

# Óbudai Egyetem

Tézisfüzet



## **Maradó alakváltozás modellezése egyenáram jelenlétében**

Varga Péter  
okleveles gépészmérnök

Témavezető:  
Prof. Dr. Ruzinkó Endre, egyetemi tanár

**Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola**

Készült:  
Óbudai Egyetem  
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Budapest, 2020. február



## **Kivonat**

Jelen disszertáció az elektromos mező jelenlétében létrejövő irreverzibilis deformáció sajátosságait tárgyalja. Vizsgáltam és leírtam az átfolyó egyenáram hatását a primer- és szekunder kúszásra, valamint a képlékeny alakváltozásra. Az áram jelenléte az alakváltozás növekedését eredményezi a kúszás mind primer, mind állandósult állapotú szakaszában. Az adott mértékű alakváltozást eredményező feszültség ugrásszerűen csökken egy elektromos impulzus megjelenésekor. Az áram fent említett hatásait a szintézis elmélet használatával modelleztem. Ehhez egy új változót vezettem be a szintézis elmélet alapvető egyenleteibe, amely kifejezi az átfolyó egyenáram hatásait. Az alakváltozások analitikai leírása jó egyezést mutat a nemzetközi irodalomban található kísérleti eredményekkel.

## **Abstract**

The thesis addresses the peculiarities of irrecoverable deformation in electrical field. The effect of direct current upon the primary and steady state creep as well as plastic deformation is studied. The action of current results in the increase of deformation in both primary and steady state portion. Further, the stress needed to maintain a given level of plastic deformation undergoes a jump-wised decrease as an electric impulse is on. The phenomena listed above have been modeled in terms of the synthetic theory by inserting into its basic formulae a term accounting for the presence of direct current. The analytical results show good agreement with experimental data.

## I. A kutatás előzményei

Egyre több tudományos munka foglalkozik az elektromos áramnak az alacsony olvadáspontú fémek alakváltozására gyakorolt – Joule-hevítéstől különböző – hatásának vizsgálatával.

Chen és Yang (2008, 2010) kísérleteik során ón, ón-ólom ötvözet és ólom anyagú próbatestek indentációs kúszásvizsgálatát végezte el. A vizsgálatok eredményeképp megmutatták, hogy a növekvő áramerősséggel nő az állandósult állapotú kúszássebesség. Úgy találták, hogy a mozgó elektronok és a fémrács atomjai közötti impulzus átadás csökkenti az atomok elmozdulásához szükséges energiát, és növeli azok elmozdulásának sebességét. Kinney et al. (2009) nyíró feszültséggel terhelt Sn-Ag-Cu ötvözet kúszását vizsgálta elektromos áram jelenlétében, és a kúszássebesség növekedését tapasztalták növekvő áramsűrűség mellett. Zhao et al. (2012) réz szalagok elektromechanikai viselkedését vizsgálta. Shao et al. (2012) polikristályos fémek diffúziós kúszásának vizsgálatokor mutatta ki az elektromos áram kúszást elősegítő hatását.

A mikroelektronikai komponensek összekötő elemein áthaladó elektromos áram a hőmérséklet helyi emelkedését okozza a Joule-hevítés hatására, illetve a mozgó elektronok és a fémrács atomjai közötti impulzus átadásnak köszönhetően a diffúzió intenzitásának növekedéséhez vezet. Ezt támasztják alá a Zhao és munkatársai (2014) által végzett kísérletek, amelyek az átfolyó áram az elektromos összekötő elemek időfüggő képlékeny alakváltozására kifejtett hatásának jellemzését célozzák.

A fenti eredmények alapján azt találták, hogy egy adott hőmérséklet és mechanikai feszültség intervallumban az ón kúszását meghatározó domináns fémteni folyamat a diszlokációk mászása. A diszlokációk mászása a vakanciák diffúziója segítségével valósul meg. Az átfolyó áram hatására növekszik a diffúziós folyamatok sebessége.

Összefoglalva a következő megállapítások tehetők:

- (i) A szekunder kúszássebesség nő a növekvő áramsűrűség hatására.
- (ii) A szekunder kúszássebesség lineárisan nő az áramsűrűség négyzetével.
- (iii) A szekunder kúszássebesség mechanikai feszültségtől való függését hatványfüggvény írja le.
- (iv) Az elektromos áramnak nincs jelentős hatása az állandósult kúszás aktiválási energiájára és a feszültség kitevőre. Az ón próbatesteken átfolyó áram nem változtatja meg a kúszási mechanizmust, ami meghatározza a kúszási alakváltozást.
- (v) Az elektromos mezőben a primer kúszás mértéke nő, az időtartama pedig csökken.

Nguyen et al. (2016) szakítóvizsgálat során bekapcsolt áramimpulzus hatását vizsgálta a pillanatnyi húzófeszültségre, AZ31 magnézium-ötvözet próbatestek segítségével. A kvázistatikus húzóvizsgálat során egyszeri elektromos impulzus haladt át a próbatesten meghatározott nyúlás elérésekor. Az áramimpulzus bekapcsolásakor a húzófeszültség ugrásszerű csökkenése következett be. A feszültség csökkenésének mértéke érzékenyen reagált az áramimpulzus áramsűrűségének változtatására: az elektromos energiasűrűség növelésével a feszültségesés közel lineárisan nő. Az áramimpulzus megszűnése után a húzófeszültség ismét növekedni kezdett a magnézium-ötvözet alakítási keményedésének megfelelően. Az egyszeri áramimpulzus hatására bekövetkező szinte azonnali feszültségesés, majd az azt követő alakítási keményedés jelensége összhangban van az 5052 alumínium-ötvözetten és korszerű nagyszilárdságú acélon végzett kísérletek eredményeivel hasonló vizsgálati körülmények között (Roh et al., 2014., Kim et al., 2014).

A fenti kutatások eredményei alapján az egyenáram hatása a következő okokra vezethető vissza:

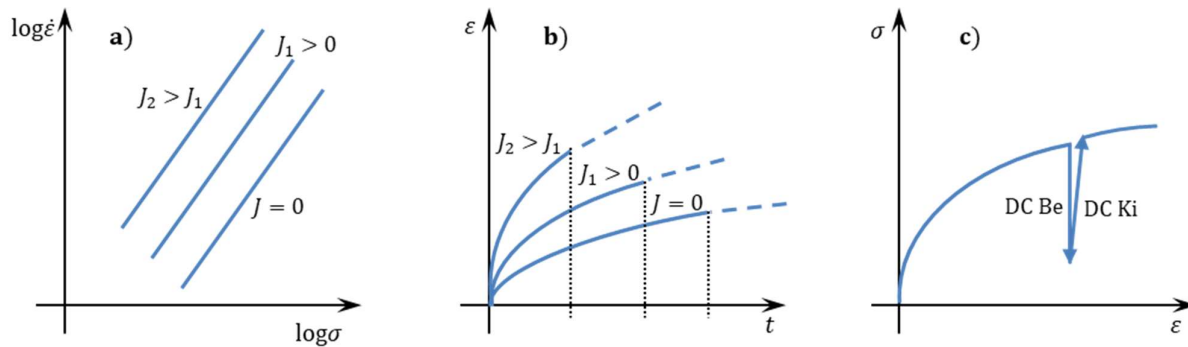
- (i) Az egyenáram okozta Joule-hevítés a hőmérséklet helyi növekedéséhez, és így időfüggő képlékeny alakváltozáshoz vezet.
- (ii) A mozgó elektronok és a fémrács atomjai közötti impulzus átadás csökkenti az atomok elmozdulásához szükséges energiát, és növeli az atomok diffúziójának sebességét.
- (iii) Az áram mező elősegíti a diszlokációs csúszás sebességének és a diffúziós kúszás intenzitásának növekedését.

Az irodalomkutatásból kiderítettem, hogy a kutatók túlnyomó része mérésekkel foglalkozik, és csak ritkán, tisztán empirikus összefüggéseket javasolnak az irreverzibilis alakváltozás leírására áram jelenlétében. Ezzel ellentétben, a fizikai mechanizmusok alapján, úgy terjesztettem ki a szintézis elmélet konstitutív egyenleteit, hogy az áram hatása az anyagban mikroszinten lejátszódó folyamatokra, analitikai úton leírható legyen.

## II. Célkitűzések

A kutatási céloom egy olyan modell kidolgozása a szintézis elméletének keretében, amely a következő jelenségek (effektusok) leírására alkalmas.

- A szekunder kúszás sebességének növekedése az áram jelenlétében (1.a ábra).
- A primer kúszási alakváltozás növekedése, a primer kúszási szakasz időtartamának csökkenése az áram jelenlétében (1.b ábra).
- Az áramimpulzus hatására megjelenő ugrásszerű feszültség csökkenés képlékeny alakváltozás esetén (1.c ábra).
- A fenti pontokban felsorolt alakváltozások során kialakuló keményedési felület evolúciója.



**1. ábra** A disszertációban tárgyalt jelenségek: **a)** szekunder kúszás sebessége, **b)** primer kúszás mértéke és időtartama, **c)** feszültség csökkenés egytengelyű húzóvizsgálat során ( $J$  - áramsűrűség)

### III. Vizsgálati módszerek

A kitűzött célokat a szintézis elmélet kereteiben valósítottam meg.

Az irreverzibilis alakváltozást leíró szintézis elmélet egyesíti magában a Budiansky-féle csúszási és a Sanders-féle folyási elméletet. A szintézis elmélet az alakítás hatására keményedő viselkedést leíró anyagmodellek csoportjába tartozik és alkalmazható a polikristályos anyagok kis képlékeny, illetve kúszási alakváltozásának leírására (Rusinko, A., & Rusinko, K., 2009,2011).

A szintézis elmélet mind matematikai, mind fizikai modellként alkalmazható. Az elmélet matematikai modellje teljes mértékben összhangban van a képlékeny alakváltozás alapvető törvényeivel, és megfelel pl. a Drucker posztulátum, a deviátor arányosságának törvénye, valamint az izotrópia posztulátum követelményeinek.

A szintézis elmélet – mint fizikai modell – a mikro- és makroszintű képlékeny alakváltozás leírásán, és a fémek mikroszerkezet (rácshibák létrejötte, szaporodása és életútja) hatásainak figyelembe vételén alapszik.

Az alakváltozás típusától (képlékeny alakváltozás, vagy kúszási alakváltozás) függetlenül egy fogalmat, az irreverzibilis (visszafordíthatatlan) alakváltozást használ. Ebben az esetben az alakváltozást nem bontják fel azonnali (képlékeny) és a kúszási (viszkózus) alakváltozás összegére (Rusinko, A., 2008, 2009). Az azonnali és kúszási alakváltozás létrejötte, illetve egymáshoz való viszonya az egyedi terhelés-hőmérséklet rendszer függvénye. A hidrosztatikus feszültségállapot nincs hatással a kúszási alakváltozásra.

Követve a maradó alakváltozások egységes leírásának tendenciáját (pl. Chaboche et al., 1996, 1997), a nem rugalmas alakváltozások teljes spektrumának leírására alkalmas konstitutív egyenletrendszer került kidolgozásra. A szintézis elmélet esetében a rendszer általános alkalmazhatósága a következőkön alapszik:

- (i) Egyetlen egyenlet teremt kapcsolatot a mikroszintű alakváltozás, az alakváltozás hatására a kristályos szerkezetben keletkező hibák, illetve az idő között. A mikro- és makroszintű alakváltozások közötti kapcsolat is egyértelmű, tekintve, hogy az irreverzibilis mikro-alakváltozások összege adja a makro-alakváltozás mértékét.
- (ii) A keményedés szabályát oly módon írja le, hogy a keményedési felület speciális szabályszerűség szerint viselkedik. Továbbá a keményedési felület megváltozásának kinetikája nem előre definiált, azt a terhelési út határozza meg.

## IV. Új tudományos eredmények – tézispontok

### 1. Tézis

**Kidolgoztam egy modellt a szintézis elmélet keretében, amely alkalmas a szekunder kúszás leírására átfolyó egyenáram jelenlétében [1,3].**

A forrasanyagok kúszásával foglalkozó kutatások rámutattak, hogy az átfolyó egyenáram jelentős hatást gyakorol a kúszási viselkedésre. A szintézis elméletet, annak kiterjesztésével, sikerült olyan alakra hoznom, amellyel alkalmassá vált az egyenáram hatásának leírására. Ennek eléréséhez a szintézis elmélet konstitutív egyenleteibe bevezettem egy, az egyenáram hatását tükröző tagot. Igazoltam, hogy az új modell segítségével meghatározható

- (i) a szekunder kúszássebesség a feszültség függvényében, különböző áramsűrűség mellett,
- (ii) a szekunder kúszássebességet az áramsűrűség függvényében, különböző hőmérsékleten.

### 2. Tézis

**Általánosítottam a szintézis elméletet a következő két eset analitikai leírására [2]:**

- (i) az átfolyó egyenáram által gyakorolt hatás a primer kúszás nagyságára és időtartamára,
- (ii) a rövid idejű áramimpulzus hatása az adott alakváltozás fenntartásához szükséges feszültségre.

A szintézis elmélet konstitutív egyenleteibe olyan tagot vezettem be, amely figyelembe veszi az átfolyó áram hatását a kúszás primer szakaszára. Igazoltam, hogy a modell segítségével meghatározható

- (i) a primer kúszás mértéke és időtartama különböző áramsűrűség mellett.

Továbbá igazoltam, hogy a levezetett egyenletek nem időfüggő alakváltozás (képlékeny alakváltozás) leírására is alkalmasak. Mégpedig alkalmazásukkal meghatározható

- (ii) a húzófeszültség ugrásszerű csökkenésének mértéke az áramsűrűség függvényében.

### 3. Tézis

**Kidolgoztam a keményedési felület változását leíró egyenleteket [4,5].**

Az átfolyó egyenáramnak az anyag deformációs tulajdonságaira gyakorolt hatását a keményedési felület részletes elemzésével támasztottam alá egytengelyű húzás esetében. Leírtam a keményedési felület fejlődését a következő esetekre: primer és szekunder kúszás, illetve képlékeny alakváltozás egyenáram jelenlétében. Programot készítettem, amely meghatározza a keményedési felület kinetikáját. Általánosítottam az egytengelyű húzás esetében kapott eredményeket általános egyszerű terhelési pályára. Ennek eredményeképp megmutattam, hogy a deformációs elmélet keretében értelmezett törvény (Hencky-Nádai törvény) marad érvényben az áram jelenlétében is.



## V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A mai összetett elektronikai eszközökben több ezer kapcsolat található egyetlen nyomtatott áramkörben. Az elektronikus komponensek méretcsökkenésének következményeként jelentősen növekvő áramsűrűség miatt egyre nagyobb figyelmet kell fordítani az elektromigráció által okozott tönkremeneteknek. Az elektronikai kapcsolatok elektromechanikai viselkedése nagy jelentőséggel bír az elektronikai eszközök megbízhatóságának és minőségének szempontjából. Az eszközökben alkalmazott nyomtatott áramkörök kapcsolataiban, az elektronikai komponensek és a hordozó lemez közötti hőmérséklet különbség hatására mechanikai feszültségek ébrednek, azokban kúszási alakváltozást okozva, amit még fokoz a rajtuk átfolyó áram. Ebből kifolyólag a gyakorlat számára döntő jelentősége van a forrasztanyagok irreverzibilis (képlékeny és/vagy kúszási) alakváltozási mechanizmusának és viselkedésének megismerésében.

Az elektronszél a fémek mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását olyan technológiák kidolgozásának céljával vizsgálják, amelyek alkalmazásával az alakításra fordított mechanikai munka csökkenthető a darab hőmérsékletének jelentős növelése nélkül. Manapság mind az akadémiai, mind az ipari érdeklődés számottevően nőtt az elektromosan támogatott alakító technológiák iránt. Az elektromos mező csökkenti a folyási feszültséget és növeli az alakváltozó képességet, aminek eredményeképp csökken a fajlagos energia fogyasztás és a költségek.

Ebből kifolyólag a disszertációban megfogalmazott eredmények az elektronikai eszközök megbízhatóságának javításában, és a különböző gyártástechnológiai technológiák optimalizálásában hasznosulhatnak.

## VI. Irodalmi hivatkozások listája

Chaboche, J. L. (1996) Unified Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations: Development, Capabilities, and Thermodynamic Frame Work, *In. Krausz, Alexander S., and K. Krausz, eds. Unified constitutive laws of plastic deformation*. Elsevier.

Chaboche, J. L. (1997). Thermodynamic formulation of constitutive equations and application to the viscoplasticity and viscoelasticity of metals and polymers. *International Journal of Solids and Structures*, **34**: 2239-2254.

Chen, R., & Yang, F. (2008). Impression creep of a Sn60Pb40 alloy: the effect of electric current. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *41*(15), 155406.

Chen, R., & Yang, F. (2010). Effect of DC current on the creep deformation of tin. *Journal of electronic materials*, *39*(12), 2611-2617. Zhao, G., & Yang, F. (2014). Effect of DC current on tensile creep of pure tin. *Materials Science and Engineering: A*, *591*, 97-104.

Kim, M. S., Vinh, N. T., Yu, H. H., Hong, S. T., Lee, H. W., Kim, M. J., ... & Roth, J. T. (2014). Effect of electric current density on the mechanical property of advanced high strength steels under quasi-static tensile loads. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *15*(6), 1207-1213.

Kinney, C., Morris, J. W., Lee, T. K., Liu, K. C., Xue, J., & Towne, D. (2009). The influence of an imposed current on the creep of Sn-Ag-Cu solder. *Journal of electronic materials*, *38*(2), 221-226.

Nguyen, T. T., Nguyen, T. V., Hong, S. T., Kim, M. J., Han, H. N., & Morestin, F. (2016). The effect of short duration electric current on the quasi-static tensile behavior of magnesium AZ31 alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.

Roh, J. H., Seo, J. J., Hong, S. T., Kim, M. J., Han, H. N., & Roth, J. T. (2014). The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current. *International Journal of Plasticity*, *58*, 84-99.

Rusinko, A., & Rusinko, K. (2009). Synthetic theory of irreversible deformation in the context of fundamental bases of plasticity. *Mechanics of Materials*, *41*: 106-120.

Rusinko, A., & Rusinko, K. (2011). *Plasticity and Creep of Metals*. Springer Science & Business Media.

Shao, S. S., Yang, F., & Xuan, F. Z. (2012). Effect of electromigration on diffusional creep in polycrystalline materials. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, *40*(2), 165-171.

Zhao, G., Liu, M., & Yang, F. (2012). The effect of an electric current on the nanoindentation behavior of tin. *Acta Materialia*, *60*(9), 3773-3782.

Zhao, G.F., Yang, F.Q. (2012). *Appl. Phys. A—Mater. Sci. Process.* *109*, 553–559.

Zhao, G., Yang, F. (2014). Effect of DC current on tensile creep of pure tin. *Materials Science and Engineering: A*, *591*, 97-104.

## VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] Varga, P., & Rusinko, A. (2018, April). Modeling the effects of imposed current on the creep of SAC305 solder material. In *2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [2] Rusinko, A., & Varga, P. (2019). Modelling of the plastic deformation and primary creep of metals coupled with DC in terms of the synthetic theory of irrecoverable deformation. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, **23**(1), 23-33.
- [3] Rusinko, A., & Varga, P. (2019). Analytical Description of the Steady-State Creep of Metals in the Presence of Direct Current. *Acta Polytechnica Hungarica*, **16**(7), 185-196.
- [4] Rusinko, A., & Varga, P. (2019). Loading surface in the plastic and creep straining coupled with direct current. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **58**(1), 195-207.
- [5] Ruzinkó, E., & Varga, P. (2019). A keményedési felület fejlődése irreverzibilis alakváltozás során, átfolyó egyenáram jelenlétében. *11. Mérnöki Szimpózium a Bánkin (ESB 2019)*. (elfogadva)