

Beszámoló az ECF23 Konferenciáról – II. rész

Report from the ECF23 Conference - Part II

1. Bevezetés

Az ECF23-at – azaz a „23rd European Conference on Fracture” konferenciát – 2022. június 27. és július 1. között rendezték meg Funchalban, Madeira fővárosában. Amint azt írásunk első részében [1] már említettük, az eseményen több mint 500 előadás hangzott el, ezért az elhangzottak áttekintő ismertetését – terjedelmi okokból – két részre osztottuk. Az első részben röviden bemutattuk a konferencia helyszínét, vázlatosan áttekintettük az ECF konferenciák történetét, és ismertettük a plenáris előadásokat. Jelen a rész a szekciókban végzett munkát ismerteti.

2. A szekciók munkájának áttekintése

Amint az előzőkben már többször említettük, az előzetesen beküldött tartalmi összefoglalók alapján a konferencia programjában mintegy 500 elfogadott előadás szerepelt. Ezeket a szervezőbizottság a következő 20 tematikus szekcióba osztotta be:

1. Fáradás;
2. Additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdései;
3. Hidrogén okozta elridegedés;
4. Statikus és kvázistatikus terhelések hatása;
5. Numerikus módszerek;
6. Mikromechanizmusok;
7. Hegesztett kötések szerkezeti integritása;
8. Kompozit anyagok;
9. Dinamikus törés és a fázisátalakulások dinamikája;
10. A biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdései;
11. Véges törésmechanika;
12. Környezeti hatások okozta repedések;
13. Betonszerkezetek szerkezetintegritási problémái: innovatív anyagok és megoldási stratégiák;
14. Nagyméretű műszaki szerkezetek kockázatelemzése és biztonsági számításai;
15. Alacsony és magas hőmérsékleten üzemelő komponensek problémái;
16. Roncsolásmentes vizsgálati módszerek;
17. Variációs módszerek a törésmechanikában;
18. Fejlett kerámiák és azok törési tulajdonságai;
19. Polimerbázisú szerkezeti anyagok törésének vizsgálatai – újszerű módszerekkel;
20. A törés és a károsodás jelenségeinek tárgyalása a mérnöki munkában.

A felsorolásban az egyes szekciókat az azokban elhangzott előadások száma szerint csökkenő sorrendben ismertettük. A sorrend felállításával azt próbáltuk érzékeltetni, hogy a konferencián megjelenők és a mögöttük álló szakmai műhelyek nagyjából milyen témákkal milyen arányban foglalkoztak vagy éppen foglalkoznak. Alább, a szekciók fenti sorrendjében haladva összefoglaljuk az azokban elhangzott főbb témákat. Bizonyos szekciók munkájának

ismertetése során az összefoglalókat olyan megjegyzésekkel, reflexiókkal egészítettük ki, amelyek – reményeink szerint – megkönnyítik azok gyorsabb megértését.

Fáradás

A mérnökök és a tudósok a fáradás jelenségével, a mérnöki szerkezetek véges élettartamának és törésének problémájával a 19. század közepső harmadában kezdtek el szisztematikusan foglalkozni. Elsőként az 1840-es évek elején Rankine – a vízgőz alapú termodinamikai Carnot-Rankine-ciklus atyja – foglalkozott vasúti tengelyek fáradási szilárdságának problémájával [2]. Az 1850-es évek elején a francia Morin alkalmazta az élettartamra történő tervezés koncepciójának korai változatát az akkori – lovak vontatta – postakocsik tengelyeinek biztonságos élettartamára végzett vizsgálataiban [3]. A fáradás kifejezést először az angol Braithwaite használta 1854-es publikációjában [4]. Wöhler 1850 és 1870 közötti elméleti és kísérleti munkája [5] teremtette meg a szisztematikus fáradástörési vizsgálatok alapjait. A fáradásos öregedés számításokkal történő követésére alkalmas első modellt Palmgren alkotta meg; eredményeit 1924-ben publikálta [6]. A Palmgren-féle elmélet két évtizedig elkerülte a mérnök-társadalom és a tudományos közösség figyelmét, és csak Miner 1945-ben, Palmgren gondolatait népszerűsítő cikkének megjelenését [7] követően terjedt el szélesebb körben. Ezt a modellt nevezik Palmgren-Miner szabálynak, vagy a lineáris halmozódó károsodások elméletének; mint ilyen, a fáradásos öregedés leírására azóta kidolgozott különböző modellek archetipusának tekinthető, beleértve a fáradásos repedésterjedési számítások alapját képező Paris-Erdogan modellt [8] is. Bár manapság soha nem látott teljesítményű informatikai erőforrások állnak rendelkezésre, a fáradásos öregedés és törés alapjait ma sem értjük megfelelően, ugyanakkor a legkülönbözőbb technológiai fejlesztések és mérnöki alkalmazások – pl. a hibátűrő tervezési koncepció elvei mentén konstruált szerkezetek tervezési élettartam-elemzése és szerkezetintegritási számításai – egyre jobban igénylik a pontosabb és megbízhatóbb modelleket, mert a biztonság szempontjából kritikus helyen üzemelő berendezések és komponensek esetleges, idő előtti, meghibásodásai könnyen katasztrofális következményekhez vezethetnek. Ezért a fáradással foglalkozó kutatások és fejlesztések világszerte egyre több erőforrást használnak fel, és egyre komplexebbé válnak. A témakör jelentőségét mutatja, hogy egyfelől a meghívott plenáris előadások közül, ld. [1], 4 foglalkozott ennek különböző aspektusaival, másfelől a fáradással foglalkozó prezentációk száma összesen 97 volt – ami az összes előadás mintegy ötödét jelentette –, valamint az, hogy az ide benyújtott előadásokat három altémára bontották, úgymint: (1) A mérnöki szerkezetek és anyagaik fáradása (49 prezentáció); (2) Ciklikus terhelések (34 előadás); (3) Rendkívül nagy ciklusú fáradás (14 prezentáció).

Additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdései

Amint a plenáris előadásokat áttekintő részben [1] említettük, az additív gyártási módszerek súlya a gyártási technológiák között az utóbbi egy-két évtizedben számottevően megnövekedett, és a közeli jövőben további térnyerésük várható. Ezek a gyártási eljárások számos előnnyel bírnak a hagyományos technológiákkal szemben, pl. kisebb mértékű vagy zéró anyagvesztés, kevesebb gyártási lépésből álló gyártástechnológia, következőképp magasabb termelékenység, azaz az olcsóbb gyártás lehetősége, valamint a geometriai formák kialakításának nagyobb szabadsága. A téma súlyát jól mutatja, hogy a két plenáris előadás mellett 41 prezentáció ismertette a kutatások és fejlesztések mai állását. Az előadások témáit áttekintve megállapítható, hogy az additív gyártástechnológiák bevezetése során hangsúlyozottan növekszik a technológia fejlesztése során alkalmazott szimulációk megbízhatóságának jelentősége, mert a gyártás során a szerkezeti anyagok a klasszikus gyártási eljárásokat jellemző terheléstörténettel jelentősen eltérő terhelési történettel rendelkeznek; ez a különbség pedig hosszú időtávon tapasztalható viselkedésüket, öregedésüket is befolyásolja.

Hidrogén okozta elridedés

A fosszilis üzemanyagok visszaszorítása érdekében végzett fejlesztések egyik iránya a hidrogén – mint alternatív energiahordozó – felhasználása a különböző belsőégésű motorteknológiákban. Ma a hidrogén-technológia alkalmazásának egyik komoly akadálya, hogy a hidrogén a vele érintkező szerkezeti anyagokat sokkal gyorsabban öregíti, mint a hidrogénnél lényegesen nagyobb atomokból vagy molekulákból, illetve azok keverékéből álló más közegek. Az alkalmazások felől jelentkező, egyre sürgetőbb igények mielőbbi kielégítése érdekében a hidrogén okozta öregedés mechanizmusának kutatásai az utóbbi években egyre intenzívebbé váltak. A területen végzett kutatások egyik fő irányáról Z. Zhang számolt be az első részben [1] ismertetett plenáris előadásában [9], melyet a szekcióban további 34 prezentáció követett. Ezek többek között a hidrogén kiváltotta öregedés mechanizmusával, a hidrogénnek a szerkezeti anyag alakváltozási mechanizmusára gyakorolt hatásával, a hidrogén hatására gyorsuló repedezés jelenségével foglalkoztak. A hidrogén okozta elridedés leírására a plenáris előadásban [9] ismertetett Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modellen [10-13] kívül a prezentációkban többek között bemutattak egy, a fázismezők elméletén alapuló, egy többskálás elméletre alapozott, valamint egy „local approach” modellt is.

Statikus és kvázistatikus terhelések hatása

A statikus és kvázistatikus üzemi körülmények, terhelési módok és a különféle szerkezeti anyagok statikus és kvázistatikus körülmények közötti viselkedésének tanulmányozása a mérnöki tudományok kezdetei óta szerves részét képezi a tervezési módszereknek és a biztonsági elemzéseknek. A statikus és kvázistatikus terhelési viszonyok között végzett anyagvizsgálatok a kísérleti

úton szerzett mérnöki és tudományos ismeretek komoly hányadát képviselik. A tématerülethez tartozó kutatások újabb eredményeit 34 előadás ismertette, melyek között elméleti és numerikus modellezéssel foglalkozó munkákat ugyanúgy találhattunk, mint különféle szerkezeti anyagokon végzett kísérletek bemutatását is.

Numerikus módszerek

A „Numerikus módszerek” szekció előadói a ma eljárónak tekinthető – numerikus eljárásokkal megoldható – modellek fejlesztésében elért új eredményeket, továbbá numerikus modellekre épített alkalmazásokat ismertettek. Az előadások többek között a szerkezeti anyagok kontinuum károsodási modelljeivel, a repedések keletkezésének és terjedésének szimulációjára fejlesztett modellekkel – mint pl. a kohéziós zóna vagy a különböző fázismező elméletekre épülő modellek –, továbbá az anyagvizsgálatok során a próbatestekben kialakuló alakváltozási-, feszültség- és károsodási állapot meghatározására végzett szimulációkkal, valamint a tényleges szerkezetekben az üzemeltetés közben kialakuló állapot meghatározására alkalmas numerikus eszközök fejlesztéseinek kérdéseivel foglalkoztak. A szekcióban 28 előadás kapott helyet. Ezek közül említésre méltónak tartjuk az első részben [1] már említett Konfigurációs Erők elméletén [14] alapuló fejlesztést bemutató prezentációt, amely az elmélet fáradásos repedésterjedésre történő alkalmazását mutatta be. Ebben a szekcióban kapott helyet az „Extending Reliability of FEM simulations, based on Optically Assisted Tensile Tests – a Digital Twin” című előadás [15] is, melynek szerzői Fekete Tamás, Antók Dániel, Tatár Levente és Bereczki Péter voltak. A prezentáció az EK és a Dunaújvárosi Egyetem közötti együttműködés keretében a Dunaújvárosi Egyetemen készített, optikai adatgyűjtőrendszerrel felszerelt szakítóméréseket és az azok kiértékelésére kidolgozott, a digitális pár koncepción alapuló mérés-kiértékelő rendszer fejlesztésének eredményeit mutatta be, amelynek fejlesztését az NKFIH-1267-2/2020 számú, Roncsolásmentes folyamatkövetés tématerület című projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Tématerületi Kiválósági Program 2020 (2020- 4.1.1-TKP2020) pályázati program finanszírozta.

Mikromechanismusok

Ebbe a szekcióba mindazokat az előadásokat sorolták, amelyek a különböző anyagok – a fémek szerkezeti anyagoktól kezdve, a műanyagokon át a biológiai környezetben létező és a gyógyászatban felhasználható anyagokig – mikro- és nanoszerkezetével és ezeken a hossz-skálán mutatott viselkedésével, valamint a rövid hossz-skálán megfigyelhető tulajdonságok és a makroszkopikus leírás viszonyával foglalkoztak. Általánosan fogalmazva, az érdeklődők a szekcióban a többskálás modellek fejlesztési területén zajló elméleti és kísérleti kutatások mai állásáról kaphattak ízelítőt. Az előadások témái között megtalálhatók voltak – többek között – az atomi szintű modellek fejlesztése terén elért elméleti és

kísérleti eredmények, a nanoszerkezetű anyagok kutatásai során elért kísérleti, valamint szimulációs modellek segítségével meghatározott eredmények, a fáradás és a törés mikroszkopikus információkat is magukba integráló kontinuummodelljei, ideértve a ridegtörés „local approach” módszereit is. A szekcióban 27 prezentáció hangzott el. A fent ismertetett témakon túlmenően, előadások foglalkoztak a képlékeny nyúlás és a nyúlásgradiens törésmechanikai modellekbe történő beépíthetőségével, a kémiai inhomogenitások, a hőkezelés reaktoracélok törési mechanizmusaira, illetve a makroszkopikus törési tulajdonságaira gyakorolt hatásával. A szekcióban hangzott el Chahboub Yassine és Szávai Szabolcs „Damage prediction of ferritic pipeline using Artificial Neural Network” című előadása [16].

Hegesztett kötések szerkezeti integritása

A hegesztett kötések kialakítása a komplex mérnöki szerkezetek építésének hosszú évtizedek óta használt technológiai eszköze; ez azonban még nem jelenti azt, hogy a hegesztett kötések viselkedését a szakma teljes mértékben értené és uralni tudná. A hegesztett kötések szerkezeti integritása ezért még mindig aktuális kutatás-fejlesztési téma. A hegesztéstechnológiai eljárások közelmúltban elért fejlesztési eredményei lehetővé tették ugyan a hegesztett kötések fáradással és töréssel szembeni ellenállóképességének javítását, ám a téma még mindig sok nyitott kérdést tartalmaz. A hegesztett kötések kialakítására alkalmazott gyártási eljárások olyan komplex lokális termomechanikai terhelést, illetve terhelési szekvenciákat indukálnak az anyagban – kezdetben gyors felolvasztást és gyors megszilárdulást követő erőteljes hűtést, majd a továbbiakban, szilárd állapotban elszenvedett több-kevesebb további termomechanikai igénybevételt –. Ezek fárasztó hatására az elkészült kötés a továbbiakban emlékezni fog, ami a komponens további célokra történő felhasználhatósági idejét erősen befolyásolja. A technológia erősen inhomogén mikroszerkezetet eredményez, amelyet az anizotrópia, a nagy gradiensekkel jellemezhető alakváltozási és maradófeszültség mezők, továbbá a mechanikai tulajdonságok inhomogén eloszlásai jellemeznek – az inhomogenitásba beleértve az olyan sajátosságokat is, mint a kötésben a készítés során megjelenő nemkívánatos szennyezők helyben maradása, illetve a porozitás –. A szimpózium a hegesztett kötések szerkezetintegritási kérdéseinek kutatásai során elért legújabb eredményeket mutatta be. Az elhangzott 21 prezentáció között legnagyobb számban olyanok szerepeltek, amelyek metallurgiai, korróziós és öregedési kérdéseket is tárgyaltak.

Kompozit anyagok

A műanyag alapú kompozitokat egyre szélesebb körben használják fel olyan iparágakban, ahol a kellő szilárdság megtartása mellett a tömeg csökkentése kulcsfontosságú. Ilyen felhasználási területek például a repülőgépipar, az autópár és a sportszeripar. Az iparban használt kompozitok jellegzetes típusai a kitüntetett irányokban futó szákkal vagy szövetekkel megerősített polimermátrixok. A

kompozit-alapú, biztonság szempontjából kritikus szerkezetek, illetve komponensek károsodásának és végső tönkremenetelének kellő pontosságú előrejelzése kulcsfontosságú a belőlük alkotott rendszerek műszakilag megengedhető üzemidejének meghatározása szempontjából, ezért a fejlesztések célja a kellő prediktív erővel bíró, megbízható szimulációs eszközök fejlesztése, validálása és az ipari alkalmazhatóságukat bizonyító verifikációja. A szekcióban elhangzott 20 előadás a különféle laborokban zajló, ezirányú kutatás-fejlesztési munkákba engedett bepillantást.

Dinamikus törés és a fázisátalakulások dinamikája

A szekcióban a nagy sebességű, dinamikus hatásokra bekövetkező károsodási és törési folyamatok „voltak terítéken”. A nagy sebességű, lökészerű terhelések a szerkezeti anyagokat extrém módon megterhelik; ilyen terhelési viszonyok hatására azok a statikus és kvázistatikus terhelési viszonyoknál megszokottól egészen eltérő, akár rendkívüli viselkedéssel reagálnak. A tématerülettel összesen 20 előadás foglalkozott, amelyek többek között kísérleti vizsgálatokból, valamint a nagysebességű terhelés hatására a szerkezeti anyagokban beinduló folyamatok numerikus szimulációiból származó eredményeket mutattak be. A prezentációk érintették a dinamikus modellek szükségszerűen több hossz- és időskálát felölelő jellegét, valamint a gyors irreverzibilis folyamatok leírásának problémáit, ideértve a gyors és extrém terhelések hatására bekövetkező fázisátalakulások dinamikáját is. Érdekes kutatási irány a nagysebességű alakváltozási, károsodási és törési folyamatok atomisztikus szimulációk segítségével történő vizsgálata.

A biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdései

A szekció a biológiai szövetek és az orvoslásban használatos biológiai, vagy a biológiai szervezetek által biztosított környezettel hosszú távon összeférhető, biokompatibilis anyagok szerkezetintegritási kérdéseit tekintette át. A témakör különböző aspektusaival 18 prezentáció foglalkozott, amelyek kiegészítették V. Silberschmidt idevágó – az első részben [1] ismertetett – plenáris előadását [17]. Az előadások érintették az orvoslásban használatos anyagok és a biológiai szövetek jellemzésének és vizsgálati protokolljainak kérdéskörét a különböző – in vitro vs. in vivo – körülmények között, továbbá ezen anyagok elméleti leírásának problémáit – a biomechanika néhány aktuális kérdését –, ideértve a biológiai anyagok viselkedését leíró konstitutív egyenletek és a korszerű numerikus szimulációs rendszerek fejlesztésének és alkalmazásainak kérdéseit. Megjegyezzük, hogy a biológiai szövetek és az orvoslásban használatos anyagok markánsan öregsznek, következésképpen az életkor előrehaladtával – az élettel együtt járó terhelésektől erősen befolyásoltan – a mechanikai teljesítőképességük, a terhelésekkel szembeni ellenállóképességük csökken. Mindez megköveteli, hogy a medicinában a különböző (ortopédiai, fogászati, szív- és érrendszeri stb.) implantátumokat és orvostechnikai eszközöket a szerkezetintegritás koncepciójának figyelembevételével tervezzék meg, építsék be és ellenőrizzék.

A szekcióban ismertették az orvosi implantátumokban használt anyagok fáradásával, kúszásával és biológiai lebomlásával kapcsolatos eredményeket; az érdeklődők előadásokat hallgathattak meg az orvosbiológiai anyagok mechanikai teljesítményének élő környezetben, hosszú időtávon történő alakulásáról, valamint a biológiai és a gyógyászatban alkalmazott anyagok és a belőlük épített szerkezeteknek az egyéni igényekre szabott, numerikus szimulációval segített adaptációjának kérdéseiről.

Véges törésmechanika

Bár a szekciót „Véges törésmechanika” címen hirdették meg, az elhangzott 15 előadás egy része nemcsak a szigorúan vett véges törésmechanikával, hanem egyéb olyan módszerekkel is foglalkozott, amelyekben a klasszikus törésmechanikában fellépő szingularitást megszüntették vagy valamilyen eljárással elkerülték – amivel a leírást teljesen végessé tették –. A matematikában a leképezések szingularitásainak megszüntetését desingularizációnak – ld. pl. [18-21] –, a szingularitás megszüntetésének stratégiáját pedig desingularizációs eljárásnak nevezik; a desingularizáció szinonimájaként használják a regularizációt, vagy a szingularitás felbontását – ld. [22-23] – kifejezést is. A törésmechanikában a szingularitás megjelenése ahhoz az aszimptotikus viselkedéshez kapcsolódik – amit Griffith az Inglis-féle modellben hajtott végre –, amikor egy véges r sugarú bemetszésből a sugár $r \rightarrow 0$ hoz való közelítésével leszámaztatják az idealizált repedésűcs-modellt. A szingularitás a modelltől eltűnik, ha a leírásba egy olyan $h > 0$ hosszparamétert – a karakterisztikus hossz – vezetnek be, amelynél kisebb távolságon belül a fizikai mező értékét vagy állandónak tekintik, vagy ott az $r > h$ távolságon alkalmazott közelítéstől eltérő, finomított leírást használnak. A karakterisztikus hossz megállapítása modellezési stratégia kérdése. A legegyszerűbb eljárás a klasszikus törésmechanikába egyszerű heurisztikus paraméterként bevezetni azt; ezt teszik a véges törésmechanikában. Ennél bonyolultabb a helyzet, ha a törésmechanikai modell alapjául szolgáló elméleti keretrendszer tágítják, és a leírást valamilyen nemlokális elméletre alapozzák, legalább valamilyen gyengén nemlokális modellre; a karakterisztikus hossz egy ilyen elméletben is megjelenik, ám itt az elmélet belső logikája kényszeríti ki a karakterisztikus hossz bevezetését. A karakterisztikus hossz értékét mindkét megközelítés esetében a kísérletekkel történő összevetés alapján kell megállapítani. Ez az indoka annak, hogy a szekcióban figyelmet szenteltek a véges törésmechanika és a fázismező elméletek valamelyikén alapuló modellek összevetésének is. A szekciót D. Leguillon szervezte, aki a véges törésmechanika általa kidolgozott változatát – az előző részben ismertetett – plenáris előadásában ismertette. A szekcióban elhangzottak közül kiemelnénk a véges törésmechanika dinamikus repedésterjedésre kiterjesztett változatát ismertető prezentációt.

Környezeti hatások okozta repedések

A szekció minden olyan témát befogadott, amely a szerkezeti anyagok és a környezet közötti kölcsönhatások következményeként a szerkezeti anyagban fellépő

öregedési/károsodási jelenségeket érintett, így az előadások a következő kérdésekkel foglalkoztak: környezeti hatások okozta korrózió és repedezés, korrózióval gyorsított fáradás, súrlódás indukálta korrózió, valamint a különböző törési mechanizmusok. A 14 előadás egy része kísérleti munkákat ismertetett, másik része szimulációs modellek fejlesztésével és azok alkalmazásaival foglalkozott.

Betonszerkezetek szerkezetintegritási problémái: innovatív anyagok és megoldási stratégiák

A szekcióban a nagyméretű, elsősorban vasbetonból vagy feszített vasbetonból készített építészeti alkotások szerkezetintegritási problémáinak megoldása érdekében végzett kutatásokról és fejlesztésekről számoltak be az előadók. A tématerület fontosságára mutattak rá a G.A.Ferro plenáris előadásában [24] már ismertetett tények is – ld. az előző részt [1] –. A 13 prezentáció többek között olyan kérdésekkel foglalkozott, mint a betonalapú anyagok fáradása és törése; ezen anyagok mikro- és nanoszerkezete, a mikro- és a nanoszerkezet kísérleti feltérképezése, valamint elméleti- és szimulációs eszközökkel történő vizsgálata; betonalapú anyagok 3D nyomtatási technológiáinak fejlesztési irányai; betonszerkezetek állapotának monitorozása mély gépi tanulással, betonszerkezetek rehabilitációja.

Nagyméretű műszaki szerkezetek kockázatelemzése és biztonsági számításai

A szekció – a címén túlmenően – a klasszikus értelemben vett nagyméretű műszaki alkotások, úgymint hídszerkezetek, épületek, gátak, vasutak, földalatti építmények, szélérőmű és egyéb tornyok, tengerre épített olaj- és gázkitermelő infrastruktúrák, nagykapacitású távolsági csővezetékek, hajók, atomerőművek és repülőgépek élet-tartam- és biztonsági elemzéseinek témakörét némileg tágítva teret adott az autópárhazban felmerülő problémák, fejlesztések ismertetésének is. Az elhangzott 13 előadás túlnyomó többsége nagyméretű szerkezetek fáradásos igénybevétel – mint öregedési mechanizmus – figyelembevételével végzett maradék-élettartam elemzések eredményeit ismertette, de elhangzott néhány, a szerkezeti anyagok törésmechanikai viselkedésének jellemzésére végzett újabb kísérletet bemutató előadás is. A szekcióban ismertetett prezentációkat összefoglalóan értékelve egyfelől megállapítható, hogy azok a mai kor mérnöki ismeretei alapján végrehajtott, igen magas színvonalú, kísérleti munkákkal és numerikus szimulációkkal támogatott fejlesztések eredményeiről számoltak be. Másfelől a nagyméretű szerkezetek biztonsági elemzéseinek témakörére is igaz az a – plenáris előadásban C. Ruggieri szájából elhangzott, tényszerű – megállapítás, melyet magunk is osztunk, hogy „eddig még nincsen olyan elméleti leírás és arra épülő modellrendszer a kezünkben, amelynek segítségével képesek lennénk a mai számításoknál pontosabban megjósolni egy mérnöki szerkezet műszakilag megengedhető üzemidejét” [25].

Alacsony és magas hőmérsékleten üzemelő komponensek problémái

A szekcióba azokat az előadásokat sorolták, amelyek

témái még ideiglenesen sem választhatók el a termikus kölcsönhatásoktól. A 12 prezentáció közül egy foglalkozott korrózióálló ausztenites acélok nagyon alacsony ($T < -150\text{ }^{\circ}\text{C}$) hőmérsékleten mutatott képlékeny- és törési viselkedésének kérdésével. Egy előadás a műanyag alapú kompozitokban használt bizonyos ragasztók -40 és $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleti tartományban végzett termomechanikai fárasztóvizsgálatainak eredményeit ismertette. A többi előadás magas hőmérsékleten ($T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) üzemelő szerkezeti anyagok öregedési folyamatainak kérdéseivel foglalkozott, amelyek a termomechanikai fáradásos kísérleteken és azok szimulációval támogatott kiértékelésén túlmenően olyan elméleti problémákat érintettek, mint a repedés élén fellépő hajtóerő meghatározása kúszó közegben, üregerős károsodás időfejlődésének leírása a mátrix kúszás dominálta alakváltozása esetén, valamint repedés terjedésének leírása termomechanikai fárasztó-igénybevétellel terhelt, oldalbemetszéseket tartalmazó, illetve CTOD próbatestek esetén.

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek

A mérnöki szerkezetek, technológiák utóbbi évtizedekben elért egyik legátütőbb fejlesztési eredményének kétségkívül a kiberfizikai rendszerek tekinthetők. A kiberfizikai rendszerek olyan – mérnöki – rendszerek, amelyek fizikai és számítás-intenzív tevékenységre alkalmas informatikai komponensek szorosan csatolt, szinergisztikus együttműködésén alapulnak [26]. Az IT mára elért fejlettségi szintje lehetővé teszi, hogy egy fizikai rendszerről valós – vagy megközelítőleg valós – időben olyan mennyiségű és minőségű információt gyűjtsenek és dolgozzanak fel, melynek segítségével technológiai folyamatok a szükségleteknek megfelelően, gyorsan irányíthatók, vagy szerkezetek öregedési folyamatai követhetők. A kiberfizikai rendszerek modelljén alapuló technológiai megoldásokkal elérhetővé vált, hogy az egy-két évtizede csak speciális körülmények között alkalmazható különböző roncsolásmentes vizsgálati módszerek egy szerkezet gyártás utáni, majd működés közbeni állapotáról az igényeknek megfelelően folyamatosan információt gyűjtsenek, lehetővé téve pl. az adott berendezés gyártás utáni állapotának, majd üzem közben a szerkezeti egészségének/állapotának folyamatos követését, majd ezekre alapozva a karbantartások, javítások valóban igény szerinti megtervezését, végrehajtását stb. A szekcióban bemutatott 12 prezentáció azt bizonyította, hogy a roncsolásmentes vizsgálati eljárásokon alapuló, megfelelő IT kapacitásokkal ellátott rendszerek a legkülönbözőbb helyzetekben felhasználhatók új gyártmányok minőségének ellenőrzésére, szerkezetek „egészségi állapotának” követésére, valamint mérnöki szerkezetek maradék élettartamának meghatározására végzett szerkezetintegritási elemzések támogatására. Az előadások közül külön említésre méltónak tartjuk azt a munkát, amely kompozit szerkezet nagy sebességű terhelése hatásának ultrahangos (utó)vizsgálati eredményeinek felhasználásával, az ugyanazon folyamat numerikus modelljén végzett szimulációkkal határozta meg annak maradék élettartamát. Ugyancsak többek érdeklődését felkelte az az előadás, amely egy olyan üvegszál-optikára épített rendszert

fejlesztését mutatta be, amely nagyméretű betonszerkezet(ek) szerkezeti állapotának követésére alkalmas; a rendszert már mindennapi alkalmazásba vették.

Variációs módszerek a törésmechanikában

A variációs számítás az elméleti fizika páratlan hatékonyságú fegyvere szerkezetek stabilitási problémáinak, újabban pedig akár folyamatok elméleti modelljeinek és a modellek numerikus megoldásainak megalkotásában. A klasszikus variációs módszerek általánosításainak az optimalitási elvek tekinthetők [27]. A szekcióban prezentált 11 előadás közül egy foglalkozott fejlesztés alatt álló reaktoracél képlékeny károsodási és tönkremeneteli folyamatainak kisméretű lyukasztóvizsgálatok numerikus kiértékeléssel támogatott jellemzésével; a károsodási és tönkremeneteli folyamatok követésére a GTN anyagmodellt [10-13] használták. Egy további előadás a modern nemegyensúlyi termodinamika alapjaival kompatibilis variációs módszer alkalmazásával kidolgozott elméleti modellt ismertetett, melyet a fáradásos repedésterjedés modellezése során egy, a Paris-Erdogan szabályhoz [8] hasonló, de annál általánosabb anyagmodell kimunkálásában használt. A többi prezentáció a napjainkban a kutatók között egyre jobban ismertté váló, a fázismezők elméletén alapuló modelleket, illetve a modellek alkalmazásával végzett numerikus szimulációk eredményeit ismertette. A fázismezők elmélete az eredetileg a L. D. Landau által a másodrendű fázisátalakulások fenomenológiai leírására kidolgozott rendparaméterek elméletén alapul, amelyet később V. Ginzburg és L. D. Landau továbbfejlesztett, és először a szupravezetés leírására alkalmazott [28] 1950-ben. Ezt a modellt nevezik Ginzburg-Landau elméletnek. A Ginzburg-Landau elmélet lényege az, hogy a felírják a rendszer szabadenergia-funkcionálját a fizikai mezők és egyéb, az aktuális problémától függő paraméterek – és eloszlásaik – függvényében, ahol a problémafüggő paramétereket fázismezőknek nevezik (ezeket Landau eredetileg rendparamétereknek nevezte). A rendszerről azt feltételezik, hogy az az idő függvényében a szabadenergia-funkcionál extrémálisai által meghatározott pályán fog fejlődni. A modell extrémálisait leíró egyenleteket a variációs számítás módszereivel határozzák meg; ezeket az egyenleteket nevezik Ginzburg-Landau egyenleteknek. A Ginzburg-Landau modell nagyon általános elméleti keretet biztosít különféle jelenségek modelljeinek megalkotására: megfelelő fázismezők bevezetésével előszeretettel használják pl. az olvadás és a megszilárdulás folyamatainak leírására [29], mert a fázisátmenetek/fázisátalakulások során kialakuló mezo- és mikrostruktúrák jellemzésére, és azok időfejlődésének leírására is használható (ld. pl. Tóth Gyula, Pusztai, Tamás és Gránásy László 2015-ben megjelent publikációját [30]). Manapság a fázismezők elméletét egyre szélesebb körben alkalmazzák többszörös modellek koncepciójának kimunkálása során. Bár a Ginzburg-Landau teória nagyon mély alapokon nyugvó fizikai elmélet, a termodinamikával való kapcsolata még laza; ugyanakkor a rá épített fázismezők modellek megfelelő típusú mezők választásával termodinamikailag konzisztenssé tehetők, ami a rájuk épülő a jövőbeli alkalmazások

szempontjából kulcsfontosságú. A fázismezőkön alapuló modellek egy-két évtizede jelentek meg a törésmechanikai kutatásokban – ld. pl. [31-33] –. A fázismező modellek és a törésmechanika alapjául szolgáló Griffith-féle modell alapjait összehasonlítva megállapítható, hogy azok egy töről fakadnak: mindkettő energetikai megfontolásokon alapul, azonban az először 1950-ben publikált [28], és azóta sokak által továbbfejlesztett Ginzburg-Landau elmélet mai állapotában mind alapjait, mind matematikai eszköztárát tekintve sokkal kifinomultabb, mint a Griffith modellben használt megfontolások és eszközök. Ezért talán a szakirodalom részletes ismertetése nélkül sem túlzás azt állítani, hogy elvileg a fázismező elméleteket felhasználva is kidolgozható a törésmechanika olyan modellje – vagy olyan törésmechanikai modellek –, amely(ek) egy anyag mikroszerkezetét, a mikroszerkezet fejlődését és a repedések kölcsönhatásait képes(ek) egységes, termodinamikailag is konzisztens elméleti keretben leírni. A szakirodalomból azonban az is jól kirajzolódik, hogy a különféle fázismezőkre épített modellek akkora elméleti apparátust mozgatnak és akkora számítási erőforrás-igénnyel bírnak, hogy rövid- és középtávon jórészt csak a kutatásokban fogják felhasználni azokat. Ám a mélyebb elméleti megalapozással bíró elméleti és numerikus modellek ígéretes eszköznek tűnnek az ipari alkalmazásokban használható, egyszerűsített modellek fejlesztési munkái során.

Fejlett kerámiák és azok törési tulajdonságai

A szekció az ipar, az űrtechnológia és az orvoslás-gyógyászat igényeinek megfelelni kívánó, az egyes alkalmazási területek mai átlagos igényeit túlszárnyaló, ún. fejlett kerámiák előállítására érdekében végzett fejlesztési munkákba is betekintést engedett. A hét prezentáció többsége a klasszikus kutatási módszertan szerint végzett – kísérleteken alapuló, majd azok eredményeit már többnyire szimulációval kiértékelő – fejlesztési munkák eredményeiről számolt be. Az elhangzott előadások közül külön említésre méltó Raul Bermejo előadása, amely a hibátűrő kerámiák fejlesztésében elért kutatási eredményekről számolt be [34]. A kerámiák más, megfelelően szívós anyagokkal történő kombinációja ugyanis kivételes műszaki képességekkel rendelkező hibrid rendszerek előállítását teszi lehetővé. Ma a kerámia-alapú komponensek felhasználhatóságát nagymértékben csökkentik, hogy a kerámia rideg volta miatt abban egy repedés terjedése gyakorlatilag megállíthatatlan. Ugyanakkor – az előadó által bioinspiráltnak nevezett koncepció alkalmazásával – megvalósíthatónak tűnik, hogy a jövő alkalmazásai-ba a jelenleginél kevésbé törékeny, azaz hibátűrő kerámia alapú anyagokat építhessenek be. Ha egy alkotórészt több rétegből építenek föl, úgy, hogy a rideg, de szilárd rétegek közé megfelelő védőrétegeket ágyaznak, akkor ez nagymértékben növelheti a komponens „szívósságát”, és a szilárdsága sem csökken. Ha sikerül elérni, hogy a kerámia-rétegek közé ágyazott rétegekben a maradékszültségek egy előírt tartományba essenek, akkor ezek képesek lehetnek a felületi hibákból kiinduló repedések terjedését lefékezni, meggátolni, biztosítva a konstrukció hibátűrő voltát. Közbevetőleg jegyezzük meg, hogy hasonló

alapelven alapuló konstrukció alkalmazásával érték el az autóiparban, hogy az autók színre fényezett műanyag lökhárító-elemei kisebb koccanásokat az elem javíthatatlan tönkremenetele nélkül elviseljenek. Kezdetben – az 1980-as évtizedben – ugyanis a műanyag lökhárítók olyan alapanyagokból készültek, amelyek képtelenek voltak a rideg fedőfényezésből kiinduló repedéseket megállítani, így azok a legkisebb koccanások hatására is elhasadtak.

Polimerbázisú szerkezeti anyagok törésének vizsgálata újszerű módszerekkel

A szekcióban az érdeklődők összesen hét prezentációt hallhattak és vitathattak meg. Ezek egyik része kifejezetten a repülőgépiparban alkalmazott, a tervezési munkákat – ideértve a méretezési és a tervezési élettartam bizonyítására használt tervezői biztonsági számításokat is – támogató, szabványos anyagvizsgálati módszereket felülvizsgáló kísérletek eredményeit ismertette. A kutatások célkitűzése szerint a nagyobb, részletgazdagabb információhalmaznak a jövőben felhasználhatónak kell lennie a repülőgépipar komponensek tervezési és szerkezeti integritási elemzéseiben, és segítségével el kell érni az elemzések megbízhatóságának növekedését. Az eredmények azt mutatják, hogy a ma használt szabványos – a klasszikus anyagvizsgálati módszereire alapozott, alapvetően a vizsgált mintadarab makroszkopikus jellemzőinek meghatározására szolgáló és a kísérletekről igen korlátozott mennyiségű információt gyűjtő – mérési eljárások nem szolgáltatnak olyan adatokat, melyek alapján a szerkezetek várható élettartama kellő időben az elvárt megbízhatósággal megjósolható lenne. Ugyanakkor a klasszikus vizsgálatokat megfelelő – ma hozzáférhető – roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal párhuzamosan követve, azokból olyan – finomabb hosszúságkálákról tudósító – információk nyerhetők ki, amelyek követhetővé teszik a mérések során a mezo- és mikroskálán lezajló folyamatokat is. Az ezen információkat megfelelően felhasználni képes elméleti modellekre alapozott szerkezetintegritási elemzések megbízhatósága minden várakozás szerint növekedni fog. Az előadások másik, jelentős része a fázismezők elméletén alapuló modellek polimerek, illetve általában a szerkezeti anyagok károsodásának és törésének vizsgálatába történő bevonását megcélzó kutatás-fejlesztési munkákról számolt be. A fázismezőkön alapuló elméleti apparátus és a törésmechanika kapcsolatát néhány mondatban vázoltuk a „Variációs módszerek a törésmechanikában” szekcióban elhangzottak ismertetése során. A szekcióban bemutatott prezentációk egyike üvegszál-erősítésű kompozitok károsodási és törési viselkedésének követésére alkalmas, többskálás modell fejlesztésének eredményiről számolt be [35]. A modell újdonsága, hogy a makroszkopikus törésmechanikai modellt a fázismezők bevezetésével termodinamikailag konzisztenssé és az anyagi anizotropia figyelembevételére alkalmassá tették. Egy másik, figyelemreméltó előadás olyan kutatások eredményeit mutatta be, amelyben polimetil-akrilát törési vizsgálatait egy termodinamikailag konzisztens, a ridegtörés leírására adaptált fázismező modellel követték. A prezentációban ismertetett modellek újszerűségéhez nem férhet kétség;

azok ma akadémiai kutatások tárgyát képezik. A fázismező modellek kétségkívül nagymértékben hozzájárulhatnak a törésmechanika mélyebb megértéséhez, azonban szélesebb körben történő elterjesztésükhöz további intenzív kutatási és fejlesztési munkákra van szükség. Ipari problémákra történő alkalmazásukkal kapcsolatban továbbra is érvényesnek tartjuk a „Variációs módszerek a törésmechanikában” szekció bemutatása végén írtakat.

A törés és a károsodás jelenségeinek tárgyalása a mérnöki munkában

A szekcióban elsősorban olyan előadások hangzottak el, amelyekben a törési és károsodási folyamatokat tágabb környezetükbe ágyazva tárgyalják, legyen szó akár gyártástechnológiai folyamatok gyártási paramétereinek meghatározásáról, akár nagyméretű nyomástartó rendszerek állapotának szerkezetintegritási elemzésekkel történő követéséről. A prezentációk közül érdekes volt hallgatni azt, amelyik bemutatta, hogyan használják fel a kritikus távolságok elméletét 3D nyomtatási eljárással készített beton próbatestek anyagvizsgálatainak kiértékelése során, figyelembe véve azok inhomogén szerkezetét és a bennük a készítés során létrejövő repedéseket is. Egy másik előadás témája folyamatos üzemű megleghengerléses technológia paraméterei és az alakítást elszenvedő gyártmány anyagának károsodási állapota közötti kapcsolat feltérképezése volt. Érdekes prezentáció mutatta be, miként hatnak a fogaskerekű pitting (felületi kipattogzás) folyamatok dominálta károsodási folyamataira a tervezés során meghatározott tribológiai paraméterek, a gyártási technológia és az alkalmazott kenőanyagok. Ebben a szekcióban kapott helyet a szerző „Structural Integrity Calculations for Ageing Large Scale Systems” című előadása [36]. A prezentáció az Energiatudományi Kutatóközpontban a nagyméretű nyomástartó berendezések – elsősorban VVER, illetve PWR típusú atomerőművek primerkörei, illetve primerköri nagyberendezései – szerkezetintegritási elemzési módszertanának továbbfejlesztésére a szerző által irányított és végzett kutatások jelenlegi állását foglalta össze. A kutatásokat azzal a céllal indítottuk, hogy: (1) jobban megértsük a mérnöki szerkezetekben végbemenő öregedési folyamatokat, és (2) közép- és hosszú időtávon a szerkezetintegritási számítások olyan módszertanát dolgozzuk ki, amely koherensebb elméleti megalapozottsággal rendelkezik, mint a jelenlegi nemzetközi jó gyakorlatban alkalmazott különféle biztonsági elemzési módszerek. Az eddigi munka során egységes koncepcióban – az életciklus paradigmába – foglaltuk a tervezői biztonsági számításokat és a szerkezetintegritási elemzéseket, előrejutottunk a szerkezetintegritás legfontosabbnak tartott alapelvei megfogalmazásában, valamint olyan fizikai elméletet kerestünk, amely alkalmasnak látszik a szerkezetintegritási elemzések feladatainak helyes megfogalmazására és a feladatok megoldására. Elméleti keretrendszernek a modern termodinamikát választottuk, mert a termodinamikában gyökerező elméleti modellek nemcsak formai szempontból kompatibilisek a termodinamikával, hanem a modellek működése is minden valószínűség szerint termodinamikailag konzisztens lesz. Ez

nagyon fontos szempont az elméleti keretrendszer megválasztása során, ugyanis a valós rendszerek viselkedése irreverzibilis; nem mindegy tehát, hogy az elmélet pusztán formálisan elégíti ki a termodinamikai konzisztencia követelményeit, vagy az elméletből lezárt modellek tényleg a termodinamika törvényeinek megfelelő megoldásokhoz vezetnek-e. A termodinamika választása mellett szól az a megfontolás is, hogy a fázismező elméletek és modellek alapjául szolgáló Ginzburg-Landau egyenletek a klasszikus elméleti megalapozástól függetlenül, termodinamikai úton, a termodinamika második főtételéből ugyancsak lezártathatók (ld. pl. [37, 38]). Úgy tűnik, hogy az előadásban ismertetett modell ígéretes szerkezeti anyagok öregedési folyamatainak makroszkopikus szintű jellemzésére, és kiinduló pontja lehet a többszálás modellek fejlesztésére vonatkozó, további kutatásoknak is.

3. Összefoglalás

Az ECF23 konferenciát az ESIS – normális körülmények között – minden második évben megszervezett konferenciáinak sorozatában kivételesen nem a 2018-ban tartott ECF22-t követő második, hanem – a 2020 elején kitört Covid-járvány miatt – az ECF22 utáni negyedik évben tartották, Madeira fővárosában, Funchalban. Jelmondata a „Fracture Mechanics and Structural Integrity” címet viselte. A konferencia-program keretében 12 meghívott plenáris előadást, továbbá a 20 tematikus szekcióban mintegy 500 előadást hirdettek meg. A poszter-szekcióban 62 posztert mutattak be. A plenáris előadásokat hét, manapság szakmai szempontból jelentősnek tekintett témakörből válogatták: (1) polimer kompozitok; (2) additív gyártástechnológiával készített fémes szerkezeti anyagok; (3) ridegtörés; (4) fáradásos öregedés; (5) biomechanikai kérdések; (6) hidrogén okozta elridegedés; (7) feszített vasbeton hidak szerkezetintegritási kérdései. Az előadók az egyes témakörök nemzetközileg nagy reputációval rendelkező kutatói voltak.

Az esemény legtöbb előadást számláló szekciói a fáradással, az additív gyártástechnológiával készített alkatrészek szerkezetintegritási kérdéseivel, a hidrogén okozta elridegedéssel, a statikus és kvázistatikus terhelések hatásait elemző vizsgálatok bemutatásával, a numerikus módszerek fejlesztési kérdéseivel, a mikromechanikai modellek és a mikromechanizmusok kutatási problémáival, hegesztett kötések szerkezetintegritási kérdéseivel és a kompozit anyagok témájával foglalkoztak. Külön szekciót szenteltek a biológiai anyagok és a medicinában használatos anyagok szerkezetintegritási kérdéseinek. A manapság legnépszerűbb témák mellett jelen voltak olyan témakörök is, amelyek a jövőben vélhetően felértékelődnek, mint például a törésmechanika variációs módszereken alapuló tárgyalása és az azon alapuló modellek bevonása a mérnöki munkába, a roncsolásmentes vizsgálati módszerek bevonása a roncsolásos anyagvizsgálatok követésébe és az online állapotfelügyeletbe stb. A szervezők professzionális háttérrel segítették az esemény gördülékeny lebonyolítását. Összefoglalva elmondhatjuk,

hogya konferencia magas színvonalú, jelentős esemény volt az ESIS életében; a Covid-járvány utáni újrakezdés első nagy eseménye.

Fekete Tamás

Irodalom

- [1] Fekete, T., 2022. Beszámoló az ECF23 Konferenciáról – I. rész, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2022/III 36–43.
- [2] Rankine, W.J.M., 1842. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles, and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. *Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings*, 2 105–108.
- [3] Morin, A., 1853. *Leçons de mécanique pratique – résistance des matériaux*. Paris, Librairie de L. Hachette et Cie, 456–460.
- [4] Braithwaite, F., 1854. On the fatigue and consequent fracture of metals. *Institution of Civil Engineers, Minutes of Proceedings*, 13 463–474.
- [5] Wöhler, A., 1870. Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl, *Zeitschrift für Bauwesen*, 20 73–106.
- [6] Palmgren, A.G., 1924, Die Lebensdauer von Kugellagern. *VDI Zeitschrift*, 68 14 339–341.
- [7] Miner, M.A., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, 67 159–164.
- [8] Paris, P. C., Erdogan, F., 1963. A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, 85 4 528–533. doi:10.1115/1.3656900
- [9] Zhang, Z., 2022. Void-based predictive framework for hydrogen embrittlement, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [10] Gurson, A. L., 1977. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth. Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous, Ductile Materials, *Journal of Engineering Materials and Technology* 99 2-15.
- [11] Tvergaard, V., 1981. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions, *International Journal of Fracture* 17 4 389-407.
- [12] Tvergaard, V., Needleman, A., 1984. Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar, *Acta Metallurgica et Materialia* 32 1 157-169.
- [13] Tvergaard, V., Needleman, A., 2006. Three Dimensional Microstructural Effects on Plane Strain Ductile Crack Growth, *International Journal of Solids and Structures* 43 6165-6179.
- [14] Steinmann, P., 2022. Spatial and Material Forces in Nonlinear Continuum Mechanics. A Dissipation-Consistent Approach. In: *Solid Mechanics and Its Applications* 272. Springer Nature, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89070-4>
- [15] Fekete, T., Antók, D., Tatár, L. és Bereczki, P., 2022. Extending Reliability of FEM simulations, based on Optically Assisted Tensile Tests – a Digital Twin, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [16] Chahboub, Y., Szávai, Sz., 2022. Damage prediction of ferritic pipeline using Artificial Neural Network, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [17] Silberschmidt, V.V., 2022. Mechanical behaviour of biomedical materials, presentation, ECF23 Conference, Funchal.
- [18] Arnold, V.I., 1984. *Catastrophe Theory*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- [19] Gilmore, R., 1993. *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*. Dover Publications, Inc., New York
- [20] Stewart, I., 1981. Applications of catastrophe theory to the physical sciences, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2 2 245–305.
- [21] Thom, R., 1975. *Structural Stability and Morphogenesis, An Outline for a General Theory of Models*. W. A. Benjamin Inc, Reding, MA.
- [22] Spivakovsky, M., 2020. Resolution of Singularities: an Introduction, In: Molina J.L.C., Lê, D.T., Seade, J. (Eds.). *Handbook of Geometry and Topology of Singularities I*, Springer Cham, 183–242
- [23] Kollár J., 2007. *Lectures on Resolution of Singularities*, Volume 166 in the series *Annals of Mathematics Studies*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [24] Ferro, G. A., 2022. Structural Integrity of prestressed bridges, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [25] Ruggieri, C., 2022. Revisiting Cleavage Fracture Modeling in Steels: From the Griffith Assumption to the Beremin Model, and Beyond, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [26] NSF Program: Cyber-Physical Systems (2021), <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.pdf> (2021. 12. 09.)
- [27] Fradkov, A. L.: Application of cybernetic methods in physics. *Physics–Uspekhi*, 48:2 (2005) 103–127.
- [28] Landau, L.D., Ginzburg, V.L., 1950. A szupravezetés elméletéről, *Zsurnal Ekszperimentalnoj i Teoreticeszkj Fiziki* 20 1064–1066. (orosz nyelven)
- [29] Boettinger, W. J.; Warren, J. A.; Beckermann, C.; Karma, A., 2002. Phase-Field Simulation of Solidification, *Annual Review of Materials Research*. 32 163–194. doi:10.1146/annurev.matsci.32.101901.155803.
- [30] Tóth, Gy., Pusztai, T., Gránágy, L., 2015. Consistent multiphase-field theory for interface driven multidomain dynamics, *Phys. Rev. B*, 92 18 184105 <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.184105>
- [31] Bourdin, B., Francfort, G.A., Marigo, J.J., 2000. Numerical experiments in revisited brittle fracture, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48 4 797–826. doi:10.1016/S0022-5096(99)00028-9
- [32] Bourdin, B., Francfort, G.A.; Marigo, J.J., 2008. The Variational Approach to Fracture *Journal of Elasticity* 91 1–3 5–148. doi:10.1007/s10659-007-9107-3
- [33] Karma, A., Kessler, D., Levine, H., 2001. Phase-Field Model of Mode III Dynamic Fracture, *Physical Review Letters* 87 4 045501. [arXiv:cond-mat/0105034](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0105034)
- [34] Bermejo, R., 2022. Exploring new concepts to design “damage tolerant” ceramics using additive manufacturing, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [35] Lacave, A.M.F., Welschinger, F., De Lorenzis, L., 2022. Multiscale phase-field modeling of fracture in short glass fiber reinforced polymers, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [36] Fekete, T., 2022. Structural Integrity Calculations for Ageing Large Scale Systems, presentation, ECF23 Conference, Funchal
- [37] Ván P., 2002. Weakly nonlocal irreversible thermodynamics – the Ginzburg-Landau equation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 2:104–110.
- [38] Ván P., 2005. The Ginzburg-Landau equation as a consequence of the Second Law. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* doi:10.1007/s00161-004-0195-z