

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

RENDEZETLEN ANYAGOK TÖRÉSE

FRACTURE OF HETEROGENEOUS MATERIALS

Danku Zsuzsa

Témavezető / Supervisor
Dr. Kun Ferenc



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

UNIVERSITY OF DEBRECEN
PhD School in Physics

Debrecen, 2017

Motivációk

A heterogén mikroszerkezetű anyagok különböző méretskálán tartalmazhatnak rendezetlenséget (rácshibák, határfelületek, mikrorepedések), ami alapvetően befolyásolja mechanikai válaszukat és tönkremenetelük, törésük folyamatát: a szabályos, kristályos struktúrához képest a rendezetlen mikroszerkezet alacsonyabb makroszkopikus teherbírást eredményez. Azonos anyagból, azonos körülmények között előállított testek teherbíró képessége eltérőnek adódhat, ezért a heterogén anyagok teherbírását csak egy valószínűség eloszlással lehet kimerítően jellemezni. Ezen túlmenően a testek méretének növelésével teherbíró képességük tipikusan csökken. A látszólagos negatív hatások mellett a heterogenitás jelenlétének számos fontos pozitív következménye is van: heterogén anyagokban előfordulhat, hogy egy repedés egy lokálisan erősebb tartományba behatolva megáll. Ennek következtében a törés nem hirtelen, katasztrófa szerűen következik be, hanem egy fokozatos repedezés és károsodás halmozódás előzi meg. A repedések keletkezése és terjedése rugalmas hullámok keltésével jár, ami megfelelő érzékelőkkel repedési zaj formájában regisztrálható. A repedési zaj mérésének segítségével terhelés alatt álló heterogén anyagok károsodásának állapota minősíthető és felmerül annak lehetősége, hogy törésüket, tönkremenetelüket megjósoljuk.

A műszaki alkalmazások mellett a törési jelenségek nagyon fontos szerepet játszanak a természeti katasztrófák létrejöttében is: a földcsuszamlások, hó- és kőlavínák, valamint földrengések hátterében nyírás alatt létrejövő és terjedő repedések állnak. A repedési zaj mérési módszereit terepen alkalmazva a katasztrófáknak ma már számos előjele azonosítható.

Az elmúlt évtizedben a szakterületen végzett kutatások egyik legfontosabb kihívása lett a heterogén anyagok különböző mechanikai terhelések alatt bekövetkező törési folyamatainak megértése, majd a repedések dinamikája alapján a katasztrófát megelőző gyorsulási fázis korai előjeleinek azonosítása és a katasztrófa előrejelzési lehetőségeinek feltárása. Doktori munkám keretében ezekbe a kutatásokba kapcsolódtam be. Elsősorban a statisztikus fizika, a komplex rendszerek fizikája és a fizikai anyagtudomány megközelítési módszereire támaszkodva a kutatás frontvonalának legfontosabb kérdéseit vizsgáltam.

Célkitűzések

Doktori munkám során a heterogén anyagok két olyan törési jelenségét vizsgáltam, melyek gyakorlati jelentőségük miatt intenzív kutatás tárgyává váltak. Az iparban felhasznált szerkezeti elemek tervezésénél arra törekednek, hogy a felhasználásuk során őket érő terhelés lényegesen kisebb legyen a teherbíró képességüknél. Ilyen szubkritikus terhelés hatására az anyagok deformációja általában az időnek monoton növekvő függvénye és megfelelően magas terhelés esetén véges idő alatt törnek el. A jelenségnek két típusát különböztetjük meg: időben konstans terhelés esetén kúszó törésről, periodikus terhelés esetén kifáradásról beszélünk. Kutatómunkám egyik fő területe a heterogén anyagok kúszó törésének vizsgálata volt. Az általam vizsgált anyagok esetében egy lassú károsodási folyamat (termikusan aktivált degradáció, korróziós repedezés) a lokális feszültség növekedését okozza. A növekvő lokális feszültség koncentráció miatt az anyagban repedések keletkeznek. A repedési lavinák sorozatán keresztül gyorsuló károsodási folyamat végül makroszkopikus töréshez vezet. Műszaki jelentősége mellett a kúszó törés számos természeti katasztrófa okozója lehet, ezért a törési folyamat megértése közelebb vihet katasztrófák előrejelzéséhez is.

Vizsgálataim során elsősorban a kúszó törés időfejlődésére és mikroszkopikus dinamikájára koncentráltam. Fő célom volt annak tisztázása, hogyan közelíti meg a kúszó rendszer a makroszkopikus törés kritikus pontját. Kvantitatív jellemzését akartam adni a repedési zaj időfejlődésének elsősorban azzal a céllal, hogy a makroszkopikus törés korai előjeleit azonosítsam, amelyeket akár előrejelzésre is fel lehet használni. A repedési zaj kritikus exponenseinek mért értékei szórást mutatnak a szakirodalomban, ami megnehezíti összevetésüket az elméleti eredményekkel. Szimulált adatok részletes feldolgozásával tisztázni akartam, hogy az adatgyűjtő rendszerek korlátai, valamint a kísérletek kiértékelésénél használt eljárások sajátosságai befolyásolhatják-e az exponensek értékét.

Repedési események sokaságának vizsgálata mellett, egyedi repedési lavinák időfejlődését is elemeztem. Fel akartam tárni, hogy milyen információt hordoz a repedési események átlagos jelalakja, illetve annak milyen kapcsolata van a terjedő repedési front és a lavinák térbeli viszonyával. Egyedi lavinák geometriai struktúrája esetén elsősorban a fraktalitás megjelenési lehetőségeire koncentráltam.

Kutatómunkám fontos célkitűzése volt annak tisztázása, hogyan befolyásolja a rendezetlenség mértéke a heterogén anyagok törési folyamatát. A szakirodalomban megmutatták, hogy a heterogén anyagok törésének kvalitatív jellemzői robusztusak, azaz a rendezetlenséget leíró valószínűség eloszlások egy igen széles osztályára ugyanazok. Analitikus számolásokkal és számítógépes szimulációkkal fel akartam tárni az univerzalitási osztály határait úgy, hogy az extrém nagy rendezetlenség irányából indulva vizsgáltam egy diszkrét sztochasztikus modell makroszkopikus válaszát és mikroszkopikus dinamikáját lassan növekvő terhelés alatt.

Vizsgálati módszerek

A heterogén anyagok törését nagyszámú repedés keletkezése és bonyolult kölcsönhatása jellemzi. Ez az oka annak, hogy a mérnöki gyakorlatban használt, véges elem módszerre épülő kontinuum modellek nem alkalmasak az általam vizsgált jelenségek leírására. Olyan módszert választottam, amely egyszerre képes megragadni az anyag rendezetlenségét, a mechanikai feszültségtér részleteit és a releváns kölcsönhatásokat.

Kutatómunkám során a heterogén anyagok kvázisztochasztikus és kúszó törésének vizsgálatára az úgynevezett szálköteg modellt használtam, amely az anyagot párhuzamos szálak kötegeként diszkretizálja¹. A vizsgált rendszer egyedi sajátosságait a szálak mechanikai válaszában, törési és reológiai jellemzőinek, továbbá a kölcsönhatások természetének és hatótávolságának változtatásával lehet befolyásolni. A modell átlagtér határesetében, amelyet a száltöréseket követő egyenletes terhelés újraosztódás valósít meg, a rendszer számos jellemzőjét analitikus eszközökkel is meg tudtam határozni. Hatékony szimulációs eljárásokat fejlesztettem ki, amelyekkel egyenletes terhelés újraosztódással akár 10^7 szálból álló rendszereket is tudtam vizsgálni. Lokális terhelés újraosztódás mellett négyzetrácson $L = 3001$ rácsméretig tudtam szimulációkat végezni. A számítógépes szimulációkhoz erősen támaszkodtam a debreceni, budapesti és a szegedi szuperszámítógépekre.

Elméleti eredményeimet igyekeztem összevetni laboratóriumi kísérletekkel, illetve terepi mérések eredményeivel. Több esetben kísérleti eredmények

¹S. Pradhan, A. Hansen, B. K. Chakrabarti, Rev. Mod. Phys. **82**, 499 (2010).

motiválták az elméleti vizsgálataimat. Doktori munkám során lehetőség nyílt bekapcsolódni egy kísérleti csoporttal való együttműködésbe, amelynek keretében dinamikus törésben mért mágneses zaj adatait kaptam meg feldolgozásra. Az adatfeldolgozás eredményeit saját elméleti számolásaimmal vettem össze.

Új tudományos eredmények

1. A kúszó törés szálköteg modelljének² keretében részletesen vizsgáltam a konstans terhelésnek kitett rendszer időfejlődését. Megmutattam, hogy már alacsony terhelésen, amikor a lassú károsodási mechanizmus dominálja a törési folyamatot, létrejön a kritikus viselkedés, azaz a rendszer jellemző mennyiségei a kritikus ponttól mért idő hatványfüggvényei. Ebben a határesetben a törési folyamat érzékenynek bizonyult a lokális feszültségtér fluktuációira [P2,KP1]. Magasabb terhelésen száltörési lavinák jönnek létre, amelyeket a modellben a repedési zaj eseményeként azonosítottam. Analitikus számolásokkal és számítógépes szimulációval elemeztem, hogyan változnak a repedési lavinák statisztikus jellemzői, amint a rendszer megközelíti a makroszkopikus törés kritikus pontját.

a) A kísérletekkel összhangban a modellszámolások alapján megállapítottam, hogy a katasztrofális töréshez közeledve a kúszó törés gyorsul, amit a repedési lavinák növekvő mérete és a köztük eltelt várakozási idők csökkenése jelez. Megmutattam, hogy a gyorsulási folyamat leírható az úgynevezett (inverz) Omori törvénnyel: az időegységre eső repedési események átlagos száma, azaz az eseményráta, a makroszkopikus töréstől mért idő hatványfüggvényeként növekszik, majd a kritikus pont közelében telítődik. Földrengések esetén az Omori törvény a nagy rengéseket követő relaxációt írja le, de előrengésekben is kimutatták már³. Az eredményem jelentőségét az adja, hogy a kúszó törést kísérő repedési lavinák a katasztrofális törés "előrengéseinek" tekinthetők

²F. Kun, H. A. Carmona, J. S. Andrade Jr., and H. J. Herrmann, *Universality behind Basquin's law of fatigue*, Phys. Rev. Lett. **100**, 094301 (2008).

³J. J. McGuire, M. S. Boettcher, and T. H. Jordan, *Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on east pacific rise transform faults*, Nature **434**, 457 (2005)

[P3,EP1,E2-3,E5].

- b) Az Omori törvényből kiindulva megmutattam, hogy a repedési események idősora jól leírható egy inhomogén Poisson folyamatként, amit a növekvő egy szátra eső terhelés és az anyag rendezetlensége kontrollál. Ennek fontos következménye, hogy a törési folyamatokban a repedési események közötti várakozási idő hatványfüggvény eloszlása nem feltétlenül utal korrelációk jelenlétére, mint azt a szakirodalomban feltételezik, hanem okozhatja egyszerűen a folyamat globális gyorsulása is [P3,EP1,E2-3,E5].
- c) A számítógépes szimulációval kapott eredmények numerikus feldolgozása során megvizsgáltam, hogyan befolyásolják a repedési zaj statisztikus jellemzőit a laboratóriumi és terepi kísérletekben használt mérőrendszerek korlátai. Megmutattam, hogy a detektorok holtideje által okozott esemény halmozódás következtében a lavinaméret eloszlásának hatványfüggvény exponense csökken. A véges detektálási küszöb megőrzi az idősor Poisson jellegét, viszont erősen befolyásolja mind az Omori exponens, mind pedig a várakozási idő eloszlását jellemző exponens értékét. Javasoltam, hogy ezek a hatások magyarázhatják a laboratóriumi kísérletek és az elméleti vizsgálatok, vagy a különböző kísérleti csoportok eredményei közötti eltéréseket. Kimutattam, hogy ha a repedési zaj statisztikájának vizsgálatát a kritikus pont környezetére korlátozzuk, a lavinaméret eloszlás átmenetet mutat egy alacsonyabb exponenshez, ami felveti az előrejelzés lehetőségét [P3,E2-3,E5].
- d) A kúszó rendszer időfejlődésének részletesebb elemzésére a rekord statisztikát alkalmaztam. A repedési lavinák méretének idősorában rekordként azonosítottam azokat a lavinákat, amelyek az adott eseményig a legnagyobbak voltak, majd a rekordokat a méretükkel és az életidejükkel jellemeztem. Annak feltárására, hogy a rekord statisztika milyen információt szolgáltat a kritikus pont felé fejlődő rendszerről, eredményeimet a független, azonos eloszlású véletlen változók (Independent Identically Distributed, IID) idősorának rekord statisztikájával vetettem össze.

Az egyenletes terhelés újraosztódással végzett vizsgálataim megmutatták, hogy a rekordok méretét hatványfüggvény eloszlás jellemzi, amelynek exponense független a külső terheléstől és szignifikánsan kisebb a teljes eseménysor exponensétől. A rekordok életidejének eloszlása szintén hatványfüggvénynek bizonyult az IID-étől eltérő exponenssel. A rekordok időfejlődésének elemzésével megállapítottam, hogy a törési folyamat jelentős részében a rekordok átlagos darabszáma az események számának logaritmusával növekszik, hasonlóan az IID esethez, a kritikus pont közelében azonban átmenet történik egy sokkal gyorsabb, exponenciális növekedéshez. A rekordok átlagos életideje a törési folyamat elején növekvő függvénye a rekord sorszámnak, azonban létezik egy karakterisztikus rekord sorszám, amelynél az életidő csökkenni kezd. A karakterisztikus rekord sorszámhoz tartozó esemény sorszám jól egyezik az exponenciális gyorsulás kezdetével. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a törési folyamat elejét a szilárdtest rendezetlensége dominálja, ami az IID-éhez hasonló rekord statisztikát okoz, míg a karakterisztikus rekord sorszámon túl már az egyedi száltörések által okozott terhelés növekmények hajtják a rendszert, ami a gyorsulást okozza. A karakterisztikus rekord sorszám lehetőséget ad a gyorsulási fázis korai azonosítására [P5,EP3,PT3,E4,E7].

2. A szálköteg modell keretében lokális terhelés újraosztódást alkalmazva vizsgáltam egyetlen repedés növekedésének dinamikáját. A repedési zaj forrását adó száltörési lavinák ilyenkor a terjedő repedési front lokális megugrásainak tekinthetők. Számítógépes szimulációk alapján megmutattam, hogy az egyedi lavinák térbeli és időbeli fejlődése is értékes információt tartalmaz a rendszer dinamikájáról.
 - a) A lavinákon belül allavinákat azonosítottam, amelyek száma alapján definiáltam a lavinák időtartamát. Mind a lavinák mérete, mind az időtartama hatványfüggvény eloszlással írható le, de az exponensek más értéket vesznek fel egy karakterisztikus terhelés érték alatt és fölött. Azonos időtartamú lavinák allavináinak méretét átlagolva meghatároztam az átlagos lavina időprofil,

amelynek függvényalakja egy jobboldali aszimmetriával rendelkező fordított parabolával írható le. Egyenletes terhelés újraosztódás esetén a lavinaprofil szimmetrikus parabolának bizonyult. Számolásaim alapján arra a fontos megállapításra jutottam, hogy az egyedi lavinák átlagos időprofiljának szimmetria tulajdonságait a terhelés újraosztódásának hatótávolsága határozza meg [P1,P4,EP2,PT1-2, E1-3,E5].

b) A lavinaprofilra kapott eredményeim jó egyezést mutatnak a szakirodalomban kvázisztatikus repedés növekedés esetén meghatározott lavina profilokkal, amelyeket nagysebességű kamerával, közvetlen optikai megfigyeléssel nyertek⁴. A kísérletekben két plexi lap között állítottak elő síkban haladó repedési frontot, ami megkönnyítette az egyedi lavinák nagy pontossággal történő azonosítását. Az egyezés alapján elméleti eredményeim felhasználhatóak anyagvizsgálati módszerek fejlesztésére is.

3. Egy kísérleti csoporttal együttműködve analizáltam acél dinamikus törése során mért mágneses emissziós zaj statisztikáját és meghatároztam a közel azonos időtartamú egyedi repedési események átlagos lavina profilját is. Nagyon jó egyezést kaptam az elméleti eredményeimmel, azaz a jelalakok jobboldali aszimmetriával rendelkeznek, ami a feszültség lokalizációjára utal a repedési fronton [P6,E6].

4. Lokális terhelés újraosztódás esetén egy lavinában eltört szálak térben összefüggő halmazt alkotnak, ami lehetővé tette, hogy megvizsgáljam a repedési lavinák, azaz a modell mikrorepedéseinek térbeli szerkezetét is. Megmutattam, hogy a repedési lavinák kompakt, térkitöltő objektumok, térbeli szerkezetüket tekintve nem rendelkeznek fraktál tulajdonságokkal. Mivel a lavinák egy heterogén környezetben fejlődnek, a kerületük nem sima, hanem völgyekkel és kiszögelésekkel erősen tagolt. Vizsgálataim feltárták, hogy a lavinák kerülete a girációs sugár hatványfüggvényeként növekszik, ezért a lavina frontja fraktál szerkezetű. A fraktáldimenzió értéke 1.25, függetlennek bizonyult a modell paramétereitől, nagy rendezetlenség esetén univerzális. A fraktál-

⁴L. Laurson et al., *Evolution of the average avalanche shape with the universality class*, Nature Communications **4**, 2927 (2013).

dimenzió értéke és a növekedés dinamikájának hasonlósága alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a repedési lavinák az Ábeli homokdomb lavinákkal együtt a hurokmentesített önelkerülő bolyongás univerzalitási osztályába tartoznak⁵ [P7].

5. Analitikus számolásokkal és számítógépes szimulációkkal vizsgáltam a rendezetlenség mennyiségének szerepét a kvázisztatikusan növekvő terhelés alatt lejátszódó törés folyamatában. A klasszikus szálköteg modellben a szálak véletlenszerű teherbíró képességét hatványfüggvény eloszlással állítottam elő egy végtelen tartományon. A rendezetlenség mennyiségét a hatványfüggvény exponensének értékével kontrollálva részletesen elemeztem a törési folyamat makroszkopikus és mikroszkopikus jellemzőit.

- a) Egyenletes terhelés újraosztást alkalmazva megállapítottam, hogy kis exponensek (nagy rendezetlenség) esetén a rendszer makroszkopikus konstitutív görbéje a szokásos viselkedéstől eltérően monoton növekvő, nem rendelkezik maximummal. Ennek következtében nem jöhet létre a rendszerben katasztrófális törés, azaz stabil repedési lavinák sorozatán keresztül jut el a rendszer az utolsó szál eltöréséig. Analitikus számolásokkal megmutattam, hogy a rendszer makroszkopikus teherbíró képességét a törési küszöbök extrém rendstatisztikája határozza meg, ami a rendszermérettel növekvő teherbírást eredményez. A repedési lavinák méreteloszlása hatványfüggvénynek bizonyult, univerzális exponenssel, amelynek értéke szignifikánsan kisebb a szálkötegekre kis és közepes rendezetlenség mellett kapott átlagtér exponenstől. Az analitikus és numerikus eredményeim alapján felhívtam a figyelmet arra, hogy a nagy rendezetlenség határesetében a rendszer fejlődése teljesen homogén módon történik, ezért nincs lehetőség a makroszkopikus törés előrejelzésére [P8,E8].
- b) A törési küszöbök eloszlásának exponensét növelve egy kritikus exponensértéknél átmenet következik be a stabil lavinákkal jellemzett kvázi-rideg viselkedésből a tökéletesen rideg fázisba, ahol

⁵S. N. Majumdar, *Exact fractal dimension of the loop-erased self-avoiding walk in two dimensions*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2329 (1992).

már az első száltörés katasztrofális törést okoz. Végesméret skálázást alkalmazva megmutattam, hogy a kvázi-rideg rideg átmenet egy folytonos fázisátalakulásként játszódik le és meghatároztam az átmenet kritikus exponenseit is. Arra a következtetésre jutottam, hogy a rendezetlenség kontrollált kvázi-rideg rideg fázisátalakulás egy önálló univerzalitási osztályt definiál a törési jelenségeken belül [P8,E8].

- c) A lokális terhelés újraosztódás határesetét számítógépes szimulációkkal vizsgáltam. Kvalitatív egyezést találtam az egyenletes újraosztással kapott eredményekkel, kisebb eltérés csak a kritikus exponensek számértékében tapasztalható a két határeset között. Azt a következtetést vontam le, hogy a törési küszöbök eloszlásának hatványfüggvény lecsengése olyan mértékű rendezetlenséget jelent, hogy még a legerősebb feszültség lokalizáció esetén is dominálja a rendszer viselkedését. Ezt megerősíti a törött szálak klasztereinek viselkedése is, ami jó egyezést mutat a rácspont perkolációval [P8].

A értekezés elkészültéhez a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt járult hozzá. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Motivations

Heterogeneous materials contain disorder on several length scales (lattice defects, internal surfaces, micro-cracks), which fundamentally influence their mechanical response and failure: compared to regular, crystalline structures, the heterogeneous microstructure leads to a lower macroscopic strength. Even if they are produced from the same material and under the same conditions, samples might have different strength, so the strength of heterogeneous materials can be fully characterized only by a probability distribution. Beyond that, increasing the size of samples their mechanical strength typically decreases. However, besides the seemingly negative effects, the presence of heterogeneity has also several important positive consequences: it is possible in heterogeneous materials that a propagating crack stops when it enters into a locally stronger domain. It has the consequence that failure does not occur suddenly, catastrophically, but it is preceded by gradual cracking and damage accumulation. Crack formation and propagation is accompanied by the generation of elastic waves which can be registered by sensitive detectors in the form of crackling noise. Through the measurement of crackling noise, the damage state of heterogeneous materials under load can be assessed and it raises the possibility of forecasting their impending failure.

Besides engineering applications, fracture phenomena play also a very important role for natural catastrophes: crack formation and propagation under shear often underlies the emergence of landslides, snow and stone avalanches and earthquakes. Using crackling noise measurements under field conditions, recently, several signatures of impending catastrophic events have been identified.

In recent decades, the understanding of fracture processes of heterogeneous materials under different mechanical loadings, the identification of the early signatures of the accelerating phase preceding catastrophes from the dynamics of cracks, and the exploration of the possibilities of forecasting of catastrophes became the most important challenges of this research field. During my PhD studies I joined this ongoing research. Relying mainly on the approaches of statistical physics, complex systems and material science I studied the most important questions of the frontiers of the research field.

Objectives

During my PhD research I investigated two fracture phenomena of heterogeneous materials, which became the subject of intensive research due to their practical significance. Structural components of engineering constructions are designed such that the load they hold should be significantly lower than their mechanical strength. Under such subcritical loading the deformation of materials usually increases monotonically as a function of time and under sufficiently high load breaking occurs in a finite time. Two types of subcritical fracture are distinguished: In case of constant loading this phenomena is called creep rupture while for periodic loading one speaks about fatigue fracture. One of the main areas of my research was the study of the creep rupture of heterogeneous materials. In the materials I studied, a slow damaging mechanism (thermally activated degradation, cracking due to corrosion) results in an increase of the local load of material elements which then gives rise to crack formation. The damage process accelerates through these cracking avalanches which eventually leads to macroscopic failure. Besides its engineering significance, creep rupture can lead to natural catastrophes as well, so the understanding of the fracture process can take us closer also to the forecasting of catastrophes.

During my research I mainly concentrated on the time evolution and microscopic dynamics of creep rupture. My main aim was to clarify how the system approaches the critical point of macroscopic failure. I wanted to give a quantitative characterization of crackling noise in order to identify such early signatures of macroscopic failure which may be exploited for forecasting. The measured values of the critical exponents of crackling noise scatter in the literature which makes it difficult to compare them to theoretical results. By means of a detailed evaluation of simulated data I wanted to clarify how the limitations of data accumulating systems and of the evaluation methods used in experiments influence the values of the exponents.

Besides the ensemble of cracking events, I also analyzed the time evolution of single cracking bursts. I wanted to explore the information coded in the average pulse shape of the cracking events and its connection with the spatial relation of the propagating crack front and bursts. In case of the geometrical structure of single bursts I mainly concentrated on the appearance

of fractality. It was an important objective of my research to explore how the amount of disorder influences the fracture of heterogeneous materials. It has been shown in the literature that the qualitative characteristics of fracture of heterogeneous materials are robust, i.e. they are the same for a broad class of probability distributions which describes materials' disorder. By analytical calculations and computer simulations I wanted to explore the boundary of the universality class in such a way, that starting from the direction of extremely large disorder I studied the macroscopic response and microscopic dynamics of a discrete stochastic model under a slowly increasing load.

Methods of the investigation

The fracture of heterogeneous materials is characterized by the formation and interaction of numerous cracks. This is why continuum models based on the finite element method, often used in engineering applications, are not suitable to describe the phenomena I studied. I chose such a method which is able to simultaneously capture the disorder of the material, the details of the mechanical stress field and the relevant interactions.

To study the quasi-static fracture and the creep rupture of heterogeneous materials I used the so called fiber bundle model, which discretizes the material as a bundle of parallel fibers¹. The individual characteristics of the studied system can be controlled by changing the mechanical response, fracture and rheological characteristics of single fibers, furthermore, the nature and the range of their interactions. In the mean field limit of the model, which is realized by the equal load sharing following fiber breakings, I was able to determine several characteristics of the system by analytical tools, as well. I developed effective simulation algorithms which made it possible to study systems composed of 10^7 fibers in the equal load sharing limit. For localized load sharing I performed simulations on a square lattice reaching up to $L = 3001$ lattice sizes. For my large scale computer simulations I strongly exploited the supercomputers at Debrecen, Budapest and Szeged.

I aimed to compare my theoretical results to laboratory experiments and to the results of field measurements. In several cases my theoretical studies

¹S. Pradhan, A. Hansen, B. K. Chakrabarti, Rev. Mod. Phys. **82**, 499 (2010).

were motivated by experimental results. During my PhD research I had the opportunity to join a collaboration with an experimental group, in which I processed crackling noise data from dynamic fracture measurements. I compared the results of data evaluation to my theoretical calculations.

Scientific results

1. In the framework of the fiber bundle model of creep rupture², I performed a detailed investigation of the time evolution of a system under constant load. I showed that even at low loads where the slow damage mechanism dominates the fracture process, critical behaviour emerges, i.e. the characteristic quantities of the system are power laws of the time measured from the critical point. In this limit the fracture process proved to be sensitive to the local fluctuations of the stress field [P2,KP1]. At higher loads, bursts of breaking fibers are triggered which I identified as events of crackling noise. I analyzed by means of analytical calculations and computer simulations how the statistical properties of cracking bursts change as the system approaches the critical point of macroscopic failure.

a) In agreement with experiments I pointed out that the creep rupture process accelerates towards catastrophic failure, which is shown by the growing size of bursts and by the decreasing waiting time between them. I showed that the acceleration process can be described by the so called (inverse) Omori law: the average number of cracking events per unit time, i.e. the event rate, increases as a power law of the time to macroscopic failure, and it saturates in the vicinity of the critical point. In case of earthquakes the Omori law describes the relaxation following larger quakes, but it has been detected for foreshocks, as well³. Based on my results, the cracking bursts accompanying the creep rupture process can be considered as „foreshocks” of the impending catastrophic failure [P3,EP1,E2-3,E5].

²F. Kun, H. A. Carmona, J. S. Andrade Jr., and H. J. Herrmann, *Universality behind Basquin's law of fatigue*, Phys. Rev. Lett. **100**, 094301 (2008).

³J. J. McGuire, M. S. Boettcher, and T. H. Jordan, *Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on east pacific rise transform faults*, Nature **434**, 457 (2005)

- b) Based on the Omori law I showed that the time series of cracking events can be well described as an inhomogeneous Poisson process, which is controlled by the increasing load of single fibers and by the heterogeneity of the material. It has the important consequence that the power law form of the waiting time distribution does not necessarily imply the presence of correlations, as it is assumed in the literature, but it may be caused by the global acceleration of the process [P3,EP1,E2-3,E5].
- c) Based on careful evaluation of simulated data I investigated how the limitations of the measuring devices used in laboratory and field measurements affect the statistical properties of crackling noise. I showed that as a consequence of the pile up of events caused by the dead time of detectors, the power law exponent of the burst size distribution decreases. The finite detection threshold keeps the Poisson nature of the time series, however, it strongly influences the values of the Omori exponent and the exponent of the waiting time distribution. These effects may explain the inconsistencies between the results of theoretical and experimental studies or between different experimental groups. I demonstrated that restricting the data analysis to the close vicinity of the critical point, the burst size distribution shows a crossover to a lower exponent which raises the possibility of forecasting [P3,E2-3,E5].
- d) I used the record breaking statistics to study the time evolution of the creeping system in more detail. In the time series of cracking bursts I identified records as events which had a size greater than any previous event. Then records were characterized by their size and lifetime. In order to explore the information provided by the record statistics about the system approaching the critical point, I compared my results to the record statistics of a time series of independent identically distributed (IID) random variables.

In the equal load sharing limit my investigations revealed that the size of records is characterized by a power law distribution, where the exponent is independent of the external load and it is significantly lower than the exponent of the complete time series. The distribution of the lifetime of records also proved to be a

power law where the exponent differs from the exponent of the IID case. By analyzing the time evolution of records I pointed out that over the major part of the fracture process the average number of records grows logarithmically as a function of the event number, similarly to the IID case, however, close to the critical point a transition occurs to a much faster, exponential growth. At the beginning of the fracture process the average lifetime of records grows with the record index, however, a characteristic record index emerges where the lifetime starts to decrease. The event number belonging to the characteristic record index agrees well with the start of the exponential acceleration. Based on my investigation, I showed that the beginning of the fracture process is dominated by the disorder of the material which causes a record statistics similar to the IID case, while after the characteristic record index the system is driven by the load increments caused by fiber breakings which leads to an acceleration. The characteristic record index provides a possibility of the early identification of the acceleration phase [P5,EP3,PT3,E4,E7].

2. Applying localized load sharing in the fiber bundle model, I studied the dynamics of single growing cracks. In this case, bursts of fiber breaking which are the source of crackling noise, can be considered as local, intermittent steps of the propagating crack front. Based on computer simulations, I showed that the spatial and temporal evolution of single bursts provide valuable information about the dynamics of the system.
 - a) I identified sub-avalanches in bursts where their number defines the burst's duration. The size and duration of bursts can be described with a power law distribution, but the exponents have different values below and above a characteristic load. Averaging the size of sub-avalanches of bursts with the same duration, I determined the average burst profile, which can be described as an inverted parabola with right-handed asymmetry. In case of equal load sharing the burst profile proved to be a symmetric parabola. Based on my calculations, I determined that the symmetry properties of the average temporal profile of single bursts are de-

terminated by the range of stress redistribution [P1,P4,EP2,PT1-2, E1-3,E5].

b) My results on the temporal profile of bursts proved to have a good agreement with recent experiments [?] where the average profile of bursts was determined by means of direct optical observation using a high speed camera. In the experiments a planar crack was generated between two plexiglass plates which facilitates the high precision determination of single bursts⁴. The good agreement implies that my results can be exploited to develop novel methods of materials' testing.

3. In a collaboration with an experimental group I analyzed the statistics of magnetic noise measured during the dynamic fracture of steel. As a result of careful data evaluation I determined the average burst profiles of single cracking events which had durations close to each other. In agreement with my theoretical results the pulse shapes proved to have a right-handed asymmetry, which implies that the stress localized at the crack front [P6,E6].

4. In case of local load sharing, fibers breaking in a burst form a spatially connected set, which are the micro-cracks of the model. I showed that the bursts are compact geometrical objects, they do not have a fractal spatial structure. Since bursts grow in a heterogeneous environment, their frontier is not smooth, but it has valleys and hills. My calculations revealed that the perimeter of bursts increases as a power law of the radius of gyration so that the frontier of bursts has a fractal structure. The value of the fractal dimension is 1.25 which proved to be independent of the parameters of the model. Based on the similarity of the value of the fractal dimension and of the growth dynamics, I conjectured that cracking bursts along with bursts of Abelian sand-pile models, fall in the universality class of loop-erased self-avoiding random walks⁵ [P7].

⁴L. Laurson et al., *Evolution of the average avalanche shape with the universality class*, Nature Communications **4**, 2927 (2013).

⁵S. N. Majumdar, *Exact fractal dimension of the loop-erased self-avoiding walk in two dimensions*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2329 (1992).

5. I studied the role of the amount of disorder in the fracture process occurring under quasi-statically increasing load by analytical calculations and computer simulation. In the classical fiber bundle model I generated the random failure thresholds of fibers from a power law distribution over an infinite range. By controlling the amount of disorder through the value of the power law exponent, I investigated the macroscopic and microscopic characteristics of the fracture process in detail.
- a) For equal load sharing I obtained that the macroscopic constitutive curve of the system, contrary to the usual behaviour, monotonically increases without having a maximum. It has the consequence that catastrophic failure can not occur in the system, so that the last fiber breaking is reached through a sequence of stable cracking bursts. I showed by analytical calculations that the macroscopic strength of the system is controlled by the extreme value statistics of the failure thresholds, which results in a strength which grows with the system size. The size distribution of cracking bursts proved to be a power law with a universal exponent, however, the value of the exponent is significantly lower than the corresponding mean field exponent obtained for small and intermediate disorder. Based on the analytical and numerical results I drew attention to the fact that in the high disorder limit the evolution of the system is completely homogeneous which prevents the forecasting of the macroscopic failure [P8,E8].
 - b) When increasing the exponent of the threshold distribution, a transition occurs at a critical point from a quasi-brittle behaviour characterized by stable bursts to a perfectly brittle phase, where already the first fiber breaking triggers catastrophic failure. By applying finite size scaling, I showed that the quasi-brittle to brittle transition emerges as a continuous phase transition and I determined also the critical exponents of the transition. I pointed out that the quasi-brittle to brittle phase transition controlled by the disorder defines a separate universality class among the fracture phenomena [P8,E8].
 - c) I investigated the local load sharing limit of the model by com-

puter simulations. I found qualitatively the same results as in the case of equal load sharing with only a small difference in the values of the critical exponents. I concluded that the power law form of the threshold distribution implies such a high disorder that even in case of the strongest stress localization, it dominates the behaviour of the system. It is also verified by the behaviour of the clusters of broken fibers, which agrees well with the results of the site percolation problem [P8].

This research was supported by the European Union and the State of Hungary, co-financed by the European Social Fund in the framework of TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 ‘National Excellence Program’.

Közlemények / Publications

Publikációk a disszertáció tárgyköréből / Publications related to the dissertation

Referált folyóiratcikkek / Papers in refereed journals

P1 **Zs. Danku** and F. Kun, *Temporal and spacial evolution of bursts in creep rupture*, Physical Review Letters **111**, 084302 (2013)⁶. **IF: 7.728**

Független hivatkozás / Independent citation: 9 (2017.03.16.)

P2 S. Lennartz-Sassinek, I. G. Main, **Zs. Danku** and F. Kun, *Time evolution of damage due to environmentally assisted aging in a fiber bundle model*, Physical Review E **88**, 032802 (2013). **IF: 2.326**

Független hivatkozás / Independent citation: 2 (2017.03.16.)

P3 **Zs. Danku** and F. Kun, *Creep rupture as a non-homogeneous Poissonian process*, Scientific Reports **3**, 2688 (2013). **IF: 5.078**

Független hivatkozás / Independent citation: 3 (2017.03.16.)

P4 **Zs. Danku** and F. Kun, *Temporal and spatial evolution of bursts in a fiber bundle model of creep rupture*, Key Engineering Materials **592-593**, 773-776 (2014). **IF: 0.00**

6

- A publikációt a Physical Review Letters folyóirat a borítóján mutatta be a nagyközönség számára. <http://journals.aps.org/prl/issues/111/8>
- Ismeretterjesztő cikk jelent meg a publikáció eredményeiről az Index hírportálon. index.hu/tudomany/2013/09/03/mikrorepedesbol_erthetjuk_meg_a_foldrengest/
- A publikációért megkaptam „Az év hallgatói tudományos publikációja aranyérem” kitüntetést (2013, Debreceni Egyetem, DETEK).
- The journal Physical Review Letters exhibited our publication for the public on its cover page. <http://journals.aps.org/prl/issues/111/8>
- A popular science article was published on the results of the publication on the news portal Index. index.hu/tudomany/2013/09/03/mikrorepedesbol_erthetjuk_meg_a_foldrengest/
- I got the award of „The Golden Medal of Student Publication of the Year” (2013, University of Debrecen, DETEK).

P5 **Zs. Danku** and F. Kun, *Record breaking bursts in a fiber bundle model of creep rupture*, *Frontiers in Physics* **2**, 8 (2014). **IF: 0.00**

P6 **Zs. Danku**, G. B. Lenkey and F. Kun, *Statistical features of magnetic noise in mixed-type impact fracture*, *Applied Physics Letters* **106**, 064102 (2015). **IF: 3.142**
Független hivatkozás / Independent citation: 2 (2017.03.16.)

P7 **Zs. Danku**, H. J. Herrmann and F. Kun, *Fractal frontiers of bursts and cracks in a fiber bundle model of creep rupture*, *Physical Review E* **92**, 062402 (2015). **IF: 2.252**
Független hivatkozás / Independent citation: 1 (2017.03.16.)

P8 **Zs. Danku** and F. Kun, *Fracture process of a fiber bundle with strong disorder*, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* **2016**, 073211 (2016). **IF: 2.091**²⁰¹⁵

Konferencia kiadványok / Conference proceedings

KP1 S. Lennartz-Sassinek, **Zs. Danku**, F. Kun, I. G. Main and M. Zaiser, *Damage growth in the fibre bundle models with localized load sharing and environmentally-assisted ageing*, *Journal of Physics: Conference Series* **410**, 012064 (2013). **IF: 0.00**
Független hivatkozás / Independent citation: 1 (2017.03.16.)

Egyéb folyóiratcikkek / Other papers

EP1 **Zs. Danku** and F. Kun, *Time series analysis of creep rupture*, *Acta Physica Debrecina* **XLVI**, 37 (2012). **IF: 0.00**

EP2 **Zs. Danku** and F. Kun, *Bursts in a fiber bundle model of creep rupture*, *Acta Physica Debrecina* **XLVII**, 43 (2013). **IF: 0.00**

EP3 **Zs. Danku** and F. Kun, *Statistics of records in crackling time series*, *Acta Physica Debrecina* **XLVIII**, 1 (2014). **IF: 0.00**

Poszterek / Posters

PT1 **Zs. Danku** and F. Kun, *Pulse shape of bursts in fracture phenomena*, 38th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, MECO38, Trieste, Italy, 25-27 March 2013

PT2 **Danku Zs.** és Kun F., *Repedési zaj a szálköteg modellben*, Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Debrecen, Magyarország, 2013.08.21-24.

PT3 **Zs. Danku** and F. Kun, *Record breaking events in crackling time series*, 40th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, MECO40, Esztergom, Hungary, 23-25 March 2015

Előadások / Talks

E1 **Danku Zs.** és Kun F., *Repedési lavinák időfejlődése*, Statisztikus Fizikai Nap, Budapest, Magyarország, 2013.03.22.

E2 **Zs. Danku** and F. Kun, *Damage enhanced creep in the fiber bundle model*, The Third International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures, CFRAC 2013, Prague, Czech Republic, 5-7 June 2013

E3 **Zs. Danku** and F. Kun, *Temporal and spatial evolution of bursts in a fiber bundle model of creep rupture*, Materials Structure & Micro-mechanics of fracture, MSMF7, Brno, Czech Republic, 1-3 July 2013

E4 **Danku Zs.** és Kun F., *Rekord-statisztika kúszó törésben*, Statisztikus Fizikai Nap, Budapest, Magyarország, 2014.04.25.

E5 **Zs. Danku** and F. Kun, *Crackling noise in a fiber bundle model of creep rupture*, International Conference Smart functional materials for shaping our future, Debrecen, Hungary, 19-20 Sept 2014

E6 **Danku Zs.**, Kun F. és Lenkeyné B. Gy., *A mágneses zaj statisztikus tulajdonságai dinamikus törésben*, Statisztikus Fizikai Nap, Budapest, Magyarország, 2015.04.10.

E7 **Zs. Danku** and F. Kun, *Record breaking events in crackling time series*, The Fourth International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures, CFRAC 2015, Cachan, France, 3-5 June 2015

E8 **Danku Zs.** és Kun F., *Törési folyamat erős rendezetlenség esetén*, Statisztikus Fizikai Nap, Budapest, Magyarország, 2016.04.08.

Egyéb publikációk / Other publications

Referált folyóiratcikkek / Papers in refereed journals

1. A. Szolnoki, M. Perc and **Zs. Danku**, *Towards effective payoffs in the prisoner's dilemma game on scale-free networks*, Physica A **387**, 2075-2082 (2008). **IF: 1.441**
Független hivatkozás / Independent citation: 130 (2017.03.16.)
2. A. Szolnoki, M. Perc and **Zs. Danku**, *Making new connections towards cooperation in the prisoner's dilemma game*, Europhysics Letters **84**, 50007 (2008). **IF: 2.203**
Független hivatkozás / Independent citation: 122 (2017.03.16.)
3. Z. Halász, **Zs. Danku** and F. Kun, *Competition of strength and stress disorder in creep rupture*, Physical Review E **85**, 016116 (2012). **IF: 2.313**
Független hivatkozás / Independent citation: 10 (2017.03.16.)

Poszterek / Posters

1. **Zs. Danku**, Z. Halász and F. Kun, *Competition of strength and stress disorder in creep rupture*, 37th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, MECO37, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 18-22 March 2012



Nyilvántartási szám: DEENK/65/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Danku Zsuzsa
Neptun kód: GA8FNP
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10032951

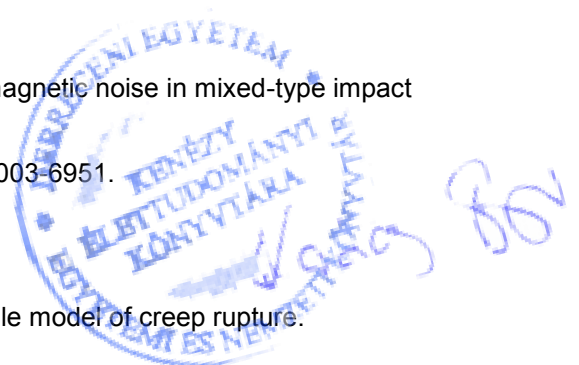
A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

1. **Danku, Z.**, Kun, F.: Statistics of records in crackling time series.
Acta Phys. Debr. 48, 1-9, 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Danku, Z.**, Kun, F.: Bursts in a fiber bundle model of creep rupture.
Acta Phys. Debr. 47, 43-47, 2013. ISSN: 1789-6088.
3. **Danku, Z.**, Kun, F.: Time series analysis of creep rupture.
Acta phys. Debr. 46, 37-45, 2012. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (9)

4. **Danku, Z.**, Kun, F.: Fracture process of a fiber bundle with strong disorder.
J. Stat. Mech.-Theory Exp. 7, 073211-1-17, 2016. ISSN: 1742-5468.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2016/07/073211>
IF: 2.091 (2015)
5. **Danku, Z.**, Kun, F., Herrmann, H. J.: Fractal frontiers of bursts and cracks in a fiber bundle model of creep rupture.
Phys. Rev. E. 92 (6), 062402-1-17, 2015. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062402>
IF: 2.252
6. **Danku, Z.**, Lenkey, G. B., Kun, F.: Statistical features of magnetic noise in mixed-type impact fracture.
Appl. Phys. Lett. 106 (6), 064102-1-4, 2015. ISSN: 0003-6951.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4908184>
IF: 3.142
7. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking bursts in a fiber bundle model of creep rupture.
Front. Physics. 2, [8], 2014. EISSN: 2296-424X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2014.00008>





8. **Danku, Z.**, Kun, F.: Temporal and Spatial Evolution of Bursts in a Fiber Bundle Model of Creep Rupture.
Key Eng. Mater. 592-593, 773-776, 2014. EISSN: 1662-9795.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.773>
9. **Danku, Z.**, Kun, F.: Creep rupture as a non-homogeneous Poissonian process.
Sci. Rep. 3, 2688-1-5, 2013. ISSN: 2045-2322.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/srep02688>
IF: 5.078
10. Lennartz-Sassinek, S., **Danku, Z.**, Kun, F., Main, I. G., Zaiser, M.: Damage growth in fibre bundle models with localized load sharing and environmentally-assisted ageing.
J. Phys.: Conf. Ser. 410, 012064-1-5, 2013. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/410/1/012064>
11. **Danku, Z.**, Kun, F.: Temporal and Spacial Evolution of Bursts in Creep Rupture.
Phys. Rev. Lett. 111 (8), 084302-1-5, 2013. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.084302>
IF: 7.728
12. Lennartz-Sassinek, S., Main, I. G., **Danku, Z.**, Kun, F.: Time evolution of damage due to environmentally assisted aging in a fiber bundle model.
Phys. Rev. E. 88 (3), 032802-1-9, 2013. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.032802>
IF: 2.326

Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (1)

13. **Danku, Z.**, Kun, F.: Repedési zaj a szálköteg modellben.
In: Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Debreceni Egyetem : MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen, 79, 2013.

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (4)

14. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking events in crackling time series.
In: 40th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, MECO40 : 23-25 March 2015, Esztergom, Hungary
15. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking events in crackling time series.
In: International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure, CCSD Centre pour la Communication Scientifique Directe, Cachan, 244, 2015.
16. **Danku, Z.**, Kun, F.: Crackling noise in a fiber bundle model of creep rupture.
In: International Conference Smart functional materials for shaping our future, 19-20 September 2014 Debrecen, Hungary. Programme and book of abstracts. Ed.: Attila Csík, University of Debrecen, Debrecen, 42, 2014. ISBN: 9789634737247



17. **Danku, Z.**, Kun, F.: Damage enhanced creep in the fiber bundle model.

In: Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures Proceedings of CFRAC 2013. Ed.: M. Jirásek, O. Allix, N. Moes, J. Oliver, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Prága, 71, 2013. ISBN: 9788001052792

További közlemények

Idegen nyelvű közlemények külföldi folyóiratban (3)

18. Halász, Z., **Danku, Z.**, Kun, F.: Competition of strength and stress disorder in creep rupture.

Phys. Rev. E. 85 (1), 016116-1-8, 2012. ISSN: 1539-3755.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.85.016116>

IF: 2.313

19. Szolnoki, A., Perc, M., **Danku, Z.**: Making new connections towards cooperation in the prisoner's dilemma game.

Europhys. Lett. 84 (5), 50007-1-6, 2008. ISSN: 0295-5075.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/84/50007>

IF: 2.203

20. Szolnoki, A., Perc, M., **Danku, Z.**: Towards effective payoffs in the prisoner's dilemma game on scale-free networks.

Physica A. 387 (8-9), 2075-2082, 2008. ISSN: 0378-4371.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.11.021>

IF: 1.441

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

21. **Danku, Z.**, Halász, Z., Kun, F.: Competition of strength and stress disorder in creep rupture.

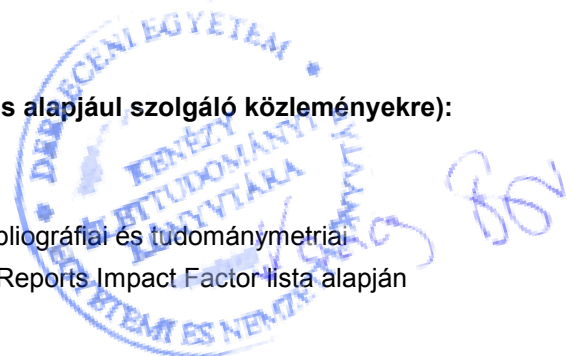
In: 37th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics : Programme and abstracts, Slovak Physical Society, Bratislava, 51, 2012.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 28,574

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 22,617

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.03.20.





Registry number: DEENK/65/2017.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Zsuzsa Danku
Neptun ID: GA8FNP
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10032951

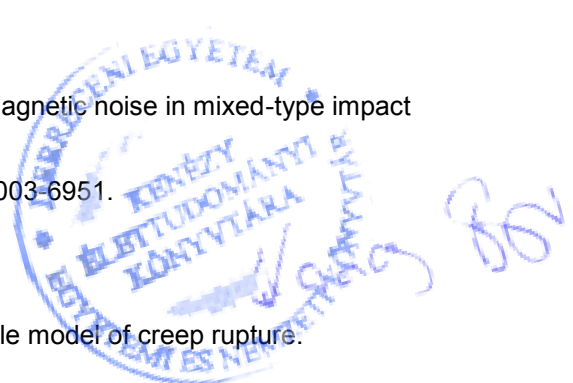
List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

1. **Danku, Z.**, Kun, F.: Statistics of records in crackling time series.
Acta Phys. Debr. 48, 1-9, 2014. ISSN: 1789-6088.
2. **Danku, Z.**, Kun, F.: Bursts in a fiber bundle model of creep rupture.
Acta Phys. Debr. 47, 43-47, 2013. ISSN: 1789-6088.
3. **Danku, Z.**, Kun, F.: Time series analysis of creep rupture.
Acta phys. Debr. 46, 37-45, 2012. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (9)

4. **Danku, Z.**, Kun, F.: Fracture process of a fiber bundle with strong disorder.
J. Stat. Mech.-Theory Exp. 7, 073211-1-17, 2016. ISSN: 1742-5468.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2016/07/073211>
IF: 2.091 (2015)
5. **Danku, Z.**, Kun, F., Herrmann, H. J.: Fractal frontiers of bursts and cracks in a fiber bundle model of creep rupture.
Phys. Rev. E. 92 (6), 062402-1-17, 2015. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062402>
IF: 2.252
6. **Danku, Z.**, Lenkey, G. B., Kun, F.: Statistical features of magnetic noise in mixed-type impact fracture.
Appl. Phys. Lett. 106 (6), 064102-1-4, 2015. ISSN: 0003-6951.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4908184>
IF: 3.142
7. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking bursts in a fiber bundle model of creep rupture.
Front. Physics. 2, [8], 2014. EISSN: 2296-424X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2014.00008>





8. **Danku, Z.**, Kun, F.: Temporal and Spatial Evolution of Bursts in a Fiber Bundle Model of Creep Rupture.
Key Eng. Mater. 592-593, 773-776, 2014. EISSN: 1662-9795.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.773>
9. **Danku, Z.**, Kun, F.: Creep rupture as a non-homogeneous Poissonian process.
Sci. Rep. 3, 2688-1-5, 2013. ISSN: 2045-2322.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/srep02688>
IF: 5.078
10. Lennartz-Sassinek, S., **Danku, Z.**, Kun, F., Main, I. G., Zaiser, M.: Damage growth in fibre bundle models with localized load sharing and environmentally-assisted ageing.
J. Phys.: Conf. Ser. 410, 012064-1-5, 2013. EISSN: 1742-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/410/1/012064>
11. **Danku, Z.**, Kun, F.: Temporal and Spacial Evolution of Bursts in Creep Rupture.
Phys. Rev. Lett. 111 (8), 084302-1-5, 2013. ISSN: 0031-9007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.084302>
IF: 7.728
12. Lennartz-Sassinek, S., Main, I. G., **Danku, Z.**, Kun, F.: Time evolution of damage due to environmentally assisted aging in a fiber bundle model.
Phys. Rev. E. 88 (3), 032802-1-9, 2013. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.032802>
IF: 2.326

Hungarian abstracts (1)

13. **Danku, Z.**, Kun, F.: Repedési zaj a szálköteg modellben.
In: Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Debreceni Egyetem : MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen, 79, 2013.

Foreign language abstracts (4)

14. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking events in crackling time series.
In: 40th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, MECO40 : 23-25 March 2015, Esztergom, Hungary
15. **Danku, Z.**, Kun, F.: Record breaking events in crackling time series.
In: International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure, CCSD Centre pour la Communication Scientifique Directe, Cachan, 244, 2015.
16. **Danku, Z.**, Kun, F.: Crackling noise in a fiber bundle model of creep rupture.
In: International Conference Smart functional materials for shaping our future, 19-20 September 2014 Debrecen, Hungary. Programme and book of abstracts. Ed.: Attila Csík, University of Debrecen, Debrecen, 42, 2014. ISBN: 9789634737247



17. **Danku, Z.**, Kun, F.: Damage enhanced creep in the fiber bundle model.

In: Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures Proceedings of CFRAC 2013. Ed.: M. Jirásek, O. Allix, N. Moes, J. Oliver, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Prága, 71, 2013. ISBN: 9788001052792

List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (3)

18. Halász, Z., **Danku, Z.**, Kun, F.: Competition of strength and stress disorder in creep rupture.

Phys. Rev. E. 85 (1), 016116-1-8, 2012. ISSN: 1539-3755.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.85.016116>

IF: 2.313

19. Szolnoki, A., Perc, M., **Danku, Z.**: Making new connections towards cooperation in the prisoner's dilemma game.

Europhys. Lett. 84 (5), 50007-1-6, 2008. ISSN: 0295-5075.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/84/50007>

IF: 2.203

20. Szolnoki, A., Perc, M., **Danku, Z.**: Towards effective payoffs in the prisoner's dilemma game on scale-free networks.

Physica A. 387 (8-9), 2075-2082, 2008. ISSN: 0378-4371.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.11.021>

IF: 1.441

Foreign language abstracts (1)

21. **Danku, Z.**, Halász, Z., Kun, F.: Competition of strength and stress disorder in creep rupture.

In: 37th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics : Programme and abstracts, Slovak Physical Society, Bratislava, 51, 2012.

Total IF of journals (all publications): 28,574

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 22,617

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

20 March, 2017

