

# A fraktográfia rövid története

Göblyös Béla<sup>1</sup> – Tóth László<sup>2</sup>

A gyakorlati életben a felületek állapota, jellemzői számos olyan információt hordoznak, amelyek nagyon sokat elárulhatnak a „felület előéletéről”, legyen az akár törés, kopás, vagy bármilyen felületi megmunkálás. Napjainkban a mikroelektronika rendkívül gyors fejlődése egyre inkább kiküszöböli a felületi sajátosságok megfigyeléséből a szubjektív elemeket, és lehetővé teszi a nagysorozatú, reprodukálható méréseket olyan formában, hogy a felületi sajátosságokat számokkal jellemzi. Ez utóbbi pedig alkalmas egyrészt a felületek egyértelmű jellemzésére, másrészt a felületek kialakulása (kialakítása) mögött meghúzódó fizikai-mechanikai folyamatok megbízható értelmezésére. Ebből adódóan napjainkban a felületek megfigyelése, vizsgálata „virágkorát éli”. Ez vezetett bennünket arra, hogy egy rövid áttekintést adjunk a fraktográfia kialakulásáról, fejlődésének történetéről, hangsúlyozva azt, hogy egy történetet teljességgel sohasem lehet visszaadni.

## A kezdetektől az ipari forradalomig

A fraktográfia szót *Carl A. Zapffe* alkotta meg, a latin *fractus* (törés) illetve a *grapho* (leírás) szavak összevonásával, miután láradozásait siker koronázta és mikroszkóppal úgy vizsgálhatt meg egy töretfelületet, hogy annak egyes szemcséit is már meg tudta különböztetni egymástól [1].

A fraktográfia célja a töretfelület jellegének elemzése illetve kapcsolat teremtés a töret jellege és a törés okai vagy alapmechanizmusa között.

A fraktográfiát két nagy csoportra bonthatjuk:

- a kis nagyítású vagy szabad szemmel végzett ( $M \leq 25x$ ) illetve,
- a nagy nagyítású vagy mikroszkópi fraktográfia.

*Cyril Stanley Smith* a metallográfia történetét kutató munkássága során bizonyítékokat talált a fraktográfia bronzkori alkalmazására is [2], miszerint az akkori kovácsok az eltört fegyverek töretfelületének legéből az olvasztási eljárásra következtettek.

A fraktográfia alkalmazásáról szóló első írásos emlék minden bizonnyal a *Vannoccio Biringuccio* által 1540-ben kiadott: *De La Pirotechnia* [3], amelyben a középkori szerző a töretfelületet minőségbiztosítási aspektusból vizsgálta.

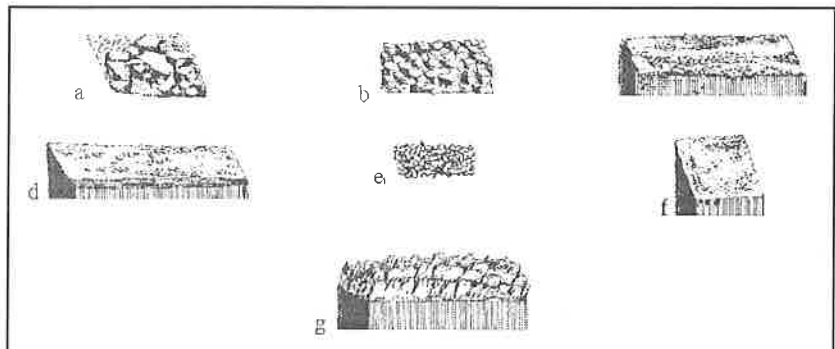
Vörösréz és sárgaréz bugák minőségét a bemetszett majd eltört bugák töretfelületeinek vizsgálatával határozta meg *Lazarus Ecker* 1574-ben [4]. Megállapította, hogy a szürke töretfelület egymás utáni repedések eredményeképpen jött létre, melyet a smithsonitban jelenlévő ólomszennyezés okozott.

Réz-ón-bizmut ötvözetből öntött harangok minőségének ellenőrzésére 1627-ben *Louis Savot* javasolt törési vizsgálatot. Az alapanyag szemcseméretét figyelemmel kísérve állított be olyan összetételt, amelynél a harangon nem keletkeztek repedések [5]. Ugyanazon évben *Mathurin Jousse* a töretfelület jellegén alapuló módszert javasolt vas- és acélminőségek minősítésére [6].

Jelentős mérnököknek tekinthető a fraktográfiában *Réaumur* műve [7], amelyben a vasak töretfelületének makroszkópikus és mikroszkópikus képét rézkarcokon mutatja be (bár addigra már a delti *Antony van Leuwenhoek* felfedezte a mikroszkópot). Mivel más módszer nem volt, a

mikroszkóppan látott képet le kellett rajzolni. Réaumur a vas és acél hét különböző törettipusát különítette el, nevezetesen:

- I. Nagy, szabálytalan, tükörszerű lapok, melyek gyenge anyagminőséget jeleznek (1a. ábra)
- II. Az előzőnél szabályosabb megjelenésű, kisebb lapok, az I. csoportnál jobb minőséget jelez (1b. ábra).
- III. A lapok között megjelennek a rostos, szálás területek (1c. ábra).
- IV. Szálás területek a jellemzők, nagyon kevés a tüközödő felület (1d. ábra).
- V. A teljesen szálás középső területet keretszerűen körbevevő más jellegű terület (1e. ábra).
- VI. Szokatlan típusú töretfelület, a szálás háttér előterében néhány kisebb lap (1f. ábra).
- VII. Faszzerű megjelenésű töretfelület (1g. ábra).



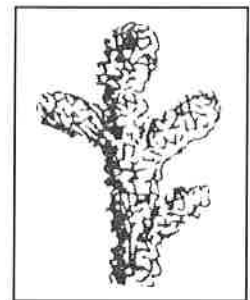
1. ábra. Réaumur rajza az általa 7 csoportba sorolt töretekről

Réaumur egyik rézkarcán, amelyet nagy nagyítású mikroszkópos képről rajzolt le, megfigyelhetők a perlit vagy cementit részecskék több mint egy évszázaddal a metallográfiai tudomány kialakulása előtt (2. ábra)!

*Geoffroy* 1725-ben a réz-cink arány változtatásának hatását követte nyomon a töretfelület jellege és a szemcsenagyság tükrében [8].

Az 1750-es években hőkezelések (köztük főleg a cementálás) eredményességének megítélésére *Gellert* javasolt vizsgálati módszert [9], szintén *Gellert* volt az, aki a töretfelület jellegét a fémek elridegedésével hozta kapcsolatba.

*Karl Franz Achard* német fizikus és kémikus is felismerte az ötvözetek tulajdonságai és a töretfelület megjelenése közötti összefüggéseket. Az általa megvizsgált 896 különféle ötvözet felölelte az akkori kor szinte minden létező ötvözetét [10].



2. ábra. Réaumur rajza egy dendritágról, melyen felismerhetők az egymás mellett lévő perlit és cementit szemcsék

## Az ipari forradalom kezdetétől a XX. század elejéig

A XIX. században a metallográfia fejlődésével a fraktográfia némiképp háttérbe szorult. *Mallet* 1856-ban ágyúcsövek sorozatos tönkremenetelét vizsgálva megfigyelte [11], hogy a töretfelület jellege összefüggésbe hozható a megszilárdulási folyamat paramétereivel, valamint,

<sup>1</sup> Dunaferri Rt.

<sup>2</sup> Prof. Dr., a Bay Zoltán Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet igazgatója

hogy a törések kialakulása az éles sarkoknál sűrűbben fordul elő. Mallet már e korai munkájában felismerte a feszültségkoncentráció hatását.

Turner 1858-ban egy publikációjában részletesen ismertette a törési jellegzetességeket [12].

A töret jellegének kristályosból szálasra váltásának átmenetét Kirkaldy 1862-ben a hőkezelési állapottal, a próbatest méretével valamint a terhelési sebességgel hozta kapcsolatba [13]. Vizsgálatait kovacsoltvason, illetve acélon végezte és megfigyelte, hogy a kristályos töret síkja a húzás irányára merőleges volt, míg a szálas töret szabálytalan képet mutatott és nem volt merőleges a húzási irányra.

E. F. Dürre 1868-ban írt doktori disszertációjában az öntöttvasak különféle töretének textúráját ismerteti, valamint rendkívül alaposan összefoglalja a témával kapcsolatos addigi irodalmat [14]. Az öntvények vizsgálatához a kisebb nagyításokat javasolja és a nagy nagyításokat nem tartja hasznosnak e célra.

D. K. Csernoff orosz kohász 1868-ban illetve 1879-ben megjelent cikkei közül az első [15] a töretfelületen lévő szemcsék nagyságát hozza kapcsolatba a hőkezelési állapottal, illetve a karbontartalommal, míg a második [16] publikációjában a nagy szemcsenagyságú acélok törését írja le. Ebben a publikációban jelenik meg a történelem folyamán először a fém szemcséjének valóságú alakja is.

John Percy 1875-ben a töretfelületeket hat csoportba sorolta be [17], melyek a következők:

- *Kristályos töret*: a tükörnyersvasra, bizmutra jellemző lapkákat tartalmazó töret.
- *Szemcsés töret*: kisebb lapkákat tartalmazó töret, mint például a nyersvasé.
- *Szálas töret*: mint a minőség általános követelménye.
- *Selymes töret*: a szálasnál is finomabb töret, mint például a vörösrézé.
- *Oszlopos töret*: a nagy hőmérsékleten bekövetkezett törések jellemzője.
- *Üvegszerű töret*.

A német Adolf Martens (akiről a martenzitet neveztek el) 1878-ban publikált művében [18] töretfelület rajzokat közöl; egy későbbi publikációjában ő írta le először a törési vonalakat (Bruchlinien). Különféle igénybevételnek kitett, és annak hatására eltörtött próbatestek töretfelületét megvizsgálva Martens megfigyelte, hogy a törési vonalak mindig a törés kiindulási pontjának irányába mutatnak.

Johann Augustus Brinell (aki leginkább az általa kidolgozott Brinell-féle keménységmérési eljárásról vált híressé, amelyet először a Párizsi Világkiállításon mutatott be 1900-ban) 1885-ben jelentetett meg egy publikációt a hőkezelési állapot, valamint a karbon kötött-szabad állapotú és a töretfelület megjelenése közötti összefüggésekről [19]. A szakítóvizsgálatnál jelentkező kontrakciós (*cup and cone*) töretet B. Kirsh már 1889 előtt leírta. A repedésterjedésre felállított modellje a mai napig megállja a helyét [20]. Elmélete szerint a repedés a befűződött keresztmetszetben van, a húzási tengelyre esik és koncentrikusan terjed kifelé (kialakítva ezzel az angol elnevezésnek megfelelő csészét (*cup*)), a csésze oldalát pedig a nyírófeszültségek alakítják ki.

## A XX. század elejétől napjainkig

A mikroszkópot a XX. század elejéig csak polírozott próbatestek vizsgálatára használták. Az 1930-as években számos kutató jutott arra az elhatározásra, hogy az acél tulajdonságai korrelációban állnak a töretfelület makroszkópiusan megfigyelhető durvaságával vagy finomságával. Arpi 1935-ben kifejlesztett egy szabványos törési vizsgálatosorozatot [21]. A töretfelületen megfigyelhető mikroszkópius sajátosságok megfigyelésére azonban csak Zapffe és kollégáinak munkássága keltette fel a szakemberek figyelmét a XX. század 40-es és 50-es éveiben. Zapffe javaslatát a fénymikroszkóp fraktográfiai alkalmazására sokan kedvezően fogadták. Annak ellenére, hogy a kor technikai fejlettsége csak a

kis mélységélességű mikroszkópok használatát tette lehetővé, Zapffe képes volt jó minőségben 1000–2000x-es nagyítású felvételeket is készíteni. Vizsgálatait többnyire vas- és acélötvözeteken valamint bizmuton, antimonon, volfrámon és molibdénen végezte és rendkívül alaposan leírta a hasadási síkok megjelenési formáit. A fémek hasadásával számos akkori kutató foglalkozott. Egyik fontos eredmény a Tipper és Sullivan által feltárt összefüggés a hasadás valamint a mechanikai ikerképződés között a vas–szilícium ötvözetekben [22]. A másik fontos eredmény Kliemek köszönhető, aki röntgendiffrakciós eljárást alkalmazott a fénymikroszkópos eljárás kiegészítéseként [23].

A mikroszkóp egyre széleskörűbb alkalmazásával a töretfelületről illetve az egész törési folyamatról megszerzett ismeretanyag fokozatosan bővült. Fontos azonban megjegyezni, hogy ezen vizsgálatok majdnem kizárólag a ridegtörés kutatására irányultak, a szívós törések vizsgálatát csak az elektron-fraktográfia megjelenése tette lehetővé. Mind a transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM<sup>3</sup>) mind pedig a pásztázó elektronmikroszkóp (SEM<sup>4</sup>) az 1960-as években terjedt el, bár Németországban már a 30-as és 40-es években is használták őket kísérleti céllal.

Ruska 1932-ben feltalálta a mágneses lencsét és ezzel útjára indult a TEM alkalmazása [24]. Ugyanebben az évben Brüche és Johannson elkészítette az első elektronmikroszkópos felvételt. A mai napig sem tisztázott azonban, hogy ki készítette az első olyan elektronmikroszkópos képet, amelynek felbontása jobb volt mint a fénymikroszkóppal készített felvételeké. Egyes vélemények szerint ez az érdem Ruskát illeti meg, míg mások szerint Driest és Müller voltak az elsők. Az első laboratóriumi használatra is alkalmas elektronmikroszkópot 1938-ban állították üzembe, ennek felbontása 10 nm volt. Az 1950-es években már több vállalat állított elő ilyen berendezéseket, a felbontás tovább csökkent és már elérte az 1–2 nm-t. A TEM egyik legnagyobb hátránya az volt, hogy a vizsgálatokhoz a próbatestről replikát kelet készíteni.

A SEM-et alkalmazó vizsgálatok kialakulásának kezdete 1935-re tehető, amikor is Knoll a szekunder elektronemisszió tanulmányásával kezdett el foglalkozni [25]. Von Ardenne 1938-ban átlátszó próbatestek vizsgálatára alkalmas elektronmikroszkópot épített [26]. Zworkyn, Hillier és Snyder 1942-ben megalkotta a ma használt mikroszkópokhoz hasonló berendezését, mely aztán a kedvezőtlen jel/zaj viszony miatt nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket.

Az 1950-es években a fejlődés felgyorsult, különösen Franciaországban és Angliában. A SEM elméleti hátterét Brachet publikálta 1946-ban [27], aki – megfelelő detektor alkalmazásával – a 10 nm-es felbontást is elérhetőnek vélte. A Cambridge-i Egyetemen 1948 és 1968 között végzett fejlesztések nagymértékben hozzájárultak a SEM kereskedelmi forgalomba kerüléséhez. Az első publikáció, amely a SEM fraktográfiai alkalmazásáról szól, 1959-ben jelent meg és Tipper, Dagg és Wells nevéhez fűződik, akik az  $\alpha$ -vas hasadásos töretét tanulmányozták [28]. Két évvel később Laird és Smith SEM segítségével bebizonyította, hogy a fáradási barázdák a törés keletkezésekor alakulnak ki, ezt fénymikroszkóppal már nem lehetett látni [29]. Annak ellenére, hogy a SEM eljárás pályafutásának kezdetén nem volt túlságosan népszerű, ma az eljárás egyik legfontosabb alkalmazási területe a fraktográfia.

## Utószó

Mint a bevezetőben hangsúlyoztuk, egy történeti áttekintést csak a-bahagyni lehet, és nem befejezni. E rövid közleményben szándékosan nem érintettünk olyan nagy területeket, mint a töretfelületek, illetve általánosabban fogalmazva: egy megfigyelt kép sajátosságainak számszerű jellemzésére használt módszerek, azok elméleti alapjainak

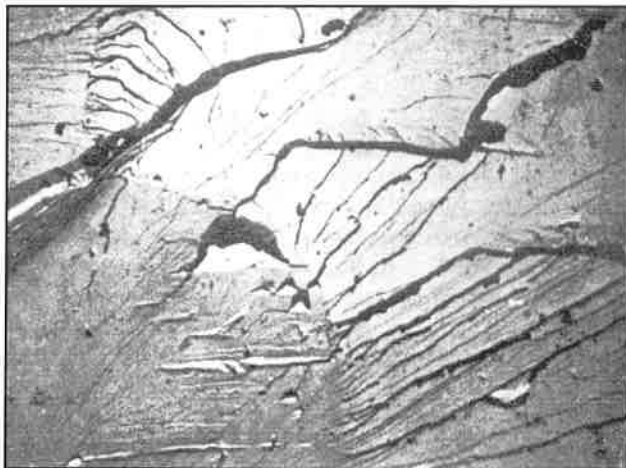
<sup>3</sup> Transmission Electron Microscope (TEM)

<sup>4</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

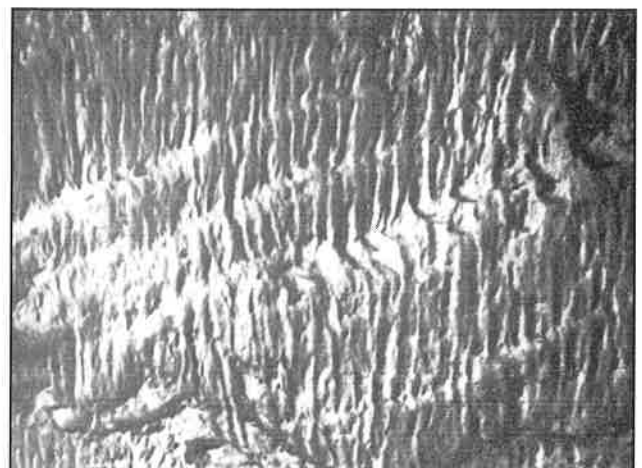
kialakulása, fejlődése. E tudományterület a sztereoográfia, sztereometria. Erről átfogó képet kaphatunk például a közelmúltban megjelent kiváló magyar nyelvű munkában, amelyet Gácsi Z. és szerzőkollektívája állított össze [30]. Ugyancsak nem terjedt ki az ismertetés a felületi sajátosságok és a repedés terjedés kapcsolatának elemzésére olyan összetett esetben, mint pl. a fátadás. E területen teljesen újszerű közelítést indított el A. Ja. Krasowsky [31] a 70-es években azzal, hogy a szembe levő felületek sztereo-párját állította elő és ezek sajátosságait vizsgálva adott magyarázatot a repedéscsúcsban lejátszódó folyamatokra, a repedés záródás, kinyílás és növekedés periódusában.

## Irodalom

- [1] C. A. Zapffe, M. Clogg, Jr.: Fractography – A New Tool for Metallurgical Research, Preprint 36, American Society for Metals, 1944.
- [2] C. S. Smith: A History of Metallography, The University of Chicago Press, 1960, p.97-127.
- [3] M.T.Gnudi, C.M.Smith: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1942. (angol nyelvű fordítása).
- [4] Lazarus Ecker: Beschreibung Allerfünemisten Minarilschen Ertz und Berckwercksarten, 1574.
- [5] Louis Savot: Discours sur les Médailles Antiques, 1627.
- [6] Mathurin Jousse: Fidelle Ouverture de l'art de Serrurier, La Fleche, 1627.
- [7] R. A. F. Réaumur: L'Art de Conventir le Fer Forgé an Ancier, et L'Art d'Adoucir le Fer Fondu, 1722.
- [8] C. F. Geoffroy: Observations sur un Métal que Résulte de L'alliage du Cuivre & du Zinc, Mém. Acad. Sci, 1725, p.57.
- [9] C. E. Gellert: Anfangsgründe der Metallurgischen Chemie, 1750.
- [10] K. F. Achard: Recherches sur les Propriétés des Alliages Métalliques, 1788.
- [11] R. Mallet: Physical Conditions Involved in the Construction of Artillery, 1856.
- [12] P. Tunner: Das Eisenhüttenwesen im Schweden, Engelhardt, 1858.
- [13] D. Kirkaldy: Results of an Experimental Inquiry into the Tensile Strength and Other Properties of Various Kinds or Wrought Iron and Steel, 1862
- [14] E. F. Dürre: Über die Constitution des Roheisens und der Werth seiner Physikalischen Eigenschaften, Zeitschrift für das Berg-, Hütten- und Salinen-wesen, Vol 16, 1868, p.70-131, 271-301.
- [15] D. K. Chernoff: Critical Review of Articles by Messrs. Lavrov and Kalakutzi on Steel and Steel Ordnance, with Original Investigations on the Same Subject, Zapiski Russkago Tekhnicheskago Obshestva, 1868, p.399-440.
- [16] D. K. Chernoff: Investigations on the Structure of Cast Steel Ingots, Zapiski Imperatorskago Tekhnicheskago Obshestva, 1879, p.1-24.
- [17] J. Percy: Metallurgy, Vol 1-4, John Murray, 1861-1880.
- [18] A. Martens: Über die Mikroskopische Untersuchung des Eisens, Z. Deut. Ing., Vol 22, 1878, p.11-18.
- [19] J. A. Brinell: Über die Texturveränderungen des Stahls bei Erhitzung und bei Abkühlung, Stahl Eisen, Vol 11, 1885, p.235-242.
- [20] B. Kirsh: Beiträge zum Studium des Fliessens, Mitt.Hlg. 1887, p.67.
- [21] R. Arpi: The Fracture test as Used for Tool Steel in Sweden, Metallurgia, Vol 11, 1935, p.123.
- [22] C. F. Tipper, A. M. Sullivan: Fracturing of Silicon-Ferrite Crystals, Trans. ASM, Vol 43, 1951, p.906-928.
- [23] E. P. Klier: A Study of Cleavage Surfaces in Ferrite, Trans. ASM, Vol 43, 1951, p.953-957.
- [24] E. Ruska, M. Knoll: The Electron Microscope, Zeitschr. f. Physik, Vol 78, 1932, p.318.
- [25] M. Knoll: Static Potential and Secondary Emission of Bodies Under Electron Irradiation, Z. Tech. Phys., Vol 11, 1935, p.467-475, (német nyelven).
- [26] M. von Ardenne: The Scanning Electron Microscope: Practical Construction, Z. Tech. Phys., Vol 19, 1938, p407-416, (német nyelven).
- [27] C. Brachet: Note on the Resolution of the Scanning Electron Microscope, Bull. L'Assoc. Tech. Mar. et Aero., No. 45, 1946, p.369-378.
- [28] C. F. Tipper, D. I. Dagg, O. C. Wells: Surface Fracture Markings on Alpha Iron Crystals, J. Iron Steel Inst., Vol 193, Oct 1959, p.133-141.
- [29] C. Laird, G. C. Smith: Crack Propagation in High Stress Fatigue, Philos. Mag., Vol 7, 1962, p.847-857.
- [30] Gácsi Z.
- [31] Krasowsky, A.Ja.



3. ábra



4. ábra

Az 1960-as évek elején készült elektromikroszkópos felvételek ( $N = 4000\times$ ) egy kis széntartalmú, ferrites acél töretéről;

3. ábra: hasadási törés ütve-hajlítás hatására  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ -on;

4. ábra: fáradási törés, fáradási barázdák 600 ezer húzó-nyomó ( $\sigma = 120 \pm 190\text{ N/mm}^2$ ) igénybevételi ciklus után

(Forrás: G. Henry, J. Plateau: Microfractography)