

## Rövid szerzői reflexió a „Gondolatok, észrevételekre ...”

### Brief author's reflection on "Reflections, remarks ..."

Ezúton fejezem ki köszönetemet Tóth László Professor Úrnak a „Gondolatok, észrevételek ...” című írásért. Külön köszönöm az írás bevezető gondolatai között az életszemléletről, a szakmai viták mibenlétéről és jellegéről szóló két mondatot. Ezekhez hasonlókat vallok magam is. A szakmai vitát – Platón nyomán – *diskusszió*nak, nem pedig vitatkozásnak tekintem. Platón iskolájában a jóakarató barátok közötti eszmecserét *diskusszió*nak nevezték, míg a vitatkozás olyan vitát jelentett, amely vetélytársak között zajlik. Ezúton is köszönöm, hogy Tóth Professor Urat évtizedek óta szakmai jó barátomnak tekinthetem, akivel valóban nyílt, őszinte *diskusszió*t folytathatunk a minket egyaránt érdeklő szakmai kérdésekről.

**Az alábbiakban dióhéjban szeretnék reflektálni az írás néhány lényeges gondolatára.**

„A szerkezetintegritás elemzésének TRADICIONÁLIS metodikája...” bekezdésben foglaltakkal szinte teljesen egyetértek. Az utóbbi két évtizedben magunk is részt vettünk annak fejlesztésében – több nemzetközi projektben – és a fejlesztések eredményeinek hazai alkalmazásában. Azonban az említett tradicionális metodikában (pontosabban a nemzetközi jó gyakorlatban elfogadott és követett metodikák mindegyikében) található néhány olyan megoldatlan probléma, amelyre a szakma művelőinek néhány éven belül megoldást kellene találniuk. Az egyik ilyen, több évtizede nyitott kérdés a „Szerkezetintegritás” cikk végén említett „Meleg-Előfeszítés (Warm-PreStress, WPS) hatás” probléma. A WPS hatás leírásának bevonása a Szerkezetintegritási Számításokba nagyon nagy gyakorlati jelentőséggel bírna, ugyanis egy adekvát elméleti alapokra épített számítási módszertan alkalmazhatóságával a jelenleg alkalmazott magas – jórészt ismerethiányból fakadó – biztonsági tényezőket csökkenteni lehetne. A jelenleg rendelkezésre álló információk szerint azok a javaslatok, amelyek a probléma megoldására a tradicionális, szabványos metodika „finomhangolását” javasolják, mind a mai napig elégtelennek bizonyultak; ezért nem is szabványosították azokat. Többek között a WPS hatás probléma vizsgálata indította el azt a kutatást, melynek első eredményeiből néhányat az Anyagvizsgálók Lapja 2023/III. számában ismertettünk.

Ami a „Nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási kérdéseiről” című közleményt illeti, az a rendelkezésre álló terjedelem korlátozott volta miatt dióhéjban foglalja össze a nagyméretű nyomástartó rendszerek Szerkezetintegritási Számítási módszertanának tradicionális és új koncepcióját. Mivel a cikk terjedelmi korlátai nem tették lehetővé az új koncepció részletes kifejtését, továbbá ezen reflexióban még kevesebb hely áll rendelkezésre, ezért csak az Alaptörvények és az Anyagegyenletek viszonyát érintő kérdéskörrel kívánok röviden foglalkozni.

Míg Tóth Professor Úr a kérdéseit kontinuummechanikai alapállásból fogalmazza meg, addig a közlemény

„A Szerkezetintegritási számítások új módszertana” fejezetében bemutatott metodika a *Modern Kontinuum Termodinamikára*, mint keretelméletre épül. Elméleti fizikai szempontból a *Modern Kontinuum Termodinamika* olyan kontinuum térelmélet, amelyet jellemzően térben inhomogén rendszerekben, véges állapotváltozási sebességekkel zajló időfüggő folyamatok leírására dolgoztak ki (Gyarmati [1], Muschik, Papenfuss, Ehretraut [2], Podio-Guidugli [3], Hobbs, Ord, Regenauer-Lieb [4]). Mivel a térben inhomogén rendszerek nemegyensúlyi rendszerek, amelyekben a folyamatok véges állapotváltozási sebességgel zajlanak, ezért ez a leírásmód túllép azon a statikus felfogáson, amely az „elegendően” lassú folyamatokat egyensúlyi állapotok sorozataként értelmezi. Megjegyzem, hogy a mérnöki alkalmazások sok szabványos számítási modellje még ma is erre a statikusnak tekinthető szemléletre épül, és tisztában vagyok azzal is, hogy ezek a számítások bizonyos esetekben akár kiválóan megközelíthetik a megfigyelések eredményeit.

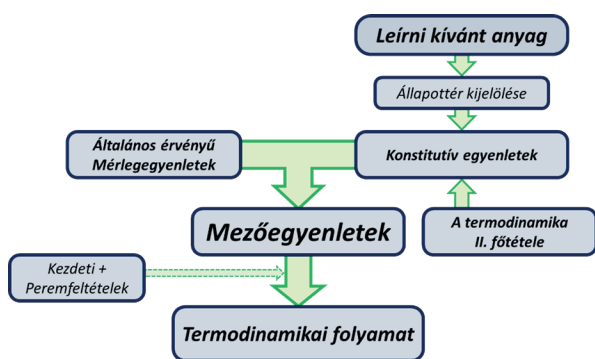
Az elmondottakon túlmenően a *Modern Kontinuum Termodinamika* alapvetően a világszemléletében tér el a klasszikus Kontinuummechanikától. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a *Modern Kontinuum Termodinamika* más paradigma, mint a klasszikus Kontinuummechanika. Ugyanis középponti hipotézise szerint „a világban az irreverzibilitás elkerülhetetlenül jelen van” (Öttinger [5]), amit Gyarmati István professzor híres Nemegyensúlyi Termodinamika című könyvében [1], évtizedekkel ezelőtt még így fogalmazott meg: „... a természetben minden makroszkopikus folyamat irreverzibilis”. A folyamatok irreverzibilis voltának oka az energiadisszipáció, ami a mérnökök jelentős hányada számára talán sokkal ismerősebb megfogalmazás. A hipotézist a disszipációra alapozva, az a következőképpen hangzik: *a világban a disszipáció elkerülhetetlenül jelen van; ez azt jelenti, hogy a disszipáció a világban minden folyamatban, minden idő- és hosszskálán, mindig működik*. A tárgyalt hipotézis plauzibilis voltát pl. Torromé azon vizsgálatainak eredményei támasztják alá, amely szerint a dinamikai rendszerek általános viselkedési formája az irreverzibilis (disszipatív) viselkedés (Torromé [6]). Nyilvánvaló, hogy egy disszipatív rendszermodellből a disszipáció mértékének  $\rightarrow 0$  határátmenetében disszipációmentes (azaz reverzibilis) rendszermodellre juthatunk, azonban egy reverzibilis rendszermodellből adekvát disszipatív rendszermodellt felépíteni már sokkal nehezebb, mert ebben az esetben még meg kell keresni a disszipációs mechanizmusokat is.

Az Alaptörvények és az Anyagegyenletek viszonyát érintő kérdésre térve, a *Modern Kontinuum Termodinamikában* az Alaptörvényeket „Általános érvényű Mérlegegyenleteknek” nevezik (Muschik, Papenfuss, Ehretraut [2]), mert ezek a mérlegegyenletek minden anyagra érvényesek. A leírni kívánt anyag speciális viselkedését az „Állapotter kijelölésével” (azaz az állapotváltozók megválasztásával)

kezdik. Ezek birtokában alkotják meg a „*Konstitutív egyenleteket*” (vagy Anyagegyenleteket), amelyekre a Termodinamika II. főtétele olyan megszorításokat ró ki, hogy az egyesített egyenletek (a Mezőegyenletek) rendszere – a szükséges kezdeti és peremfeltételekkel kiegészítve – valós/megengedett Termodinamikai folyamat(ka)t írjon le. Ebben a felfogásban az Anyagegyenlet nemcsak az alakváltozási és a mechanikai feszültségmező, hanem az állapotteret kifesztítő összes mező között kapcsolatot teremt; annak termodinamikai konzisztenciáját a lezármaztatási eljárás biztosítja. A konkrét anyag(ok)ra vonatkozó, megfelelő paramétereket ebben a konstrukcióban is kísérletek eredményeiből származtatják le. Egy anyagi rendszer viselkedésének leírására alkalmas rendszermodell *Modern Kontinuum Termodinamika* szellemében történő konstrukcióját, az Általános érvényű Mérlegegyenletek, a Termodinamika II. főtétele és a Konstitutív egyenletek viszonyát az 1. ábra szemlélteti. Ezen felfogás szerint a *Modern Kontinuum Termodinamikában* az Anyagegyenletek tehát mindenképpen „*termodinamikailag determináltak*”.

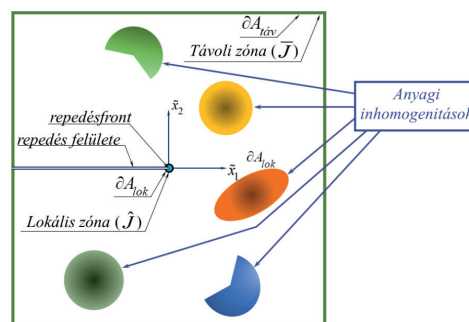
Az 1. ábrán bemutatott konstrukció már önmagában körvonalazza a választ arra a kérdésre, hogy az „*ismertett ÚJ MÓDSZERTAN mennyiben 'nagy méretű nyomástartó rendszer' specifikus*”. A módszertan – a geometriai modelleken túlmenően – annyiban (lesz) nagy méretű nyomástartó rendszer specifikus, amennyiben a Konstitutív egyenletek a megfelelő rendszerek szerkezeti anyagainak adekvát modelljei (lesznek). Első lépésben a nagy méretű nyomástartó rendszerek vizsgálatára fejlesztés alatt álló mérnöki alkalmazások Anyagegyenletei még a klasszikus folyási és kúszási modellekre épülnek. A valóban mélyebb megértésen alapuló, például a mezo- és mikrostruktúra, valamint a károsodás hatását is jobban követő modellek még intenzív kísérletekkel támogatott elméleti fejlesztést igényelnek. Az ilyen irányú – jobbra elméleti – kutatások irodalma erőteljesen gyarapszik (ld. pl. Coleman, Gurtin [7], Rice [8], A. Berezovski, Engelbrecht, Maugin [9] és Morro, Giorgi [10]), azonban az ipari használatra alkalmas mérnöki modellek eléréséig még sok kutatási és fejlesztési munka szükséges.

Ami viszont az új módszertant valóban megkülönbözteti a tradicionális módszertantól, az a termodinamikai keretelméletből következő törésmechanikai modell. Mivel a



1. ábra: Anyagi rendszer leírására szolgáló mezőegyenletek konstrukciója a *Modern Kontinuum Termodinamikában* [2]

*Modern Kontinuum Termodinamika a térben inhomogén nemegyensúlyi rendszerekben, véges állapotváltozási sebességekkel zajló időfüggő/tranziens, disszipációval járó folyamatokat* tárgyal, természetesen, hogy a törésmechanikát is ebben a környezetben értelmezzük. Chen és Mai a [11] monográfiában részletesen tárgyalják a termodinamikai keretelméletben értelmezett, általánosított  $J$ -integrált. A termodinamikai elmélet túllép Rice híres cikkének [12] bevezető „*consider a homogeneous body of linear or nonlinear elastic material free of body forces*” félmondatán, amely az eredeti  $J$ -integrál elmélet kiindulási hipotézise. A repedés körüli viszonyok leírása ebben az elméletben is az Eshelby-tenzor köré szerveződik, de a leírás kiegészül a repedés környezetében jelenlévő inhomogenitások indukálta disszipatív folyamatok hatásának követésével; ezért áll itt az általános esetben a  $J$ -integrál a lokális  $\hat{J}$  plusz a távoli  $\bar{J}$  tagokból (ld. a 2. ábrát). Ez a törésmechanikai modell, bár kétségkívül komplexebb az eredetinel, de mindenképpen összhangban áll a kiindulási termodinamikai keretelmélettel.



2. ábra: A lokális  $\hat{J}$  és a távoli  $\bar{J}$  tagokból álló, általánosított  $J$ -integrál

A választott leírásban az anyag viselkedésének jellemzése szempontjából releváns disszipatív folyamatokat a megfelelő belső változók reprezentálják (pl. Coleman, Gurtin [7], Rice [8], A. Berezovski, Engelbrecht, Maugin [9]); a belső változók maguk is rendelkezhetnek inhomogén eloszlással. Anyagi inhomogenitásoknak ebben a modellben – meglehetősen durván fogalmazva – azokat a lokális környezeteket nevezzük, amelyekben az anyag valamilyen fizikai, kémiai, elektrokémiai vagy akár elektromágneses jellemzője/paramétere szignifikánsan eltér az őt tartalmazó reprezentatív térfogatelemre meghatározott átlagos jellemzőjétől. Ezen környezetekben a disszipáció mechanizmusa attól függ, hogy milyen típusú inhomogenitásról van szó, lokális mértéke pedig szignifikánsan eltér a jellemzőnek az adott környezetet tartalmazó, reprezentatív térfogatelemre átlagolt értékétől. A különböző anyagi károsodások, lokális repedések megjelenése, terjedése mind disszipatív folyamat, azonban pl. egy kezdeti repedés környezetében is létez(het)nek olyan anyagi inhomogenitások (pl. kemény másodrendű kiválások), amelyek valamely kísérlet kezdetén még nem azonosíthatók anyagi károsodással, azonban az ezen helyekről – bizonyos kritikus állapot elérése után – a kísérlet későbbi fázisában kiinduló disszipatív folyamatok már tartozhatnak az említettek közé. A jelenség tárgyalása az

önszerveződés – vagy kényszerek által befolyásolt önszerveződés – nagyon gazdag tématerületére vezet át, és szoros összefügg a kísérletekkel, valamint a kísérleteknek a keretrendszerben történő értelmezésével. A kérdéskör további kifejtésétől itt hely hiányában eltekintek, azonban a téma olyan mélységű kifejtésére, amelybe Professor Úr eddig feltett, és a jövőben várható kérdéseire adandó, lehetőleg kimerítő válaszok beleférnek, szívesen állok rendelkezésre, amennyiben erre igény mutatkozik.

Az írás „*Mechanikai anyagvizsgálat*” fejezetében megfogalmazott gondolatokkal kapcsolatban – ugyancsak dióhéjban – szerzőtársaimmal egyetértésben annyit tudok válaszolni, hogy teljes mértékben egyetértünk a 7. ábra mondandójával, miszerint a mechanikai anyagvizsgálatok során az anyag önszerveződő rendszerként viselkedik, ám azt inkább kényszerített önszerveződésnek neveznénk. A szerkezeti anyagok termodinamikai önszerveződő rendszerként történő felfogására Professor Úr tanulmányán [13] kívül nemigen találtunk példát a szakirodalomban. Egy kivételnek tekinthető Ivanova munkája [14]. Termodinamikai megfontolások alapján egyetértünk azzal, hogy egy anyagvizsgálat – pl. szakítóvizsgálat – során az anyag viselkedése a kezdeti és a végállapot között folyamatosan változik, azonban az ilyenfajta modellek kidolgozása még a jövő feladata.

A kutatások elején abból indultunk ki, hogy pl. egy szakítókísérlet során a próbatest – előbb vagy utóbb – mind geometriai, mind anyagi szempontból nemlineáris viselkedést mutat, és a kétféle viselkedés kísérleti módszerekkel nem szeparálható. Ugyanakkor a paraméterek átvihetősége szempontjából fontos, hogy amennyire lehet, a próbatest méretének és geometriájának hatását mégiscsak valamilyen módszerrel „*lehámozzuk az Anyagegyenlet paramétereiről*”. Erre szolgál a numerikus – elsősorban megfelelő nemlineáris problémák tárgyalására is validált Végeselemes Módszerrel támogatott – *Digitális Pár* koncepció, amelynek segítségével a próbatest geometriai és anyagi nemlinearitásai együtt vizsgálhatók. Mára addig jutottunk, hogy egy feltételezett formájú Anyagegyenleten alapuló szimulációk segítségével az Anyagmodell paraméterei úgy határozhatók meg, hogy közben a próbatest megvalósult, ideálistól eltérő, gyártási geometriájának és a tökéletlen befogásnak a hatásai elkülöníthetők az anyagi viselkedéstől. A cikkben a lapos próbatestek Digitális Párjain végzett szimulációk megmutatták, hogy a próbatest gyártási méretein alapuló modellek a kontrakció helyének a mérések során megfigyelt, igen jelentős aszimmetrikus elvándorlását képesek kimutatni. Ehhez hasonló eredmény(ek)e)t eddig nem találtunk a szakirodalomban. A komplexebb Anyagmodellek Digitális Párokba történő bevezetése problémájának megoldását tervbe vettük.

Összefoglalva, tisztában vagyunk azzal, hogy a Szerkezetintegritás és az anyagvizsgálatok kiértékelésének módszertana még sok fejlesztést igényel. A cikkek a

„*bis dat qui cito dat*” elvét követve készültek, elsősorban azzal a célkitűzéssel, hogy a módszertan korszerű elméleti alapjait bemutassuk, továbbá az anyagvizsgálatok kiértékelésére kidolgozott rendszer működőképességét – a szakítóvizsgálatok példáján – demonstráljuk.

**Fekete Tamás**

*főtanácsos, HUN-REN Energetikai Kutatóközpont*

## Irodalomjegyzék

- [1] Gyarmati I., Nemegyensúlyi Termodinamika. 2. kiadás Műszaki Könyvkiadó Budapest (1976)
- [2] W. Muschik, C. Papenfuss, H. Ehrentraut, A sketch of continuum thermodynamics, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 96 1–2 (2001) 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(00\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(00)00141-5)
- [3] P. Podio-Guidugli, *Continuum Thermodynamics*. SISSA Springer Series Volume 1, Springer Nature Switzerland AG (2019) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11157-1>
- [4] B.E. Hobbs, A. Ord, K. Regenauer-Lieb, The thermodynamics of deformed metamorphic rocks: A review, *Journal of Structural Geology* 33 (2011) 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.01.013>
- [5] H.C. Öttinger, *A philosophical approach to quantum field theory*. Cambridge University Press Cambridge New York (2017)
- [6] R.G. Torromé, General theory of non-reversible local dynamics, *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics* 18 7 (2021) 2150111 <https://doi.org/10.1142/S0219887821501115>
- [7] B.D. Coleman, M.E. Gurtin, Thermodynamics with Internal State Variables, *The Journal of Chemical Physics* 47 2 (1967) 597–613. <https://doi.org/10.1063/1.1711937>
- [8] J.R. Rice, Continuum Mechanics and Thermodynamics of Plasticity in Relation to Microscale Deformation Mechanisms, In: A.S. Argon (szerk.), *Constitutive Equations in Plasticity*. MIT Press (1975) 23–75.
- [9] A. Berezovski, J. Engelbrecht, G.A. Maugin, Generalized thermomechanics with dual internal variables. *Archive of Applied Mechanics* 81 (2011) 229–240. <https://doi.org/10.1007/s00419-010-0412-0>
- [10] A. Morro, C. Giorgi, Mathematical Modelling of Continuum Physics. In: *Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology* Birkhäuser Cham (2023) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-20814-0>
- [11] X.H. Chen, Y.W. Mai, *Fracture Mechanics of Electromagnetic Materials. Nonlinear Field Theory and Applications*. Imperial College Press London (2013) <https://doi.org/10.1142/p760>
- [12] J.R. Rice, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration of notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 35 (1968) 379–386. <https://doi.org/10.1115/1.3601206>
- [13] Tóth L., Materials as the Simplest Self-Organised Systems, and the Consequences of This. In: G. Pluvinage, L. Milovic (szerk.), *Fracture at all Scales, Lecture Notes in Mechanical Engineering* Springer International Publishing Switzerland (2017) 41–57. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32634-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32634-4_3)
- [14] V.S. Ivanova, *Synergetics. Strength and Fracture of Metallic Materials*. Cambridge International Science Publishing Great Abington (1998)

**A diskuszió partnerei egyetértnek abban, hogy a gondolatok és eredmények értékelése természetesen folytatódik akkor, ha a felvetett konkrét kérdésekre konkrét válaszok születnek.**