

SZERKEZETINTEGRITÁSI KUTATÁSOK AZ INNOVATÍV ANYAG-TECHNOLÓGIÁK TUDOMÁNYOS MŰHELYBEN

Koncsik Zsuzsanna

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsuzsanna.koncsik@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt, 4.1. Innovatív anyagtechnológiák tudományos műhely szerkezetintegritási témakörű kutatási irányait, legérdekesebb eredményeit foglalja össze a publikáció. A témakör komplexitásának megfelelően a kutatómunkákban több anyag típus, többféle vizsgálati módszer jelenik meg. Az integritás szellemiségének megfelelően a globális elemzés és gondolkodás szükségességére világít rá a cikk. A publikáció célja a témában végzett szerteágazó kutatási irányokról, azok eredményeiről rövid összefoglaló nyújtása, a részletes kutatási eredményeket tartalmazó források megjelölésével.

Kulcsszavak: szerkezetintegritás, károsodáselemzés, anyagvizsgálat

Abstract

The present paper summarizes the structural integrity-based research directions and most interesting results of the Scientific Workshop of Innovative Materials Technologies, Nr. 4.1. of EFOP-3.6.1-16-2016-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” project. According to the complexity of the topic, several different material grades and different testing methods appear in the research works. According to the integrity-mind the paper highlights the necessity of global analysis and thinking. The aim of this paper is to give short summary about the broad range of research directions and their results, tagging the concerning reference within the topic of the Scientific Workshop.

Keywords: structural integrity, damage analyses, materials testing

1. Bevezetés

Napjainkban az ipari és tudományos életben egyaránt ismert tény, hogy a mérnöki szerkezetek integritásának elemzése egy átfogó feladat. A fogalom tartalma – az üzemeltetésre való alkalmasság az élet-tartam bármely pillanatában – is már következtetni enged annak komplexitására [1], [2], [3]. Megismerve jelentése mélységeit a specialista már azt is sejti, hogy a szerkezetintegritási ismeretanyagot nem elegendő megtanulni, azt a gyakorlatban tapasztalni szükséges ahhoz, hogy az egyes problémákat valaki globálisan átlássa, és közben fókuszálni tudjon egy-egy tényezőre, akár iterációval. A szerkezetek integritása iránti igény mind az oktatás, különösen a felsőoktatás, mind a kutatások területén megjelenik, a hazai és nemzetközi területeken egyaránt [1].

Egy szerkezet integritásának megítéléséhez számos tényező ismerete szükséges. Ismernünk kell a beépített szerkezeti anyagok kiinduló állapotát, a gyártás (gyártási technológia, összeszerelés maradó feszültségei), és az üzemeltetés során kialakuló terheléseket (üzemszerű, ismétlődő és havária jelleggel

fellépő terhelési körülmények), ha az adott szerkezet tönkrement, úgy a károsodás folyamatát és mértékét, továbbá az üzemelő szerkezet állapotát, roncsolásmentes eljárásokkal feltérképezve [1].

Összességében elmondható, hogy a szerkezeti integritás a mechanikai igénybevétel elemzésének, az igénybevétel modellezésének és az anyagtudománynak (beleértve az anyagszerkezetant és az anyagvizsgálatot) együttműködését igényli. Ezek közül bármelyik terület elhanyagolása, relatív súlyának csökkentése hibás döntéshez vezethet. Míg a specialista átlátja az egész rendszert, annak feltétlenül szükséges elemeivel, addig a megvalósításban résztvevők csak egy-egy feladatra koncentrálnak, ami nekik úgy a maga valójában szintén teljes és kerek [4], [5].

Az Innovatív Anyagtechnológiák Tudományos Műhely szerkezetintegritás területével foglalkozó kutatásai több tématerületet érintenek. Csoportosíthatók a vizsgált anyagminőségek alapján: fémes és nemfémes anyagminőségekkel foglalkozó kutatásokként. Csoportosíthatók az egyes kutatásokban alkalmazott vizsgálat típusok alapján: a vizsgálat időbelisége alapján: statikus, dinamikus vagy ismétlődő; a szerkezet vizsgálat közbeni roncsolódása alapján: roncsolásos vagy roncsolásmentes. Továbbá csoportosíthatók témájukat tekintve: károsodáselemzéssel és/vagy károsodások megelőzésével foglalkozó kutatásokként. Ezekon a megközelítéseken kívül van a Tudományos Műhelyen belül egy további kutatási irány, amely minden előbb említett csoportosítási módot és azok eredményét magában foglalja: Sőt azok szervezéséhez, időbeliségéhez is támpontot ad, mintegy felülről összefogva a különböző anyagminőségeket, a vizsgálati módszereket és a vizsgálati célokat, az integritás szemlélet, amelynek elemzése a Tudományos Műhely feladata volt.

A cikk további részében ezekről a kutatási irányokról adok rövid áttekintést, a rendszer legkisebb elemeitől haladva, a komplex kutatási irányig.

2. Kutatási tevékenységek

2.1. Károsodások elemzése

A károsodások elemzése témakörben már meglévő ipari alkalmazásokban fellépő károsodások elemzésével, illetve ipari alkalmazásra szánt anyagminőségek terhelhetőségének, alkalmazhatóságának vizsgálatára egyaránt találunk példát, mind a fémes, mind a nemfémes anyagok területén.

A [6] kutatómunka célja egy alkohol-lepárló berendezés üstjének üzemelés közben történt károsodásának vizsgálata. A kutatás megállapította, hogy ausztenites korrózióálló acélok esetében a korróziós repedések legkárosabb formái azok, amik kloridos vagy maró hatású közegben, nagy hőmérsékleten vagy nagy nyomás alatt, vizes környezetben alakulnak ki. Az optikai mikroszkópos vizsgálatok megállapították, hogy szerteágazó, transzkrisztallin repedések találhatók, amely károsodási forma a feszültségkorróziós repedésre jellemző, lásd 1. ábra.

Egy további kutatás [7], [8] alumínium csomagolóanyagokat gyártó cég által alkalmazott hidegalakító szerszámok károsodásának elemzésével foglalkozik. A vizsgálat kiterjed a szerszám jellemző igénybevételeire, lehetséges károsodására, az igénybevétel és a károsodás kapcsolatára, valamint a károsodás lehetséges okaira. Bár a vizsgálat alapvetően a nem üzemszerű működést állapította meg a károsodás egyértelmű okának, a kutatómunka rávilágított arra, hogy az integritás megőrzéséhez nem elegendő csupán egyedi káresetek vizsgálata.

Egy szerkezeti elem/szerkezet teljes élettartamának monitorozásával, megfelelő dokumentálásával tartható csak fenn az integritás, amely egy folyton iteráló információ és adatáramlást kell jelentsen a tervező-gyártó-felhasználó-karbantartó rendszerben.

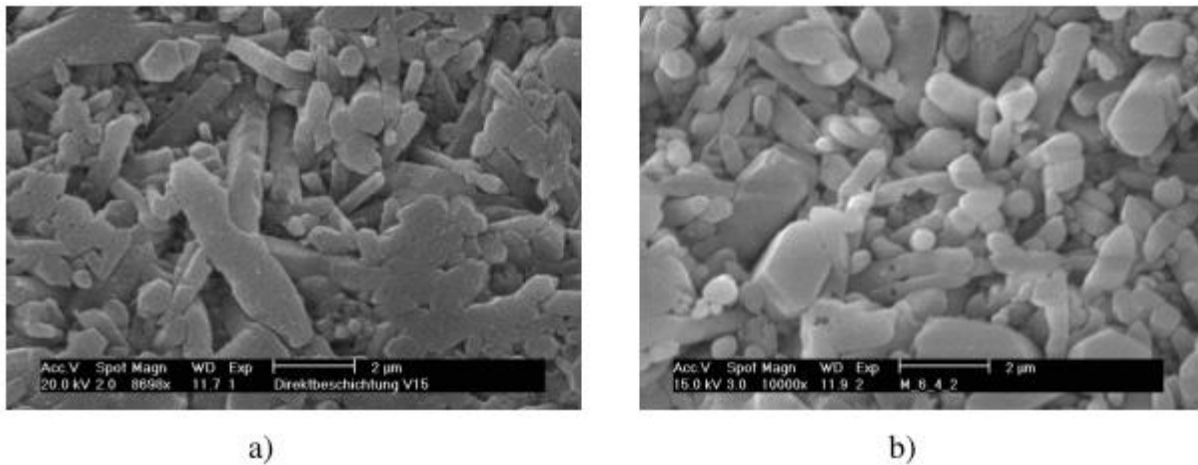


1. ábra. Transzkrisztallin repedés ausztenites acél tartályban. Marószers: királyvíz, $N=200x$.

2.2. Alkalmazhatósági, üzemeltetési jellemzők meghatározása

Különösen érvényes az előző fejezet záró gondolata olyan szerkezetek esetén, amelyek jelenleg még nem üzemelnek, de tesztelés alatt van, hogy milyen üzemelési körülmények között, milyen élettartam lesz várható. Mindez a pontos dokumentációs igény fokozódik, ha a vizsgálat típusa is *zárt rendszer* jellegű. Igaz ez például a kopásvizsgálatokra, ahol a koptatási rendszer egyetlen elemének megváltoztatása a teljes rendszer jellemzőinek és viselkedésének változását idézheti elő. A kopásvizsgálatok kifejezetten élettartamra vonatkozóan adnak információt az adott szerkezetéről, annak is felületéről, amennyiben a felületet mechanikai igénybevétel hatására jelentkező anyagleválás jellemezheti. A kopásnak leginkább ellenálló anyagok a nagy teljesítőképességű high-tech műszaki kerámiák, ennek köszönhetően széleskörűen alkalmazhatók kopásnak kitett gépipari alkatrészekként. Számos területen nemcsak a fémek helyettesítésére, de azokat felülmúló tulajdonságok biztosítására is alkalmasak. Alkalmazásuk során sokféle környezeti- (hőmérséklet, páratartalom) és terhelési tényező (ciklusszám, terhelőerő) szerepet játszik a kialakuló kopás-formák megjelenésében. A [9] számú szakirodalom Si_3N_4 kerámiák kopási viselkedését vizsgálta különböző páratartalmak esetén. A vizsgálatok fretting-módszerrel történtek szobahőmérsékleten, 10 N terhelőerővel, 3, 50 és 99,5% relatív páratartalmú levegőn. A vizsgálatok során egyértelműen kimutatható volt a páratartalom hatása a szilícium-nitrid alapú kerámiák kopására, ami a tribokémiai kopás sajátosságaival magyarázható. Egy további vizsgálati irány [10] pedig a terhelési tényezők hatásával foglalkozik. Ennek kimutatására a mérések fretting-módszerrel történtek szobahőmérsékleten, 50% relatív páratartalmú levegőn 2 és 5 N terhelőerővel, valamint 30.000 és 50.000 ciklusszám mellett. A vizsgálatok során egyértelműen kimutatható volt a terhelőerő és a vizsgálat hosszának hatása a szilícium-nitrid alapú kerámiák kopási viselkedésére.

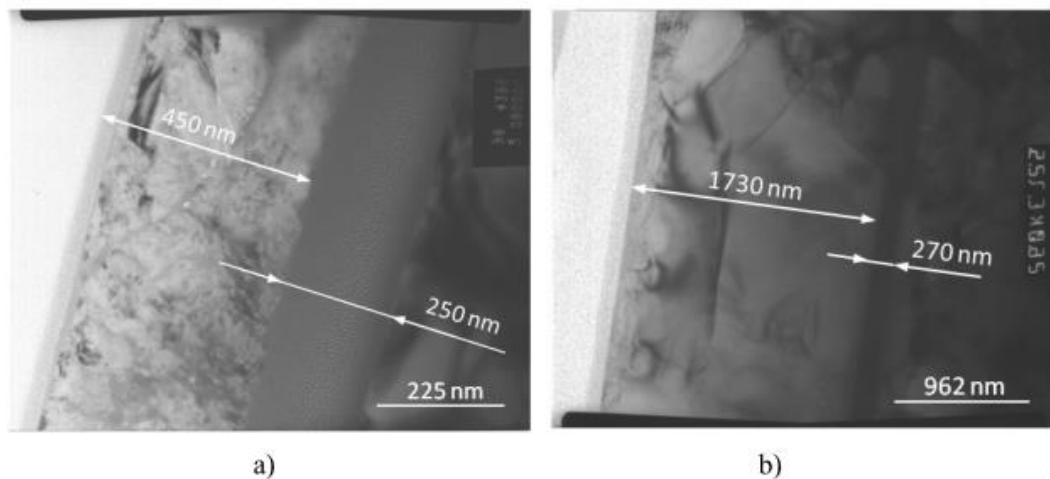
Nemcsak a külső környezeti tényezők szerepelhetnek a kopási vizsgálat során, mint rendszer-elemek, hanem a vizsgálati anyagminőség kismértékű változása, utó-hőkezelése [11] vagy ion-implantálása [12] is befolyásolhatja a kopási rendszer viselkedését. Az utó-hőkezelési kísérletek során a kerámia alapanyag hőkezelése 800, 1000, 1200 és 1400 °C-on történt, a kopási együttható "fretting" típusú kopásvizsgálattal került meghatározásra. A kísérletek alapján megállapítást nyert, hogy az anyag szerkezetében a szinterelés utáni hőkezelés a szemcsék finomodását okozta, lásd 2. ábra, és található egy olyan optimális hőmérséklet, ahol a szerkezeti átalakulások még kedvezőek a tribológiai tulajdonságok szempontjából.



2. ábra. Szemcsefinomodás a hőkezelés hatására, a) Kezeletlen és b) 1400 °C-on hőkezelt SiAlON minták SEM töretfelvételei [11].

A vizsgálat bizonyította, hogy a 800 °C-on hőkezelt SiAlON minták kopása csökkent, míg a magasabb hőmérsékleten kezelt próbatestek olyan anyagszerkezeti változásokon mentek keresztül, hogy az hátrányosan hatott a szilárdsági tulajdonságokra, vele együtt a tribológiai viselkedésükre is [11].

A másik felületmódosító eljárás, amelyet műszaki kerámiák esetében hatékonyan alkalmaznak az ion-implantáció [12]. Ebben az esetben a Si_3N_4 alapú kerámia tribológiai tulajdonságok javítására, a felületi réteg nanoméretű anyagszerkezeti változtatásával a nagy energiájú ion-implantációjával került sor. A kísérlet sorozatban kétféle ionnal, C^+ és N^+ -nal történt az implantáció, 0,5; 1 és 2 MeV energiával, $9,9 \cdot 10^{17} \text{ion/cm}^2$ energiasűrűséggel. A kezelt anyagon számos vizsgálat történt, összefüggéseket keresve a mechanikai-, illetve a kopási tulajdonságok és az anyag mikroszerkezeti sajátosságai között. Anyagszerkezeti vizsgálatok igazolták, hogy az ion-implantáció hatására a kerámia felülete alatt az energiától és iontól függően bizonyos mélységben amorf réteg keletkezik, lásd 3. ábra.



3. ábra. Az amorf réteg kimutatása TEM felvételek segítségével; a) 0,5 MeV N^+ ionnal implantált és b) 2 MeV C^+ ionnal implantált Si_3N_4 alapú kerámia [12].

Az implantált Si_3N_4 alapú kerámia szilárdsági-, kopási- és súrlódási tulajdonságai között egyértelmű összefüggés mutatható ki. A 0,5 MeV energiával történő implantáció mindkét ion esetén előnyösen befolyásolta a kezelt anyag tribológiai tulajdonságait.

Nemcsak az alapanyag kutatása kapcsolódhat egy adott szerkezeti elem alkalmazhatósági kritériumainak meghatározásához, hanem ide tartozhat egy gyártástechnológia elemzése, annak kutatása is. Napjainkban a különböző ipari technológiai folyamatok minél hatékonyabb kivitelezése a cél, természetesen a megbízhatóság megtartása mellett. A hőkezelési technológiák tekintetében a legnagyobb hatékonyságot az indukciós hevítési technológia alkalmazásával lehet elérni. A technológia sajátosságából adódóan azonban a klasszikus hőkezelési idő-diagram görbék itt nem állnak rendelkezésre, habár az anyag szerkezetében lejátszódó folyamatok megismerése, megértése és irányítása érdekében ezekre nagy szükség volna. A [13] szakirodalom egy fogazott tengely indukciós hevítése során fellépő hőmérsékletek hőkamerás méréséről tartalmaz információt, azzal a céllal, hogy meghatározható legyen a hőkezelés hatása az anyag szövetszerkezetére.

Ezek a kísérleti kutatások és azok eredményei mind az anyagtervező, mind a szerkezet tervező mérnök számára információval bírnak, valamint a vizsgálat szerkezet/szerkezeti elem alkalmazása esetén kontroll méréshez is összehasonlítható adatként szolgálhatnak.

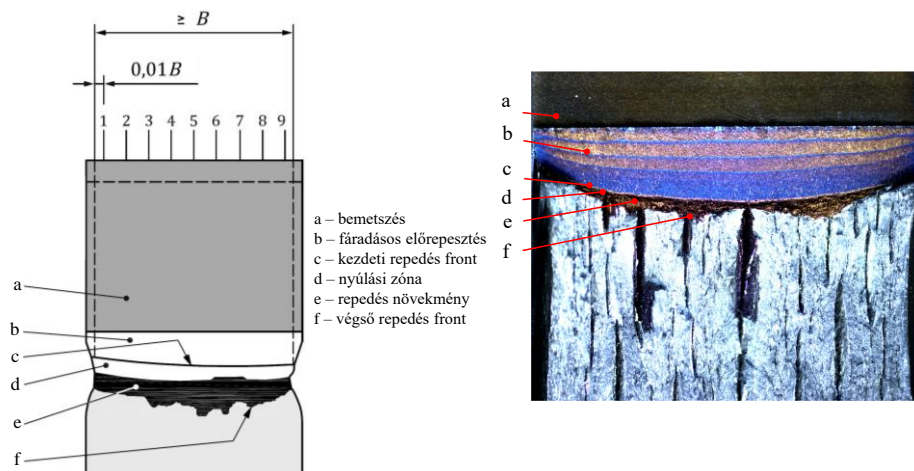
2.3. Károsodások megelőzése, élettartam növelés

Talán az egyik legnagyobb tématerület a szerkezetek integritásának vizsgálata kapcsán a már üzemelő szerkezetek még hátralévő élettartamának becslése, a véletlenszerűen bekövetkező károsodások megelőzése és/vagy előrejelzése, illetve a maradék élettartam növelése. Ehhez a területhez ugyanúgy tartoznak különböző vizsgálati eljárások, azok számítógépes modellezése, illetve az élettartam növelésére irányuló technikák, technológiák alkotása és természetesen azok megbízhatóságának, alkalmazhatóságának vizsgálata.

A jelenleg üzemelő szerkezeteink nagy hányada úgy került beépítésre, beüzemelésre, hogy a szerkezetintegritás fogalma még ismeretlen volt. Ennek megfelelően nagy szerencse, ha részletes információt tudunk szerezni a szerkezet tervezéséről, gyártásáról, illetve üzemeléséről. A jelenleg még üzemelő szerkezetek (akár annak alapanyaga, akár a benne lévő hegesztett kötés) maradék élettartamának becsléséhez két típusú vizsgálat megbízhatóan alkalmazható. Az egyik típusú vizsgálat, a fárasztóvizsgálat, amely a szerkezet ciklikus üzemelését feltételezi [14], [15], és az igénybevétel jellegének megfelelően a tönkremenetelig elviselt ciklusszámot vizsgálja, vagy ha közben a terhelési feltételek is változnak, akkor a tönkremenetelhez tartozó mechanikai feszültséget.

A vizsgálatok másik típusa nem ismétlődő igénybevételt vesz alapul, hanem feltételezi, hogy a régóta üzemelő szerkezetben van valamilyen anyagfolytonossági hiba, például repedés, zárvány, amely feszültséggyűjtő helyként funkcionál. Ezt követően törésmechanikai elven közelíti meg a szerkezetet és törési szívósság, vagyis repedés terjedéssel szembeni ellenállás mérőszámának meghatározása a cél [15], [16], [17], amelyet például a 4. ábrán látható próbatestes vizsgálat eredményeinek kiértékelésével határozhatunk meg.

Az előző fejezetben említett kopásvizsgálat maga is egy ciklikus igénybevételt megvalósító vizsgálati eljárás, ilyen módon szintén alkalmas üzemelő szerkezetek maradék élettartamának meghatározására. A kopási rendszer, és benne a fellépő kopás típusa azonban nagymértékben befolyásolja, hogy az adott üzemelő rendszerben a szerkezet tönkremenetele mennyire lesz intenzív, ehhez nyújtanak segítséget a [18] kutatás során megszerkesztett kopásátmeneti térképek.



4. ábra. Repedési frontok elemzése töretfelületen, CTOD típusú törési szívósság vizsgálat [17]

Egy-egy vizsgálati mérőszám önmagában is információt hordoz, illetve eleme lehet egy átfogóbb, az egész szerkezet megbízható üzemelését célzó elemzésnek [19], [20]. Az élettartam növelésére irányuló kutatómunkát mutat be részben a [20] és teljes egészében a [21] szakirodalom. Folyamatosan növekvő életkorú szénhidrogénszállító csőtávvezetékek integritásával és élettartamának növelésével foglalkozik a kutatás. Ez a rendszer a hazai és nemzetközi viszonylatban is nagy jelentőségű szerkezetnek tekinthető, amelyen bekövetkező hiba észlelése, majd értékelése után általában azonnal nyilatkozni kell, a hogyan tovább kérdéséről, vagyis meg kell ítélni, hogy szükséges-e beavatkozás vagy sem, s ha igen, akkor milyen. Egy, a témakörhöz kapcsolódó vizsgálatsorozatot mutat be a [21] irodalom. A csőtávvezetési rendszer egy adott ideig működő, kiváltott szakaszát műhibával terhelve, majd a hibát kompozit szigeteléssel, több rétegben megerősítve, javítva került sor a teljes csőszakasz fárasztó és repesztő vizsgálatára, lásd 5. ábra. A ciklikus igénybevétellel a javítási technológia megbízhatósága került elemzésre, és a repesztő igénybevétellel a maximális teherviselése.



5. ábra. Kompozittal erősített, műhibát tartalmazó csőszakasz a fárasztó és repesztő vizsgálatokat követően [21].

A hirtelen bekövetkező és/vagy anyagi kárral járó káresetek minden esetben arra is rákényszerítik az üzemeltetőket, hogy globálisan, az adott esettől részben elvonatkoztatva, szinte külső szemmel vizsgálják meg a káreset tágabb, a teljes rendszerre kiterjeszhető vonatkozásait és intézkedéseket is hozzanak a megbízhatóbb üzemeltetés érdekében.

3. Összefoglalás

Az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként a 4.1. Tudományos Műhelyben szerteágazó kísérleti munka folyt szerkezetintegritás témakörben. Az anyagminőségek tekintetében mind a fémes, nemfémes és kompozit anyagok vizsgálatára találtunk példát, a vizsgálatok tekintetében, mind egyszerűbb statikus, hosszabb időtávú ciklikus, illetve teljes szerkezet vizsgálatának kutatásával foglalkozott a műhely. Jelen cikkben ezen főbb kutatási irányokról adtunk egy rövid tájékoztatót, a kutatások részletes bemutatását tartalmazó publikációk hivatkozásainak megjelölésével. A kutatások hozzájárultak a tudományterület előremeneteléséhez, a jelenségek jobb megértéséhez, nyitott kérdések tisztázásához, szerkezetek üzemelésre való alkalmasságának megítéléséhez, élettartamuk pontosabb meghatározásához.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Koncsik, Zs. (2019). A szerkezetintegritás helye és szerepe az oktatásban és a kutatásban. *Multidiszciplináris tudományok*, 9(4), 63-71. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.5>
- [2] Lukács, J. (2005). Dimensions of lifetime management. *Materials Science Forum*, 473-474, 361-368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.361>
- [3] Lukács, J. (2008). *Polimer mátrixú kompozittal erősített hibrid csövek integritása*: GVOP-3.1.1.-2004-05-0215/3.0. Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN: 9789636618315, 197 p.
- [4] Lukács, J., Nagy, Gy., Török, I. (2009). *Szemelvények az élettartam gazdálkodás témaköréből*. Miskolci Egyetem, ISBN: 9789636618902, 246 p.
- [5] Lukács, J.; Nagy, Gy.; Harmati, I.; Koritárné, F. R.; Kuzselláné, K. Zs.: *Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből*, Miskolci Egyetem (2012) ISBN: 9789633580004, 334 p.
- [6] Nagy, N., Kovács, „Hagyó” A. (2019). Lepárló edény tönkremeneteli okának vizsgálata. *Multidiszciplináris tudományok*, 9(4), 136-141. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.11>
- [7] Varga, V. V., Koncsik, Zs., Cserjésné S. Á.: *Hidegalakító szerszám károsodásának elemzése*, 2019 Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, ISBN 978-963-7064-38-8, Debrecen, pp. 436-439.
- [8] Koncsik, Zs., Cserjésné, S. Á. (2020). Károsodott folyató fészek vizsgálata. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(3), 254-263. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.31>
- [9] Babcsáné, K. J. (2020). A páratartalom hatása a Si₃N₄ alapú kerámiák kopására. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(1), 36-43. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.1.5>

- [10] Babcsánné, K. J. (2020). A műszaki kerámiák kopási viselkedését befolyásoló vizsgálati tényezők. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(3), 166-173.
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.21>
- [11] Babcsánné, K. J. (2020). A hőkezelt SiAlON kerámiák tribológiai tulajdonságai. *Multidiszciplináris tudományok*, 10(3), 40-49. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.5>
- [12] Babcsánné, K. J.: *Ion-implantációval módosított műszaki kerámiák sajátosságai*, megjelenés alatt
- [13] Koncsik, Zs., Fodor, B., Kubuk, D., Losonczy, R. (2019). Hőkezelési hőmérsékletek mérése indukciós hevítés során. *GÉPGYÁRTÁS*, LVIII, 40-44.
- [14] Mobark, H. F. H., Lukács, J. (2019). Efficient application of S690QL type high strength steel for cyclic loaded welded structures. In: *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development* (394 p. pp. 325-336). ICESD 2019 London, Egyesült Királyság / Anglia: CRC Press
<https://doi.org/10.1201/9780367824037-39>
- [15] Koncsik, Zs. (2019). Lifetime analyses of S960M steel grade applying fatigue and fracture mechanical approaches. In: *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development* (394 p. pp. 316-324). ICESD 2019 London, Egyesült Királyság / Anglia: CRC Press
<https://doi.org/10.1201/9780367824037-38>
- [16] Koncsik, Zs., Nagy, Gy., Lukacs, J. (2019). COD assessment of S960M grade steel at different temperatures. In: *72nd IIW Annual Assembly and International Conference: Proceedings of International Conference* (Paper: IIW-DOC X-1958-19, 12 p.). Prága, Csehország: Guarant
- [17] Koncsik, Zs., Lukács, Zs. *Fracture mechanical analyses of high strength steels applying experiments and simulation*, 2020 IOP Conference Series: Materials Science And Engineering 903 p. 01201, 9 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012013>
- [18] Németh, A. K., Marosné, B. M.: *HIP és SPS gyártású Si₃N₄/MLG nanokompizotok kopási viselkedésének jellemzése kopásátmenet térképekkel*, 2019 Műszaki Tudomány az észak-kelet magyarországi régióban, ISBN 978-963-7064-38-8, Debrecen, pp. 285-288.
- [19] Lukacs, J., Koncsik, Zs. (2019). Determination of plane-strain fracture toughness using CRB specimens and their applicability for structural integrity calculations. In: *72nd IIW Annual Assembly and International Conference: Proceedings of International Conference* (Paper: IIW-DOC X-1959-19, 12 p.). Prága, Csehország: Guarant
- [20] Lukács, J., Nagy, Gy., Török, I., Koncsik, Zs. (2020). Kutatási eredmények a szénhidrogénszállító csőtávvezetékek integritása területén. *GÉP*, 71(5-6), 87-94.
- [21] Lukács, J., Koncsik, Zs., Chován, P. (2019). Life cycle extension of damaged pipelines using fiber reinforced polymer matrix composite wraps. In: *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development* (394 p. pp. 235-244). ICESD 2019, London, Egyesült Királyság / Anglia: CRC Press
<https://doi.org/10.1201/9780367824037-30>