

A telephelyi veszélyhelyzet-kezelés

Az atomerőmű alapvetően rendelkezik a veszélyhelyzetek (nukleáris és hagyományos) kezeléséhez szükséges személyi és tárgyi feltételekkel és erőforrásokkal.

A felülvizsgálat megállapította, hogy a veszélyhelyzeti és a súlyosbaleset-beavatkozási képesség a nemzetközi ajánlások és a nemzeti szabályozások követelményei alapján épül fel. A felkészülés időszakában készenléti rendszer és eszközök, illetve riasztással aktiválható szervezet biztosítja a beavatkozó képességet. A felkészültség biztosításának irányelvei és a konkrét tervezési alapjai a nukleáris baleseti események mellett egyéb veszélyhelyzetek felszámolására is biztosítottak. Normál időszakban kötelező ellenőrzési, képzési és gyakorlási rendszer eredményezi a beavatkozási képesség fenntartását.

A paksi atomerőműben működő balesetelhárítási szervezet jelenlegi formájában nem teljesen alkalmas a tervezési alapján túli esetek, azaz a több blokkon egyidejűleg bekövetkező balesetek kezelésére. Több-blokkos súlyos baleset esetén a jelenlegi szervezet még több váltást figyelembe véve sem tudja biztosítani a folyamatos tevékenységet, az elhárítási feladatokra rendelkezésre álló állomány létszáma elhúzódó időtartamú tevékenység esetén nem elegendő. Ilyenkor a balesetelhárítási szervezet külső erők bevonásával tudja kezelni a helyzetet. Bizonyos tervezésen túli külső események olyan mértékű személyi és anyagi kárt okozhatnak, hogy a helyzet kezelése mindenképpen az országos hatáskörű szervezetek közreműködését igényli.

A balesetelhárítási tevékenységeket úgynevezett védett vezetési pontról lehet irányítani, annak elvesztésekor az irányítási feladatokat a tartalék vezetési pontról kell végrehajtani, ahol az irányítási és kommunikációs feltételek jelenleg nem teljes értékűek. Ezért a védelmi követelményeknek (földrengés, sugárzás, környezeti hőmérséklet stb.) megfelelő, az

irányítás és a kommunikáció eszközeit tekintve a védett vezetési ponttal egyenértékű tartalék vezetési pont létesítését határoztuk el.



A paksi atomerőműben végrehajtott célzott biztonsági felülvizsgálat igazolta, hogy az erőmű blokkjai teljesítik a tervezési alaphoz tartozó követelményeket, beleértve a belső és külső hatásokkal szembeni védettség kritériumait. Az atomerőmű védettsége a vizsgált kulcseseményekkel szemben is jó.

A vizsgálatok alapján rögzíthető volt, hogy a fukusimai tapasztalatok feldolgozása és a célzott biztonsági felülvizsgálat eredményei azonnali beavatkozással nem tesznek szükségessé.

A felülvizsgálat emellett arra is rámutatott, hogy több lehetőség kínálkozik a tartalékok növelésére a kis valószínűsű, de a tervezési alapon túli terheléseket eredményező hatásokkal vagy azok következményeivel szemben.

A célzott biztonsági felülvizsgálat során különböző javító intézkedések lehetőségeit tártuk fel. A javító intézkedések négy különböző kategóriába sorolhatóak:

- külső hatásokkal (földrengés, elárasztás) szembeni védettség fokozása,
- kezelési utasítások módosítása, újak készítése,
- meglévő és alternatív villamos betáplálási vagy hűtési lehetőségek biztosítása és
- súlyos balesetek következményének csökkentése.

A javító intézkedések végrehajtását követően a villamos betáplálás és a végső hőelnyelő, valamint a pihentető medencék hűtésének tartós elvesztése csaknem lehetetlenné válik. Ezért a súlyos balesetek bekövetkezésének valószínűsége az eddigi alacsony értékhez képest is radikálisan csökken. Az extrém külső események ugyan továbbra is okozhatnak károkat a telephelyen, de e károk biztonsági hatása jelentősen csökken. A több-blokkos balesetek esélye még a jelenlegi rendkívül kis értékhez képest is elhanyagolhatóvá válik.

MIKROMÉRETŰ MINTÁK DEFORMÁCIÓINAK VIZSGÁLATA

Hegyí Ádám, Ratter Kitti, Ispánovity Péter Dusán, Groma István
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Anyagfizikai Tanszék

A kristályos anyagok képlékeny alakváltozását mikroszkopikus alapon leíró elmélet a 20. század elején jött létre, amikor 1934-ben *Orován*, *Polányi* és *Taylor* bevezette a diszlokáció fogalmát és sikeresen alkalmazta azt a képlékeny alakítás kvantitatív vizsgálatára. A diszlokáció vonalszerű rácshiba, amely sok tekintetben hasonlít a folyadékok áramlásakor kialakuló örvényekhez. Alapvető különbség azonban, hogy

amíg a folyadékörvény egy vektortér (nevezetesen a sebességtér) örvényessége, addig a diszlokáció egy tenzortér (az elasztikus disztorzió) örvényessége. Ezért tulajdonságai lényegesen bonyolultabbak. Ezekre még a későbbiekben részletesebben kitérünk.

Az évek során sikerült a diszlokációk feszültségterét és kölcsönhatásukat is meghatározni, ezáltal lehetővé vált a kristályos anyagok deformáció közben történő mozgásának leírása. Minél több diszlokációt tartalmaz az anyag, annál „keményebb”, hiszen a diszlokációk akadályozzák egymást mozgásukban, így ugyanakkora plasztikus (maradandó) deformáció csak nagyobb

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg (a támogatás száma TAMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003).

külső kényszer hatására tud kialakulni. Azt mondhatjuk, hogy az egyedi diszlokációk elmélete jól kidolgozott, és képes számot adni nagyon sok hétköznapi jelenségre, például arra, hogy a deformáció hatására az anyag keményebb lesz, illetve hogy az ötvözetek (acél, bronz) sokkal keményebbek, mint a tiszta anyagok. Ugyanakkor, még ha jól kilágyított anyagot veszünk is, ami azt jelenti, hogy kevés benne a diszlokáció, a keresztmetszet 1 cm^2 -nyi felületét akkor is $\sim 10^6$ diszlokáció dőfi át. Ez az érték a deformáció hatására 4 nagyságrenddel is növekedhet. A vonalhibák ilyen nagy száma ad okot arra, hogy mozgásukat a termodinamikához hasonlóan statisztikus fizikai eszközökkel vizsgáljuk. Ez a megközelítés az utóbbi 15 évben ugrásszerű fejlődésen ment keresztül, amelyben az ELTE Anyagfizikai Tanszékén működő kutatócsoport [1] aktív szerepet játszott [2–5]. Döntő jelentőségű, hogy az elméleti kutatások mellett lehetőségünk van a deformációs folyamat különböző skálákon (atomi, mezoszkopikus, makroszkopikus) történő számítógépes modellezésére. Érdemes megemlíteni, hogy sok ezer processzort tartalmazó szuperszámítógépek használatával képesek vagyunk néhány 100 nm élhosszúságú kockában levő atomok (~ 1 milliárd atom) mozgását deformáció közben követni, képet kapva a diszlokációk atomi szinten történő mozgásáról. Mezoszkopikus szinten, két nagyságrenddel nagyobb kockában a mai számítógépekkel lehetőség van a diszlokációk, mint kölcsönható vonalhibák kollektív mozgásának követésére (diszkrét diszlokációdinamika). A mai kutatások legnagyobb kihívása a különböző hosszúságskálák összekapcsolása (multiscale modelling of materials).

A transzmissziós elektronmikroszkópok és a legújabb technológiájú kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóp/fókuszált ionsugaras eszközök (SEM/FIB) elterjedésével lehetőség nyílik az anyag nanométeres nagyságrendű megfigyelésére és megmunkálására. Más anyagfizikai kísérleti eszközök is léteznek (például nanokeményégmérő, nanoindenter), amelyek hasonló mérettartományban képesek fizikai vizsgálatokat végezni.

Mint azt a fentiekből láthatjuk, az anyagfizikai kutatásokban a 21. század elejének egyik nagyon fontos fejleménye, hogy a kísérleti és szimulációs méretek összeértek. A szimulációk az elméleti megfontolások alapján készülnek, tehát lehetőség nyílt arra, hogy elméleteinket közvetlenül kísérleti úton ellenőrizzük, alátámasszuk.

A cikk megírásának apropóját egy, a közelmúltban mikron méretű oszlopokon (mikropillár) elvégzett deformációs kísérlet adta, amely nem várt eredményt hozott és ezért szükségessé teszi a plasztikus deformációról alkotott eddigi képünk jelentős felülvizsgálatát. Kiderült ugyanis, hogy a makroszkopikus méretű mintákkal ellentétben a mikron méretű minták esetében a feszültség-deformáció görbe nem sima, hanem a diszlokációk kollektív, lavinaszerű mozgása következtében véletlen lépcsőket tartalmaz. A lépcsők helye és hossza mintáról mintára változik. Így tehát ebben a mérettartományban az anyag tulajdonságairól csak valószínűségi kijelentéseket tudunk tenni. A jelenség leírása a statisztikus fizika egy új kihívása.

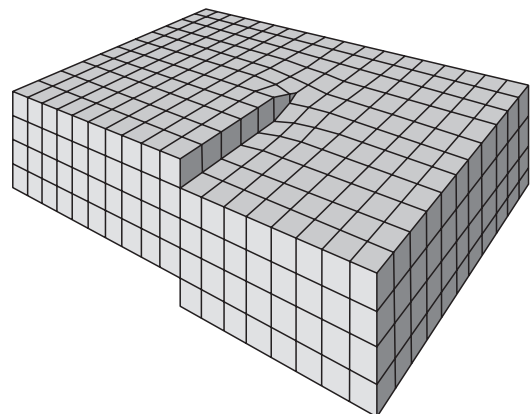
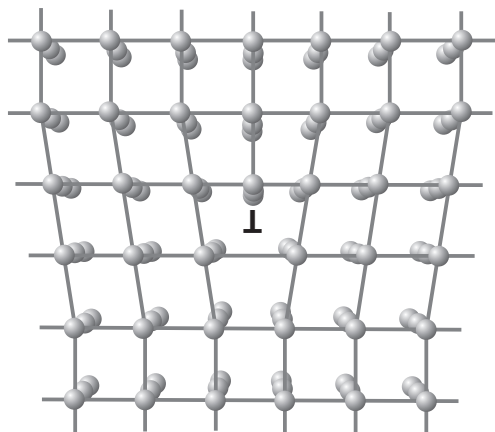
Diszlokációk [6]

Mivel a fentiekben ismertetett jelenségért a diszlokációk együttes mozgása felelős, ezért először röviden ismertetjük a diszlokációk néhány fontos egyéni tulajdonságát.

Kristályos anyagokban különböző típusú rácshibák alakulnak ki, amelyeket kiterjedésük alapján csoportosíthatunk. Nulla dimenziós hibák a vakanciák és intersticiális atomok, amelyeket ponthibáknak is hívunk. Habár ezek jelentősen befolyásolhatják az anyagok plasztikus tulajdonságait, a cikkben vizsgált problémakör szempontjából nincs jelentőségük.

A diszlokációk egydimenziós vonalhibák. Szerkezetüket legegyszerűbben *Andrade* modelljével szemléltethetjük. Az egyes atomsorokat merev hengerként képzeljük el. Vegyünk két hengert egymás alatt, amelyek egy fél hengerátmérőnyivel el vannak tolva egymáshoz képest. A hengerekben a hengerek (azaz atomsorok) közti erőt úgy képzelhetjük el, mint rugalmas gumiszalagokat. Próbáljuk meg a két hengert eltolni egymáson. Ha egyszerre az összes hengert szeretnénk elmozdítani, ahhoz nagyon nagy erő kellene. Azonban, ha nem egyszerre, hanem szakaszosan mozdítjuk el egymáshoz képest a két hengert, akkor a gumiszalagok megfeszülésével az elmozdulás hullámként megy végig a hengereken, és mire a hullám végig ér, az egész sor elmozdul egy hengernyi. Másik példa

1. ábra. Él- (föül), illetve csavardiszlokáció (alul) modellje.



lehet egy hosszú, nagyon nehéz szőnyeg. Hogyan te-
gyük arrébb? Ha az egészet próbáljuk elhúzni nem fog
sikeredni, azonban csináljunk a végén egy felgyűrő-
dést, és toljuk végig azt a szőnyegen. Amikor a felgyű-
rődés a másik végére ér az egész szőnyeg elmozdult. A
diszlokáció a kristályos anyagban egy ilyen könnyen
mozgó lokalizált deformációs állapot, amelyet a véges
rácsállandó stabilizál. A deformációk ilyen leírását a
kísérletek igazolják, hiszen a maradandó deformáció-
hoz tartozó csúsztatófeszültség-érték közel két nagy-
ságrénddel kisebb annál, mint amit a teljes atomsor
elmozdításához létre kellene hozni.

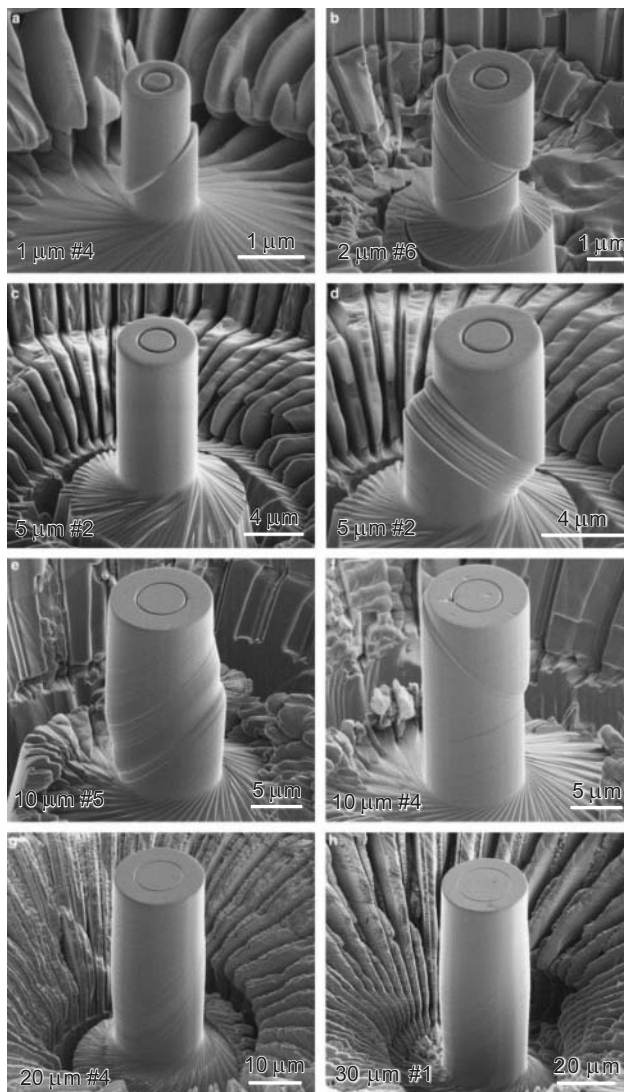
A diszlokációkat legegyszerűbben úgy képzelhet-
jük el, hogy veszünk egy tömbi anyagot, majd félgig
bevágjuk egyik atomsíkja mentén, ide beteszünk egy
extra atomokból álló félsíkot, végül „összeragasztjuk”
és az atomokat engedjük rugalmasan relaxálni (1.
ábra). Mivel a félsík behelyezéséhez az atomokat a
vonatra merőlegesen kell elmozdítani, az ilyen típusú
vonalhíbat éldiszlokációnak hívjuk. Fontos megjé-
gyezni, hogy alacsony hőmérsékleten az éldiszlokáció
csak a betoldott félsíkra merőlegesen tud mozogni. Ez
annak a következménye, hogy a betoldott sík irányá-
ban történő mozgáshoz atomok „eltüntetése”, illetve
„keltése” szükséges. Egészen pontosan a diszlokáció-
vonalon levő atomoknak a felületre kell kijutniuk,
illetve onnan a vonalhoz kell eljutniuk. Ez csak diffú-
zióval valósulhat meg, amely csak magas hőmérséklet-
en számottevő.

Egy másik típust kapunk, ha veszünk egy hengert
és egy alkotójával párhuzamosan bevágjuk egy sugara
mentén a középpontjáig, ezután a két részt a vágás
mentén a henger tengelyével párhuzamosan eltoljuk,
majd újra összeragasztjuk (1. ábra). Az ilyen vonalhíbat
csavardiszlokációnak hívjuk. Természetesen a
fenti leírások csak két, de nagyon fontos, speciális
esetet jelentenek. A valóságban leggyakrabban a két-
tő keveréke fordul elő.

Fontos foglalkozni a diszlokációk kölcsönhatásá-
val. Megmutatható, hogy egy mechanikai feszültségter
hatására a diszlokációra a feszültséggel arányos erő
hat. Mivel a diszlokáció maga körül is létrehoz feszül-
tséget, ha ebbe a térbe egy másik diszlokációt helye-
zünk, akkor erre erő hat. A kölcsönhatás sokban ha-
sonlít az áramok közötti kölcsönhatásra, amennyiben
a távolsággal fordítottan arányos, azaz hosszú hatótá-
volságú. Ugyanakkor a diszlokáció létrehozásából
adódóan (egy adott irányból félsíkot tolunk be) erő-
sen anizotróp.

Nanométerű deformációs kísérletek

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatának gerincét a
21. században is azok a mérési módszerek adják,
amelyeket a tudományág megszületésének hajnalán
alkalmaztak. Ezek egyszerű nyújtó, összenyomó és
csavaró vizsgálatok. A különbség az alkalmazható
mintaméret jelentős csökkenésében, és a mérési érzé-
kenység növekedésében mutatkozik.



2. ábra. Különböző méretű mikropillárok és a deformációs lép-
csők [7].

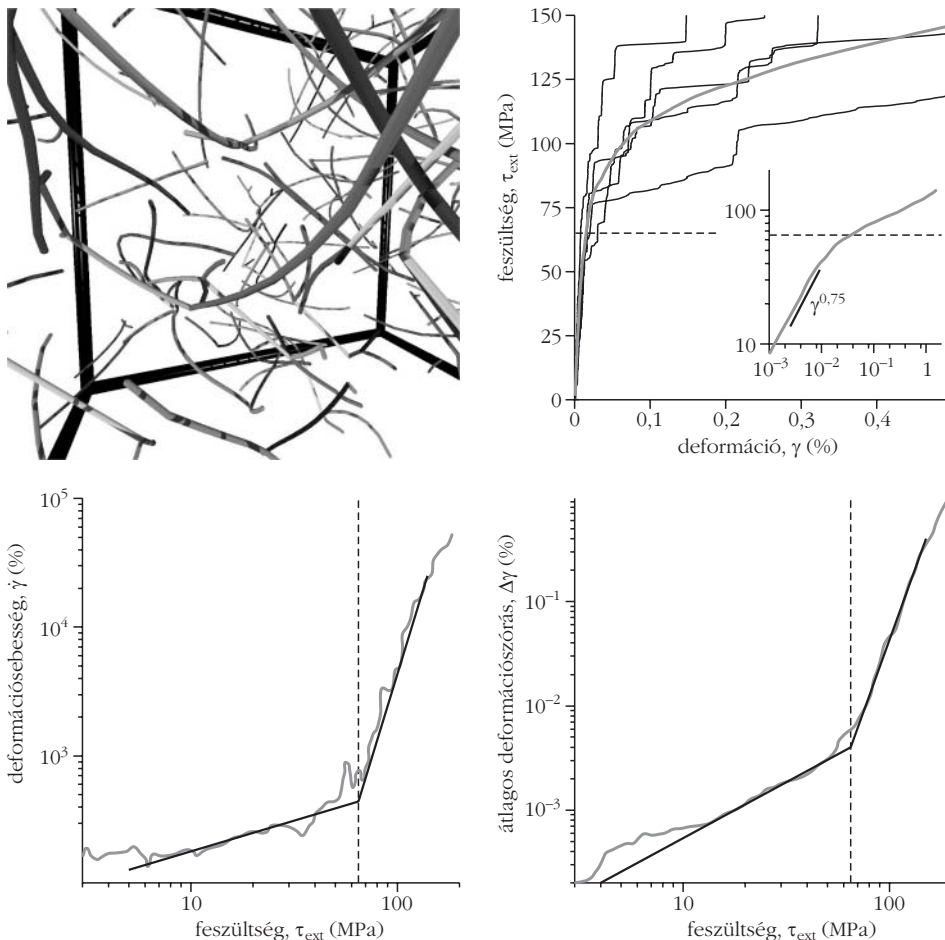
2006-ban a *Science* folyóirat *Sample dimension in-
fluence strength and crystal plasticity* [7] címmel kö-
zölt egy cikket, amely hengeres alakú, néhány mik-
rométer átmérőjű minták (mikropillárok) egytengelyű
összenyomással történő vizsgálatával foglalkozik.
Amint már a bevezetésben is utaltunk rá, különösen
érdekes új jelenségre bukkantak. A mintán az állandó
sebességgel történő összenyomáshoz szükséges erőt
mérték a benyomódás függvényében, és a kapott gör-
bén lépcsőket találtak. SEM-vizsgálatok tanulsága sze-
rint a minták oldalán megfigyelhetők a lépcsőszerű
deformáció nyomai (2. ábra). A cikk megjelenése óta
a problémakör intenzív kutatások tárgya.

A megfigyelt lépcsőket a diszlokációk kollektív, lavi-
naszerű mozgása okozza, amely makroszkopikus min-
táknak is lejátszódik. Azonban csak akkor jelenik meg a
minta külső deformációs kényszerre adott makroszkopi-
kus válasza (mint például a feszültség-deformációs gör-
be), ha a minta méreteit néhány mikron alá csökkentjük.
A vizsgálatok szerint a jelenség okát a diszlokáció-diszlo-
káció kölcsönhatás hosszú hatótávolsága adja.

Ez a jelenség számtalan technikai alkalmazásban, de különösen a mikroelektronikában fontos. Az alkalmazás szempontjából újonnan felmerülő problémákat egy egyszerű példával illusztráljuk.

Ismeretes, hogy a különböző anyagok egy jól definiált feszültség elérése (folyásfeszültség) után kezdenek plasztikusan deformálódni. A folyáshatár mérnöki definíciója a 0,2%-os plasztikus deformációhoz tartozó feszültség. A folyáshatár több külső körülménytől (hőmérséklet, anyagi minőség), és számos belső jellemzőtől (diszlokációeloszlás különböző paramétereit) függ. A folyáshatár egyszerűen mérhető például egytengelyű nyújtással. Azonban, ha mikronos méretű mintán kívánjuk ezt elvégezni, amelyet mikromechanikai és mikroelektronikai alkalmazások tehetnek szükségessé, az előbbieken leírt véletlen deformációs ugrások következtében az anyag nem egy jól meghatározott ponton kezd el „folyni”, hanem a folyáshatár értéke mintáról mintára változhat. Így tehát a folyáshatár szokásos mérnöki definíciója nem használható. Az anyag „szilárdságára” új statisztikus definíciót kell adni.

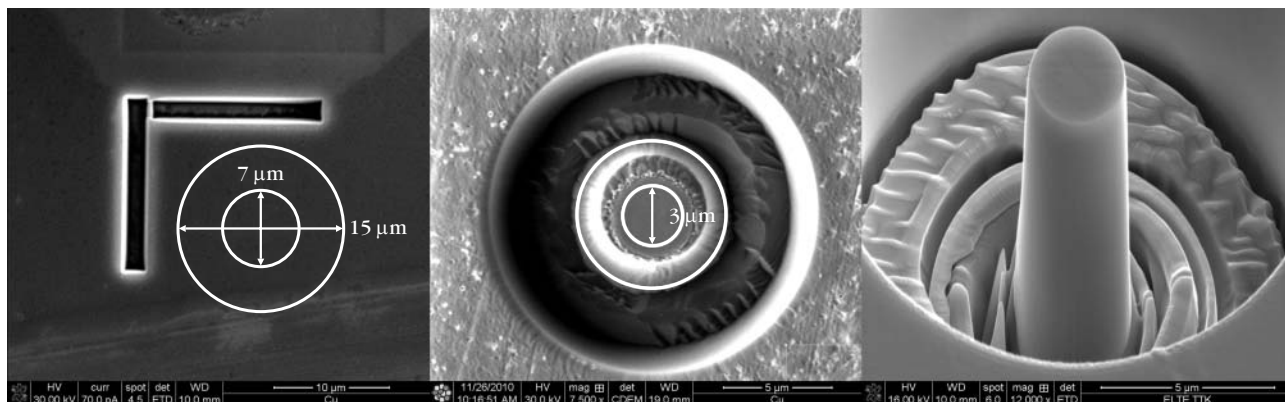
Az Eötvös Egyetem Anyagfizikai Tanszékén hosszú évek óta folynak elméleti, illetve számítógépes kutatások, valamint röntgen vonalprofil vizsgálatok a diszlokációk mozgásának statisztikus fizikai módszerekkel történő leírása céljából [2–5]. Vizsgálataink során két úton is szeretnénk megismerni a diszlokációlavinák létrejöttét és eloszlásukat, valamint a feszültség-deformáció görbék statisztikus tulajdonságait. Az egyik a diszkrét diszlokációdinamikai szimuláció, amellyel összenyomás közben követjük a diszlokációk mozgását egy 0,5 μm élhosszúságú kockában. A másik pedig az, hogy ionsugaras megmunkálással „kifaragunk” viszonylag nagyobb számú, néhány mikron átmérőjű mikropillárt, majd azokat egy megfelelően átalakított nanoindenterrel összenyomva megmérjük a minták erő-elmozdulás görbéit. Mivel a szimulációs és a kísérleti vizsgálatok közel ugyanakkora mintán történnek, lehetőség van a két módszer eredményeinek közvetlen, kvalitatív összehasonlítására.



3. ábra. 3D szimulációval kapott tipikus diszlokációeloszlás (bal felső ábra). (A különböző árnyalatok – eredetileg színek – különböző típusú diszlokációkat jelölnek.) Különböző kezdeti konfigurációhoz tartozó feszültség-deformáció görbék, illetve azok átlaga (jobb felső ábra). Átlagos deformációsebesség-feszültség görbe (bal alsó ábra). A deformáció átlagos szórása a feszültség függvényében (jobb alsó ábra).

Diszkrét diszlokációdinamikai szimuláció

A diszlokációk mozgását a mai több tízezer processzort tartalmazó szuperszámítógépekkel atomi szinten is lehetőség van egy 200 nm élhosszúságú kockában (~1 milliárd atom) vizsgálni. Az ilyen vizsgálatok nagyban hozzájárulhatnak a diszlokációs folyamatok jobb megértéséhez, de a szimulációk – jelentős időigényük miatt – nyilván csak igen korlátozott számban kivitelezhetők. Ezért komplex diszlokációs folyamatok vizsgálatára nagyobb hosszúságskálán történő megközelítést, az úgynevezett diszkrét diszlokációdinamikát alkalmazzák. Ez azt jelenti, hogy a diszlokációvonalak fent említett kölcsönhatását figyelembe véve követjük a vonalak mozgását. Mivel a vonalak mozgása atomi szinten sok atom együttes mozgásával valósul meg, a diszlokáció mozgása során rácsrezgéseket kelt. Ez energiavesztéssel jár. Ezért a diszlokáció mozgása nem konzervatív folyamat és a mozgás során az energiavesztés súrlódási erő bevezetésével figyelembe kell venni. Ez az erő általában jól közelíthető egy, a diszlokáció sebességével arányos kifejezéssel. Mivel a diszlokációk gyorsulása a legtöbb esetben kicsi, a diszlokációk mozgásegyenletében a gyorsulást tartalmazó inerciatagot elhanyagoljuk a



4. ábra. Mikropillár kifaragásának lépései.

súrlódási erő mellett. Így tehát a diszlokáció sebességéről feltételezzük, hogy arányos a rá ható erővel (túlcsillapított dinamika). A diszlokációdinamikai szimulációban a vonalak kis szegmenseire ható erő kiszámítása után a szegmenst az erővel arányosan a diszlokáció csúszósíkjában elmozdítjuk. Ezután gondoskodunk arról, hogy a diszlokációvonal összefüggő maradjon, és ha ellenkező előjelű diszlokációk találkoznak, akkor azok megsemmisüljenek. A fent leírt módszer a diszlokációk hosszú távú kölcsönhatása, illetve a bonyolult topológia következtében rendkívül nagy számítógépkapacitást igényel. A szimulációk a fent említett mintaméret és realiztikus diszlokációsűrűség (10^{14} m^{-2}) mellett is több napos futási időket igényelnek. A szimulációs kódok kifejlesztése sok éves csapatmunkát tesz szükségessé. A világban mindössze három ilyen programot fejlesztettek ki. Ezek közül kettőben az Anyagfizikai Tanszék fiatal kutatói is részt vettek.

A pillárokban a deformáció során lejátszódó diszlokációfolyamatok tanulmányozására egy $0,5 \mu\text{m}$ élhosszúságú Al-kockában, időben lineárisan növekvő külső feszültség alkalmazása mellett követtük a diszlokációk mozgását, és meghatároztuk a minta deformációját az alkalmazott feszültség (idő) függvényében nagyszámú kiindulási diszlokációkonfiguráció esetén. Egy tipikus diszlokációkonfiguráció, valamint néhány tipikus feszültség-deformáció görbe látható a 3. ábrán [8]. Látható, hogy a kísérleti eredményekhez hasonlóan a görbék véletlen lépcsőket tartalmaznak, és erősen függnek a kiindulási diszlokáció-elrendezéstől.

Annak érdekében, hogy a különböző diszlokáció-elrendeződéshez tartozó feszültség-deformációs görbék statisztikus tulajdonságairól mondani tudjunk valamit, meghatároztuk azok adott feszültséghez tartozó átlagát, illetve szórását, valamint az átlagos deformációsebességet (3. ábra). Fontos új eredmény, hogy mindegyik görbe tanulsága szerint a deformációs folyamat két jól elkülöníthető szakaszra osztható.

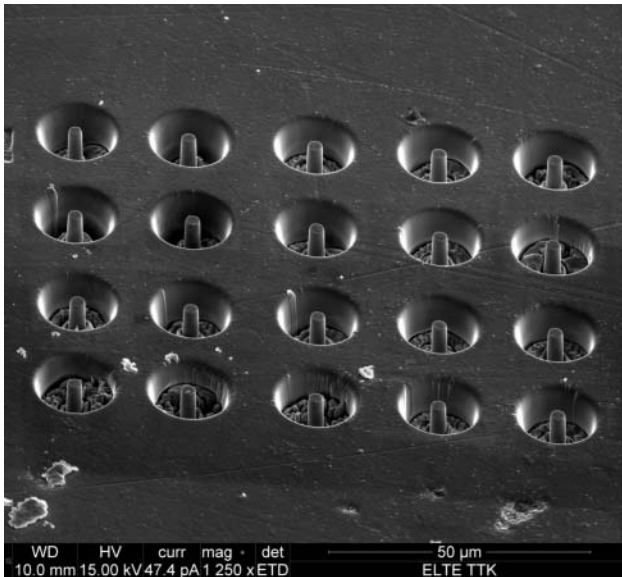
Fókuszált ionsugaras megmunkálás

A mikropilláros kísérletek szempontjából fontos előfeltétel, hogy nagyszámú, azonos paraméterekkel rendelkező mikropillárt lehessen készíteni. Számunk-

ra ezt az tette lehetővé, hogy az ELTE TTK az *Európai léptékkal a tudásért*, ELTE elnevezésű TÁMOP pályázat keretében beszerzett egy FEI Quanta 3D FEG két-sugaras pásztázó elektronmikroszkópot. A két sugár azt jelenti, hogy nemcsak elektronforrással, hanem ionforrással is rendelkezik (a berendezés részleteit lásd [9]-ben). Mindkét nyaláb alkalmas mikroszkópi kép készítésére, és emellett a fókuszált ionnyalábbal (focused ion beam = FIB) a minta felülete néhány nanométeres pontossággal megmunkálható.

A fókuszált ionnyaláb (FIB) működési elve hasonló, mint a pásztázó elektronmikroszkópé [9]. A galliumionokat elektromos tér gyorsítja a kiválasztott energiára, és mágneses lencsék pásztázzák a minta felülete mentén. Az ionok előállítását a következőképpen történik: volfrám anyagú galliumtartályhoz vékony volfrámtű csatlakozik. A felmelegített, folyékony gallium nedvesíti a volfrámtűt, ahol kihúzófeszültség ionizálja a tű hegyén összegyűlt galliumatomokat, így Ga^+ keletkezik. Az ionszlopban a kiválasztott gyorsító feszültség (2–30 kV) a kívánt energiára gyorsítja az ionokat, amelyek a mintába becsapódva különböző termékeket keltenek. Keletkeznek szekunder elektronok, amelyek mikroszkópi kép készítésére használhatóak. Ezen kívül szekunder ionok is keletkeznek, amelyek a minta anyagából kiűtött ionizált részecskék. Elég nagy energiát és áramerősséget választva a minta anyaga hatékonyan és szabályozott módon porlasztható. Ez teszi lehetővé a minta felületén nanométeres skálájú struktúrák kialakítását.

A mérésekhez a mikropillárokat FIB-es megmunkálással készítettük. Réz egykristályt porlasztottunk körgyűrű alakú maszkon keresztül. Ehhez egy, az irodalomban ismertetett eljárásoktól némileg különböző módszert fejlesztettünk ki. A porlasztást több lépésben kellett végezni, mivel minél nagyobb áramerősséget használunk, annál inkább széttartó a nyaláb, és ezért a körgyűrűmaszkon kívül is porlaszt, így nem alakítható ki a szabályos hengeralak, ezzel roncsolva a pillárt. Ugyanakkor csökkenő áramerősséggel a porlasztás ideje lényegesen növekszik. Mivel a deformáció statisztikus tulajdonságainak vizsgálatához nagyszámú pillárra volt szükség, a gyártási idő igen lényeges. Ezért egyre szűkülő körgyűrűmaszkokat használtunk. A folyamat néhány kiragadott mozzanata látható a 4. ábrán. Az el-

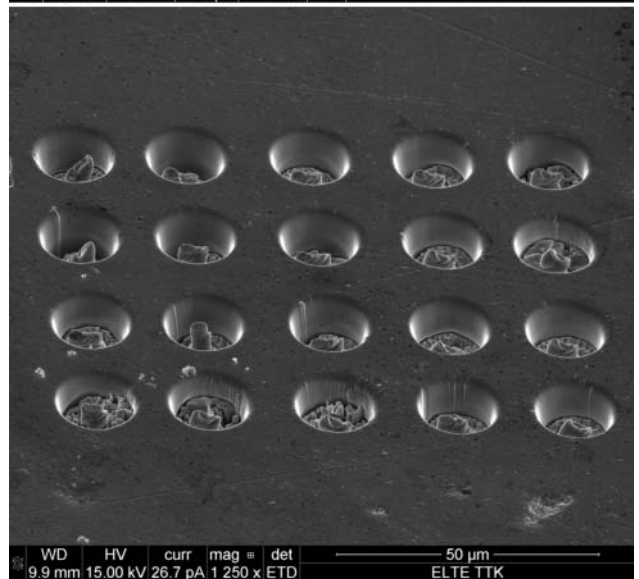
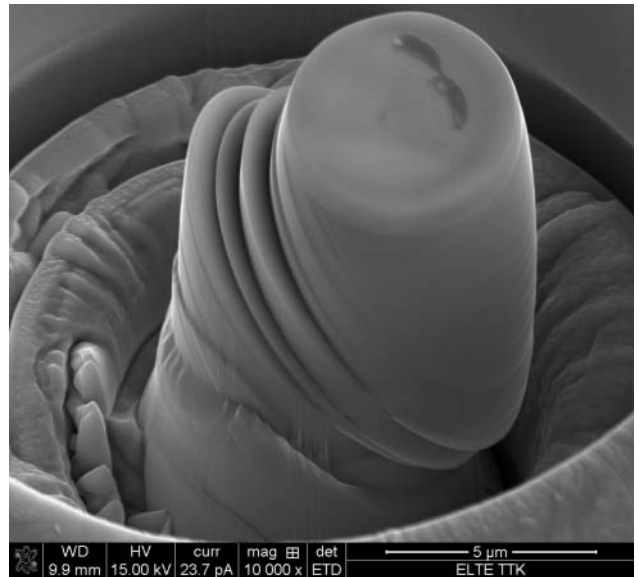


5. ábra. 20 darab egymás melletti pillár.

ső képen a pillár számára kijelölt terület látható, illetve a körgyűrű maszk. A külső átmérő 15 μm , a belső 7 μm . A mélységet, azaz a pillár magasságát úgy választottuk, hogy ne haladja meg a pillár átmérőjének négyszeresét. 3 μm átmérőjű pillárokat készítettünk, így a mélység maximum 12 μm lehetett.

A második, felülnézeti ábrán látható, hogy a nagyobb áramerősséggel végzett porlasztás után a pillár formája nem henger, hanem kissé kúpos. Utolsó lépésben ezért lényegesen kisebb áramerősséget kellett választani, és a két körgyűrű átmérőjét egyre csökkenteni, amíg a jobb oldali ábrán látható 3 μm átmérőjű, henger alakú pillár el nem készült.

Ezzel a módszerrel sikerült nagyobb számú, néhány százalék pontossáig azonos geometriájú pillárt egymás mellett kifaragni (5. ábra).



7. ábra. Összenyomott mikropillárok.

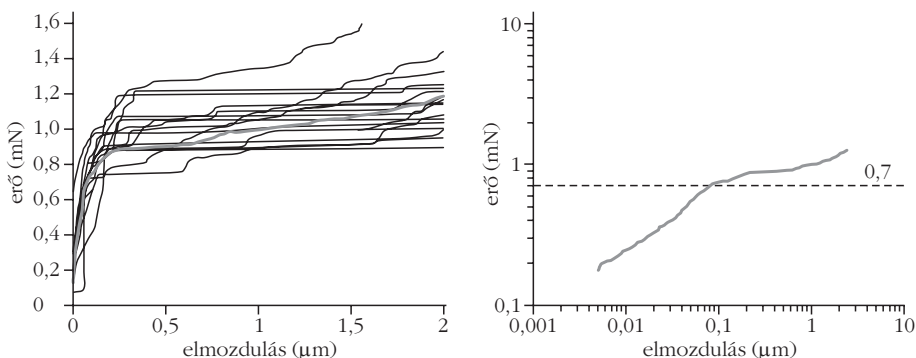
Nanoindentációs kísérlet

Miután mintegy 40 pillárt sikerült kifaragnunk, a következő lépés a minták állandó deformációsebességgel történő összenyomása mellett a feszültség-deformáció görbék felvétele. Ehhez az ELTE-n található

UMIS típusú nanoindentert használjuk. Ez a műszer szervomotoros és piezoelektromos mozgatókkal van felszerelve a mintatartó tálca mozgatásához. A tálcát két bázispont között tudjuk mozgatni. Az egyik neve „Indenter” a másiké „CCD”. A „CCD” álláshoz egy 5 megapixeles digitális CCD-kamera tartozik. A kamera koaxiális megvilágítással egy százszoros nagyítású objektív-lencsével készít képet a mintáról. Ezzel a mikroszkóppal keressük meg a pillárokat. A kamera felbontása az optikailag lehetséges legjobb felbontást súrolja (100 nm/pixel), így éppen elegendő ahhoz, hogy a pillárokat lássuk.

Az „Indenter” állásban található a gyémánt összenyomó fej, amely csonkakúp ala-

6. ábra. Különböző pillárokon mért erő-elmozdulás görbék, valamint azok átlaga (balra), logaritmikus skálával is (jobbra).



kú 4 μm végátmérővel. Az összenyomás közben az alkalmazott erőt tudjuk vezérelni. Az összenyomófej alá a CCD-kamerával beállított pillárokkal számos kísérletet kellett elvégeztünk mire hosszan tartó tökéletesítések után az első sikeres összenyomást el tudtuk végezni. Az így kapott görbéken jól definiált lépcsőket sikerült megfigyelni. Tipikus erő-összenyomódás görbék láthatók a 6. *ábrán*.

A 7. *ábra* fölül egy tipikus összenyomott pillárt mutat. Jól látható, hogy a felületen lépcsők jelentek meg. A 7. *ábra* alul az 5. *ábrán* látható pillárok összenyomás utáni képeit mutatja. Annak megfelelően, hogy az erő-deformáció görbék lényegesen különböznek, a pillárok deformáció utáni alakja is nagyon eltér.

Több kísérletet elvégezve, majd kiszámítva az azonos erőhöz tartozó deformációk átlagát már sima görbét kapunk (6. *ábra*). Ez azt mutatja, hogy a lépcsők valóban véletlenszerűen jelennek meg. A szimulációs eredményekhez hasonlóan (3. *ábra*) itt is megfigyelhető egy viszonylag jól definiált töréspont az átlagos görbén, amely a deformációs folyamatot két szakaszra osztja.

Összefoglalás

Megállapítható, hogy mind a számítógépes diszkrét diszlokációdinamikai szimulációk, mind a kísérleti eredmények azt mutatják, hogy statisztikus értelemben a mikronos méretű mintákon is definiálható egy karakterisztikus feszültségérték, amely a makroszkopikus mintákon mérhető folyáshatárral rokon mennyiség. Fontos azonban kiemelni, hogy ez a karakterisztikus feszültség nem azt jelenti, hogy ennél kisebb feszültsé-

nél semmilyen mintán nem jelenhet meg nagy marandó alakváltozás. Ugyanakkor a feszültség értéke az adott mintasorozat „szilárdságát méri”. Ahhoz tehát, hogy a mikron méretű objektumok mechanikai tulajdonságait jellemezni tudjuk egyetlen mérés nem elegendő, mivel csak mintasokaságra érvényes statisztikus tulajdonságok állapíthatók meg. Ez a felismerés paradigmaváltást jelent a kristályos anyagok deformációs tulajdonságainak vizsgálatában. A számítógépek által vizsgált tartomány és a kísérleti méretek egyre nagyobb átfedésével új kutatási terület nyílik a mikro- és nanomechanika, valamint a nanoelektronika felé, amely már a jelen és még inkább a jövő technológiája.

Irodalom

1. <http://dislocation.elte.hu>
2. I. Groma: Link between the microscopic and mesoscopic length-scale description of the collective behavior of dislocations. *Phys. Rev. B* 56 (1997) 5807–5813.
3. I. Groma, F. F. Csikor, M. Zaiser: Spatial correlations and higher-order gradient terms in a continuum description of dislocation dynamics. *Acta Mater.* 51 (2003) 1271–1281.
4. I. Groma, G. Györgyi, B. Kocsis: Debye Screening of dislocations. *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 165503.
5. P. D. Ispánovity, I. Groma, G. Györgyi, P. Szabó, W. Hoffelner: Criticality of Relaxation in Dislocation Systems. *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 085506.
6. Kovács István, Zsoldos Lehel: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
7. D. M. Dimiduk, C. Woodward, R. LeSar, M. D. Uchic: Scale-free intermittent flow in crystal plasticity. *Science* 312 (2006) 1188–1190.
8. P. D. Ispanovity, I. Groma, G. Györgyi, F. F. Csikor, D. Weygand: Submicron Plasticity: Yield Stress, Dislocation Avalanches, and Velocity Distribution. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 085503.
9. Havancsák K., Lendvai J.: Nagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkóp az Eötvös Egyetemen. *Fizikai Szemle* 61/10 (2011) 339–343.

ÉBREDJ, MERT JÖN A FEKETE ENTRÓPIA!

Martinás Katalin, ELTE TTK Fizikai Intézet
Huller Ágoston festőművész

Fizikus: Műtermedben, az ajtóval szemközti fal bal sarkában található pasztell képnek azt a címet adtad, hogy *Ébredj, mert jön a fekete entrópia!* Nem tartod különösnek, ha művész a természettudományok fogalomtárából kölcsönöz címet valót? Egyáltalán, mi indított az említett kép címadására?

Festő: Beszélgetéseink e témáról. Ahogyan Te bővítetted az ismereteidet a művészeti élményeiddel, hasonlóképp fordulok jómagam a természettudományok felé. Persze nem mint szakember, hanem csak mint érdeklődő. Egy idő elteltével rá kell döbbernem, hogy Te is, Én is ugyanannak a problémának vagyunk rabjai, a világ megismerhetőségének. Amiben különbözünk az a megfogalmazás nyelvezete.

Bevallom, hogy számomra az entrópiatörvény nagyon pesszimista. A természet egyirányúsága a romlás szinonimája. Az entrópia növekedése is azt jelenti, hogy életminőségünk egyre rosszabb lesz?

Fizikus: Nem.

Festő: Lehetne részletesebben?

Fizikus: Kezdjük az elején. Örülök, hogy érdeklődsz az entrópia iránt.

Már mintegy ötven éve, hogy *Snow A két kultúrában* azt írta, hogy a termodinamika II. főtétele legalább annyira az emberi kultúra fontos eleme, mint *Shakespeare*. Ugyanakkor nem tekinthető civilizált embernek az, aki nem ismeri Shakespeare-t. Viszont az entrópiát, a termodinamika II. főtétele csak kevesen ismerik (azóta is). Hogy érezzük a hasonlat mélységét, tudomásul kell vennünk, hogy Shakespeare az örök emberi tapasztalatokat összegzi műveiben. És a második főtétele? Ugyanezt teszi, képlettel elbeszélve. Shakespeare-t sokan ismerik. De azért ma már sokan ismerik – ha csak közvetetten is – az *entrópia* szót is. Generációnk – a hatvannyolcasok – amerikai irodalmában az entrópia a hanyatlás, a romlás szinonimája.