

# AKIK KIDERÍTETTÉK HOGYAN TÖRTÉNIK A FÉMEK KÉPLÉKENY ALAKVÁLTOZÁSA

– a képlékeny alakváltozás diszlokációs mechanizmusa

Márki-Zay János  
Hódmezővásárhely

A képlékeny alakváltozás megértésére irányuló vizsgálatok az 1900-as évek elején értek el odáig, hogy a kutatók figyelme már a megoldás valódi kulcsát jelentő kristályhibákra, azaz a fémkristályban jelenlévő diszlokációkra terelődött. Hosszú és rögös út vezetett el idáig, amit megkísérlünk vázlatosan ismertetni.

## A képlékenységtan első kutatói

A képlékenységtan kezdetét *Charles Augustin de Coulomb* (1736–1806) francia fizikus 1773-ban végzett csavaró kísérleteitől számítjuk. Coulomb 1784-ben leírta egy 243,6 mm hosszú és 0,51 mm átmérőjű vasdróttal végzett csavarási kísérleteit. Világhírét torziós mérleggel végzett kísérleteinek köszönhette. Ezen mit sem változtat, hogy nem tartották meggyőzőnek azt a megfigyelését, hogy átlagos terhelési és hőmérsékleti körülmények között a fémek anyagának egyre nagyobb kiterjedésű része válik képlékenyebbé.



Charles Augustin de Coulomb

*John Macquorn Rankine* (1820–1872) skót gépészmérnök és fizikus 1858-ban feltételezte, hogy a képlékenyebbé válás csak húzásra következik be és egyszerű modellt ajánlott a képlékeny határállapot bekövetkezésének ellenőrzésére. A későbbiekben kiderült, hogy a fémek alakítása szilárdságnöveléssel jár, amit alakítási keményedésnek neveznek. (Ezt magunk is könnyen ellenőrizhetjük:



William John Macquorn Rankine

például egy fűrőgépbe fogott viszonylag lágy rézdrótot erősen megcsavarva a megcsavart rézdrótot úgy megkeményedik, hogy akár fába kalapálhatjuk.)

1864-ben *Henri Édouard Tresca* (1814–1885) francia gépészmérnök megállapította, hogy a fémek képlékeny alakváltozása egy bizonyos nagyságú csúsztaerőfeszítés elérésekor indul meg. Szerinte a képlé-

keny alakváltozás akkor lép fel, ha a legnagyobb nyírófeszítés eléri azt az értéket, amely folyást idéz elő (a legnagyobb nyírófeszítés elve).

*Rejtő Sándor* (1853–1928) gépészmérnök az alakítási folyamatok és a fellépő erők közötti összefüggéseket kutatta. Rámutatott, hogy a fémek tulajdonságai az anyagszerkezetük függvénye.



Henri Édouard Tresca

## A diszlokáció

A fémek képlékeny alakváltozásának megértéséhez vezető diszlokáció-elméletet *Vito Volterra* (1860–1940) olasz matematikus és fizikus 1905-ben kezdte el kifejleszteni. A diszlokáció fogalmát *Ludwig Prandtl* (1875–1953) és *Ulrich Dehlinger* (1901–1983) vezették be.



Vito Volterra

Ludwig Prandtl német fizikus a rugalmas-képlékeny testekre már 1913 előtt olyan modellt alkalmazott, amelyben fellelhető a diszlokáció fogalmának csírája. Prandtl mint a modern aerodinamika egyik megalapozója vált ismertté, e témában volt doktorandusza *Kármán Tódor*.

Ulrich Dehlinger német fizikus, a stuttgarteri Műszaki Egyetem Elméleti és Alkalmazott Fizikai Intézetének professzora, ahol 1929-től 1969-ig a fémfizika kutatójaként dolgozott és jelentős szakírói tevékenységet is folytatott.

A fémek képlékeny alakváltozásához az szükséges, hogy az alakváltozást kiváltó erők meghaladják az atomokat összetartó belső



Ludwig Prandtl

erők nagyságát. Ha a csúszási síkban diszlokáció néven nevezett kristályhiba található, akkor a hiba által létrehozott rácsorzulás miatt felhalmozódott feszültségi energia is hozzájárul a képlékeny alakváltozáshoz (az elcsúszáshoz) szükséges energiaszint eléréséhez. Másrészt a képlékeny alakváltozás során létrejött (akár a  $10^{15} \text{ m}^{-2}$  sűrűséget is elérő) nagy számú új diszlokáció viszont már egymás mozgását gátolja, ami alakítási keményedést okoz.



Ulrich Dehlinger

A képlékeny alakváltozás során megváltoznak a fém mechanikai tulajdonságai és szemcseszerkezete. A jelenség azonban különböző módon hat hideg- és melegalakításkor.

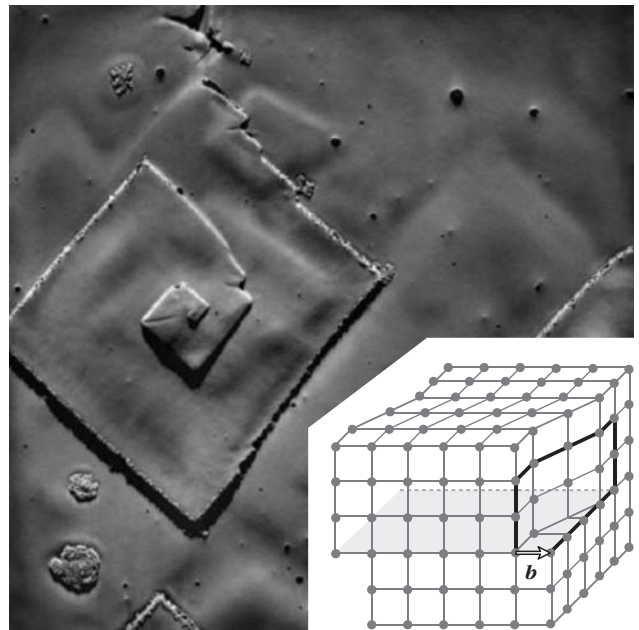
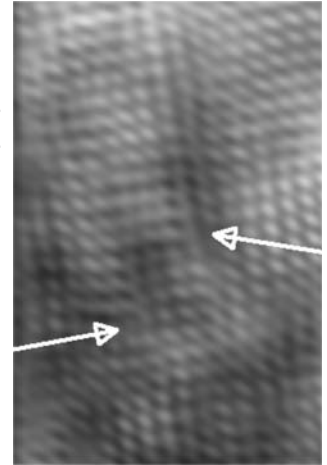
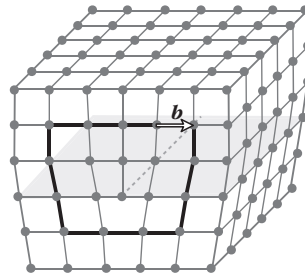
A kristályos anyagok atomjai vagy molekulái rendezett módon térbeli rácsban kapcsolódnak össze. A térbeli szerkezet rendezettsége azonban nem tökéletes, abban különböző hibák lépnek fel.

Témánk szempontjából most az egydimenziós (vonalmenti) kristályhibák, a diszlokációk fontosak, amelyeknek két szélső típusa az éldiszlokáció és a csavar-diszlokáció (1. ábra).

Az anyagban előforduló diszlokációk általában kevert diszlokációk, amelyek mind él-, mind csavar-komponenst tartalmaznak. A diszlokációk mennyiségét az egységnyi felületen ( $1 \text{ m}^2$ ) áthaladó diszlokációk átlagos számával, a diszlokáció-sűrűséggel jellemezzük. A diszlokáció-sűrűség másik lehetséges definíciója a térfogategységben található diszlokáció-vonalak összhossza.

A diszlokációk jobb minőségű fénymikroszkóppal már észlelhetők, de csak akkor, ha előhívtuk azokat. A megfelelő maratószer a diszlokációk felületet elérő dőféspontjánál mélyebb maratási gödröt old ki az anyagból, mint a hibátlan felületről, így az (különösen ferde megvilágításnál) már láthatóvá válik. Elektronmikroszkóppal a diszlokáció-eloszlás jól megfigyelhető. Elektronmikroszkópos mérések szerint a fémkristályokban a diszlokációk száma a gyors lehűtés, a hidegalakítások és a nagy szemcsenövekedési sebesség következtében megsokszorozódhat, és akár az ezerszeresére is növekedhet, miközben az anyag egyre ridegebb, keményebb lesz. Fordított eljárás esetén – a kristály hőkezelésekor, illetve melegalakításkor – a hibahelyek száma csökken.

Jelöljük ki a kristályrácsban egy paralelogrammát úgy, hogy minden irányban azonos számú rácspont számolunk le. Tökéletes kristályban visszaértünk a kiindulási helyre, ami azt jelenti, hogy nincs a tartományban diszlokáció. Nem tökéletes kristályban – ahol diszlokáció van – a kezdőponttól a végpontba húzott vektor lesz az úgynevezett Burgers-vektor, amely a diszlokáció környezetéhez tartozó tartományok elcsúszásának nagyságát és irányát adja meg.



1. ábra. Felül éldiszlokáció – extra félsík beékelődése –, mellette HRTEM felvételen a nyilak mutatják a diszlokációt. Alul csavar-diszlokáció, amely térbeli csavarvonal mentén elrendeződő hibahelyeket jelent, körülötte csavar-diszlokáció menti kristálynövekedés AFM képe. Mindkét diszlokáció ábráján jelöltük a **b** Burgers-vektort és a körbejárást is.

Másképpen fogalmazva: egy-egy diszlokáció nem végződik a kristály belsejében, azaz vagy zárt görbét alkot a kristályon belül, vagy mindkét végpontja a kristály felületén van. Az energiaminimumra való törekvés miatt a diszlokáció rövidülni igyekszik.

*Johannes (Jan) Burgers* (1895–1981) holland fizikus, a delfti Műszaki Egyetem folyadékdinamika tanára. A róla elnevezett Burgers-egyenlet tekinthető a folyadékdinamika modellezésében alapvető szerepet játszó Navier–Stokes-egyenletek egydimenziós változatának. Kristályfizikával foglalkozva 1939-ben bevezette a



Jan Burgers

Burgers-vektort. Tudományos munkásságának végén érdeklődése a plazmafizika és a lökéshullámok felé fordult.

Burgers 1921-ben a turbulenciával foglalkozva szakmai és személyes kapcsolatba került Kármán Tóddal.

Kármán Tódor (1881–1963) gépészmérnök, fizikus, alkalmazott matematikus. A szuperszonikus légi közlekedés atyja, a rakéte technológia és a hiperszonikus űrhajózás úttörője. Az 1910-es években Kármán deformációs problémákkal foglalkozott: doktori értekezése a törés és plasztikus deformáció feltételeiről szólt, a hengerlés elméletéről, majd a szilárdságtan fizikai alapjairól írt fontos, sokat idézett munkákat (Theodore von Kármán: *Physikalische Grundlagen der Festigkeitslehre*, 1913).

Reuss Endre (1900–1968) gépészmérnök, egyetemi tanár, a műszaki tudományok doktora 1930-ban megjelentetett tanulmányaiban a Prandtl–Reuss féle elmélet alapjait fektette le.



Kármán Tódor



Reuss Endre

Még néhány tudnivaló a diszlokációkról

A diszlokációt tartalmazó teljes kristály némi többlet-energiával rendelkezik, aminek következtében például:

1. A diszlokációkat tartalmazó anyag képlékenyebben viselkedik. Számítások szerint a diszlokációk mozgatásához szükséges erők a diszlokációt jellemző Burgers-vektorral arányosak, a diszlokációk energiája pedig a Burgers-vektor abszolút értékének négyzetével. Tudni kell, hogy a diszlokációk energiája meghaladja az atomok rezgőmozgásának energiáját, így pusztán rezgőmozgások hatására nem jöhetnek létre.

Az amorf vagy üvegszerű anyagoknál hosszútávú rendezettségéről nem beszélhetünk, és ezért ezeknél diszlokációk sincsenek. Ezért például az üveget érő külső mechanikai hatás nem tud folyamatos diszlokációs mozgásokban megmutatkozni, hanem a felhalmozódó feszültségek általában hirtelen törést eredményeznek.

Ezzel szemben az, hogy a fémkristályokat ért mechanikai erőhatás következtében a fémkristályban

diszlokációk keletkezhetnek, illetve mozdulhatnak el, azt jelenti, hogy fémkristályokban a feszültségek kisebb léptékű alakváltozások sorozatát eredményezik. Az erőhatások a szemcsék elmozdulásával, illetve a szemcsehatárok változásával is járhatnak. Itt jegyzem meg, hogy Burgers feltételezte, hogy a szomszédos kristallitok vagy szemcsék kisszögű szemcsehatárai *diszlokációs sorokból* állnak. Feltételezését később elektronmikroszkópos vizsgálatok is igazolták.

A diszlokációs mozgások tehát a feszültségek oldódásával járnak. A diszlokáció mozgásához szükséges feszültség meglehetősen kicsi, ha a kristálybeli kötési erők nem túlságosan irányfüggők. Ha valamilyen oknál fogva a diszlokációs mozgások akadályoztatva vannak, akkor a feszültségek felhalmozódnak, ami bizonyos határon túl már töréshez vezethet.

2. A diffúzió és a vele rokon korrodálás a szemcsehatároknál, így a diszlokációval (lásd diszlokációs sorok) összefüggő kisszögű szemcsehatárok mentén is, erőteljesebb. Ezért az apró kristályszemcsékből felépülő reális kristályok (a polikristályos anyagok) jóval kisebb ellenállást fejtenek ki az atomok diffúziójával szemben, mint a szemcsehatároktól mentes egykristályok. Azt, hogy a szemcsehatárok mentén kémiaiilag aktívabb az anyag az is mutatja, hogy a legtöbb kristályos anyagnál a szemcsehatárok láthatóvá tétele marattással történik.

3. Változnak a villamos tulajdonságok, deformálódik a fémionok által létrehozott periodikus tér, és zavart szenved az elektronok terjedése. Ezért például a kristályos félvezető eszközöket csak hibátlan (diszlokáció-mentes) kristályokból lehet gyártani.

Az 1900-as évek elején *Tytus Maksymilian Huber* (1872–1950) lengyel, *Richard von Mises* (1883–1953) osztrák és *Heinrich Hencky* (1885–1951) bajor fizikus – különböző időben, de egymástól függetlenül – megállapították, hogy a képlékeny alakváltozáshoz szükséges fajlagos deformációs munkának meg kell haladnia egy kritikus értéket (elméletüket azóta Huber–Mises–Hencky-féle folyási feltételnek nevezik).

*Nádai Árpád Lajos* (1883–1963) magyar gépészmérnök, egyetemi tanár, a Huber–Mises–Hencky-féle folyási feltétel ellenőrzésére végzett tesztek végrehajtásánál az elsők között szerepelt. Nádait főként a fé-



Tytus Maksymilian Huber



Richard Edler von Mises



Heinrich Hencky

mek folyása és törési jelenségei foglalkoztatták. Összefoglaló műve a *Theory of flow and fracture of Solids, 1931* az első angol nyelvű könyv ebben a témában.

A *Max von Laue* (1879–1960) Nobel-díjas német fizikus által kidolgozott és mások által továbbfejlesztett röntgenvizsgálati módszerek a szilárd anyagok, így a fémek szerkezetéről pontos képet adtak, aminek alapján számításokat lehetett végezni a fémek elméleti szilárdságára vonatkozóan.

A csúszáshoz, azaz az atomsíkok egymáson való elmozdításához szükséges elméletileg meghatározott feszültség legalább két nagyságrenddel nagyobbak adódott, mint a kísérletekkel kimérhető folyáshatár. Ma már tudjuk, hogy ennek az a magyarázata, hogy reális anyagokban az atomsík atomjai nem egyszerre mozdulnak el egymáson, hanem soronként rácshibák, diszlokációk révén. Az elcsúszás általában azokon a síkokon indul meg, ahol a legtöbb atom található.

A képlékeny alakváltozásoknál az elmélet és a gyakorlat között jelentkező – két nagyságrendet meghaladó – ellentmondás feloldására 1934-ben *Polányi Mihály* és *Orován Egon* magyar származású tudósok dolgoztak ki hipotézist, akik feltételezték, hogy a szabályos szerkezetben előforduló rácstrendetlenségek adják meg az eltérés magyarázatát.

Azt, hogy a képlékeny alakváltozás diszlokációk mozgása révén megy végbe (a csúszási sík mentén), tőlük függetlenül, de velük gyakorlatilag egyszerre, *Taylor* angol fizikus is felismerte, aki 1929-től a német *Ulrich Deblinger* nyomán indult el.

Geoffrey Ingram Taylor (1886–1975) angol fizikus és matematikus. Kutatási területe: áramlástan, hullámelmélet. Az első világháború utáni időszakban a legszélesebb körű munkát a kristályos anyagok deformációja terén végezte.

Polányi Mihály (1891–1976). 1913-ban orvostudományból diplomázott, majd kémiai tanulmányokat folytatott. Manchesterben lett a



Nádai Árpád



Max von Laue



Geoffrey Ingram Taylor

fizikai kémia professzora. Brit állampolgárként, mint vegyész, szociológus, tudományfilozófus és közgazdász járult hozzá a tudományok fejlődéséhez.

Orován (Orowan) Egon (1902–1989) magyar származású amerikai fizikus, metallurgus. Orován számos eredménye között a legfontosabb, hogy a képlékeny alakváltozást a diszlokáció fogalmával magyarázta.

Orován továbbfejlesztette a diszlokációk elméletét, és azt is kimutatta, hogy a kristályon belül kiváló idegen anyag olyan háromdimenziós hibákat okoz, amelyeket önmagukba záródó diszlokáció-vonalak, úgynevezett Orowan-hurkok vesznek körül. Számos szabadalom is fűződik nevéhez.

1928-ban a Berlieni Műszaki Egyetem hallgatójaként Orován Egon érdeklődése a fizika felé fordult. A kristályok töréséről írt doktorátust. Doktori témavezetője, a magyar *Wigner Jenő* (1902–1995) is foglalkozott diszlokációkkal. Orován, Wignerrel kívül többször konzultált az egyetemen tanító Polányi Mihállyal. A képlékeny alakváltozással kapcsolatos alapvető tanulmányát Orován 1933-ban Budapesten készítette el, amikor mint állástalan ráért gondolkodni. Elméletének megalkotását követően a témában ugyancsak elmélyült Polányinak javaslatot tett egy közös cikk megírására. Polányi Orován munkáját sajátjánál többre tartotta, és ezért javaslatára a cikkeiket külön-külön írták meg, majd azok egyszerre jelentek meg a német *Zeitschrift für Physik* folyóiratban. A cikkek megjelenését követően Geoffrey Ingram Taylor elküldte Orovánnak a hasonló témában már korábban megírt cikkének kefelevonatát. Taylor is a diszlokációra épített, de cikkében több hibát is vétett, amelyekre Orován mutatott rá.

Úgy látszik, hogy a képlékeny alakváltozás magyarázatára a kor megérett, és így történhetett, hogy elméletét szinte egyszerre adta meg három tudós, akik közül kettő magyar származásúnak vallotta magát.

Feltételezéseik közvetlen bizonyítékát az elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok szolgáltatták az 1950-es években.



Polányi Mihály



Orován Egon



Wigner Jenő



Rejtő Sándor



Geleji Sándor



Kovács István

Végül megemlítem a szilárd testek plaztikus deformációját és a diszlokációk kontinuum-modelljét kutató Kovács István (1933–2011) fizikust, az Eötvös Loránd Tudományegyetem tanszékvezető egyetemi tanárát. Erdemei közé tartozik, hogy (*Pattantyúst*, *Kaliskyt* követően) nagy sikerű magyar nyelvű tankönyvet írt a képlékeny alakváltozásról. Kovács-Zsoldos: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás* (Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965). A könyv később angol nyelvű változatban is megje-

lent a Pergamon Press és az Akadémiai Kiadó gondozásában és jelentős nemzetközi sikert aratott.

## A hazai műhely

Megemlékezünk még néhány magyar tudósról, akik szintén jelentős érdemeket szereztek a képlékenységgel kapcsolatos kutatások terén.

Rejtő Sándorról, a József Nádor Műegyetem rektoráról, a Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének alapítójáról már volt szó.

Geleji Sándor (1898–1967) kohómérnök, egyetemi tanár kidolgozta az első olyan eljárást, amellyel a hengerléskor ébredő erők és teljesítményszükségletek kellő pontossággal kiszámíthatók. Kidolgozta a csőhengerlés elméletét, a hűtőpadok méretezésének alapelveit. 1966-ban jelent meg *A fémek képlékeny alakításának elmélete* című könyve.

## Irodalom

- E. Orowan: Zur Kristallplastizität I–III. *Zeitschrift für Physik* 89 (1934) 605–659.
- M. Polányi: Über Eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte. *Zeitschrift für Physik* 89 (1934) 660–664.
- G. I. Taylor: The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I. – Theoretical. *Proc. Royal Society London* 145 (1934) 362–387.
- Kovács I., Zsoldos L.: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- Juhász A., Kovács I.: *A szilárdtestek kristályszerkezete. Kristálybi-bák*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- Voith M.: *A képlékenyalakítás elmélete – Nagy alakváltozások tana*. Miskolc, Egyetemi Kiadó, 1998.
- K. Osakada: History of Plasticity and Metal Forming Analysis. *ICTP 2008* (The 9th International Conference on Technology of Plasticity)

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# A MÁGNESES VEKTORPOTENCIÁL, MINT VALÓSÁGOSAN LÉTEZŐ VEKTORMEZŐ

Hárs György, Varga Gábor  
BME Fizikai Intézet

A legszélesebb körben alkalmazott elektrotechnikai eszköz a transzformátor, amely alapértelmezésben két galvanikusan független tekercsből áll. A tekercsek geometriai kialakítása lehet szolenoid vagy toroid jellegű. A tekercsek szoros mágneses csatolásban állnak. Tekintsük azt az esetet, amikor a szekunder tekercs belsejében helyezkedik el a primer. Az általánosan elfogadott elmélet szerint a szekunder tekercsben indukált feszültség forrása a primer tekercs által létrehozott mágneses fluxus megváltozása. Ezzel a magyarázattal azonban az a probléma, hogy a primer tekercsen kívül, a szekunder tekercs helyén gyakorlatilag nincsen mágneses tér, így a mágneses fluxus és annak változása is csak a primer tekercs belsejére

korlátozódik. Ennek dacára a szekunder tekercsben mindig megjelenik az indukált feszültség.

Ezt a ellentmondást oldja fel a mágneses vektorpotenciál. Ismert a harmadik Maxwell-egyenlet, amely a  $\mathbf{B}$  mágneses indukció forrásmentességét írja le.

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Ezen kívül ismert a következő vektoranalitikai összefüggés:

$$\operatorname{div}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) \equiv 0.$$

Vagyis egy tetszőleges  $\mathbf{A}$  vektormező rotációjaként előállított vektormező divergenciája azonosan nulla.