

## Törés és fragmentáció statisztikus fizikája

A projekt keretében a rendezetlen szerkezetű szilárdtestek törésének és fragmentációs folyamatainak elméleti leírására végeztünk kutatómunkát három fő területen: vizsgáltuk szilárdtestek lassan növekvő, továbbá konstans, és periódikus külső terhelés alatt bekövetkező úgynevezett kvázisztatikus, kúszó (creep) és fáradásos (fatigue) törését; a gyors energia betáplálás hatására létrejövő fragmentációs jelenségeket; és a repedésterjedés folyamatát dinamikus terhelés hatására mind tömbi anyagban, mind határfelületek mentén. A három részterület eredményeit külön fejezetben ismertetjük.

### 1. *Rendezetlen szerkezetű anyagok kvázisztatikus, kúszó, és fáradásos törése*

A strukturált anyagok egyik legfontosabb típusát alkotják a szálakkal megerősített kompozitok, amelyek két komponensből állnak: egy hordozó vagy mátrix anyagból és a bele ágyazott, többnyire egy másik anyagból készült szálakból. Ma már az autók, repülőgépek, űreszközök és hajók gyártásához óriási mennyiségben kerülnek felhasználásra kompozitok elsősorban előnyös tömegspecifikus tulajdonságaik miatt, azaz viszonylag kis tömeg mellett rendkívüli teherbírással rendelkeznek, s ezt a tulajdonságukat igen magas hőmérsékleteken is megtartják (úgynevezett HITECH anyagok). Az alkalmazások során, a kvázisztatikusan növekvő terhelés mellett, a szálakkal megerősített kompozitok leggyakoribb igénybevétele, hogy hosszú időn keresztül állandó nagyságú, vagy periódikusan változó külső terhelésnek vannak kitéve. Ilyen körülmények között általában időfüggő deformációt mutatnak, ami a törésükhöz vezethet. Ez az úgynevezett kúszó, illetve fáradásos törés limitálja a kompozitok életidejét és alapvetően meghatározza szerkezeti elemekben történő felhasználásukat. A rendezetlen szilárdtestek törési jelenségeinek egyik legfontosabb modellje az úgynevezett szálköteg modell, amely párhuzamos szálak kötegeként diszkretizálja a vizsgált testet. Változtatva a szálak mechanikai és törési tulajdonságait, továbbá a szálak közötti kölcsönhatás jellemzőit, a szálköteg modellek képesek realisztikus leírását adni a törés folyamatának.

A projekt keretében szálköteg modellt dolgoztunk ki fémmátrixú kompozitok creep törésének vizsgálatára figyelembe véve, hogy a törött szálak lassú relaxációja miatt a még ép szálak terhelése is időfüggővé válik. A modellben a száltöréseket követően a terhelés újraosztódik a még ép szálakon. A terhelés újraosztódása a szálak közötti kölcsönhatást definiálja, amelynek hatótávolsága alapvetően befolyásolja a törés folyamatát. Analitikus számolásokkal és számítógépes szimulációkkal kimutattuk, hogy a terhelés értékétől függően a konstans terhelésnek kitett rendszernek két lehetséges végállapota van: ha a terhelés egy kritikus érték alá esik, a rendszer csak részleges törést szenved, de megőrzi integritását és életideje végtelen lesz. A kritikus terhelés fölött véges idő alatt makroszkópikus törés következik be. Kimutattuk, hogy a két fázis közötti átmenet tulajdonságai erősen függenek a szálak közötti kölcsönhatás hatótávolságától: a repedés hegyénél koncentrálódó, lokális terhelés újraosztódás esetén a creep törés az elsőrendű, míg hosszú hatótávolságú kölcsönhatásnál a másodrendű, folytonos fázisátalakulásokkal mutat analógiát [1].

A kutatómunka következő lépéseként a szálköteg modellben analitikus és numerikus számításokkal részletesen vizsgáltuk, hogyan közelíti meg az állandó nagyságú terhelésnek kitett fémmátrixú rendszer a makroszkópikus törés kritikus időpontját. A kritikus jelenségek elméletére alapozva olyan mérhető mennyiségeket és összefüggéseket vezettünk le, amelyek segítségével a törés bekövetkezése előre jelezhető. Analitikus számolásokkal meghatároztuk a rendszer Monkman-Grant relációját, azaz megmutattuk, hogy a rendszer életideje hatványfüggvénye a deformációs sebesség minimális értékének. Igazoltuk, hogy a rendezetlen szerkezetű szilárdtestek életideje erős fluktuációkat mutat, s az életidőt univerzális lognormális eloszlás jellemzi. Felhívtuk a figyelmet arra, hogy a törés kritikus

időpontja meghatározható a minimális deformáció-sebességének időpontjából is. A törési folyamat mikroszkópikus dinamikájáról szolgáltat információt az egyedi száltörések sorozata. Kimutattuk, hogy mikroszkópikus szinten az egymást követő mikrorepedések (száltörések) közötti időtartam, az úgynevezett várakozási idő hatványfüggvény eloszlást mutat, amelynek exponense nem függ a rendszer rendezetlen szerkezetétől, de eltérő értéket vesz fel a kritikus terhelés alatt és fölött. A kritikus pont fölött a várakozási idő eloszlása exponenciális levágással rendelkezik, ahol a levágást jellemző exponens megegyezik a rendszer Monkman-Grant exponensével [2,3].

A creep és fáradásos törés egyik lehetséges mikroszkópikus oka a nemlineáris repedéshalmozódás. Ennek hatásának vizsgálatához a szálköteg modellben két törési módus versengését analizáltuk. Megmutattuk, hogy a két törési módus időskáláinak szeparációja miatt mikroszkópikus szinten száltörési lavinák jönnek létre, amelyeket a lassú módus törési sorozatai hajtanak. A lavinák és törési sorozatok méretének, továbbá a lavinák közötti várakozási időnek az eloszlása univerzális hatványfüggvény viselkedést mutat, amely felhasználható a makroszkópikus törés előrejelzésére is. Makroszkópikus skálán egy általános skálaformulát vezettünk le a különböző terheléseken kapott deformációs diagrammok leírására. Igazoltuk, hogy a modell reprodukálja a szubkritikus törés Basquin törvényét, továbbá a küszöbterhelés létrejöttét, amely alatt a rendszer életideje végtelen. Elméleti eredményeinket rendezetlen anyagokon végzett creep és fatigue kísérletek eredményeivel vetettük össze. Az aszfalt egy rendezetlen strukturájú részecske kompozit, amelyben véletlen méretű szemcséket ágyaznak egy polimer mátrixba, így kiváló példája a rendezetlen anyagoknak. Azt találtuk, hogy modellünk jóminőségű leírását adja az aszfaltra kapott mérési eredményeknek [4,5,6]. Az eredményeket bemutató egyik publikációnk a Physical Review Letters folyóiratban jelent meg [7], amelyről beszámolt a Physical Review Focus is (*What Doesn't Kill You Makes You Weaker*, Phys. Rev. Focus **21**, story 8 (2008)).

A közelmúlt egyik meglepő kísérleti eredménye, hogy a termikusan aktivált mikrorepedés keletkezés hatással lehet makroszkópikus testek törésének folyamatára. Mivel a lokális teherbíró képesség erős mikroszkópikus rendezetlensége felerősíti a termikus fluktuációk hatását, a termikus zaj akár szobahőmérsékleten is fontossá válhat. Szálköteg modellünk keretében analitikus és numerikus számításokkal megmutattuk, hogy ha a repedések mentén jelentős mechanikai feszültség koncentrálódik, akkor a termikusan aktivált repedés nukleáció nagyon erős hatással van a törési folyamat egészére. A termikus fluktuációk hatására a konstans terhelésnek kitett rendszer életideje anomális méreteffektust mutat, azaz az életidő a rendszer hatványfüggvényeként csökken, ahol az exponens értékét a terhelés és a hőmérséklet határozza meg. Bevezettük az Arrhenius törvény egy módosított formáját, amely kimerítő jellemzését adja a termikusan aktivált kúszó törés jelenségének. A száltörési lavinák méreteloszlása hatványfüggvénynek bizonyult lokális és egyenletes feszültség újraosztódással is, de az exponens értéke a terhelés és a hőmérséklet függvénye [8].

Szilárdtestek nyírási deformáció alatt bekövetkező károsodása és törése mind kísérleti, mind elméleti szempontból sokkal bonyolultabb a nyújtási és nyomási igénybevételnél. A nyírási deformáció különösen fontos szerepet játszik szilárdtestek ragasztott határfelületének felszakadásában. Két szilárdtest ragasztott határfelületének nyírás alatti viselkedésének vizsgálatára javasoltunk egy újszerű modellt, amely képes figyelembe venni, hogy a nyírott felületdarabok nemcsak nyújtási és nyomási, hanem hajlítási deformációt is szenvednek. Az irodalomban található modellekkel ellentétben a felületet nem lineárisan rugalmas „rugókkal”, hanem „rudakkal” diszkretizáltuk, ami a korábbiaknál lényegesen realisztikusabb leírást tesz lehetővé. A longitudinális deformáció és hajlítás miatt a határfelület lokális felrepedését két törési módus okozza, amelyek lehetnek függetlenek, illetve a von Mises kritérium formájában csatoltak. Analitikus számításokkal meghatároztuk a határfelület makroszkópikus válaszát, majd számítógépes szimulációkkal elemeztük a felszakadás mikroszkópikus

folyamatát változtatva a felületi „rudak” kölcsönhatásának hatótávolságát. Egyik legérdekesebb eredményként megmutattuk, hogy a komplikált deformációs állapot ellenére a nyírás alatt bekövetkező törési folyamat visszavezethető egy egyszerűbb szálköteg modellre a felületelemek rendezetlen fizikai tulajdonságait jellemző valószínűség eloszlások megfelelő transzformálásával [9,10,11].

## *2. Fragmentációs jelenségek*

Ha egy szilárdtesttel rövid idő alatt nagymennyiségű energiát közlünk, nagyszámú repedés keletkezik, amelyek mentén a szilárdtest darabokra esik szét, azaz fragmentálódik. A kváziszztatikus töréssel szemben, a fragmentáció egy egyensúlytól távoli folyamat, amely rendkívül gyorsan játszódik le, így a fragmentációhoz vezető mikroszkópikus törési események kísérletileg nem hozzáférhetőek, a megfigyelések általában néhány mennyiségnek a folyamat végállapotában előálló eloszlásaira vonatkoznak. Fragmentációs folyamatok legfontosabb jellemző mennyisége a darabok, fragmensek méreteloszlása, továbbá a framensek sebessége és a tömeg-sebesség korrelációja.

Zárt héjszerkezetek fragmentációja alapvető fontosságú az űrutazásokat veszélyeztető űrszemét problémájának kezeléséhez, mivel az űrszemét fő forrása a műholdakat pályára állító rakéták elhagyott üzemanyag tartályainak felrobbanása. Kísérleteket végeztünk a zárt héjszerkezetek fragmentációjának mélyebb megértésére. Nagysebességű digitális kamera segítségével elemeztük üres tojáshéj és üveggömbök robbanás okozta széttörésének dinamikáját. Azt találtuk, hogy zárt héjak fragmentációja egy kétlépéses folyamat: először a héj síkbeli deformációja miatt repedések keletkeznek az anyagban, amelyek nagy sebességgel terjednek. Ez a repedéskeletkezés és terjedés, s a keletkező fragmensek geometriai tulajdonságai erősen függenek a héj anyagának jellemzőitől. A héj tágulása során a keletkezett fragmensek már a síkra merőlegesen is deformálódnak, ami egy másodlagos fragmentációs folyamathoz vezet. A kísérletek azt mutatták, hogy a fragmensek alakját az anyagfüggő elsődleges repedési mechanizmus határozza meg. Nagysebességgel, elágazások nélkül terjedő repedések esetén a fragmensek alakja önaffin tulajdonságokat mutat, míg erősen elágazó, rendezetlen repedések mellett izotróp fragmensek keletkeznek. A vázolt fragmentációs mechanizmusra építve javasoltunk egy fragmentációs modellt, amellyel kielégítő pontossággal reprodukáltuk a kísérleti eredményeket [12,13,14,15].

Nagyon fontos eredményként kimutattuk, hogy a fragmentációs jelenségekre korábban ismert skálatörvényeken túlmenően a fragmensek alakja is skálaviselkedést mutat. A fragmensalak jellemzésére bevezettünk egy alakparamétert és meghatároztuk annak eloszlásfüggvényét. Megmutattuk, hogy a robbanáskor fellépő elsődleges repedési mechanizmus határozza meg a folyamat végállapotában a fragmensek alakját [15]. Számítógépes szimulációkkal vizsgáltuk fragmensek tömegének és sebességének korrelációját. Azt találtuk, hogy kis fragmensek tömege és sebessége független, míg a nagy tömegű fragmensek sebessége a tömeg hatványfüggvényeként csökken. A két rezsím közötti átmenet egy jóldefiniált tömegértéknél következik be [16].

Tömbi anyagok fragmentációs jelenségeinek mélyebb megértéséhez kidolgoztunk egy háromdimenziós diszkrét elem modellt, amely realiztikus leírását adja a rideg, rendezetlen anyagok törési folyamatának. A modell keretében analitikus számításokkal és számítógépes szimulációkkal elemeztük egy gömb alakú test ütközését egy kemény fallal. Feltártuk az úgynevezett meridionális repedések keletkezési mechanizmusát, majd elemeztük a szegmentációs repedések létrejöttét. A Mott féle megközelítésre alapozva sikerült meghatározni a fő repedések térbeli eloszlását is. A fragmensek tömegeloszlása a kis fragmensek tartományán hatványfüggvénynek bizonyult, míg a nagy fragmensekre Weibull eloszlást kaptunk. Megmutattuk, hogy a hatványfüggvény eloszlás exponense nem függ a mikroszkópikus anyagi jellemzőktől, azt elsősorban az ütközéskor kialakuló feszültségtér határozza meg [17].

### *3. Dinamikus repedésterjedés, mágneses zaj dinamikus törésben, repedési zaj struktúrája*

A dinamikus törés jelensége átmenetet képez a kvázisztatikus törés és a fragmentáció között. Dinamikus törés akkor jön létre, ha egy testtel rövid idő alatt nagymennyiségű energiát közlünk, de a határfeltételek biztosítják, hogy csak egyetlen repedés keletkezik, amely nagy sebességgel terjed. A repedés megindulásának és terjedésének dinamikája, továbbá a repedés frontjának és a hátrahagyott törési felületnek a geometriai struktúrája (durvasága) a statisztikus fizika számára is érdekes problémákat vet fel. A projekt keretében elsősorban a repedési zaj jellemzőinek megértésére koncentráltunk, mert ez az elsődleges információ forrás a törés mikroszkópikus dinamikájáról.

Ferromágneses anyagok dinamikus törését elektromos és mágneses zaj emissziója kíséri, amely értékes információt szolgáltat a repedés mikroszkópikus folyamatáról. Az elektromos és mágneses zaj vizsgálatához feldolgoztuk az együttműködő partnereinktől (Bay Zoltán Intézet, Miskolc) kapott mérési eredményeket. Kimutattuk, hogy az elektromos zajspektrum szerkezete erősen függ a mintadarab anyagának törésmechanikai jellemzőitől és a terhelés sebességétől: kis ütési sebességeknél a zajspektrum csúcsainak jellemző mennyiségei exponenciális, míg nagy sebességnél hatványfüggvény eloszlást mutatnak. A mágneses zajt jellemző valószínűség eloszlások hatványfüggvény viselkedést mutatnak, ahol az exponens értéke függ a törés módjától: a rideg törést jellemző exponensek kisebbek a szívós törést kísérő repedési zaj exponenseitől.

Mivel az elektromágneses jelek a repedés haladása és kinyílása közben keletkeznek, a repedésterjedés értelmezésére kidolgoztunk egy sztochasztikus határfelületi modellt, amelyben a rendezetlenség mennyiségének változtatásával rideg-szívós átmenetet tudunk előidézni. A határfelületi modell a kompozitok törésének vizsgálatára korábban kidolgozott szálköteg modellünk egy kiterjesztése nem homogén feszültségtér esetére, amellyel feszültségkontrollált kvázisztatikus és deformáció kontrollált dinamikus terhelést is tudunk vizsgálni. A modellben a hárompontos hajlításnak kitett próbatestet két darabra bontjuk, s a darabok közötti határfelületet diszkrétizáljuk, ahol a nagysebességgel terjedő repedés keletkezik. A diszkrétizációhoz használt szálköteg modellben a száltörési lavinák megfeleltethetőek az akusztikus spektrum elemi eseményeinek, ezért a modellszámolások segítik mért zajspektrumok értelmezését. A kísérletek vizsgálatára történő alkalmazás mellett elvégeztük a modell általános elemzését is. A modellben a repedési zaj oka, hogy a repedés hegye nem „simán” halad előre, hanem korrelált ugrásokat végez, amelyek méretének eloszlása hatványfüggvény viselkedést mutat. A modellben rideg-szívós átmenetet előidézve egy crossover lép fel, ahol a rideg törést jellemző exponens szignifikánsan kisebbnek bizonyult a szívós törésénél. Elméleti eredményeink nagyon jól egyeznek a kísérleti eredményekkel [18,19,20,21].

A rideg törést mutató szilárdtestek szálköteg modelljeiben a szálak lineárisan rugalmas viselkedést mutatnak egy törési küszöbig, ahol eltörnek. A törési küszöb egy véletlen változó, amelyet egy valószínűség eloszlás jellemez. A szálköteg modellben kimutattuk, hogy a törési küszöbök alsó levágását (minimális törési küszöb) a makroszkópikus törés kritikus pontjához közelítve a száltörési lavinák méreteloszlása egy átcsapási jelenséget mutat. A kritikus teherbíró képesség közelében keletkezett lavinák méreteloszlása univerzális hatványfüggvény viselkedést mutat, ahol az exponens értéke  $3/2$ , függetlenül a rendezetlenség eloszlásától és a terhelés újraosztódás hatótávolságától. Felhívtuk a figyelmet arra, hogy az eredmény felhasználható a közelgő katasztrófális törés előrejelzésére, ha a lavina eloszlást a terhelés különböző tartományain értékeljük ki [22,23].

A gyakorlatban használt anyagok legtöbbször mikroszkópikus szinten nagyon erős inhomogenitást mutat. Ezt a tulajdonságot figyelembe vehetjük a szálköteg modellben úgy, hogy nagyon eltérő teherbíró képességgel rendelkező szálak halmazait keverjük össze. Erős és gyenge szálak keverékét tartalmazó köteget vizsgálva analitikus számolásokkal megmutattuk, hogy egyenletes feszültségeloszlás esetén a keverék száltörési lavináinak méreteloszlása hatványfüggvény viselkedést mutat. A keverési aránynak létezik egy kritikus értéke, amelyet átlépve a hatványfüggvény exponense hirtelen megváltozik,  $5/2$ -ről  $9/4$ -re csökken. Ez a jelenség a repedési zaj egy újszerű univerzalitási osztályát definiálja: a kisebb  $9/4$  zajexponenshez történő átmenet minden olyan rendszerben megfigyelhető, amelyek erős szálak nélküli konstitutív görbéje rendelkezik kvadratikusan maximummal és inflexiós ponttal. A kritikus keverési arányhoz felülről közeledve a karakterisztikus lavinaméret hatványfüggvény divergenciát mutat univerzális  $3/2$  levágási exponenssel. Az eredményeknek gyakorlati alkalmazásai lehetségesek kompozit anyagok mért akusztikus zajspektrumának elemzésénél [24].

1. R. C. Hidalgo, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Slow relaxation of fiber composites, variable range of interaction approach*, Physica A **347**, 402 (2005).
2. K. Kovács, S. Nagy, R. C. Hidalgo, F. Kun, H. J. Herrmann, and I. Pagonabarraga, *Critical ruptures in a bundle of slowly relaxing fibers*, Physical Review E **77**, 036102 (2008).
3. F. Kun, F. Raischel, R. C. Hidalgo, and H. J. Herrmann, *Extension of Fiber Bundle Models for Creep Rupture and Interface Failure*, International Journal of Fracture **140**, 243 (2006).
4. F. Kun, M.H.A.S. Costa, R.N. Costa Filho, J. S. Andrade Jr., S. Zapperi, and H. J. Herrmann, *Fatigue fracture of disordered materials*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P02003 (2007).
5. H. Carmona, F. Kun, J. S. Andrade Jr., and H. J. Herrmann, *Computer simulation of fatigue under diametrical compression*, Physical Review E **75**, 046115 (2007).
6. F. Kun, Z. Halász, J. S. Andrade Jr., and H. J. Herrmann, *Crackling noise in the fatigue fracture of heterogeneous materials*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P02003 (2009).
7. F. Kun, H. A. Carmona, J. S. Andrade Jr., and H. J. Herrmann, *Universality behind Basquin's law of fatigue*, Physical Review Letters **100**, 094301 (2008).
8. N. Yoshioka, F. Kun, and N. Ito, *Size scaling and bursting activity in thermally activated breakdown of fiber bundles*, Physical Review Letters **101**, 145502 (2008).
9. F. Raischel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Simple beam model for the shear failure of interfaces*, Physical Review E **72**, 046126 (2005).
10. F. Raischel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Failure process of a bundle of plastic fibers*, Physical Review E **73**, 066101 (2006).
11. F. Raischel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Continuous damage fiberbundle model for strongly disordered materials*, Physical Review E **77**, 046102 (2008).
12. F. K. Wittel, F. Kun, H. J. Herrmann, and B.-H. Kröplin, *Study on the fragmentation of shells*, International Journal of Fracture **140**, 255 (2006).
13. H. J. Herrmann, F. K. Wittel, and F. Kun, *Fragmentation*, Physica A **371**, 59 (2006).
14. B. Behera, F. Kun, S. McNamara, and H. J. Herrmann, *Fragmentation of a circular disc by impact on a frictionless plate*, Journal of Physics-Condensed Matter **17**, 2439 (2005).
15. F. Kun, F. K. Wittel, H. J. Herrmann, B.-H. Kröplin, and K.-J. Maloy, *Scaling behaviour of fragment shapes*, Physical Review Letters **96**, 025504 (2006).
16. K. Kovács and F. Kun, *Mass-velocity correlation in impact fragmentation*, in Proceedings of Multiscale Materials Modelling (MMM2006), International Conference, September 18-22, Freiburg, Germany, pp. 324-327.

17. H. A. Carmona, F. Wittel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Fragmentation processes in impact of spheres*, Physical Review E **77**, 051302 (2008).
18. S. Nagy, I. Varga, and F. Kun, *A stochastic interface model for the fracture of bars*, in Proceedings of 16<sup>th</sup> European Conference on Fracture, July 3-7 2006, Greece.
19. F. Kun and S. Nagy, *Damage process of a fiber bundle with a strain gradient*, Physical Review E **77**, 016608 (2008).
20. F. Kun, F. Raischel, R. C. Hidalgo, and H. J. Herrmann, *Extensions of fiber bundle models, Modelling Critical and Catastrophic Phenomena in Geoscience: A Statistical Physics Approach*, Lecture Notes in Physics (LNP) **705**, Springer Verlag, Berlin (2006), pp. 57-92.
21. Z. Halász and F. Kun, *Fiber bundle model with stick-slip dynamics*, in Proceedings of Multiscale Materials Modelling (MMM2006), International Conference, September 18-22, Freiburg, Germany, pp. 321-323.
22. F. Raischel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Local load sharing fiber bundles with a lower cutoff of strength disorder*, Physical Review E **74**, 035104(R) (2006).
23. F. Raischel, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Fiber Bundle Models for Composite Materials*, in Proceedings of Conference on Damage in Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Testing, 18-20 September 2006, Stuttgart, Germany.
24. R. C. Hidalgo, K. Kovacs, I. Pagonabarraga, and F. Kun, *Universality class of fiber bundles with strong heterogeneities*, Europhysics Letters **81**, 54005 (2008).