157-160
- [3] Irwin GR: Fracture Mechanics. Contribution to the First Symposium on Naval Structural Mechanics. Stanford University, Stanford, California, USA 1958
- [4] Wells AA: The Application of Fracture Mechanics at and beyond General Yielding. British Welding Journal (1963) 536-
- [5] Rice JC: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. Journal of Applied Mechanics 35 (1968) 379-386
- [6] Gillemot László, Sinay Gábor: Die Brucharbeit als Werkstoffkenngröße. Acta Technica Ac. Sci. Hung. Tom. XXII (1958) 149-173
- [7] Gillemot László: Zur Rechnerischen Ermittlung der Brucharbeit Materialprüfung 3 (1961) 330-336
- [8] Ziaja György: Periodica Polytechnica, Engineering. (1959) vol.3. pp.147-156.
- [9] Saposnyikov NA: Fémek mechanikai vizsgálata. Nehézipari Könyvkiadó, Budapest, 1952
- [10] Nadasan S, Safta V: Beiträge zur Bestimmung der spezifischen, mechanischen Brucharbeit beim statischen Zugversuch. Mitteilung der V. Konferenz für Schweistechnik und Materialprüfung, Timisoara, 1965
- [11] Gillemot László: Anyagszerkezettan és Anyagvizsgálat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [12] Gillemot László: Brittle fracture of welded materials. Commonwealth Welding Conference, Sessions VIII-XI, paper #7, London, 1965, 1-6.
- [13] Konkoly Tibor: Auswärtung von radiographisch ermittelten Schweißfehlern in Stählen unter rechnerischer Berücksichtigung der Spödrückneigung von Schweißgut. Materialprüfung 12 (1970) 348-350
- [14] Ivanova VS, Ragozin YI, Vorovjev NA: Academy Nauk UdSSSR, 168 (1966) 51-54.
- [15] Romvári Pál, Tóth László: A correlation of Absorbed Specific Energy with the exponent in Paris- Equation of Fatigue Crack Growth. Proc. Int. Symp. On Absorbed Specific Energy and/or Strain Energy Density Criterion, Budapest, 1982, 355- 358
- [16] Czoboly Ernő, Havas István, Safta V, Moisa T: Az előzetes hidegalakítás hatása egy kazánacél törési tulajdonságaira. Bányászati és Kohászati lapok. Kohászat 114 (1981) 369-373.
- [17] Artinger István: A Cr-Mo-V ereműi acélok hőkezeltségi állapotának vizsgálata a fajlagos törési munka alapján. Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat. 101 (1968) 120-124.
- [18] Gillemot Ferenc: Absorbed Specific Energy of Fracture, a Failure Criteria for Neutron Irradiated Materials. Proc. 5th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology. West Berlin, 1979 paper G3
- [19] Radon JC, Czoboly Ernő: Material Toughness versus Specific Fracture Work. Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials. Kyoto, Japan, 1972 vol.1. pp. 543-557
- [20] Havas István, Schulze HD, Hagedorn KE, Kochendörfer A: Der Zusammenhang zwischen der spezifischen Brucharbeit und der Bruchzähigkeit. Materialprüfung 16 (1974) 349-353
- [21] Gillemot László, Czoboly Ernő: Generalized Theory of Fracture. II. Conference on Brittle Fracture, Marianske Lázne, 1970 No.11. pp.1-21
- [22] Czoboly Ernő, Havas István, Gillemot Ferenc: The Absorbed Specific Energy till Fracture as a Measure of the Toughness of Metals. Proc. of Symposium on Absorbed Specific Energy/Strain Energy Density. Sijthof and Nordhoff – Akadémiai Kiadó Budapest, 1982, pp. 107-129
- [23] Elarbi Y, Palotás Béla: Determination of the Creep Properties of Creep Resistant Martensitic Steels at Elevated Temperature from their Crack Opening Displacements (COD). IIV 60 th Annual Assembly and International Conference, Proceeding of the IIV International Conference Welding and Materials, Technical, Economic and Ecological Aspects, Dubrovnik and Cavtat, Croatia 2007 pp. 235-242
- [24] Czoboly Ernő, Havas István: Töréssel kapcsolatos kutató- és oktatómunka a BME Mechanikai Technológia tanszéken. GTE Szeminárium, 1994, Budapest