

A FÉMEK TULAJDONSÁGAINAK JELLEMZÉSE A FAJLAGOS ALAKVÁLTOZÁS MUNKÁJÁVAL*

GILLEMOT LÁSZLÓ
AKADÉMIKUS

A dolgozat egy hosszabb kutatási periódus részeredményeit kíséri meg egységes képbe összefoglalni. Egy-egy fejezete egy-egy nagyobb kísérletsorozat eredményeit csak kivonatoltan tartalmazza. A tárgyalt kísérletsorozatok fő célkitűzése annak megállapítása volt, hogy lehetséges-e a fémek törésének folyamatát egységes képbe foglalni és egyértelmű összefüggést találni a törés során lejátszódó makroszkopikus és szubmikroszkopikus folyamatok között. A törési jelenségek — legalábbis a vizsgált határok között — egyértelműen leírhatónak látszanak a próbatestre ható külső erő fajlagos munkájának a segítségével.

A fémek és ötvözetek törése az igénybevétel módjától függően különböző feszültségen történik. A töréshez szükséges fajlagos munka minden esetben három részre bontható. Ezek: a rugalmas alakváltozás, a képlékeny alakváltozás és a repedésterjedéshez szükséges fajlagos munka. A repedés terjedéséhez szükséges munka függvénye a terhelő feszültségnek. A terjedő repedés létrejöttéig szükséges munka azonban egy az anyagra jellemző állandó érték. Egy adott fém vagy ötvözet fajlagos munkája a terjedő repedés létrejöttéig az anyagra jellemző szám, amely legalábbis a nagy képlékeny alakváltozással rendelkező anyagoknál független a rácshibáktól. Ezért az igen tiszta fémek képlékeny alakváltozásához szükséges munkából a tökéletes térrácsú egykristályok szilárdsága elég nagy pontossággal kiszámítható. Mivel a fajlagos törési munka független a rácshibáktól, a nemesített acélok fajlagos törési munkája széles határok között független a megeresztési hőmérséklettől.

I. Bevezetés

A fémek különböző sajátságainak leírására általában feszültség-, illetve alakváltozás jellegű mennyiségeket lehet használni. A feszültséget a mérnöki gyakorlatban mint az erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosát definiálják. Az alakváltozás mérésére a fajlagos nyúlást, illetve a fajlagos keresztmetszetváltozást (kontrakció) szokás használni. Mindegyik mennyiség a próbatest kezdeti keresztmetszetére van vonatkoztatva az (1) képletsor által megadott definíciók szerint:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}; \quad \varepsilon = \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}; \quad \psi = - \int_{A_0}^{A_1} \frac{dA}{A_0} = - \frac{A_0 - A_1}{A_0}. \quad (1)$$

Ha a fém alakváltozása képlékeny, akkor az anyag kezdeti méretei jelentősen megváltoznak, és ilyenkor célszerűbb az ún. valódi feszültség, nyúlás és kontrakció bevezetése:

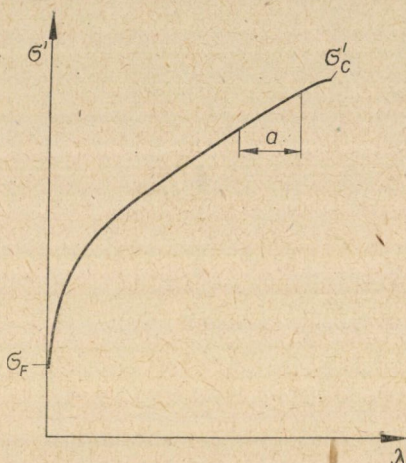
* Akadémiai székfoglaló előadás, elhangzott 1966. január 25-én.

$$\sigma' = \frac{F}{A}; \quad \lambda = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}; \quad \psi' = - \int_{A_0}^{A_1} \frac{dA}{A}. \quad (2)$$

Minthogy a képlékeny alakváltozás során a térfogat állandó

$$V = A_0 l_0 = A_1 l_1 \quad (3)$$

az (1) és (2) képletekkel definiált alakváltozási mérőszámok, valamint a valódi és nem valódi feszültségek egymás között kölcsönösen átszámíthatók. Könnyen



1. ábra. Szakítódiaagram elvi vázlata a valódi feszültség—valódi nyúlás koordinátákban. Az a -val jelölt szakasz a mikroszkópiusan megfigyelhető repedések kezdete

belátható továbbá az is, hogy a valódi mértékrendszerben a fajlagos nyúlás és a fajlagos keresztmetszetcsökkenés egymással identikusan azonos.

Mindkét rendszerben azonos lesz a fajlagos munka, mert a térfogat-állandóság (3) képlet felhasználásával

$$W = \int_{l_0}^{l_1} \frac{F dl}{A \cdot l} = \int_0^\lambda \sigma' d\lambda = \int_{l_0}^{l_1} \frac{F \cdot dl}{A_0 l_0} = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon. \quad (4)$$

A definíciókban F az erő, V az anyag valamely kijelölt igen kicsiny térfogateleme, l a térfogatelem hosszúsága, A pedig a keresztmetszete. A 0 index mindig a kezdeti állapotot jelenti. A továbbiakban is használt két nyúlásfogalommal (ϵ , λ) kapcsolatban hangsúlyozandó, hogy azok differenciálisan kicsiny mérőhosszra vonatkoztatott ún. effektív nyúlást jelentenek.

A (4) egyenletekkel jellemzett integrál a külső erő összes munkáját adja meg az alakváltozás során, az alakváltozás meghatározott mértékéig. Amenny-

nyiben az integrálás határai a törést jellemző fajlagos nyúlásig vannak kiterjesztve, a (4) definíció a külső erőnek a törésig végzett fajlagos munkáját adja meg. Míg a folyás megindulásának feltételeit a Hencky—Huber—Mises-féle elmélet egyértelműen meghatározza, addig ez ideig nem sikerült olyan törési kritériumot találni, amely a törés feltételeit hasonló szabotossággal adná meg. A törést okozó feszültség azonos jellegű igénybevételt (pl. váltakozó húzás-nyomást) alkalmazva, függ az igénybevételek számától.

Egy fém szakítódiagramját valódi feszültség—valódi nyúlás koordinátákban ábrázolva (1. ábra), statikus húzó igénybevételnél a törés a σ_c -vel jelölt pontban következik be, míg ismétlődő igénybevételek hatására fáradt törések a folyási határnál kisebb feszültségek hatására is bekövetkezhetnek.

MINER [1] vetette fel hipotézisként azt a gondolatot, hogy a töréshez — illetőleg a repedés keletkezéséhez — meghatározott mennyiségű munka szükséges. Eddigi kísérleteink során sikerült igazolni azt, hogy legalábbis húzás, nyomás, illetőleg ismétlődő húzás-nyomás során a repedés keletkezése meghatározott, az anyagra jellemző munka végzése után jön létre.

II. A fajlagos munka és a fémek szerkezete közötti összefüggés

Nagyon régóta ismeretes az, hogy a fémek krisztallitokból, a krisztallitok pedig az atomok valamilyen meghatározott geometriai rendjéből vannak felépítve. Egy fémdarab tehát fenomenologikusan homogénnek és folytonosnak tekinthető. A fémek egykristályát vagy krisztallitjait folytonosnak lehet, ugyan tekinteni, de nem homogénnek, és végül a fémek térrácsa se nem folytonos, sem pedig nem homogén. Könnyen belátható az, hogy a feszültség és az alakváltozás, amelyek tenzor mennyiségek, nem ugyanolyan jelentőségűek a homogén és folytonosnak tekinthető makroszkopikus fémtest vagy a se nem homogén, se nem folytonos térrács szempontjából. Feltételezhető azonban az, hogy a fajlagos munka mind a három fajta szerkezet jellemzésére egyaránt alkalmas. POLÁNYI és OROWAN [2, 3] mutattak rá arra, hogy az atomok szabályos geometriai elhelyezkedése a fémekben nem lehet tökéletesen rendezett, mert ebben az esetben a fémek szakítószilárdsága az 1000 kp/mm² nagyságrendben mozogna, szemben a polikrisztallin fémeken mért 10—100 kp/mm² nagyságrendű értékekkel és az egykristályokon mért még ennél is sokkal kisebb értékekkel.

POLÁNYI és OROWAN ezen úttörő munkássága nyomán rohamos fejlődésnek indult a rácsrendezetlenségek elmélete, és ettől az időponttól kezdve a többé-kevésbé tisztán tapasztalaton nyugvó anyagvizsgálat egyre inkább közeledett a fizikához, anélkül azonban, hogy a fémek fizikája mai fejlődési állapotában a mérnöki gyakorlat minden kérdésére kielégítő választ tudna adni. Kétségtelen azonban az, hogy olyan fémnek, amelyben nincsenek rácsrendezetlen-

ségek, csak rugalmas alakváltozása lehet, a képlékeny alakváltozás pedig a rácsrendezetlenségektől függ.

Az utóbbi időkben [4] sikerült közel tökéletesen rendezett rácsú fémeket is egykristályok formájában előállítani. Többkristályos rendezett rácsú fém jelenlegi ismereteink szerint nehezen képzelhető el, mert a többkristályos fém szemcsehatárain szükségszerűen jelen vannak rácsrendezetlenségek.

Az a tény, hogy a közel tökéletes rácsú kristályoknak csak rugalmas alakváltozása van, és képlékeny alakváltozás csak akkor lehetséges, ha a rácsban rácsrendezetlenségek is vannak, egybevetve az előbbi számadatokkal, világosan mutatja azt, hogy az alakváltozást leíró bármely mennyiség a rácsrendezetlenségektől függ. Aránylag egyszerű megfontolások alapján azonban feltételezhető az, hogy a külső erők fajlagos munkája olyan mennyiség, amelyik a rácsrendezetlenségektől bizonyos fokig független.

SMEKAL [5] óta szokásos a fémek tulajdonságait két csoportba osztani. Az egyik csoport az ún. szerkezetérzékeny tulajdonságok csoportja, mint pl. a feszültség és az alakváltozás, a másik csoportba a szerkezetérzéketlen tulajdonságok csoportjába tartozik pl. a fajhő, a kompresszibilitás és a további bizonyítások alapján a fajlagos munka is.

A szerkezetérzéketlen sajátságok sem függetlenek azonban teljesen a rácsrendezetlenségektől, ezért pontosan úgy lehetne fogalmazni, hogy a rácsrendezetlenségek befolyása a szerkezetérzéketlen sajátságokra eléggé kicsiny ahhoz, hogy az esetek többségében elhanyagolható legyen. Amennyiben tehát a fajlagos törési munka is egy szerkezetérzéketlen sajátság, és csak az atomok geometriai konfigurációjától és kölcsönhatásától függ, úgy valóban alkalmas arra, hogy egy adott rácsszerkezetű fém törésjelenségeit annak a segítségével lehessen leírni. Azt, hogy a munka szerkezetérzéketlen sajátság, aránylag egyszerű becsléssel lehet bizonyítani.

A hőtan első főtétele szerint egy test belső energiájának megváltozása (ΔE) a külső erők munkájának (W) és a hőmennyiségnek (Q) az összege. Tehát:

$$\Delta E = W + Q. \quad (5)$$

A munka előjele pozitív, ha a testbe befektetett munkáról van szó, és a hőmennyiség is akkor tekintendő pozitívnak, ha a testtel hőt közölnek. A rugalmas alakváltozás reverzibilis folyamat, míg a képlékeny alakváltozás irreverzibilis, és mindig hőfejlődéssel jár. A képlékeny alakváltozás során tehát a testben fejlődik a hő, ezért az (5) egyenletben, amely pusztán algebrai összegezést fejez ki, a Q negatív, tehát képlékeny alakváltozás esetén

$$W = \Delta E + Q \quad (6)$$

a külső erők munkája tehát részben a test energiatartalmát változtatja meg, részben pedig hőt fejleszt. A test energiatartalmának megnövekedése (ΔE) alapvetően két okra vezethető vissza [6]:

- a) Az alakítás során változik a diszlokációk mennyisége és eloszlása;
- b) pontszerű rácshibák keletkeznek.

Az energiatartalom változásával a képlékeny alakítás során igen széles körű irodalom foglalkozik. Bár a mérés nehézsége miatt az eredmények szórása elég nagy, az kétségtelennek látszik [7], hogy az alakváltozás kezdetén az energiatartalom változása nagy a befektetett munkához képest, növekvő alakváltozással a $\Delta E/W$ viszonyszám egyre jobban csökken, és igen nagy alakváltozások esetén az értéke már csak a 0,01 nagyságrendben van.

A továbbiakban ismertetendő kísérletek szerint pl. a kémiaiilag tiszta vas teljes törési munkája 180 mkp/cm^3 . Egységnyi hosszúságú éldiszlokáció energiáját vasra kiszámítva, kereken $10^{-9} \text{ kpcm/cm} = 10^{-11} \text{ kpm/cm}$ adódik. A diszlokációk sűrűségét lágyított fémekben $10^6 - 10^8/\text{cm}^2$, nagyméretű hidegalakítás után pedig $10^{11} - 10^{12}/\text{cm}^2$ nagyságrendben adják meg [8]. Következik tehát, hogy a ΔE értéke:

$$\Delta E = 10^{-11} \cdot 10^{11} \simeq 1 \text{ mkp/cm}^3. \quad (7)$$

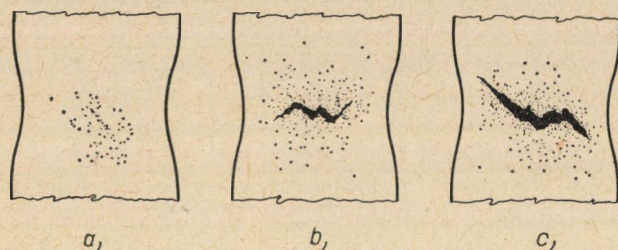
A $10^{11}/\text{cm}^2$ diszlokációsűrűséggel számolva 1 mkp/cm^3 -nek adódik, a $10^{12}/\text{cm}^2$ diszlokációsűrűséget figyelembe véve pedig 10 mkp/cm^3 .

Mind a diszlokációk energiájának meghatározása, mind pedig a diszlokációsűrűség meghatározása igen változó értékekre vezet, de még a legkedvezőtlenebb esetet is figyelembe véve, a 180 mkp/cm^3 törési munka mellett az 1-es nagyságrendben mozgó, ΔE néhány százalék hibán belül elhanyagolható, és így valóban az adódik, hogy a fajlagos törési munka a rácsrendezetlenségektől már az első becslés alapján is gyakorlatilag független. A fajlagos munka tehát szerkezetérzéketlen sajátságának tekinthető azokban az esetekben, amikor a törés nagymértékű képlékeny alakváltozás után következik be.

III. A fajlagos törési munka fogalma és meghatározása

A definíció szerint (4) egyenlet a fajlagos törési munka a külső erők összes fajlagos munkája, valamely, a törés helyén kiválasztott térfogatelemen a törés bekövetkezéséig. Rendkívül nehéz azonban a törés fogalmát egyértelműen meghatározni. Vitatható az, hogy a törés valóban akkor következik-e be, amikor egy próbatest valamilyen igénybevétel hatására két részre válik. Elég régen ismeretes az, hogy a próbatest két vagy több részre válását megelőzően is keletkeznek már az alakított testben üregek, illetve repedések, ennek ellenére a képlékeny alakváltozás tovább folytatódik [9]. A legújabb időkben BLUHM és MORRISEY [10] a szakítókísérlet során ultraszónikus hibakereső vizsgálattal vizsgált különböző anyagokból készült próbatesteket. Ultrahangokkal már a látható törést előidéző alakváltozásnál, valamint kisebb alak-

változás esetén is kimutatható volt üregek, illetve repedések jelenléte. Próbatestjeiket különböző alakváltozások után mikroszkópi vizsgálatnak is alávetették, és megállapítható volt, hogy nem sokkal a kontrakció kezdete után a testben már kis mikroszkopikus üregek jelennek meg, amelyek a későbbiek során repedéssé egyesülnek (2. ábra). A folyamatot szemlélteti, hogy pl. egy lágyacél törése $\psi = 0,67$ kontrakciónál következett be, míg az első mikroszkóppal megállapítható repedést már $\psi = 0,46$ kontrakciónál lehetett észlelni. A repedések és üregek megjelenésétől függetlenül azonban egyidejűleg folytatódik a képlékeny alakváltozás folyamata is, és a repedés terjedése csak közvetlenül valamivel a tényleges törés előtt indul meg. Egész általánosan tehát a fémek alakváltozása kezdetben rugalmas, azután képlékeny, a képlékeny alakváltozás meghatározott stádiumában pedig elkezdődik a repedés



2. ábra. a) Üregek keletkezése a kontrakció kezdeti szakaszán, b) a repedésterjedés megindulása, c) a törést közvetlenül megelőző állapot (BLUHM és MORRISEY [10] mikroszkópi felvételei nyomán)

terjedése, amely szintén munkát igénylő folyamat. Nyilvánvaló, hogy a töréshez szükséges teljes munka három részre osztható:

$$W = W_e + W_p + W_r, \quad (8)$$

ahol W_e a rugalmas, W_p a képlékeny munka, W_r pedig a repedésterjedés munkája. Könnyen belátható az is, hogy egy fém ridegtörése úgy definiálható, hogy a képlékeny alakváltozás munkája (W_p) egyenlő vagy közel egyenlő zérussal. A közel egyenlő kifejezés itt azért szükséges, mert még a gyakorlatilag ridegnek tekintett törések környezetében is kimutathatók egy igen vékony rétegben a képlékeny alakváltozás nyomai [11].

A (8) képletben az első két tag meghatározásához a szakítókísérlet látszik a legalkalmasabbnak, tekintettel arra, hogy a törés igen nagy feszültségen következik be, tehát feltehető, hogy a repedés terjedésére fordított munka a képlékeny alakváltozásra fordított munkához képest kicsi. Szakításnál

$$W \cong W_e + W_p. \quad (9)$$

Ez az elhanyagolás nem engedhető meg pl. fárasztókísérleteknél, ahol az alkalmazott feszültség szint a folyáshatárnál rendszerint kisebb, és így a repedés terjedéséhez szükséges munka igen nagy értéket vehet fel, sőt az is lehetséges, hogy a repedés végesszámu igénybevétel hatására egyáltalában nem terjed [12, 13].

A repedés terjedéséig szükséges fajlagos munkát tehát szakítókísérlettel lehet a legegyszerűbben meghatározni. Ezért a fajlagos törési munka meghatározására egy olyan képletet vezettünk le, amely a szakítókísérlet során amúgy is meghatározott anyagjellemzőkből (folyáshatár σ_F , szakítószilárdság σ_B , egyenletes nyúlás ε_e , kontrakció ψ) teszi lehetővé a fajlagos törési munka kiszámítását [14]:

$$W = \frac{\varepsilon_m}{3} [\sigma_F + 2\sigma_B] + 4,6(1 + \varepsilon_m) \ln \left(\frac{1 - \psi_m}{1 - \psi_c} \right) - \sigma_B(1 + \varepsilon_m)^2 (\psi_c - \psi_m). \quad (10)$$

Ezt a képletet többen [15, 16] kísérletileg ellenőrizték és gyakorlati számításokra egyszerűsített formákba is átalakították [17, 18]. Újabban REUSS E. [19] a csavaró munka meghatározására alkalmas számításmódot közölt.

IV. A szakítókísérletet befolyásoló tényezők

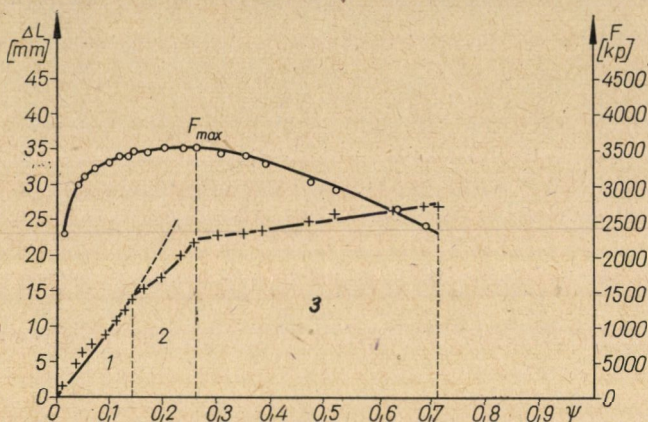
A szakítókísérlet során a próbatest feszültségi állapota a kontrakció kezdetéig egytengelyű és a feszültségeloszlás a próbatest keresztmetszetében egyenletes. A fajlagos nyúlássebesség abban az esetben, ha a befogó szerszám valamely U sebességgel mozog, az egyenletes nyúlás határáig gyakorlatilag állandó, és

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{U}{L_0}. \quad (11)$$

Amikor a kontrakció megkezdődik, a kontraháló keresztmetszetben a nyúlássebesség pontról pontra változik. Mivel a fajlagos törési munka függvénye a nyúlássebességnek és a hőmérsékletnek, egymással közvetlenül csak olyan kísérletek hasonlíthatók össze, melyek során a hőmérséklet és a nyúlássebesség is azonos. A nyúlássebesség és a hőmérséklet hatása egyes anyagoknál elhanyagolhatóan kicsiny ugyan, a tételek általánosítása érdekében azonban ezeket a tényezőket is figyelembe kell venni. Egyes anyagok szakítódiagramját MACGREGOR [20] vizsgálta, állandó értéken tartva a valódi nyúlássebességet. Kísérletei során előre kísérletileg meghatározta a nyúlássebesség változását a fajlagos nyúlás függvényében, majd pedig a kapott empirikus összefüggés

alapján a további kísérleteknél kézzel szabályozta a befogó szerszám mozgási sebességét úgy, hogy a $d\lambda/dt = \text{konstans}$ feltétel betartható legyen.*

Mivel ez a kísérleti technika rendkívül bonyolult és nehézkes, egyik kísérletsorozatunk arra irányult, hogy a nyúlássebesség változását a továbbiakban egyszerű számítással lehessen figyelembe venni. CZOBOLY E. [21] különböző fémeken végzett kísérletekkel kimutatta azt, hogy a kontrakció során létrejövő megnyúlás arányos a próbatest átmérőjével és a kontraháló keresztmetszettel. A nagyszámú mérési eredmény közül egyet a 3. ábra mutat. A vízszintes tengelyen a kontrakció, a függőleges tengelyen pedig különböző



3. ábra. A szakítópróbatest megnyúlása a kontrakció függvényében

léptékben az erő, illetve a megnyúlás van felmérve. Látható, hogy a próbatest megnyúlása és a kontrakció között szigorúan lineáris összefüggés áll fenn.

Legyen ΔL a kontrakció során keletkező megnyúlás, akkor

$$\Delta L = kd_0(\psi - \psi_m). \quad (12)$$

Az egyenletben ψ_m a maximális erőhöz tartozó keresztmetszetcsökkenés értéke. A (12) egyenletet differenciálva

$$U = \frac{\Delta L}{dt} = kd_0 \frac{d\psi}{dt} \quad (13)$$

meghatározható a kontrakció időbeli változása az U szakítási sebesség függvényében. A térfogatállandóság törvénye értelmében a nyúlássebesség:

* A továbbiakban közölt megfontolások a mérnöki nyúlássebességekre vannak vonatkoztatva az egyszerűbb kezelhetőség kedvéért. Ha az alakváltozás kicsiny, úgy ez a közelítés megengedhető. Ezzel a közelítéssel ugyanis legalább az egyenletes nyúlás határán belül a nyúlássebesség állandó. Az egyenletek levezetése $d\lambda/dt = \text{konstans}$ feltételre hasonló, alkalmazásukra azonban csak igen nagy alakváltozásnál van szükség.

$$c = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{(1-\psi)^2} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{(1-\psi)^2} \cdot \frac{U}{k \cdot d_0}. \quad (14)$$

Innen látható, hogy a fajlagos nyúlás sebessége a kontrakció függvényében rohamosan nő, ha a szakítás sebessége állandó.

A nyúlássebesség és a mért erő közti összefüggést a PRANDTL [22] által levezetett egyenlet adja meg:

$$P_1 = P_0 + a A_m \ln \frac{c_1}{c_0}. \quad (15)$$

A Prandtl-féle egyenlet szerint valamely c_1 fajlagos nyúlássebességgel mért erő P_1 , míg a c_0 nyúlássebességhez P_0 erő tartozik. A_m a maximális erő helyén fellépő keresztmetszetet jelöli, a pedig egy az anyagtól függő állandó.

NÁDAI és MANJOINE [23] különböző szakítási sebességekkel az egyenletes nyúlás határáig végzett kísérleteiből az a állandó értéke kiszámítható, és lágyacélra $a = 4,5$ kp/mm², rézre $a = 1,2$ kp/mm² adódik, ha a (15) egyenletben tízes alapú logaritmussal történik a számítás.

A szakítókísérlet során az egyenletes nyúlás határáig c_0 állandó és értéke a (14) egyenlet alapján

$$c_0 = \frac{1}{(1-\psi_m)^2} \cdot \frac{U}{k d_0}. \quad (16)$$

A (15) egyenletet a mindenkor elosztva, a valódi feszültség meghatározására a kontrakció során a (14) és (16) egyenlet figyelembevételével az alábbi egyenlet adódik [24]:

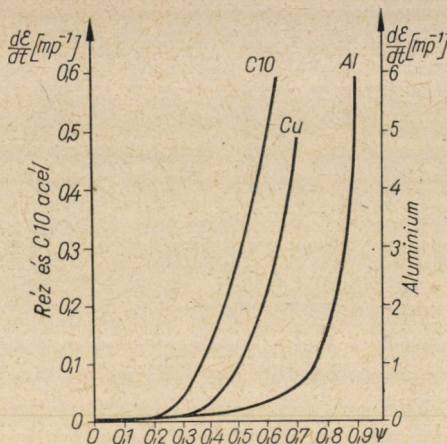
$$\sigma'_1 = \sigma'_0 + a \frac{1-\psi_m}{1-\psi} \cdot \ln \left(\frac{1-\psi_m}{1-\psi} \right). \quad (17)$$

Ez az egyenlet a kontrakció során fellépő viszonyokat gyakorlatilag kielégítő pontossággal írja le, és így a szakítókísérlet során mért közepes valódi feszültségből (σ'_1) pontról pontra kiszámítható az a közepes valódi feszültség (σ'_0), amely akkor keletkeznék, ha a nyúlássebesség végig állandó volna [25].

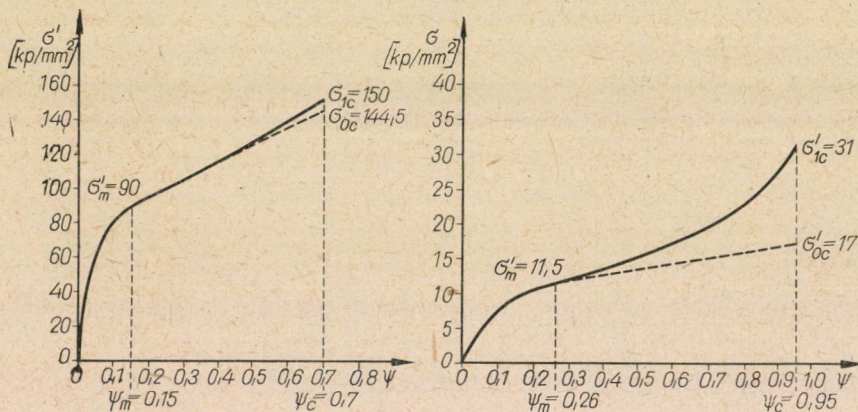
A fajlagos nyúlássebesség változását a kontrakció függvényében néhány szerkezeti anyagra a 4. ábra mutatja. A kísérletek igen nagy pontossággal egyeznek a fentiekben megadott (13), illetve (14) egyenlettel.

A szakítódiagram korrigált alakját a (17) összefüggés figyelembevételével az 5. ábra mutatja. Mint az ábrából is látható, a fajlagos nyúlássebesség változása miatt szükséges korrekció a kisebb kontrakciójú acéloknál csak elhanyagolhatóan kis különbséget okoz, míg az igen nagy kontrakciónál szakadó alumínium esetén az eltérések már számottevőek lehetnek.

A második tényező, amit a fajlagos törési munka fizikailag helyes értelmezésénél tekintetbe kell venni, az, hogy a szakítókísérlet során az egyenletes nyúlás határáig az egyenletes és egytengelyű feszültségeloszlás a kontrakció



4. ábra. Lágycél, alumínium és réz nyúlássebességének változása a kontrakciós szakaszon a kontrakció függvényében



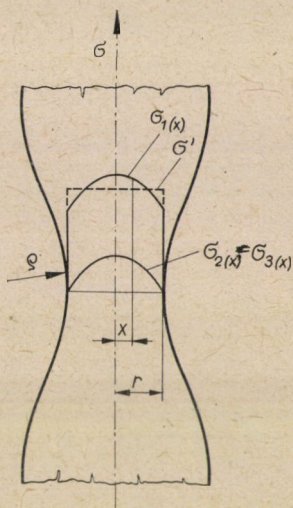
5. ábra. Valódi feszültség a valódi nyúlás függvényében. A vastag vonal állandó szakítás sebességre, a szaggatott vonal állandó nyúlássebességre vonatkozik.

a) nemesített acél, b) alumínium

során többtengelyű és egyenlőtlen feszültségeloszlássá alakul át, mint azt a 6. ábra mutatja.

A kontrakció során fellépő feszültségeloszlást a képlékenységtan módszereivel többen tanulmányozták [26–29]. A legújabb időkben THEOCARIS a Prandtl–Reuss-féle egyenletek felhasználásával és igen érdekes kísérleti technikával tanulmányozta ugyanezt a problémát. Bár a különböző

szerzők által a feszültségeloszlásra levezetett értékek egymástól számszerűen különböznek, az a megállapítás azonban egyöntetű, hogy a kontrakció során fellépő háromtengelyű feszültségeloszlás, egy a keresztmetszet mentén egyenletesen eloszló húzófeszültséghez hozzáadódó és a keresztmetszet mentén pontonként változó hidrosztatikus húzófeszültségből áll. Kísérletileg azonban csak az ún. közepes valódi feszültség határozható meg, amely a mért erő elosztva a mindenkorai keresztmetszettel.



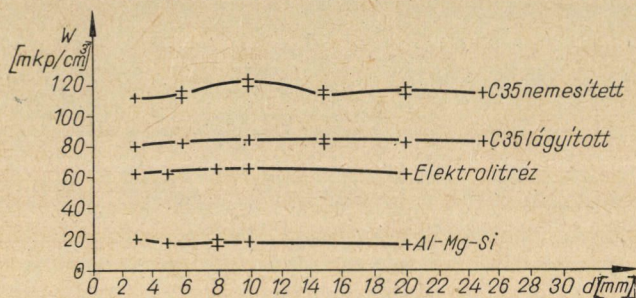
6. ábra. Feszültségeloszlás a kontraháló keresztmetszetben

Valamennyi irodalmi adat megegyezik abban, hogy a legnagyobb axiális húzófeszültség és a legnagyobb radiális, illetve tangenciális feszültség a körhengeres próbatest középvonalában lép fel, a folyást megindító feszültség azonban a Hencky—Huber—Mises-féle elmélet szerint a próbatest egész keresztmetszetében állandó. Az a tény, hogy az első üregek és repedések mindig a próbatest középvonalában keletkeznek [9, 10], egyben újabb bizonyítéka annak, hogy a törés folyamata szempontjából a külső erő fajlagos munkája a mértékadó.

Az anyagvizsgálati mérés során csak a közepes valódi feszültség határozható meg, a 7. ábrán bemutatott feszültségeloszlás legfeljebb különböző feltevésekkel számítható. Azonban a közepes valódi feszültség figyelembevételével számított fajlagos törési munka igen nagy pontossággal közelíti meg a feltételezett feszültségeloszlásból számítható munkát.

A szakítókísérlet során fellépő feszültségeloszlás részletes analízise azonban egyben azt is mutatja, hogy a fajlagos törési munkának közvetlen mérési adatokból való meghatározása csak olyan kísérletek esetén lehetséges, ahol az

erő és az átmérő méréséből számított közepes valódi feszültség segítségével számított fajlagos munka legalábbis igen jó közelítésben egyezik a pontról pontra változó feszültségeloszlás következtében a keresztmetszet mentén is változó munkával. Ez a feltétel a húzó- és a nyomókísérlet során az eddigi vizsgálatok szerint elég nagy alakváltozásokig fennáll. Ennek igazolására különböző anyagokon és különböző átmérőjű próbatesteken végeztünk kísérleteket. A közepes valódi feszültségből számított fajlagos törési munka a gyakorlati alkalmazásban előforduló határok között állandónak bizonyult [31], mint azt a 7. ábra mutatja.



7. ábra. A fajlagos törési munka a próbatest átmérőjének függvényében

Végül egy eddig nem kellően figyelembe vett tényező hatását is részleteiben vizsgálat alá kellett vennünk. Minden szakítógép a mérés közben rugalmas alakváltozást szenved, amelyhez hozzájárul az is, hogy az erőmérés is elmozdulást tesz szükségessé. A szakítógép tehát fogalmilag mint egy kemény rugó kezelhető, ahol is a gép alakváltozása (x) és az erő (F) közt lineáris összefüggés áll fenn. Itt nem részletezett elméleti megfontolások és kísérleti adatok alapján a fajlagos törési munka értékének meghatározásához csak igen kemény (merev) szakítógépek használhatók.

A kísérleti feltételeket összefoglalva tehát a különböző igénybevételi módok, pl. húzás, nyomás vagy ismétlődő húzás és nyomás során a törésig szükséges összes munka csak akkor hasonlítható össze, ha

1. a különböző kísérletek gyakorlatilag azonos nyúlássebességgel történnek, vagy legalább az eredmények a megadott módszerrel azonos nyúlássebességre vannak átszámítva;

2. a kísérletek során előálló többtengelyű és egyenlőtlen feszültségi állapot elég nagy pontossággal közelíthető meg a közepes valódi feszültséggel; és végül

3. ha a kísérletek során a különböző igénybevételek ugyanazon csúszósíkrendszeren hatnak.

Ezen utóbbi megszorító feltétel arra vonatkozik, hogy a külső erő által végzett munka csak akkor összegezhető fizikailag helyesen, ha a külső erő hatását ugyanazon a csúszósíkrendszeren fejtette ki.

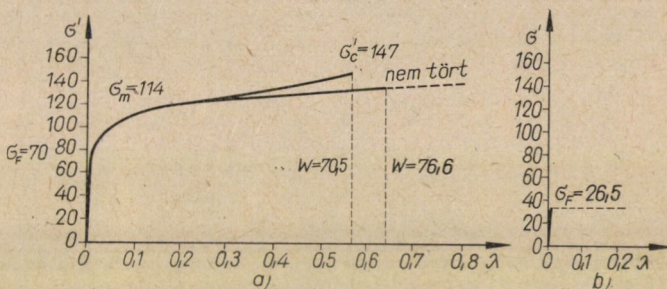
Ezen megszorító feltételek figyelembevételével a továbbiakban tárgyalandó kísérletsorozatok két tétel igazolását tűzték ki célul:

1. A törés folyamata során a repedés terjedéséig elnyelt fajlagos munka állandó;

2. ha a terjedő repedés (tehát a törés kezdete) nagy képlékeny alakváltozás után következik be, akkor a törésig elnyelt energia független a rácsrendeztlenségektől, a törési munka tehát egy szerkezetérzékeny mérőszám.

V. Kísérletek a törési munka állandóságának igazolására

A IV. fejezetben foglalt megszorító feltételek alapján a törési munka állandóságát elsősorban húzó, illetőleg nyomó kísérletekkel lehet a legegyszerűbben igazolni. Az előbb kifejtettekből következik, hogy bár a szakító-



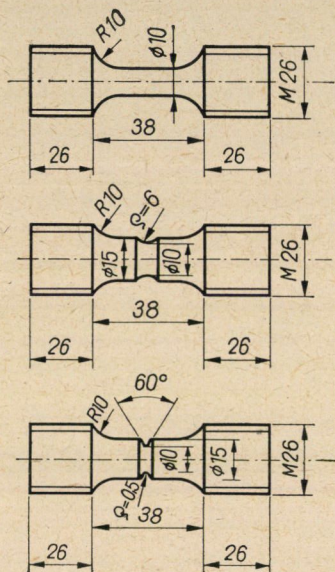
8. ábra. a) Nemesített acél húzó-, illetve nyomódiagramja; b) 76,6 mkp/cm³ fajlagos munkával összenyomott próbatest szakítódiagramja

kísérlet során már a törés bekövetkezése előtt a próbatestben üregek és repedések keletkeznek, a repedés terjedése csak közvetlenül a törést megelőző stádiumban következik be, és így a szakításnál a (9) egyenlet szerint a törésig befektetett fajlagos munka igen jó közelítésben egyenlő a repedés terjedéséig befektetett munkával. A nyomókísérlet során a próbatest lényegesen nagyobb fajlagos összenyomódást tud törés nélkül elviselni, mint a húzókérslet során, sőt a lágyabb fémeket nyomókísérlettel egyáltalában nem lehet eltörni.

MYLONAS [32] mutatott rá arra, hogy egy próbatestet összenyomva, majd ismét meghúzva, egy bizonyos mértékű képlékeny nyomóigénybevétel után a próbatest húzásra ridegen törik. Hasonló eredményre jutott akkor is, ha a próbatest hajlítással volt előzőleg hidegen alakítva.

Annak igazolására, hogy nyomásnál is a repedés megjelenéséig szükséges fajlagos munka ugyanaz, mint a szakítókérslet során meghatározott fajlagos munka, egy külön erre a célra kialakított szerszámban a próbatesteket meghatározott mértékig nyomtuk össze, mégpedig úgy, hogy a nyomókísérlet során a próbatesttel közölt munkamennyiség az egyik kísérletsorozatnál nagyobb, a másikonál pedig kisebb legyen, mint a szakításkor meghatározott fajlagos munka. Egy ilyen kísérlet eredményét szemlélteti a 8. ábra. Az ábra

bal oldalán a vizsgált acélanyag húzó, illetve nyomódiagramja van feltüntetve. A vízszintes tengelyen a valódi effektív nyúlás, a függőleges tengelyen pedig a valódi feszültség. Ilyen ábrázolásmód mellett a diagram területe közvetlenül a fajlagos törési munkát adja. A vizsgált anyag folyási határa 70 kp/mm^2 volt, szakításra a törés 147 kp/mm^2 feszültség hatására következett be. A szakító-kísérlet során a törésig elnyelt fajlagos munka $70,5 \text{ mkp/cm}^3$ volt. Egy ugyanezen anyagból készült nyomópróbatestet $76,6 \text{ mkp/cm}^3$ fajlagos munkával alakítva, a próbatest nem tört. Ugyanezt a próbatestet a nyomás után ismét



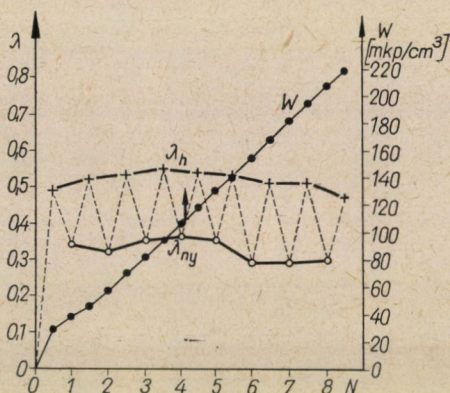
9. ábra. A kis igénybevételi számú fásztásokhoz használt bemetszett és sima próbatestek képe

meghúzva, a próbatest $26,5 \text{ kp/mm}^2$ feszültségnél, tehát az eredeti folyáshatárnál lényegesen kisebb feszültségen eltörött. Ebből arra lehet következtetni, hogy a nyomókísérlet során a próbatest belsejében a repedés már létrejött, azonban a nyomóigénybevétel hatására nem terjedt olyan mértékben, hogy a törés létrejöjjön. A nyomást követő szakítás során azonban már rendkívül kicsiny feszültség hatására a törés a rugalmas alakváltozás során bekövetkezett.

Azoknál a kísérleteknél, ahol a nyomókísérletet az anyagra jellemző $70,5 \text{ mkp/cm}^3$ fajlagos munkánál kisebb értékeknél hagytuk abba, a nyomást követő húzókísérlet során a próbatest még határozott képlékeny alakváltozást mutatott, és a szakadáshoz szükséges fajlagos munka, valamint a nyomás során befektetett fajlagos munka összege a szóráshatárokon belül ismét az eredeti anyagra jellemző értéket adta.

A kísérletek alapján tehát kimondható az, hogy az anyag rácsszerkezetének makroszkopikus méretű megromlásához, tehát a repedés keletkezéséhez egy, az anyagra jellemző fajlagos munkamennyiség szükséges.

Ugyanennek az állításnak további bizonyítására nemesített C 35 acélokkal végeztünk kis igénybevételi számú fárasztókísérleteket. A kísérletekhez sima, illetve bemetszett próbatesteket használtunk [33] (9. ábra). A fárasztókísérleteket is az előbb leírt megszorító feltételek miatt igen kemény szakítógéppel végeztük. Az igénybevételek száma a kísérletek során általában legfeljebb 100-ig terjedt. Ez a korlátozás részben azért volt szükséges, mert az



10. ábra. A fajlagos nyúlás, illetve a fajlagos munka változása az igénybevételi szám függvényében

aránylag lassú nyúlássebességek miatt a kísérlet hosszadalmas, másrészt pedig az egyes egymást követő húzó-, illetve nyomóigénybevételeknél olyan mértékű alakváltozást kellett létesíteni, amelyhez szükséges fajlagos munka még elég nagy pontossággal volt meghatározható.

Az első kísérletsorozatokat úgy végeztük, hogy a húzás, illetve a nyomás során létrejövő valódi feszültség ugyanaz az érték legyen, a feszültség tehát $+\sigma'$ és $-\sigma'$ között váltakozott. Minden terhelési periódusban mértük a próbatest fajlagos effektív nyúlását (λ). A kísérleti anyag 0,35% C tartalmú közönséges szénacél volt, melynek szilárdsági vizsgálata nagyszámú próbatesten mérve a következő adatokat adta:

A maximális erő hatására fellépő valódi feszültség $\sigma'_m = 89 \div 95$ kp/mm²;
 valódi feszültség a törés pillanatában $\sigma'_c = 122 - 138$ kp/mm²;
 valódi nyúlás a törés helyén $\lambda_c = 0,94 \div 1,02$;
 fajlagos törési munka szakítással meghatározva: 110 ± 10 mkp/cm³.

A kísérleti adatok közül egyet a 10. ábra szemléltet. A váltakozó húzó-nyomó valódi feszültség nagyobb, mint a szakítókérslet során a maximális erő hatására mért valódi feszültség. Ennek a feszültségnek a hatására az első

terheléskor $\lambda = 0,5$ fajlagos effektív nyúlás jött létre. A nyomóterheléskor a fajlagos nyúlás 0,32 értékre csökkent le. Egy húzási és egy nyomási periódus tesz ki egy teljes alakváltozási ciklust. Az egy lépésben törésig végzett szakító-kísérlet tehát a továbbiakban a fárasztókísérletekkel összehasonlítva az $N = 0,5$ ciklusszámnak felel meg.

Mint az ábrából látható, mind a húzott periódusban mért nyúlás (λ_h), mind a nyomott szakaszon mért nyúlás a kísérleti szórástól eltekintve, egy bizonyos pontig, kb. a negyedik ciklusig nő, azon túl pedig enyhén csökken. A nyúlásgörbe maximuma azzal magyarázható, hogy amíg az alakváltozás



11. ábra. Kezdődő repedés mikroszkópi képe; $N = 100 \times$

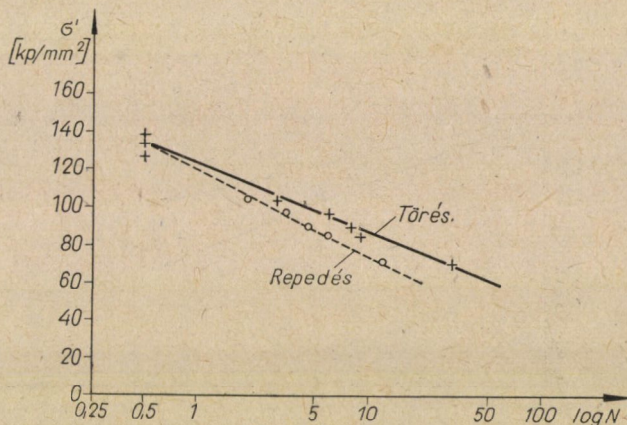
tisztán képlékeny, addig a próbatest az egyes igénybevételi ciklusok során lassan, de jól mérhetően nyúlik. A repedés keletkezése után az erő elosztva a látszólagos keresztmetszettel, már csak névlegesen adja a valódi feszültséget, mert a repedés következtében a próbatest belsejében a feszültségeloszlás alapvetően megváltozik. A húzó periódusokban tehát már nem a további képlékeny alakváltozás, hanem a repedés terjedése lesz a döntő folyamat, és ez a magyarázata annak, hogy a próbatest összes nyúlása innen kezdve már nem növekszik tovább ugyanolyan mértékben, mint az előző ciklusokban. Az ábrában fel van tüntetve az egyes igénybevételi periódusok során elnyelt fajlagos munka is. A fajlagos munka vonala közelítőleg egyenes, és a nyíllal jelölt helyen, tehát éppen az anyagra jellemző 110 mkp/cm³ energia elnyelése után észlelhető a nyúlásgörbe előbb már említett irányváltozása.

Az ábrából megfigyelhető az is, hogy bár az anyag 110 mkp/cm³ fajlagos alakváltozási munka után megrepedt, a töréséhez a nyolcadik húzó-nyomó igénybevétel után 220 mkp/cm³ fajlagos munka volt szükséges.

Az ilyen nagy valódi feszültség amplitúdóval végzett kísérletek során a repedés a 110 mkp/cm³ fajlagos alakváltozási munka átlépését követő első

húzóperiódusban már láthatóvá vált. A kisebb valódi feszültségekkel végzett kísérletek során is észlelhető volt az anyagra jellemző 110 kpm/cm^3 energia elnyelése után a nyúlásgörbe jellegének megváltozása, azonban a repedést csak a próbatest szétvágása után mikroszkópon lehetett jól észlelni (11. ábra).

Valamennyi sima próbatesten végzett kísérlet eredményét a 12. ábra mutatja. A vízszintes tengelyen az igénybevételi számok vannak felmérve logaritmikus léptékben, a függőleges tengelyen pedig a valódi feszültség. A már említett okok miatt az egyszerű szakítókísérletet a 0,5 igénybevételnek felel meg. A méréspontokat ebben a koordináta-rendszerben felrakva, azok első közelítés-



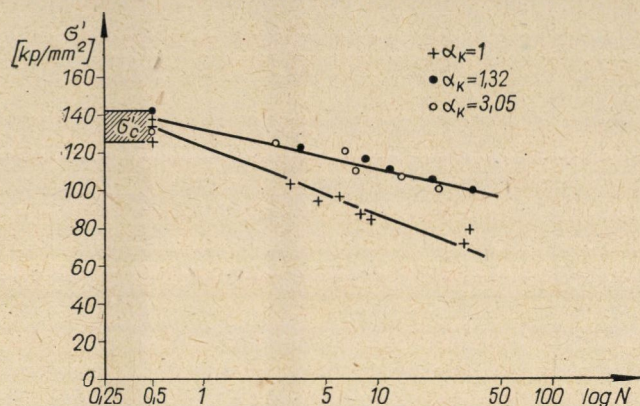
12. ábra. Sima próbatestek repedésének kezdete, illetve törése az igénybevételi szám függvényében

ben egyenesvonalon fekszenek, legalább olyan mértékben, hogy a szakító-kísérletnek megfelelő $N = 0,5$ igénybevételig való extrapoláció ezen az alapon elvégezhető legyen. A két görbét, a repedés keletkezésének és a törésnek megfelelő görbét a szakítókísérletnek megfelelő igénybevételig extrapolálva, azok az $N = 0,5$ igénybevételnél találkoznak, ami azt bizonyítja, hogy a szakítókísérlet során a repedés terjedéséhez szükséges munka kicsiny. A két egymást metsző görbe közös kiindulópontja éppen a szakítókísérletek során meghatározott σ_c törési feszültség.

A 13. ábrában a sima és a bemetszett szakítópróbák kis ciklusú fárasztásának eredményei vannak feltüntetve. Mint az ábrából látható, a szakító-kísérlet során mért σ'_c a töréskor fellépő valódi közepes feszültség értéke mind a sima, mind a bemetszett próbatestek esetén. Ezt a tényt, mely szerint a valódi feszültség a töréskor a próbatest bemetszésétől függetlenül ugyanaz, már LUDWIG óta ismeri a szakirodalom. A kis ciklusú fárasztókísérletek során mért értékekből szerkesztett görbe ebbe az anyagra jellemző σ'_c pontba fut össze. Igen érdekes és figyelemre méltó az, hogy a fáradási görbének ezen a szakaszán azonos valódi feszültséggel terhelve, a bemetszett próbatestek álta-

lában nagyobb igénybevételi számnál törnek el, mint a sima próbatestek, és ez az igénybevételi szám, legalábbis első közelítésben, független a bemetszéstől.

Az itt említett állandó amplitúdójú valódi feszültséggel folytatott húzó-nyomó kísérletek eredményeinek további igazolására HAVAS I. [34] végzett olyan húzó-nyomó kísérleteket, amelyeknél a húzó és a nyomó periódusban keletkező mérnöki fajlagos nyúlás volt állandó. A kísérleteket ugyanazzal a C 35 nemesített anyaggal végezte, azzal a különbséggel, hogy a próbatestek edzés után két különböző hőmérsékleten, 600 és 680 C°-on voltak megeresztve. Mint a későbbiekben még részletesebben igazolni fogjuk, a nemesített acélok

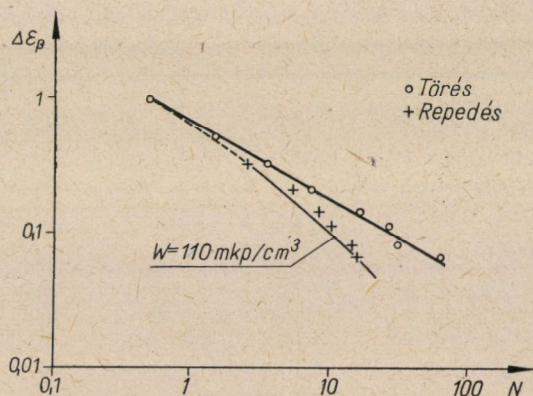


13. ábra. Sima, illetve bemetszett próbatestek kifaradási görbéje. Állandó valódi feszültség-amplitúdóval végzett fárasztás

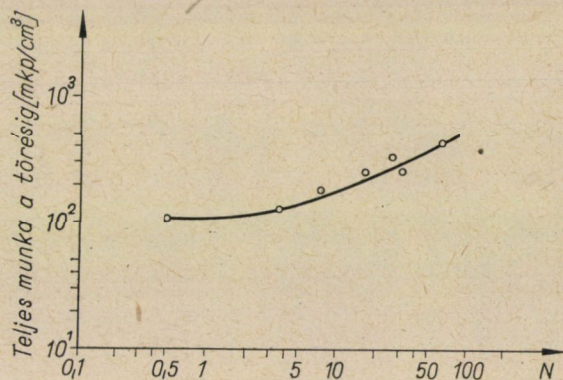
fajlagos törési munkája független a megeresztési hőmérsékletektől. Ugyan-ezeket a kísérleteket elvégezte egy nemesíthető alumínium-magnézium-cink-titán ötvözzel is. Ezeknek a kísérleteknek a céljuk az volt, hogy az előbb leírt eredményeket állandó nyúlásamplitúdó esetére is igazolják. Mint a 14. ábrában látható, a repedés bekövetkezéséhez szükséges munka a nemesített C 35 acélra jellemző 110 mkp/cm³ volt, függetlenül a megeresztés hőmérsékletétől. A töréshez szükséges munka viszont annál nagyobb, minél kisebb az egy igénybevételi ciklusban alkalmazott alakváltozás. A töréshez szükséges teljes munkát az igénybevételi szám függvényében a 15. ábra mutatja. Míg a próbatest repedése mindig a $W = 110$ mkp/cm³ munka elnyelése után következett be, addig a próbatest teljes töréséhez szükséges munka a legnagyobb igénybevételi számnál, az 500 mkp/cm³-t is eléri.

Az ismertetett kísérletek összefoglalva azt mutatják, hogy egy meghatározott és az anyagra jellemző fajlagos munka kell ahhoz, hogy az anyagban a makroszkopikus méretű repedés létrejöhön. Ez a munkamennyiség ugyanaz akár húzásra, akár pedig nyomásra van terhelve a próbatest, de ugyanaz akkor is, ha a vizsgálat húzás és nyomás ismétlésével történik. A szó fizikai

értelmében vett törés tehát a rácsnak makroszkopikus méretű szétválása mindig egy adott, és az anyagra jellemző mennyiségű fajlagos munka hatására történik. Az igénybevétel módjától és a feszültségszinttől függően változó azonban az a munka, amit a próbatest a repedés terjedése során nyel el.



14. ábra. Nemesített acél fáradási diagramja állandó nyúlásamplitúdóval végzett kísérletek alapján

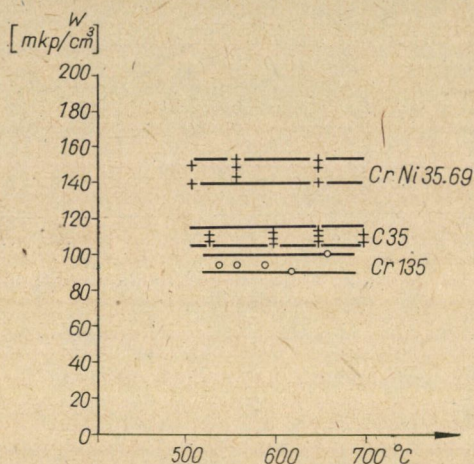


15. ábra. A töréshez szükséges teljes munka, beleértve a repedés terjedés munkáját is, növekvő igénybevételi számmal nő

További részletezés nélkül itt csak megemlítenéd, hogy a fajlagos törési munka a (8) egyenlet értelmében mint ridegtörési kritérium is használható. Ebben az esetben ugyanis a képlékeny alakváltozás munkája közelítőleg zérus, és a ridegtörés során a teljes töréshez szükséges munka két részből áll: a rugalmas alakváltozás fajlagos munkájából és a repedésterjedés munkájából.

VI. A fajlagos törési munka mint szerkezetérzéken mērőszám

A bevezetésben közölt gondolatmenet szerint a fajlagos törési munka számértéke a rácsrendezetlenségektől csak elhanyagolható mértékben függ, ha a törést nagy képlékeny alakváltozás előzi meg. Az előző fejezetben kifejtettek szerint a szakítókísérlet során a repedésterjedés munkája elhanyagolhatóan kicsi, a töréshez szükséges munka tehát egyenlő lesz igen nagy közelítéssel a képlékeny alakváltozásra fordított munkával. Ezért a továbbiakban ismertetendő kísérletek során kizárólag a szakítókísérletet alkalmaztuk, megvizsgálva



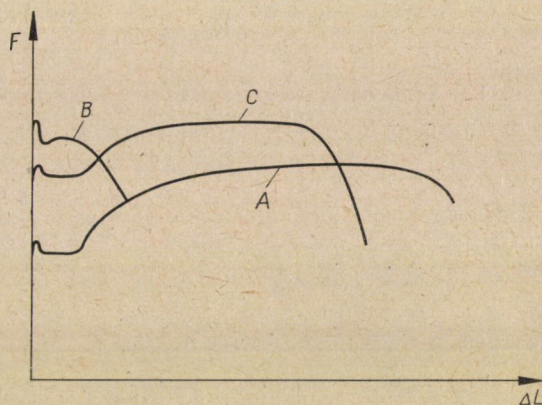
16. ábra. Nemesített acélok fajlagos törési munkája a megeresztési hőmérséklet függvényében

számos olyan lehetőséget és kezelési módszert, melyeknek hatására a rácsrendezetlenségek mennyisége jelentős mértékben megváltozik külső erők munkájának befektetése nélkül.

a) A nemesíthető acélok edzése és különböző hőmérsékleteken való megeresztése után a rácsrendezetlenségektől függő sajátságok, a feszültség és a nyúlás, igen jelentős mértékben változnak. Ha a töréshez szükséges fajlagos munka a rácsrendezetlenségektől független, akkor a nemesített acélok törési munkájának a megeresztési hőmérséklettől tág határok között függetlennek kell lennie. Ezt a jelenséget először MATTHAES [35] figyelte meg. Különböző nemesíthető acélokkal végzett kísérleteink közül néhányat a 16. ábra mutat [36]. Az ábrán magyar szabványoknak megfelelő nemesíthető krómacél, 0,35% C tartalmú közönséges szénacél és egy króm-nikkel acél fajlagos törési munkája van feltüntetve a megeresztési hőmérséklet függvényében. A kísérlet szórásának határain belül valamennyi acél fajlagos törési munkája egy, az illető anyagra jellemző állandó érték. Az ábrán közölteknel alacsonyabb hőmérsékleteken való megeresztés hatására a fajlagos törési munka már lényege-

sen változik, a csak martenzitesre megeresztett acélok törési munkája pedig a zérustól csak kevéssé különbözik. Az átmeneti szakasz vizsgálata és az átmenet okainak pontos felderítése még a folyó kísérletek feladata.

b) A rácsrendezetlenségek mennyiségének változtatására egy másik utat PARKER kísérletei jelöltek meg [37]. PARKER meghatározta egy lágyacél szakítódigramját normalizált állapotban (17. ábra A jelű görbe). Az acélt néhány százalékos hidegalakításnak vetve alá, a B jelű görbét kapta, majd pedig 650 C°-on az acélt kilágyítva, az eredeti anyagon mért A szakítódigram helyett a C jelű görbét kapta. Az ábrán az erő van feltüntetve a megnyúlás



17. ábra. Lágyacél szakítódigramja: A normalizált állapotban; B 8% hidegalakítás után; C 8% hidegalakítás és 650 C°-on való lágyítás után

függvényében léptékhelyesen, de a számértékek nélkül. Ez a PARKER kísérletei alapján megrajzolt ábra csupán azt kívánja bemutatni, hogy a leírt kezelés után a folyási határ és a szakítószilárdság jelentősen megnő, a próbatest teljes nyúlása pedig csökken. PARKER ezt a jelenséget a hidegalakítás és azt követő kilágyítás révén keletkező kis hajlásszögű szemcsehatároknak tulajdonította. A leírt kezelés révén tehát ismét megváltozik a rácsrendezetlenségek mennyisége, amely a feszültség és a nyúlás jellegű mérőszámok tényleges megváltozásában nyilvánul meg.

Ezen jelenség alapján C 10-es lágyacélokkal végeztünk kísérleteket, melyeknek eredményeit az I. táblázat mutatja. Az N jelű próbatestek normalizált állapotban kerültek megvizsgálásra, a H jelű próbatestsorozat 8% hidegalakítás után 650 C°-on lett lágyítva. PARKER kísérleti adataival összhangban a hidegen alakított és lágyított H jelű próbatestek szakítószilárdsága és folyási határa nagyobb, egyenletes nyúlása és kontrakciója pedig kisebb, mint a normalizált állapotú próbatesteké. Ennek ellenére a fajlagos törési munka igen nagy pontossággal ugyanaz.

I. táblázat

Lágyacél szakítóvizsgálatának adatai

Hőkezelés jele	Próbatest jele	σ_B [kp/mm ²]	$\sigma_{0,2}$ [kp/mm ²]	ϵ_e	ψ	W [mkp/cm ²]
N	A/1	42,2	30,7	0,21	0,71	82,2
	A/2	42,2	29,7	0,21	0,71	81,9
H	E/1	46,5	42,3	0,14	0,69	89,7
	E/2	48,6	42,2	0,13	0,68	81,3
	E/3	47,2	44,7	0,13	0,69	82,2

N = normalizálva,

H = 8% hidegalakítás után 650 C°-on lágyítva.

Ezen két kísérletsorozat egybevetéséből arra lehet következtetni, hogy minden olyan művelet, amely a fémekben csak a rácsrendezetlenségek mennyiségét és eloszlását változtatja meg külső munka alkalmazása nélkül, a fajlagos törési munka értékét nem befolyásolja.

Ha a fajlagos törési munka a rácsrendezetlenségektől független, akkor a képlekeny igen tiszta fémek fajlagos törési munkája azonos kell hogy legyen ezen fémek ideális rácsú tűkristályain mért fajlagos alakváltozás munkájával. Az ideális rácsú fémek szilárdságát a felületi energia felhasználásával POLÁNYI, illetőleg OROWAN [2, 3] határozták meg. Az újabb számítások alapján az OROWAN által levezetett értékek a valóságosnál nagyobbak adódnak. A valóságot jobban megközelíti a POLÁNYI által megadott számítás. A számításnál mindenképpen figyelembe kell venni azt, hogy a tökéletes rácsú kristályok szilárdsága és nyúlása a krisztallográfiai irányoktól függ. Így a polikrisztallin testen mért fajlagos alakváltozási munka csak a tökéletes rácsú kristályok törési munkájának átlagértékével lehet egyenlő. Elégé durva közelítő számítás szerint [33] a tökéletes rácsú kristály szilárdsága

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{W \cdot E}{2}}, \quad (18)$$

ahol E az anyag rugalmassági modulusa.

POLÁNYI szerint az ideális rácsú kristály szilárdsága

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot S}{d}, \quad (19)$$

ahol S a felületi energia, d pedig a rácsparaméter.

II. táblázat

Igen nagy tisztaságú kőbős térrácsú fémek rácshibamentes kristályainak szilárdsága

Anyag	$\sigma_t = \frac{2S_{\text{foly.}}}{d}$	$\sigma_t = \frac{2S_{\text{szil.}}}{d}$	$M_{\text{ért}}$	$\sigma_t = \sqrt{\frac{EW}{2}}$
Ag	656	—	176	692
Al	372	450	—	420
Cu	885	(805) 900	300	800
Fe	1200	1350	1340	1320
Ni	—	1070	—	1030

1. oszlop: Polányi képletével számítva a folyékony állapotban mért felületi feszültségből;
2. oszlop: Polányi képletével számítva a szilárd állapotban mért felületi feszültségből;
3. oszlop: Az eddig rendelkezésre álló kísérleti adatok;
4. oszlop: A polikristallin fémek fajlagos törési munkájából számítva.

Az összefüggés igazolására spektroszkopikusan tiszta vas, réz, alumínium, ezüst és nikkel próbatesteket vizsgáltunk. Az eredményeket a II. táblázat szemlélteti, amelyből látható, hogy a tökéletes térrácsú kristály szilárdsága a képlékeny test fajlagos törési munkájából számítva igen nagy pontossággal egyezik a POLÁNYI által a felületi energia figyelembevételével számított értékekkel.

Említésre méltó az, hogy legújabban IVANOVA [38] kimutatta azt is, hogy az előbbieken eddig tárgyalt fajlagos törési energia legalábbis a tiszta fémeknél az olvadáshőből is kiszámítható. Ezek számításai igen nagy pontossággal egyeznek az általunk mechanikai úton mért értékekkel.

IRODALOM

1. MINER, M. A.: *Journal of Applied Mechanics* 12 (1945), A—159.
2. POLÁNYI, M.: *Z. f. Physik*, 89 (1934), 660.
3. OROWAN, E.: *Z. f. Physik*, 89 (1934), 634.
4. BRENNER, S.: *J. Appl. Phys.* 27 (1956), 1484.
5. SMEKAL, A.: *Handbuch d. Physik*, Berlin 1933.
6. TITCHENER, A. L.—M. B. BEVER—CHALMERS: *Progress in Metal Physics* 7 (1958), 247.
7. CLAREBROUGH, L. M.—HARGREAVES, M. E.—WEST, G. W.: *Proc. Roy. Soc. A* 232 (1955), 252.
8. READ, W. T.—SHOCKLEY, W.: *Imperfections in Nearly Perfect Crystals*. J. Wiley, New York 1955; 166.
9. PLATEAU, J.—HENRY, G.—COUSSARD, C.: *Review de Metallurgie*, 54 (1957), 200.
10. BLUHM, J. I.—MORRISSEY, R. J.: *Int. Conf. on Fracture*, Sendai, 1965. D. II. 93.
11. OROWAN, E.: *Fatigue and Fracture of Metals*, New York 1952; 154.
12. HEMPEL, M.—SCHRADER, A.: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* 28 (1957), 547.
13. FROST, N. E.—PHILLIPS, C. E.: *Int. Conf. on Fatigue of Metals*, London 1956; 520.
14. GILLEMOT, L.—SINAY, G.: *Acta Techn. Hung.* 22 (1958), 149.
15. MATTHAES, K.: *Zeitschrift f. Metallkunde* 53 (1962), 265.
16. BELLO, J.—HUGO, M.—HERZOG, E.: *Memoire Scientifique de la Rev. Met.* 60 (1963), 695.
17. NADASAN, S.—SAFERA, V.: *Konstrukcia de Masini* (1965), 345.
18. MIHÁLYI, E.—MILOTAY, GY.—SINAY, G.: *Gép* 16 (1964), 145.

19. REUSS, E.: *Acta Techn. Hung.* **39** (1962), 259.
20. MACGREGOR, C. W.—FISHER, J. C.: *Journal of Appl. Mech.* **12** (1945), A. 217.
21. CZOBOLY, E.: *Periodica Polytechnica*, Maschinen und Bauwesen, **8** (1964), No 4. 395.
22. PRANDTL, L.: *Z. Angew. Math. Mech.* **8** (1928), 85.
23. NÁDAI, A.—MANJOINE, M.: *J. Appl. Mech.* **8** (1941), A. 77.
24. GILLEMOT, L.: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* (sajtó alatt).
25. GILLEMOT, L.—MIHÁLYI, E.: III. Anyagvizsgáló Kongresszus előadásai. GTE kiadvány, Budapest 1964; 269.
26. DAVIDENKOV, N. N.—SPIRIDINOVA, N. I.: *Proc. of A.S.T.M.* **46** (1946), 1147.
27. BRIDGEMAN, P. W.: *Transaction of Am. Soc. for Met.* **32** (1944), 553.
28. SIEBEL, E.—SCHWAIGERER, S.: *Archiv f. Eisenhüttenwesen* **19** (1948), 145.
29. TRUSZKOWSKY, W.: *Bull. de l'Academie Polonaise des Sciences et des Lettres*, **1** (1952), Nr. 4. 373.
30. THEOCARIS, P. S.—MARKETOS, E.: Int. Conf. on Fracture, Sendai 1965, D. II. 153.
31. GILLEMOT, L.: *Materialprüfung* **3** (1961), 330.
32. MYLONAS, C.: Int. Inst. of Welding, Rep. IX. 419 (1964).
33. GILLEMOT, L.: Int. Conf. on Fracture, Sendai 1965, D—I. 47.
34. HAVAS, I.: *Materialprüfung* (1966) (sajtó alatt).
35. MATTHAES, K.: *Zeitschrift f. Metallkunde*, **43** (1952), 14.
36. GILLEMOT, L.: *Freiberger Forschungshefte*, B **76** (1963), 5.
37. PARKER, E. R.—J. WASHBURN: Effect of Impurities and Imperfections e.t.c. *Am. Soc. for Metals*, 1955.
38. IVANOVA, V. S.—YU. I. RAGOZIN—N. A. VOROBYOV: Proceedings of the Second Conference on Dimensioning and Strength Calculations. Akadémiai Kiadó Budapest 1965; 508.