

UNIVERSITATE BABEȘ-BOLYAI

FACULTATEA DE FIZICĂ



REZUMAT EXTINS

O abordare de tip “depinning” a plasticității
amorfe și a fenomenului de “dewetting”

Autor:

TYUKODI Botond

Conducători științifici:

Prof. Dr. NÉDA Zoltán

Prof. Dr. VANDEMBROUCQ Damien

CLUJ-NAPOCA 2016

Cuprins

1	Motivarea structurii tezei	2
2	Capitolul 1: Introducere	6
3	Capitolul 2: Modele mesoscopice	9
4	Capitolul 3: Construirea interacțiunii elastice: kernelul Eshelby	11
5	Capitolul 4: Proprietăți de scalare și efecte de mărime finită	14
6	Capitolul 5: Aplicații la materiale compozite amorfe	16
7	Capitolul 6: Dinamica și topologia liniei triple a unui fluid pe o suprafață dezordonată	19
8	Concluzii finale	23
9	Contribuții personale	25
10	Publicații și prezentări la conferințe	26

Rezumat

În lucrarea de față investigăm două sisteme dezordonate din perspectiva fenomenului de “depinning”. În ambele, dinamica este guvernată de competiția dintre interacțiunile elastice și o dezordine impusă în sistem. Lucrarea fiind realizată în urma unei colaborări dintre Universitatea Babeș-Bolyai (UBB) din Cluj și ESPCI Paris este concepută în două părți. **Prima parte** este realizată cu colaborări din afara UBB. În această parte folosim un model simplificat mesoscopic pentru a studia proprietățile generice a plasticității amorfe. Curgerea materialelor amorfe prezintă proprietăți universale similare cu tranziția depinning. Ca atare, ea este adesea descrisă prin aproximări de câmp mediu. Aici demonstrăm că modurile moi prezente în interacțiunea elastică au un impact dramatic asupra localizării și rezultă în creșterea fluctuațiilor într-un mod difuziv, ceea ce până la urmă duce la cedarea materialului. Această fenomenologie adițională este absentă în fenomenele de depinning, și în ciuda consecințelor importante, nu este luată în considerare în descrierile de tip câmp mediu. Se arată că benzile de forfecare sunt moduri moi a interacțiunilor elastice Eshelby și pe lângă localizare, ele afectează și proprietățile universale ale materialului. În același timp, testăm două cazuri extreme și arătăm că tipul dezordinii nu are impact considerabil asupra proprietăților universale ale acestor sisteme. Ca o aplicație a celor discutate, se arată că întărirea materialelor amorfe prin introducerea incluziunilor dure în volumul amorf este legat de percolarea benzilor de forfecare între aceste incluziuni. În cea de-a **doua parte**, studiem morfologia unei linii de contact pe suprafețe neomogene. Spre deosebire de metodele standard de tip depinning, aici dezvoltăm o metodă potrivită pentru descrierea regimului de deformări mari și ruperea stratului. Arătăm existența unei concentrații limite. Peste această concentrație linia se oprește, iar în jurul concentrației prezintă proprietăți critice.

1 Motivarea structurii tezei

Din punctul de vedere a științei materialelor, există o necesitate continuă pentru tehnologii noi care permit realizarea materialelor cu calități mecanice impuse. Înțelegerea localizării și a proprietăților universale intrinseci este deci primul pas în dezvoltarea materialelor cu caracteristici mecanice îmbunătățite.

Fundamentele teoretice ale proprietăților mecanice ale solidelor cristaline sunt astăzi bine stabilite. Structura ordonată ale acestor materiale a permis dezvoltarea teoriei dislocațiilor care a fost confirmată de simulări și metode experimentale [13]. O parte semnificativă ale materialelor însă nu prezintă o astfel de ordine structurală. Exemplele includ materialele amorfe precum sticla, dar și sisteme amorfe într-o viziune mai largă, precum paste, spume, coloizi sau materiale granulare. Răspunsul mecanic ale materialelor amorfe, în special sticla, este mai puțin înțeles, în principal din cauza lipsei unei dispozitive experimentale adecvate: fragilitatea lor intrinsecă împiedică realizarea testelor mecanice standarde. O altă sursă de dificultate experimentală este că în unele dintre aceste materiale, de exemplu sticlele structurale, plasticitatea se manifestă de obicei la o scală foarte mică [33].

Proprietățile mecanice ale materialelor amorfe sunt mai complexe la scală microscopică decât cele ale materialelor cristaline, din cauza lipsei de ordine la distanțe mari. Într-adevăr, spre deosebire de solidele cristaline, dezordinea elimină noțiunea de defecte izolate.

În cazul materialelor amorfe, dezordinea exclude dislocațiile ca și mecanismul plastic elementar. Mai mult decât atât, putem afirma că face extrem de dificilă identificarea statisticii din spatele acestor procese microscopice. Această dificultate a întârziat elaborarea unui astfel de mecanism elementar cu 40 de ani după ce ideea dislocațiilor a fost introdusă [13]. Abia la sfârșitul anilor 70 A. S. Argon a propus conceptul de reorganizare locală ale câtorva particule ca și proces elementar al plasticității în materialele amorfe, numit în engleză *shear transformations*[4], abreviat ST în continuare.

De-a lungul ultimelor două decenii a devenit din ce în ce mai clar că multe sisteme amorfe împărtășesc proprietăți similare la scale diferite: sticle metalice [3], plute de bule [5] și coloizi [34, 2]. Ele prezintă o curgere peste o solicitare limită. Spre deosebire de fluide însă, curgerea nu este una netedă, ci este stăpânită de căderi bruște de solicitare (căderi de tip avalanșă) și au caracteristici de scalare (Fig. 1). Reologia complexă este rezultatul efectelor colective ale rearanjărilor locale care au fost observate în toate aceste materiale. Identificarea proceselor elementare la scală mică a beneficiat enorm de mult de observări experimentale la scale mai mari [34, 2, 26, 27, 5].

Această fenomenologie universală precum și proprietățile de scalare în jurul cedării au condus în mod natural la presupunerea că cedarea sistemelor amorfe este o tranziție de fază dinamică [8, 28].

Ca atare, cedarea sistemelor amorfe prezintă asemănări cu alte tranziții dinamice, de exemplu, fenomene de cutremur [6] și de tip depinning [25]. În fiecare dintre aceste sisteme, elementele individuale au o dinamică de tip “stick-slip” și sub o forță critică dinamica sistemului se oprește, iar peste această forță critică dinamica sistemului continuă. O tranziție de

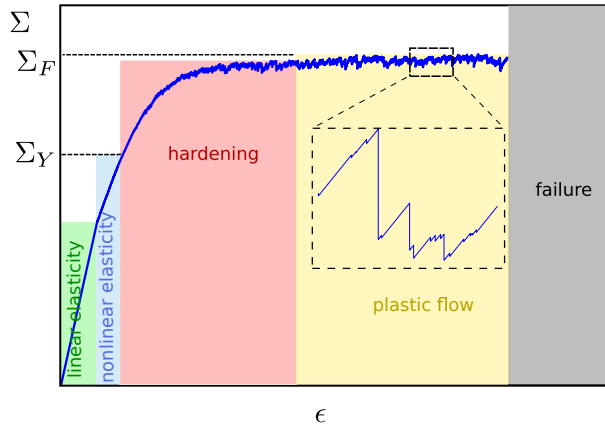


Figura 1: Curgerea tipică a solidelor. La deformații mici materialul se deformează reversibil, la sollicitări mai mari însă acesta curge și eventual se rupe. Curgerea este caracterizată prin căderi abrupte a sollicitării ceea ce rezultă într-o curbă de sollicitare dințată.

fază dinamică apare deci la forța critică însoțită de relații de scalare și evenimente care se repetă în cascade. În capitolul introductiv (Capitolul 1) discutăm natura critică a tranziției de curgere precum și asemănările cu fenomenele de tip depinning [25], unde tranziția de fază dinamică este bine studiată.

Tranzițiile dinamice de fază prezintă deci un comportament universal, o fenomenologie care este independentă de detaliile specifice ale sistemului. Sisteme la scale foarte diferite (de la valuri de densitate de sarcină până la cutremure) pot manifesta comportamente foarte asemănătoare [7, 6]. Această universalitate ne permite construirea unor modele simple, care reproduc proprietățile universale, pur și simplu pentru că acestea sunt insensibile la detaliile sistemului.

Se pune întrebarea firească: dacă tranziția de curgere este într-adevăr o tranziție de fază dinamică, pot oare modelele simple să reflectă universalitatea? Contează oare detaliile acestor modele? Multe astfel de modele au fost dezvoltate [5, 17, 21, 36, 16] pe baza imaginii de ST (shear transformation), considerând o interacțiune de tip câmp mediu între ST-uri. Având menirea de a descrie proprietăți universale, aceste modele au presupus că forma interacțiunii este un detaliu irelevant. Mesomodelele recent introduse folosesc interacțiuni realiste, însă, au început să elucideze că forma interacțiunii afectează comportamentul critic [38, 39, 28, 29, 8, 32]. Aceste modele sunt modele simplificate ale materialelor amorphe și majoritatea lor sunt modele scalare. În ciuda simplității lor ele sunt capabile de a reproduce proprietățile generice ale plasticității amorphe. În capitolul 2 prezentăm ideea de bază din spatele acestor modele.

Interacțiunile elastice asociate rearanjărilor de particule sunt anizotrope. Această anizotropie favorizează acumularea activității plastice de-a lungul anumitor direcții, rezultând

în benzi de forfecare și nucleare de fisuri. Benzile persistente deteriorează materialul și sunt principalul obstacol în ameliorarea limitei de curgere ale materialelor amorfe [33]. În consecință, aceste efecte de localizare nu pot fi pur și simplu neglijate prin abordări de câmp mediu. În capitolul 3 abordăm această problematică. Arătăm că interacțiunea elastică specială are o influență dramatică asupra localizării și asupra fluctuațiilor. Arătăm totodată că interacțiunea permite moduri de deformare fără cost energetic. Aceste moduri se pot dezvolta astfel nelimitat, și difuzia lor stăpânește dinamica sistemelor amorfe. În capitolul 4 explorăm modul în care prezența modurilor moi influențează proprietățile universale precum distribuția avalanșelor și efecte de talie, comparând exponențele de scalare rezultante din simulări de tip dinamică moleculară. Localizarea și difuzia deformării sunt fenomene complet absente din modelele standarde de tip depinning.

În sistemele amorfe, localizarea activității plastice de-a lungul benzilor de forfecare este cauza primordială a fragilității și a cedării materialului [26], ceea ce este o limitare serioasă în utilizarea acestora ca și materiale structurale [30, 15, 31]. Nucleația și propagarea benzilor de forfecare însă pot fi controlate prin introducerea unor incluziuni de o componentă diferită în materialul amorf [1, 22, 20]. Deși câteva tehnici de omogenizare sunt disponibile pentru a calcula proprietățile mecanice efective ale acestor materiale compozite [14, 41, 40], aceste metode se concentrează asupra proprietăților medii. Din cauza tranziției de faze dinamice importanța fluctuațiilor devine însă crucială. Aceste fluctuații conduc la efecte de mărime finită, iar aceste efecte nu pot fi capturate prin metodele standard de omogenizare. Pe de altă parte, modelele mesoscopice [38, 39, 28, 29] au fost concepute pentru a ține cont de fluctuații, astfel ele sunt candidați buni în investigarea acestor efecte de talie. În capitolul 5 folosim un model mesoscopic pentru a investiga scalarea de mărime finită în compozitele amorfe și arătăm că întărirea acestor materiale este legată de percolația benzilor de forfecare între incluziuni. Incluziunile dure pot opri propagarea benzilor de forfecare, întărind astfel materialul.

În cea de-a doua parte a lucrării, realizat în cadrul cercetărilor efectuate la UBB, prezentăm un alt sistem dezordonat. În capitolul 6 investigăm dinamica și asperizarea interfeței triple al unui fluid în urma procesului de “dewetting” (des-umezire) pe suprafețe neomogene. Fenomenologia procesului de asperizare este adesea legată de fenomenul de depinning deoarece aceasta rezultă din competiția forțelor elastice și dezordinea suprafeței. Aceste forțe elastice provin din tensiunea superficială și sunt, de obicei, tratate într-o aproximație perturbativă [18, 12, 24, 23, 10, 19], în limita deformațiilor mici. Deși acest cadru a avut succes în reproducerea unor caracteristici a liniei de contact (de exemplu exponentul de asperizare) [11], nu are ca scop descrierea fenomenologiei asociată la deformări mari.

Spre deosebire de abordarea standard a procesului de dewetting prin modele de tip depinning [18], unde doar forțe elastice de lungă distanță sunt considerate, aici considerăm o linie moale care permite deformații extrem de mari, chiar și ruperea stratului. Am dezvoltat o metodă nouă pentru a explora morfologia și dinamica a liniei de contact în cazul deformațiilor mari. Deși modelul nu este un model standard de tip depinning, arătăm că sistemul prezintă proprietăți critice în jurul unei concentrații de prag a defectelor.

Rezultatele acestei teze au condus la următoarele publicații în reviste internaționale: [43, 42, 44]. În ceea ce urmează, vom rezuma conținutul fiecărui capitol și concluziile noastre în ceea ce privește rezultatele obținute.

2 Capitolul 1: Introducere

Acest capitol introductiv are ca scop prezentarea fenomenului de deformare plastică în materialele amorfе prin sintetizarea rezultatelor științifice anterioare. Este descrisă fenomenologia relevantă, folosită în lucrare cu privire la plasticitatea materialelor amorfе, în special, sticle. Introducem ideile principale în spatele modelării multiscale pornind de la metode de dinamică moleculară, prin modele mesoscopice până la modele constitutive. În sfârșit, stabilim conexiunea între fenomenologia tranziției de tip depinning și a tranziției de fluaj.

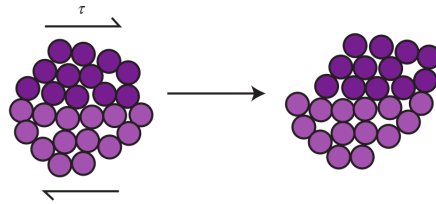


Figura 2: Procesul elementar al plasticității în materialele amorfе: rearanjări locale ale câtorva particule numite transformări de forfecare (shear transformations). Figura din [35]

Arătăm că plasticitatea în materialele amorfе are loc sub forma rearanjărilor locale ale câtorva particule (Fig. 2). Dinamica la scală macroscopică este rezultatul efectului colectiv ale rearanjărilor. Fenomenologia folosită este deci rezultatul competiției între elasticitate și dezordine. În acest context, curgerea materialelor amorfе este asemănătoare cu tranziția de depinning. Totuși, tranziția de curgere prezintă caracteristici adiționale care lipsesc din tranziția depinning. Un astfel de exemplu este localizarea deformației care este responsabilă pentru cedarea materialului (Fig. 3).

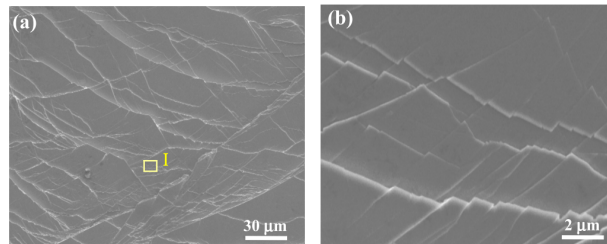


Figura 3: Localizarea deformației într-o sticlă metalică $Zr_{64.13}Cu_{15.75}Ni_{10.12}Al_{10}$ de-a lungul benzilor de forfecare. (b) este mărirea regiunii marcate în (a). Benzile au o structură de fractal. Figură din [37].

Metodele constitutive sunt concentrate pe proprietăți efective, fără a ține cont de locali-

zare. Pe de altă parte, metodele de dinamică moleculară nu permit reglajul fin între natura dezordinii și interacțiunile elastice. Familia mesomodelor a fost însă dezvoltată pentru a permite reglajul interacțiunii și a dezordinii. Aceste modele permit fluctuații și localizare, astfel ele sunt potrivite pentru modelarea comportamentului benzilor de forfecare și fragilitatea asociată. Conceptele principale în toate modelele mesoscopice sunt interacțiunea elastică între blocurile elastoplastice și dezordinea care rezultă din structura amorfă (Fig 4).

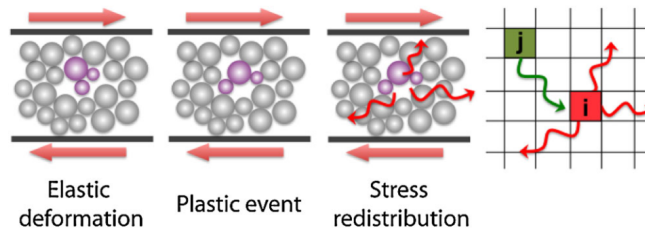


Figura 4: Descrierea semi-continuuă al plasticității prin intermediul mesomodelor: materialul este împărțit în blocuri elastoplastice care reprezintă o parte din material și includ câteva rearanjări. Consecințele elastice ale rearanjărilor locale sunt redistribuirea solicitării în materialul întreg. Se realizează astfel o interacțiune elastică între blocurile elastoplastice. [9]

Dezordinea este adesea introdusă prin intermediul unor solicitări locale de prag: dacă solicitarea pe blocul elastoplastice respectiv este mai mare decât solicitarea de prag, blocul cedează. În consecință, deformăția plastică are o dinamică de tip stick-slip. De fapt, problema plasticității amorse este analog cu mișcarea interfețelor într-un potențial dezordonat (depinning). Fig. 5 reprezintă această analogie: poziția interfeței în vocabularul depinning corespunde deformării plastice locale. În acest context, asperizarea unei interfețe depinning corespunde acumulării a deformării plastice.

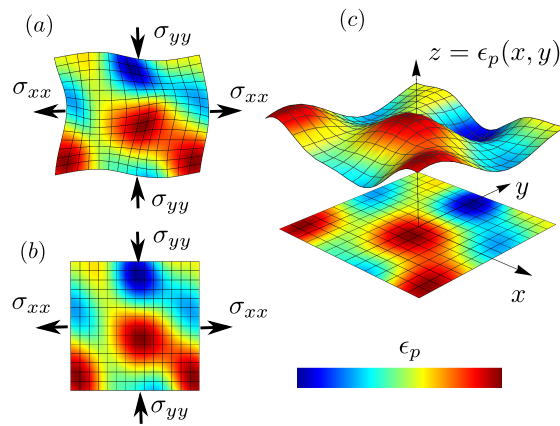


Figura 5: Schema unui material bidimensional sub o solicitare bi-axială. (a) Grila este deformată conform deplasărilor locale. Deformația asociată are o componentă elastică reversibilă și una plastică ireversibilă. Culoarea reprezintă deformația plastică. (b) Același câmp de deformație în sistemul referențial original. (c) Câmpul de deformație plastică este reprezentat ca o interfață bidimensională care avansează în spațiul tridimensional.

3 Capitolul 2: Modele mesoscopice

În capitolul 1 s-a argumentat faptul că tranziția de curgere în materialele amorfe este o tranziție dinamică de fază asemănătoare tranziției de depinning. Cu toate acestea, localizarea este o caracteristică cheie, și este absentă în procese de depinning. În următoarele capitole 2-5 s-a investigat localizarea deformării plastice în materialele amorfe și efectele acestei localizări asupra universalităților caracteristice în aceste sisteme. Deoarece suntem interesați în proprietăți generice care sunt independente de detaliile sistemului, utilizăm modele mesoscopice care reflectă un astfel de comportament universal. Cu toate acestea vom demonstra că unele detalii (în special forma interacțiunii elastice) au o influență considerabilă asupra proprietăților generice. Prin urmare, în capitolul 2, examinăm principalele ingrediente ale mesomodelor concentrându-ne la modul în care acestea influențează proprietățile universale.

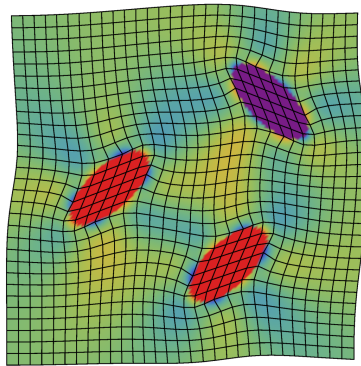


Figura 6: Incluziuni elipsoidale Eshelby în interacțiune. În figură, direcțiile principale a tensorului de deformare plastică sunt considerate a fi aceleași pentru fiecare incluziune. Culorile indică solicitarea de forfecare. În acest aranjament, avem o simetrie quadrupolară: solicitarea indusă este pozitivă de-a lungul direcțiilor 0 și $\pi/2$ și negativă de-a lungul direcțiilor $\pm\pi/4$. Solicitarea este omogenă în interiorul incluziunilor.

La originea tuturor modelelor mesoscopice se găsește interacțiunea elastică între blocurile elastoplastice și dezordinea care rezultă din structura amorfă. Interacțiunea elastică este de obicei reprezentată ca și incluziuni de materiale de tip Eshelby, ilustrată în Fig. 6. Acestea sunt incluziuni de materiale care se pot deforma într-un mod ireversibil. Precum ei sunt presate de către materialul înconjurător, rezultatul deformației plastice este o solicitare neomogenă și anizotropă în ansamblul materialului. Incluziunile Eshelby ne permit o descriere semi-continuu a mediului amorf prin substituția rearanjărilor de către incluziuni continue. Astfel, problema rearanjărilor se reduce la problema semi-continuu a incluziunilor Eshelby care interacționează. În capitolul 3 este studiat efectul interacțiunii elastice asupra

universalităților din sistem și asupra fluctuațiilor.

4 Capitolul 3: Construirea interacțiunii elastice: kernelul Eshelby

În Capitolul 3 este prezentat studiul interacțiunii elastice. Se arată că prin folosirea unui kernel elastic anume rezultă un efect dramatic asupra universalităților din sistem. În consecință, tranziția de curgere nu se clasifică în clasa de universalitate de tip câmp mediu. Cauza acestei diferențe constă în proprietățile intrinseci ale acestui kernel elastic care permite localizarea. Aceste proprietăți (localizarea și modurile de deformare moi) sunt deosebit de sensibile la construcția kernelului. În acest capitol, mai întâi se prezintă strategiile folosite pentru construirea kernelului și apoi este testată influența diferitelor kerneli asupra fluctuațiilor. Fluctuațiile sunt de multe ori neglijate în studiile ingineresti și doar proprietățile efective sunt luate în considerare. Tranziția de curgere arată însă caracteristici critice care includ fluctuații corelate la scală largă. Importanța acestor fluctuații nu poate fi deci neglijată deoarece contribuie la cedarea materialului.

În prima parte a capitolului, se prezintă diferite posibilități de discretizare a interacțiunii Eshelby și se dezvoltă o metodă nouă de elemente finite care ne dau acces la toate câmpurile elastice: deformații, forțe, solicitări și deplasări. Deoarece aceste metode de discretizare sunt definite pe o rețea, după denumirea engleză câmpurile de solicitare sunt numite “kerneli” (Fig. 7).

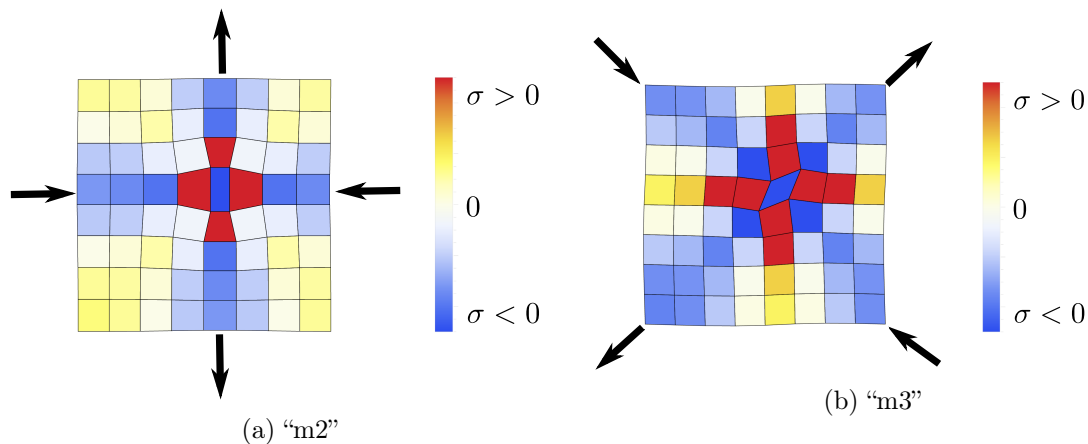


Figura 7: Kerneli provenind din calcule de elemente finite pentru două direcții a solicitării. “m2” corespunde geometriei în care solicitarea este pozitivă de-a lungul direcțiilor $\pm\pi/4$, iar “m3” corespunde geometriei în care solicitarea este pozitivă de-a lungul direcțiilor 0 și $\pi/2$. Ambele kerneli descriu o forfecare în plan. Culoarele indică solicitările pe blocul respectiv, iar săgețile indică direcția solicitării externe.

În cea de-a doua parte a capitolului se arată că forma neobișnuită a kernelului Eshelby asociat rearanjărilor atomice în modelele mesoscopice conduce la localizarea activității plas-

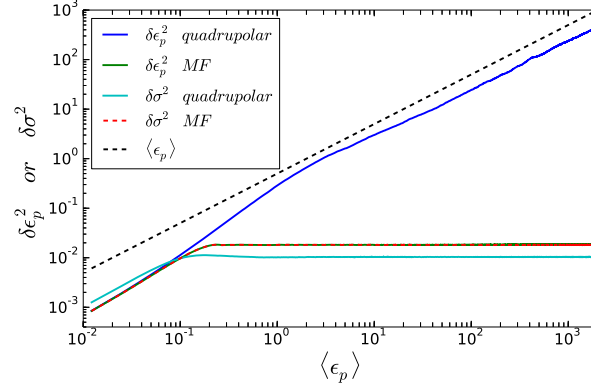


Figura 8: Variația deformației și a solicitării pentru interacțiunea de câmp mediu și pentru interacțiunea quadrupolară de tip Eshelby. Linia punctată indică difuzie. Fluctuațiile de solicitare plafonează pentru ambele interacțiuni, precum și fluctuațiile de deformații pentru interacțiunea de câmp mediu. În același timp, fluctuațiile interacțiunii Eshelby tind spre un regim difuziv.

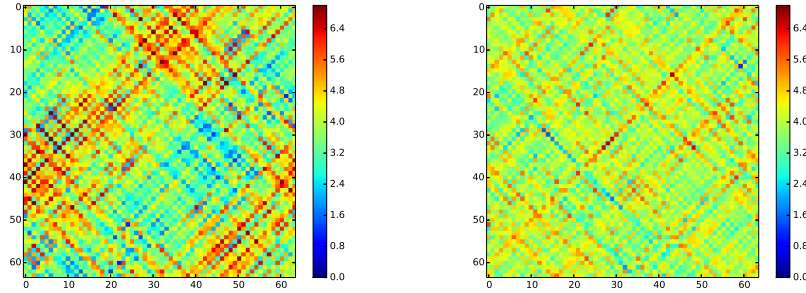


Figura 9: Câmpul de deformație plastică pentru kerneli cu diferite contribuții de câmp mediu. Stânga: kernelul Eshelby pur (contribuție câmp mediu zero). Dreapta: o pondere mică a kernelului de câmp mediu.

tice și o creștere difuzivă a fluctuațiilor (Fig. 8). Pe timp scurt, dinamica este dominată de evenimente plastice localizate, pe timp lung însă se dezvoltă benzile de forfecare. Localizarea de-a lungul benzilor de forfecare se poate realiza deoarece aceste benzi se pot forma fără nici un cost energetic. Astfel, deformația poate fi blocată pentru perioade lungi în aceste benzi. Acest efect conduce la creșterea continuă a fluctuațiilor. Dinamica este astfel dominată de cuplajul slab dintre benzile individuale. În noul cadru oferit de competiția

dintre dezordine și o serie de benzi slab cuplate, plasticitatea amorfă poate fi privită cu un pas mai departe de incluziunile de tip Eshelby.

O astfel de localizare nu este posibilă în problemele clasice de depinning cu interacțiuni de câmp mediu sau izotrope. Pentru a vizualiza acest lucru, am considerat kerneli care sunt medii ponderate între un kernel Eshelby și un kernel câmp mediu. În Fig. 9 de exemplu se vede clar că localizarea este suprimată de prezența celui mai slabe contribuții de câmp mediu. Cea mai slabă contribuție de câmp mediu deci rezultă în suprimarea localizării și în saturația fluctuațiilor. Această diferență este atribuită prezenței a modurilor moi în kernelul Eshelby. Prezența acestor moduri poate fi pusă în evidență examinând spectrul de valori proprii al kernelului elastic (Fig. 10). Aici se vede că introducerea unei contribuții infime de câmp mediu rezultă în deschiderea unui decalaj în jurul valorii proprii zero. Dinamica fiind guvernată de cele mai slabi valori proprii, această diferență are consecințe cruciale asupra localizării. Pentru kernelul Eshelby, modurile de deformare asociate sub-spațiului valorii proprii zero sunt benzi de forfecare.

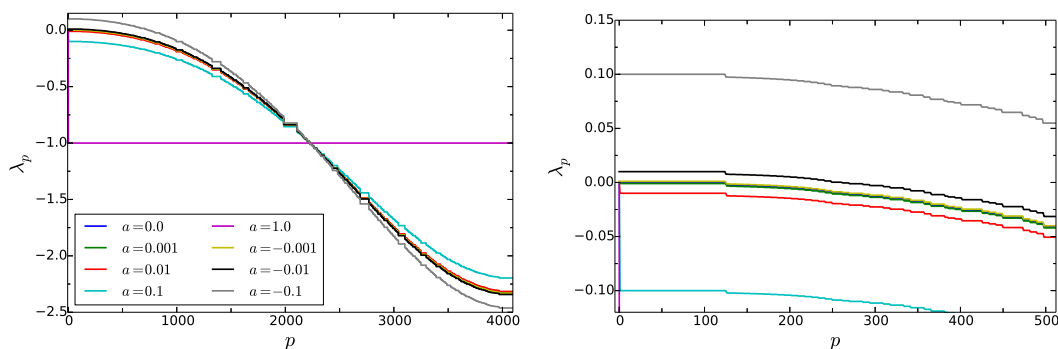


Figura 10: Spectrul de valori proprii pentru kernelul Eshelby și diferite contribuții de câmp mediu. O pondere diferit de zero deschide un decalaj în jurul valorilor proprii zero.

Deși benzile de forfecare sunt moduri de deformare moi a kernelului Eshelby, arătăm că prezența lor poate fi suprimată în mod eronat de modul de discretizare. Modurile de deformare moi permit localizarea deformării și creșterea continuă a fluctuațiilor, ceea ce până la urmă duce la nucleația fisurilor și cedarea materialului. Controlarea formării benzilor de forfecare este deci primul pas către suprimarea nucleației de fisuri și întărirea materialelor amorfe fragile.

5 Capitolul 4: Proprietăți de scalare și efecte de mărime finită

Capitolele precedente demonstrează că descrierea mesoscopică a materialelor amorse rezultă din competiția dezordinii și a elasticității. În capitolul anterior ne-am ocupat cu interacțiunea elastică, am pus în evidență importanța modurilor moi și am ajuns la concluzia că acestea au un efect dramatic asupra localizării și a fluctuațiilor. Prezența lor poate afecta chiar și clasa de universalitate în vocabularul fenomenelor de tip depinning. În capitolul 4 explorăm influența dezordinii asupra proprietăților de scalare. Ne concentrăm asupra distribuției mărimii avalanșelor și comparăm rezultatele noastre cu cele anterioare obținute din dinamica moleculară atermală și cuasistatică. Se studiază atent și efectele de mărime finită.

Scopul mesomodelor considerate este de a oferi o comparație cantitativă cu metodele de tip dinamică moleculară. Măsura în care detaliile acestor modele sunt importante este încă neclară și primul pas către elucidarea acestei întrebări este de a testa modul în care aceste detalii afectează comportamentul universal. Dacă proprietățile universale observate în dinamica moleculară nu sunt reflectate de mesomodele, o comparație cantitativă este imposibilă.

Pentru a studia influența dezordinii asupra fluctuațiilor și asupra proprietăților de scalare considerăm două posibilități extreme pentru dezordinea din sistem: bariere potențiale cu înălțimi fixe sau lățimi fixe. Comparăm exponenții critici cu cele obținute de simulări de dinamică moleculară.

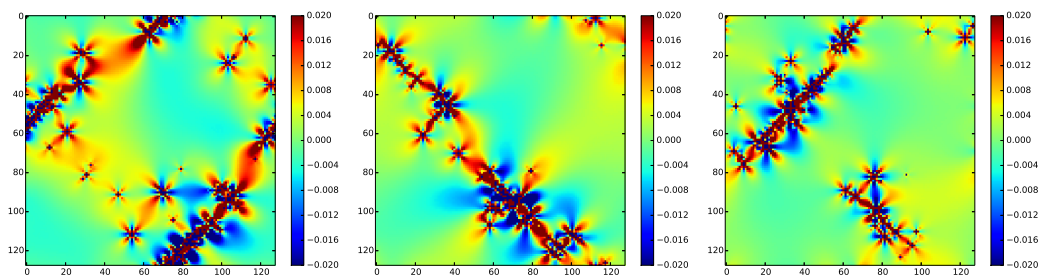


Figura 11: Câmpul incremental de solicitare pentru intervale de timp succesive, pentru una dintre protocoalele utilizate. Activitatea plastică tinde să se acumuleze de-a lungul benzilor de alunecare.

Arătăm că în materialele amorse ipoteza conform căreia avalanșele au o formă spațială de benzi de alunecare (Fig. 11) este în concordanță cu efectele de mărime finită observate. Comportamentul difuziv pe timp scurt este guvernat de împingeri rare de către benzile individuale, ceea ce este confirmată de scalarea obținută. Pe o scară de timp lungă, difuzia este efectul colectiv a benzilor cuplate (Fig. 12). Comportamentul pe termen lung este extrem de sensibil la prezența modurilor moi în kernelul de interacțiune. Cu toate acestea,

exponenții de scalare sunt aproape insenzitivi la protocolul utilizat. Deși o distribuție și o corelație realistă a dezordinii va trebui obținută din simulări de dinamică moleculară, nu ne așteptăm ca acestea să afecteze considerabil comportamentul universal în aceste sisteme.

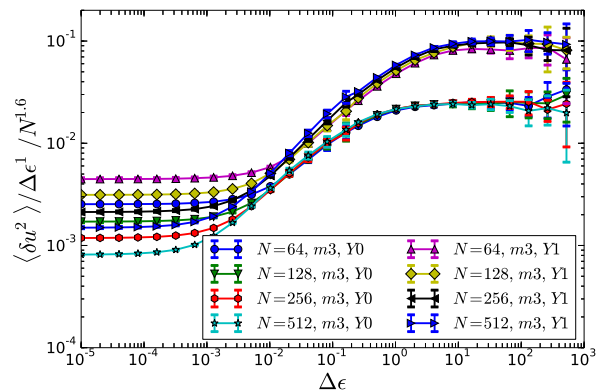


Figura 12: Coeficienții de difuzie rescalate cu $N^{1.6}$ unde N este mărimea lineară a sistemului. Coeficientul de difuzie prezintă scalare de mărime finită. Pe termen scurt, el scalează ca $N^{1.05}$, iar pe termen lung, ca $N^{1.6}$. Difuzia pe termen scurt poate fi explicată printr-un model de benzi random necorelate. Pe termen lung însă scalarea este rezultatul colectiv a benzilor de forfecare și prezintă o scalare non-trivială. Cele două curbe master corespund celor două tipuri de dezordine.

6 Capitolul 5: Aplicații la materiale compozite amorse

În capitolele 2-4 s-a arătat că interacțiunea elastică asociată rearanjărilor în materialele amorse prezintă moduri noi de deformare care rezultă în localizare și în fluctuații anormale a deformației. Această localizare este cauza fragilității materialelor amorse, cum are fi și sticlele.

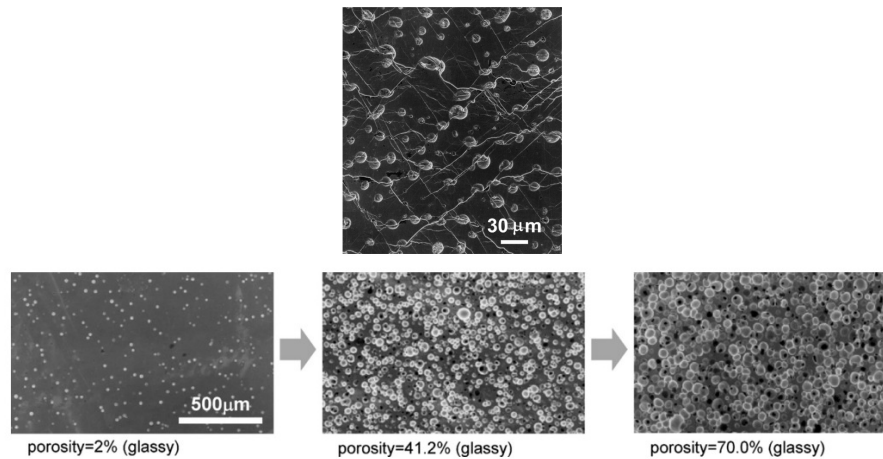


Figura 13: Aliaj de sticlă poroasă. Porii împiedică nuclearea și propagarea benzilor de forfecare, astfel întărind materialul. Figură din [22].

Experimente recente au pus în evidență că formarea benzilor de forfecare poate fi controlată prin introducerea unor incluziuni de componentă diferită în blocul amorf (Fig. 13). Rolul acestor incluziuni este de a bloca formarea benzilor de forfecare. Aceste materiale compozite devin întărite. În modelul propus de noi, incluziunile dure sunt modelate ca orice alt nod din sistem, dar având o limită de curgere mai mare. Cu această modificare simplă s-a investigat creșterea solicitării la limita de curgere. Am observat că cea mai mare parte a deformației se acumulează de-a lungul celei mai slabe benzi de forfecare, banda definită prin cel mai mic număr de incluziuni dure. Pornind de la aproximația că toate activitatea plastică se desfășoară de-a lungul acestei benzi, am dezvoltat un simplu model analitic. Cu acest model, am reușit să explicăm efectele de mărime finită observate. Fig. 14 prezintă datele de simulări împreună cu estimările teoretice a limitei solicitării la curgere și a fluctuațiilor acestuia. În limita unui sistem de mărime infinită, solicitarea la curgere este descrisă de o creștere lineară în funcție de concentrația incluziunilor dure. Pe fig. 14 am reprezentat și un sistem unidimensional, adică o linie de depinning cu o concentrație de incluziuni dure. Aceasta nu prezintă efecte de mărime finită și solicitarea în funcție de concentrația incluziunilor dure este descrisă de legea de amestecare lineară independent de mărimea sistemului.

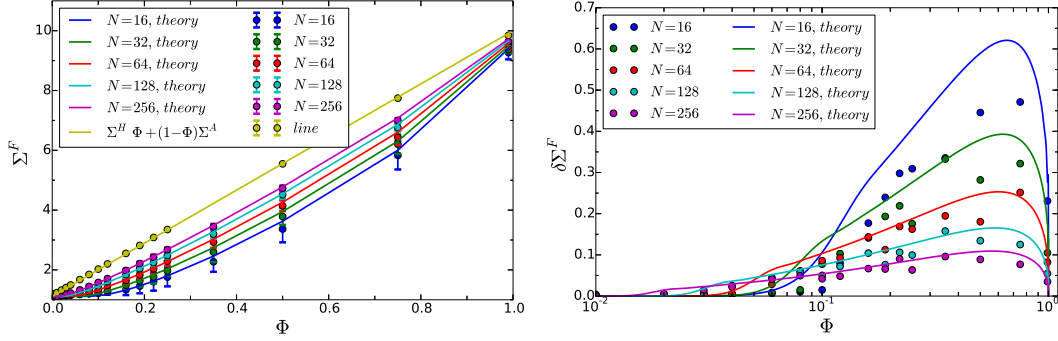


Figura 14: Stânga: Estimări analitice exacte a a limitei de curgere în funcție de concentrație. Linia continuă reprezintă calculul bazat pe modelul celei mai slabe benzi, iar punctele reprezintă rezultate din simulări. Se observă o creștere a solicitării limite cu mărirea sistemului. Limita superioară este dată de o lege de amestecare lineară. Într-un sistem ipotetic unidimensional, astfel de efecte de mărime finită nu s-au observat. Dreapta: Estimări analitice pentru fluctuațiile limitei de curgere.

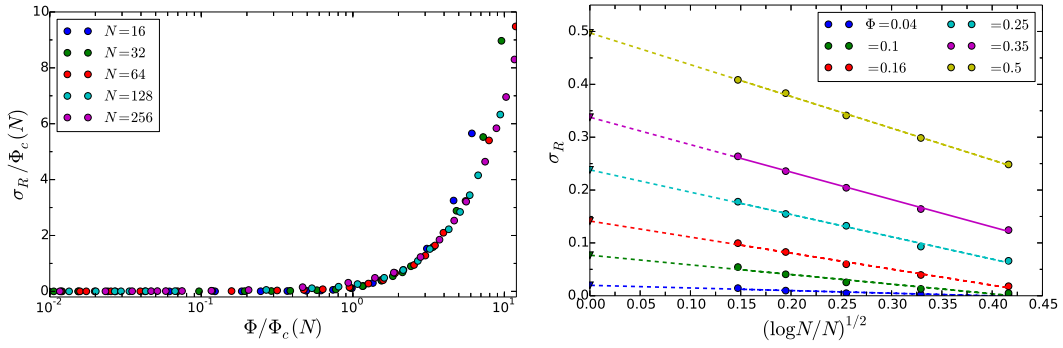


Figura 15: Stânga: Colapsul curbelor de amestecare după rescalare cu concentrația critică Φ_c . σ_R reprezintă diferența solicitării la curgere între rezultatele din simulări și legea de amestecare lineară. Din figură reiese existența unei concentrații critice sub care nu are loc nicio întărire. Dreapta: Diferența solicitării la legea de amestecare scalează ca $(\log(N)/N)^{1/2}$ și prefactorul depinde de concentrație.

În cadrul acestui capitol se demonstrează că plasticitatea în materiale amorphe prezintă două tipuri de efecte de mărime finită: unul asociat matricei amorphe prezentat în [39] și al doilea asociat incluziunilor dure. Primul rezultă într-o dependență $1/N$ a solicitării la curgere (unde N este mărimea sistemului), iar celălalt prevede o concentrație prag sub

care nu are loc întărire în sistem (fig. 15 stânga). Acest prag corespunde percolației benzilor de forfecare între incluziunile dure. Peste concentrația de prag, diferența solicitării la legea lineară se scalează ca $(\log(N)/N)^{1/2}$ (fig. 15 dreapta) și limita de curgere crește cu creșterea sistemului. Legea lineară este deci o limită maximă a solicitării. S-a arătat că creșterea limitei de curgere rezultă prin spargerea celei mai slabe benzi și că deformația este acumulată pe această bandă. În final, s-a dezvoltat un model simplu bazat pe ipoteza benzii celei mai slabe care s-a dovedit a fi funcțional în descrierea limitei de curgere, în înțelegerea dependenței acesteia de mărimea sistemului și a fluctuațiilor limitei de curgere.

7 Capitolul 6: Dinamica și topologia liniei triple a unui fluid pe o suprafață dezordonată

S-a argumentat că tranziția de curgere are multe caracteristici comune cu tranziția de depinning a liniilor elastice. Ambele fenomene sunt rezultatul competiției dintre dezordine și interacțiunile elastice. În acest sens, multe sisteme pot fi modelate în cadrul formalismului de depinning. De exemplu, asperizarea liniei triple a unei pelicule de fluid în retragare pe suprafața unui solid este guvernată de competiția dintre forțele de tensiune superficială și interacțiuni de tip pinning cu neomogenitățile suprafeței. Acest proces de asperizare a fost studiat în multe detalii în cadrul modelelor de tip depinning [18, 12, 24, 23, 10, 19]. Cadrul oferit de aceste modele este limitat însă la interacțiuni lineare, deci deformații mici. Mai mult decât atât, metodele standard în fenomenologia de tip depinning nu permit ruperea eventuală a stratului în limita deformațiilor mari. După cum se vede în Fig. 16, stratul adesea se deformează peste limită și stratul se rupe ușor.

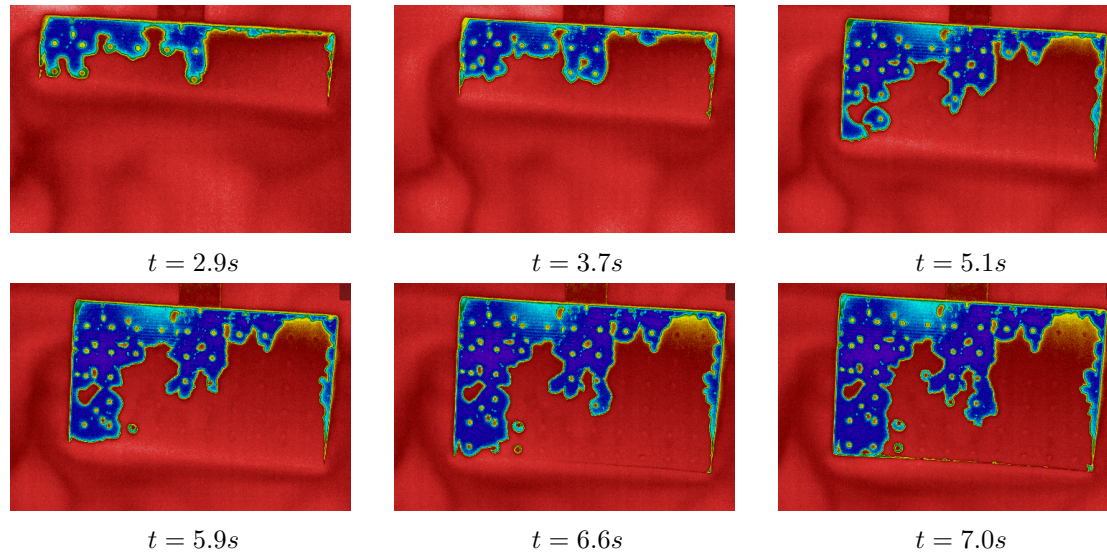


Figura 16: Asperizarea progresivă a unei linii de des-umezire pe o matrice de defecte. Experimente și imagini efectuate de E. S. Bogy și Á. Kukovecz. În acest experiment, o matrice de defecte s-a depozitat pe o suprafață plană. Suprafața plană apoi a fost ridicată din apă sub diferite unghiuri la viteză constantă. În timpul ridicării, un strat subțire rămâne în urmă care se contractă, însă este prins în capcană de defecte, ceea ce rezultă în asperizarea liniei. Imaginile au fost făcute cu o cameră termică pentru un contrast ameliorat.

În capitolul 6, se abordează chiar neajunsurile metodelor clasice de studiu. S-a dezvoltat un model asemănător celor de tip depinning cu scopul de a investiga deformațiile mari și

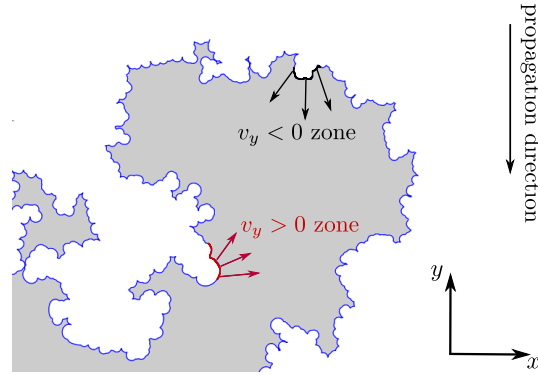


Figura 17: Morfologia liniei de contact în simulările noastre. Metoda oferită de noi permit deformații mari, ruperea stratului precum și mișcări în sens opus a retragerii peliculei.

ruperea stratului de lichid (Fig. 17). Metoda este o metodă de tip off-lattice, asemănătoare cu metodele de dinamică moleculară pentru a investiga dinamica unui strat subțire și vâcos de lichid pe suprafețe neomogene. În această metodă, linia de contact este discretizată prin intermediul unor puncte reprezentative. Pornind de la energia sistemului în modelul discretizat, calculăm forțele de interacțiune între aceste puncte reprezentative. În aproximarea de strat plat bidimensional s-a găsit că interacțiunea este una locală. Linia de contact astfel este una moale, care, deși preferă o configurație locală netedă, se poate deforma la scale mari la un cost energetic minor.

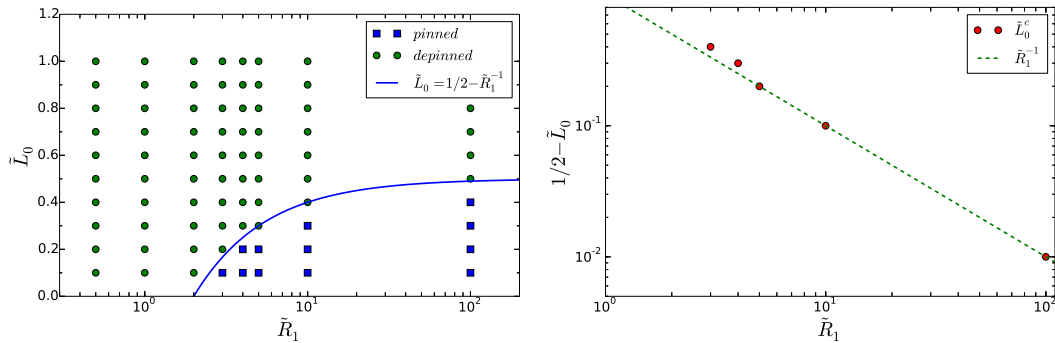


Figura 18: Stânga: diagrama de fază a liniei de contact în spațiul de parametri $(\tilde{R}_1, \tilde{L}_0)$. Simbolurile indică valori la care s-au efectuat simulări. Pătratele albastre indică faza oprită (pinned), iar cercurile verzi faza în mișcare (depinned). Dreapta: linia de separare a celor două faze are forma $\tilde{L}_0^c = 1/2 - \tilde{R}_1^{-1}$. Linia discontinuă are o pantă -1 .

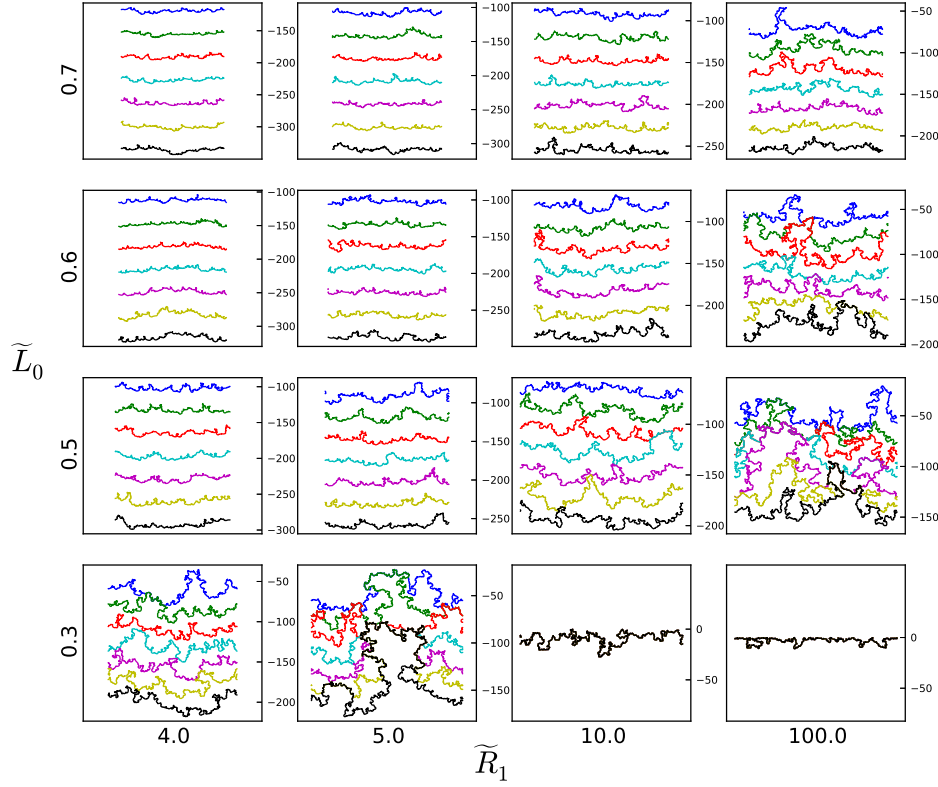


Figura 19: Asperizarea liniei de contact pentru cele două parametri adimensionale a sistemului. \tilde{L}_0 reprezintă distanța medie între defecte, iar \tilde{R}_1 este asociată tăriei defectelor. Diferitele culori reprezintă momente succesive în timp. Se observă o combinație a parametrilor la care corelații spațiale de lungă distanță se dezvoltă. Această combinație este descrisă de $\tilde{L}_0^c = 1/2 - \tilde{R}_1^{-1}$.

Folosind metoda elaborată, s-a studiat un sistem simplu în care suprafața peste care se retrage fluidul are distribuite aleator defecte punctiforme (puncte de pinning). În model s-a pus în evidență existența unui prag de concentrație a defectelor peste care dinamica liniei este blocată, iar deasupra acestuia linia de contact se mișcă până la infinit. În jurul concentrației critice s-a arătat apariția unor deformări mari cu corelații la distanțe lungi ceea ce poartă amprenta unei tranziții de tip depinning neobișnuite. Introducem două parametri adimensionali, ambele de natură de lungime și asociate defectelor: \tilde{L}_0 reprezintă

distanța medie între defecte, iar \tilde{R}_1 este asociată tăriei defectelor și explorăm diagrama de fază bidimensională (Fig. 18).

Cu introducerea cantităților adimensionale necesare arătăm că dinamica este rezultatul competiției între două scale de lungime, ambele fiind caracteristice suprafeței neomogene (Fig. 19). În această abordare, proprietățile universale a liniei pot fi considerate ca și rezultatul competiției dintre tăria și densitatea defectelor.

8 Concluzii finale

În această teză s-a studiat două sisteme dezordonate din punctul de vedere depinning. Fenomenologia complexă în aceste sisteme este consecința nonlinearităților care provin din competiția dezordinii și a interacțiunilor elastice.

În prima parte s-a investigat proprietățile generice plastice ale materialelor amorfe printr-un model mesoscopic. S-a arătat că dinamica de praguri provine din multistabilitatea elementelor elastoplastice. Prin două cazuri extreme s-a arătat că forma dezordinii nu are efecte considerabile asupra comportamentului universal.

Deși tranziția de cedare a materialelor amorfe este, din multe puncte de vedere, similară cu tranziția depinning, curgerea plastică nu este depinning. Diferența provine din existența modurilor moi în interacțiunea elastică. În cazul kernelului asociat rearanjărilor locale, s-a arătat că aceste moduri moi sunt benzi de forfecare. S-a arătat că modurile moi sunt responsabili pentru creșterea difuzivă a fluctuațiilor și pentru localizarea activității plastice.

S-a arătat că dinamica pe termen lung rezultă din difuzia benzilor de forfecare slab cuplate. Cuplajul provine din varianța deformării plastice de-a lungul benzilor individuale și contează pe termen lung. De exemplu, scalarea de mărime finită a coeficientului de difuzie nu poate fi explicată printr-un model simplu de benzi independente. Cu toate acestea, localizarea pe timp scurt urmărește benzi de alunecare precum s-a arătat din scalarea de mărime finită a coeficientului de difuzie.

Fluctuațiile divergente asociate benzilor de forfecare rezultă, în ele din urmă, în ruperea materialului. Prin urmare, înțelegerea procesului de formare acestor benzi este primul pas în construirea materialelor cu proprietăți mecanice ameliorate. Pasul următor este controlarea nucleării acestor benzi. S-a arătat că nuclearea este afectată de introducerea incluziunilor dure în volumul amorf. S-a arătat că întărirea prezintă efecte de mărime finită și o lege lineară de amestecare este o limită maximă a limitei de curgere. Efectul de mărime finită s-a explicat printr-un model simplu analitic. Mai mult decât atât, s-a arătat că întărirea este asociată percolației între incluziunile dure și, în consecință, nu există întărire sub un prag de concentrație.

În cea de-a doua parte s-a introdus un alt sistem dezordonat tip depinning. S-a dezvoltat o metodă nouă pentru descrierea și modelarea dinamicii a straturilor subțiri pe suprafețe neomogene. În model, s-a considerat un strat plat ceea ce a permis descrierea completă a stratului numai prin urmărirea liniei triple de contact. În această aproximație s-a arătat că interacțiunile de-a lungul liniei sunt de scurtă distanță, în consecință, linia este una moale. Asperizarea liniei este guvernată de competiția între aceste forțe de scurtă distanță și a dezordinii suprafeței. S-a arătat existența unei concentrații prag a neomogenităților suprafeței. Peste acest prag, linia se oprește, iar sub acest prag ea se mișcă încontinuu. În jurul concentrației de prag linia prezintă proprietăți critice precum structură fractal și corelații spațiale de distanțe lungi. Această tranziție este una neobișnuită. Deși este asemănătoare tranziției depinning, în acest caz, tranziția este asociată deformațiilor mari și ruperii a stratului. Aceste aspecte nu sunt considerate în modelele standarde de depinning.

În consecință, sperăm că metoda noastră poate deschide o nouă perspectivă în studiul mișcării intermitente ale interfețelor.

9 Contribuții personale

Contribuții personale în domeniul plasticității amorfe:

- am dezvoltat propriul meu cod pentru a simula plasticitatea materialelor amorfe. Codul rulează și în paralel pentru a putea demara simulări cu sisteme extinse pe clustere de calculatoare.
- am rulat simulările pe clusterelor, am dezvoltat codurile pentru procesarea datelor și am preparat graficele.
- am dezvoltat o metodă de elemente finite pentru discretizarea interacțiunii elastice și a câmpului de deplasări și am arătat că prezența modurilor moi este sensibilă la discretizare.
- am arătat existența a două feluri de difuzie și am explicat originea acestora. Am arătat că proprietățile universale nu sunt afectate de natura dezordinii.
- am dezvoltat codul pentru simularea compozitelor amorfe și am descoperit că întărirea compozitelor este legată de percolația benzilor de forfecare și am dezvoltat un model analitic pentru explicarea legii de întărire.

Contribuții personale în domeniul des-umezirii:

- am dezvoltat codul pentru simularea dinamicii a liniei de contact
- am introdus și implementat o metodă de gestionare a punctelor reprezentative pentru a impune o densitate constantă ale acestora, precum și pentru a permite ruperea stratului.
- am dezvoltat interfața grafică pentru o depanare ușoară
- am introdus o metodă probabilistică pentru modelarea defectelor
- am rulat simulările și am găsit existența unei concentrații prag a defectelor și proprietăți critice în jurul acestei concentrații.
- am explicat fenomenul prin descrierea adimensională a problemei și am redus problema la competiția a două scale de lungime

10 Publicații și prezentări la conferințe

Publicații legate de teză

- B. Tyukodi, C. Lemarchand, J. Hansen, D. Vandembroucq, “Finite size effects in a model for plasticity of amorphous composites”, *Physical Review E*, 93, 023004 (2016)
- B. Tyukodi, S. Patinet, D. Vandembroucq, S. Roux, “From depinning transition to plastic yielding of amorphous media: a soft modes perspective” (2015, submitted)
- B. Tyukodi, Y. Bréchet, Z. Nédá, “Kinetic roughening of a soft dewetting line under quenched disorder - a numerical study”, *Physical Review E* 90, 052404 (2014)

Conferințe

- B. Tyukodi, W. Zhu, D. Vandembroucq, C. Maloney, “Diffusion and localization in elasto-plastic models of amorphous plasticity”, *Materials Research Society fall meeting* (2015, Boston, talk)
- B. Tyukodi, Y. Bréchet, Z. Nédá, “Kinetic roughening of a soft dewetting line - a novel computer simulation method ”, *Physics Conference TIM14* (2014, Timișoara, co-author of plenary talk)
- B. Tyukodi, C. Lemarchand, D. Vandembroucq, “Plasticity of strongly heterogeneous materials”, *Condensed Matter in Paris* (2012, Paris, poster)

Alte publicații

- B. Bresson, C. Brun, X. Buet, Y. Chen, M. Ciccotti, J. Gateau, G. Jasion, M. Petrovich, F. Poletti, D. J. Richardson, R. Sandoghchi, G. Tessier, B. Tyukodi, D. Vandembroucq, “The long memory of glass surfaces” (2016, in preparation)
- Sz. Boda, Z. Nédá, B. Tyukodi, A. Tunyagi, “The rhythm of coupled metronomes”, *The European Physical Journal B* 86, 263 (2013)
- B. Tyukodi, I. A. Chioar, Z. Nédá “A kinetic Monte Carlo study for stripe-like magnetic domains in ferrimagnetic thin films”, *Central European Journal of Physics* 11, 487 (2013)
- B. Tyukodi, Zs. Sárközi, Z. Nédá, A. Tunyagi, E. Györke, “Boltzmann constant from a snifter”, *European Journal of Physics* 33, 455 (2012)
- Z. Nédá, B. Tyukodi, Á-E. Kacsó “Foundations of classical statistical mechanics” (textbook, 2014, in Hungarian, ISBN 978-973-114-187-9)

Cuvinte cheie

plasticitate, materiale amorfe, depinning, tranziția de cedare, tranziții de faze dinamice, des-umezire, sisteme dezordonate, asperizarea interfețelor.

Bibliografie

- [1] Albe, K., Ritter, Y., and Soper, D. (2013). Enhancing the plasticity of metallic glasses: Shear band formation, nanocomposites and nanoglasses investigated by molecular dynamics simulations. *Mechanics of Materials*, 67:94–103.
- [2] Amon, A., Nguyen, V. B., Bruand, A., Crassous, J., and Clément, E. (2012). Hot Spots in an Athermal System. *Physical Review Letters*, 108(13):135502.
- [3] Antonaglia, J., Wright, W. J., Gu, X., Byer, R. R., Hufnagel, T. C., LeBlanc, M., Uhl, J. T., and Dahmen, K. A. (2014). Bulk Metallic Glasses Deform via Slip Avalanches. *Physical Review Letters*, 112(15):155501.
- [4] Argon, A. S. (1979). Plastic deformation in metallic glasses. *Acta Metallurgica*, 27:47 – 58.
- [5] Argon, A. S. and Kuo, H. Y. (1979). Plastic Flow in a Disordered Bubble Raft (an Analog of a Metallic Glass). *Materials Science and Engineering*, 39(1):101–109.
- [6] Bak, P. (1999). *How Nature Works*. New York.
- [7] Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987). Self-Organized Criticality: An Explanation of the $1/f$ Noise. *Physical Review Letters*, 59(4):381–384.
- [8] Baret, J. C., Vandembroucq, D., and Roux, S. (2002). Extremal Model for Amorphous Media Plasticity. *Physical Review Letters*, 89(19):195506.
- [9] Bocquet, L., Colin, A., and Ajdari, A. (2009). Kinetic theory of plastic flow in soft glassy materials. *Physical Review Letters*, 103(3):1–4.
- [10] Bonn, D., Eggers, J., Indekeu, J., Meunier, J., and Rolley, E. (2009). Wetting and spreading. *Reviews of Modern Physics*, 81(2):739–805.
- [11] Bormashenko, E., Musin, A., Whyman, G., Barkay, Z., and Zinigrad, M. (2015). On universality of scaling law describing roughness of triple line. *The European Physical Journal E*, 38(1):2.

- [12] Brochard-Wyart, F., de Gennes, P. G., Herver, H., and Redon, C. (1994). Wetting and Slippage of Polymer Melts on Semi-ideal Surfaces. *Langmuir*, 10(5):1566–1572.
- [13] Burgers, J. M. (1939). Physics -Some considerations on the fields of stress connected with dislocations in a regular crystal lattice I. *Proceedings of the koninklijke nederlandse akademie van wetenschappen*, 42:335–389.
- [14] Chen, J. S. and Lin, K. Y. (2005). Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *Journal of Materials Science*, 40(1):87–95.
- [15] Chen, M. (2011). A brief overview of bulk metallic glasses. *NPG Asia Materials*, 3:82–90.
- [16] Dahmen, K. A., Ben-Zion, Y., and Uhl, J. T. (2011). A simple analytic theory for the statistics of avalanches in sheared granular materials. *Nature Physics*, 7(7):554–557.
- [17] Falk, M. L. and Langer, J. S. (1998). Dynamics of viscoplastic deformation in amorphous solids. *Physical Review E*, 57(6):7192–7205.
- [18] Gennes, P. G. (1985). Wetting: Statics and dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 57(3):827–863.
- [19] Golestanian, R. (2004). Moving contact lines on heterogeneous substrates. *Philosophical Transactions of the Royal Society A- Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 362(1821):1613–23.
- [20] Hardin, T. J. and Homer, E. R. (2015). Microstructural factors of strain delocalization in model metallic glass matrix composites. *Acta Materialia*, 83:203–215.
- [21] Hébraud, P. and Lequeux, F. (1998). Mode-Coupling Theory for the Pasty Rheology of Soft Glassy Materials. *Phys. Rev. Lett.*, 81(14):2934–2937.
- [22] Inoue, A., Wada, T., and Louzguine-Luzgin, D. V. (2007). Improved mechanical properties of bulk glassy alloys containing spherical pores. *Materials Science and Engineering A*, 471(1-2):144–150.
- [23] Joanny, J. F. and de Gennes, P. G. (1984). A model for contact angle hysteresis. *The Journal of Chemical Physics*, 81(1):552.
- [24] Joanny, J. F. and de Gennes, P. G. (1986). Upward creep of a wetting fluid: a scaling analysis. *Journal de Physique*, 47(1):121–127.
- [25] Kardar, M. (1998). Nonequilibrium dynamics of interfaces and lines. *Physics Reports*, 301:85–112.

- [26] Le Bouil, A., Amon, A., McNamara, S., and Crassous, J. (2014a). Emergence of Cooperativity in Plasticity of Soft Glassy Materials. *Physical Review Letters*, 112(24):246001.
- [27] Le Bouil, A., Amon, A., Sangleboeuf, J. C., Orain, H., Bésuelle, P., Viggiani, G., Chasle, P., and Crassous, J. (2014b). A biaxial apparatus for the study of heterogeneous and intermittent strains in granular materials. *Granular Matter*, 16(1):1–8.
- [28] Lin, J., Lerner, E., Rosso, A., and Wyart, M. (2014). Scaling description of the yielding transition in soft amorphous solids at zero temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(40):14382–14387.
- [29] Lin, J. and Wyart, M. (2016). Mean-field description of plastic flow in amorphous solids. *Physical review X*, 6(1):011005.
- [30] Louzguine-Luzgin, D. V., Louzguina-Luzgina, L. V., and Churyumov, A. Y. (2013). Mechanical Properties and Deformation Behavior of Bulk Metallic Glasses. *Metals*, 3(1):1–22.
- [31] Maas, R., Klaumunzer, D., and Loffler, J. F. (2011). Propagation dynamics of individual shear bands during inhomogeneous flow in a Zr-based bulk metallic glass. *Acta Materialia*, 59(8):3205–3213.
- [32] Picard, G., Ajdari, A., Lequeux, F., and Bocquet, L. (2004). Elastic consequences of a single plastic event: A step towards the microscopic modeling of the flow of yield stress fluids. *The European Physical Journal E, Soft Matter*, 15:371–381.
- [33] Rodney, D., Tanguy, A., and Vandembroucq, D. (2011). Modeling the mechanics of amorphous solids at different length scale and time scale. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 19:083001.
- [34] Schall, P., Weitz, D. A., and Spaepen, F. (2007). Structural rearrangements that govern flow in colloidal glasses. *Science (AAAS)*, 318:1895–1899.
- [35] Schuh, C. A. and Lund, A. C. (2003). Atomistic basis for the plastic yield criterion of metallic glass. *Nature materials*, 2:449–452.
- [36] Sollich, P., Lequeux, F., Hébraud, P., and Cates, M. E. (1997). Rheology of Soft Glassy Materials. *Physical Review Letters*, 78(10):2020.
- [37] Sun, B. A. and Wang, W. H. (2011). Fractal nature of multiple shear bands in severely deformed metallic glass. *Applied Physics Letters*, 98(20):201902.
- [38] Talamali, M., Petaja, V., Vandembroucq, D., and Roux, S. (2011). Avalanches, precursors, and finite-size fluctuations in a mesoscopic model of amorphous plasticity. *Physical Review E*, 84(1):016115.

- [39] Talamali, M., Petaja, V., Vandembroucq, D., and Roux, S. (2012). Strain localization and anisotropic correlations in a mesoscopic model of amorphous plasticity. *Comptes Rendus Mecanique*, 340(4-5):275–288.
- [40] Torquato, S. (2002). *Random heterogeneous materials. Microstructure and macroscopic properties*. Springer, New York.
- [41] Turcsanyi, B., Pukanszky, B., and Tudos, F. (1988). Composition dependence of tensile yield stress in filled polymers. *Journal of Materials Science Letters*, 7:160–162.
- [42] Tyukodi, B., Bréchet, Y., and Néda, Z. (2014). Kinetic roughening of a soft dewetting line under quenched disorder: A numerical study. *Physical Review E*, 90(5):052404.
- [43] Tyukodi, B., Lemarchand, C. A., Hansen, J. S., and Vandembroucq, D. (2016). Finite-size effects in a model for plasticity of amorphous composites. *Physical Review E*, 93(2):023004.
- [44] Tyukodi, B., Patinet, S., Roux, S., and Vandembroucq, D. (2015). From depinning transition to plastic yielding of amorphous media: A soft modes perspective. *arXiv:1502.07694v1*.