

# TÉZISFÜZET

## FELÜLETI HIBÁK HATÁSA GÖMBGRAFITOS VASÖNTVÉNYEK KIFÁRADÁSI ÉLETTARTAMÁRA

Készítette: Gróza Márton, okleveles gépészmérnök  
Témavezető: Dr. Váradi Károly, egyetemi tanár  
Dátum: 2020.02.06

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gép- és Terméktervezés Tanszék



# TARTALOM

1. Bevezetés.....	1
1.1. Előzmények, a kutatás indokoltsága.....	2
1.2. Kutatás célja.....	2
1.3. Kutatási módszerek .....	3
2. A kutatómunka rövid bemutatása .....	4
2.1. A felületi hiba-feszültséggradiens (DSG) módszer továbbfejlesztése .....	5
3. A kifáradási élettartam szempontjából megengedhető felületi hibák.....	7
4. Tézisek .....	9
5. Összefoglalás.....	13
Tézisekhez kapcsolódó publikációim .....	14
Irodalom .....	14

## RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Rövidítés	Megnevezés
DSG	Felületi hiba-feszültséggradiens módszer (Defect Stress Gradient Approach)
EIM	Egyenértékű Zárvány Módszer (Equivalent Inclusion Method)
VE	Végelem módszer
HCF	Nagyciklusú kifáradás (High-Cycle Fatigue)
LEFM	Lineárisan rugalmas törésmechanika (Linear Elastic Fracture Mechanics)
NCI	Gömbgrafitos öntöttvas (Nodular Cast Iron)
SEM	Pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscopy)

# 1. BEVEZETÉS

Az értekezés a felületi hibákból kiinduló nagyciklusú fáradásos tönkremenetel folyamatát vizsgálja gömbgrafitos vasöntvény alkatrészekben. Tekintettel az általánosan elfogadott tapasztalatra, amely szerint a nagyciklusú kifáradási élettartam szoros kapcsolatban áll a felületi minőséggel, a felületi folytonossági hiányok hatásának vizsgálata alapvető kérdés. A részletes kifáradási ellenőrzés során a felületi hibák szerepe nem elhanyagolható, hiszen ezek jellemzően a repedéskeletkezési folyamat kiindulópontjában állnak. Továbbá jelenlétük elkerülhetetlen a gömbgrafitos öntvények felületén ill. a közvetlenül felület alatti rétegében. A gömbgrafitos öntvények számos előnnyel rendelkeznek a hasonló kovácsolt és forgácsolt alkatrészekkel szemben, mint a hatékony közepes-nagyszériában való gyárthatóság és az acéllal összehasonlítható mechanika jellemzők. Az előnyös tulajdonságaiknak köszönhetően széles körben alkalmazzák őket a gépipar különböző ágazataiban, különösen a járműiparban. Előnyös tulajdonságaik ára az anyagtulajdonságaik keresztmetszet mentén tapasztalható inhomogenitása. Ez számos jelenség együttes hatásának következménye, mint az öntőformában való olvadáskaramlás és az azt követő megszilárdulási folyamat inhomogenitása. Az öntvények felületi tartományában képződő öntvénykéreg és a különböző felületi öntvényhibák jelenléte jelentős mértékű bizonytalanságot okoz a gömbgrafitos öntöttvasak üzemi szilárdsági jellemzőiben.

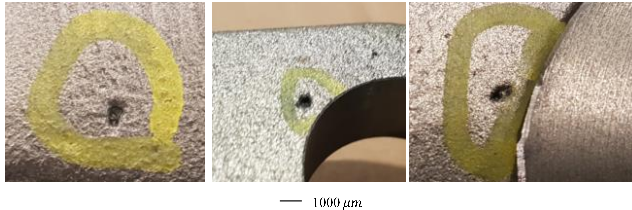
Az 1.1 ábra illusztrálja a gömbgrafitos öntvények minőségbiztosítási folyamata során azonosított felületi hibákat. Az ilyen és ehhez hasonló felületi hibák egyesével történő figyelembevétele a kifáradás ellenőrzésben alacsonyabb biztonsági tényezők alkalmazását teszi lehetővé a megbízhatósági követelmények megtartása mellett. Alapvető kérdés az üzemi szilárdságot befolyásoló hatások egymástól való elkülönítése. Egy bizonyos küszöbérték feletti ártalmassággal rendelkező felületi hibákat külön-külön érdemes vizsgálni a minőségbiztosítási folyamat során, lehetőség szerint a kifáradási élettartamra kifejtett hatásuk figyelembevételével. Ezzel szemben a technológia során pontosan nem szabályozható, ideálistól eltérő, mikroszerkezet hatását már a tervezési folyamat során figyelembe kell venni.

A gépészeti rendszerek gyártóinak szemszögéből nézve az öntödékből érkező alkatrészek minősítése számos nehézséget vet fel. A rendszergyártók jellemzően a monoton terhelés hatását vizsgáló szakítóvizsgálaton alapuló előírásokkal ellenőrzik a beérkezett alkatrészek minőségét, véletlen mintavételezéssel kiválasztott darabokból kimunkált próbatestekkel. A nagyciklusú üzemi szilárdság a felületi tulajdonságok függvénye, ezért a keresztmetszet belső része által befolyásolt monoton szakítóvizsgálat megfelelősége nem biztosítja a dinamikus terhelésű alkatrészek szükséges üzemi szilárdságát.

Nemzetközi szabványok szabályozzák az öntvények felületi minőségének ellenőrzési szabályait (az EN 1370 [1] Európai szabvány és az ASTM A802 [2]), de egyik sem javasol irányelveket az üzemi szilárdságra kifejtett hatásuk számszerűsítésére. Az értekezés témáját képező kutatást a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungária Kft. kezdeményezte, és támogatta közvetlen elméleti és kísérleti tapasztalatok megszerzése céljából. Az ipari célkitűzés a felületi hibák üzemi szilárdságra gyakorolt hatásának vizsgálata volt, amelynek tapasztalatai biztonságkritikus öntvények tervezési és minőségbiztosítási szabályozásába való beépítésére is alkalmazhatók a jövőben.

A jelenleg rendelkezésre álló szakirodalmi módszerek jelentős egyszerűsítéseket tesznek, és az alkatrészek üzemi szilárdságának számítására való alkalmazhatóságot jellemzően nem tűzik ki célul. További nehézséget okoz, hogy a vizsgált ISO 1083 500-7 [3] jelű gömbgrafitos anyagminőségre kevés kifáradási anyagjellemző található a szakirodalomban ahhoz, hogy a rendelkezésre álló módszereket biztonságosan alkalmazni lehessen.

A kutatás fókuszában a minőségbiztosítási folyamat során detektált öntvényhibák hatásának figyelembevétele áll a nagyciklusú kifáradási élettartam ellenőrzése során. Első lépésként a felületi hibákat olyan paraméterekkel kell jellemezni, amelyek tartalmazzák a szükséges információt veszélyességük értékeléséhez. Az kifáradási szilárdságot és élettartamot így a hiba jellemző paraméterek függvényében tudjuk meghatározni általános feszültségállapotban lévő alkatrészekre.



1.1 ábra. Példák gömbgrafitos vasöntvények felületén található öntvényhibákra.

## 1.1. Előzmények, a kutatás indokoltsága

Számos módszert dolgoztak már ki az anyaghibáktól kiinduló kifáradási folyamat modellezésére az elmúlt években, de nagyrésztük jelentős hiányosságokkal rendelkeznek az ipari alkalmazhatóság tekintetében. Nincs egységesen elfogadott eljárás a bemetszések hatásának értékelésére, miközben a felületi hibák hatása jelentősen több bizonytalanságot foglal magában.

A bemetszések és a felületi hibák hatásával foglalkozó kutatások jellemzően körbefutó bemetszések és félgömb alakú hibák hatására korlátozódnak természetes (gyártási folyamatból származó) hibák vizsgálata helyett, és csak kevés munka [4,5] vizsgálja a hibák alakjának az üzemi szilárdságra vonatkozó hatását. A hibaalak hatásának számítása fontos lépés az összetett alakú természetes felületi anyaghibák viselkedésének megértéséhez.

Fontos, mégis sokszor elhanyagolt vagy természetesnek vett kérdés véleményem szerint a polírozott hengeres próbatesteken mért kifáradási jellemzőkből nyert tapasztalat átvitele ipari alkatrészek szintjére. W. Schütz [6] 1996-ban írt összefoglaló-értékelő cikkében kiemeli az azóta is aktuális problémát. Kutatók módszereket fejlesztenek és validálnak kizárólag próbatestek fárasztásával nyert eredményeken, a tapasztalatok alkatrészekre való átvitelét a mérnökökre hagyva. A gyakorló mérnököknek általában nem áll rendelkezésére a szükséges idő és erőforrás általános megoldások megtalálására és dokumentálására.

A többtengelyű feszültségállapot, az anyagjellemzők heterogenitása a keresztmetszet mentén és a repedéskeletkezési és terjedési fázisok eltérő arányának figyelembevétele mind szükséges a polírozott hengeres próbatestek fárasztásával szerzett tapasztalat összetett alkatrészek értékeléséhez való átviteléhez. A jelen kutatás fontosságát szintén alátámasztja a kísérleti tapasztalat hiánya ciklikus anyagi viselkedés és kifáradási jellemzők tekintetében a ferrit-perlites ISO 1083 500-7 [3] gömbgrafitos anyagminőségre. Nagyságrendekkel több kísérleti adat található a szakirodalomban a ferrites 400-18 és túlnyomó részben perlites 600-3 anyagminőségekre.

## 1.2. Kutatás célja

A jelen kutatás alkatrészekre és próbatestekre egyaránt alkalmazható általános válaszokat keres a hibák hatására meginduló nagyciklusú kifáradási folyamat leírására, kiemelten az ISO 1083 500-7 [3] ferrit-perlites gömbgrafitos öntöttvas anyagminőségre. A felületi hiba-feszültséggradiens módszer (DSG) bizonyult a legalkalmasabbnak a kutatás ipari feltételeinek figyelembevételével a jelenség modellezésére, ezért a munka során ennek továbbfejlesztésével foglalkozom. A munka

tartalmazza továbbá a kísérleti program összefoglalását és a kísérleti eredmények új elméletekkel való összevetését.

Tudományos szempontból a kutatás célja a felületi hibás gömbrágitos vasöntvények többtengelyű kifáradási szilárdságának és élettartamának vizsgálata a legfontosabb hatások figyelembevételével, úgy, mint a hibák alakja, mérete, irányultsága, helye és a környező mikroszerkezet. A hibák alakjának hatásával kiemelt módon foglalkozom az értekezésben, mert ez a szakirodalomban egy erősen elhanyagolt terület. A cél elérését a próbatesteken nyert tapasztalatok alkatrészek szintjére való átvitelével és alkalmazásával tervezem elérni.

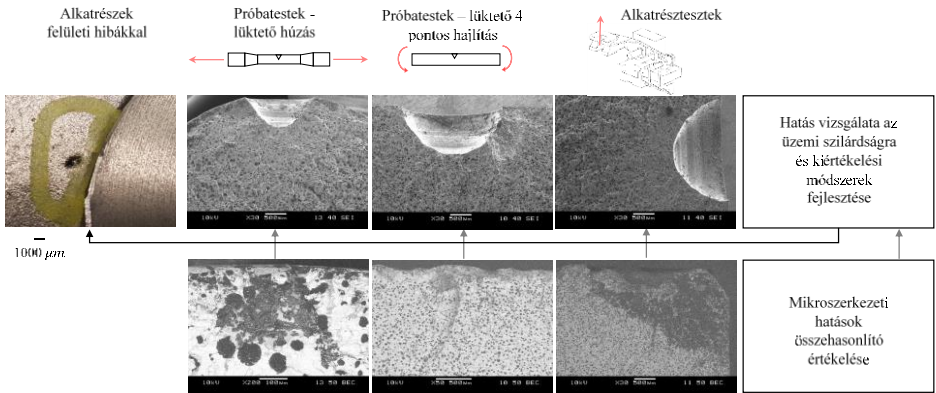
Mérnöki szempontból a munka célja egy új módszer fejlesztése a tudományos eredmények alapján az alkatrészek idealizált állapotára készített üzemi szilárdsági számítások újszerű kiértékelésével, amely segít eldönteni, hogy egyedi alkatrész (a sajátos felületi tulajdonságai mellett) alkalmas-e a tervezési követelmények betöltésére. A kutatáshoz kapcsolódó ipari elvárások: (annak érdekében, hogy a tapasztalatok alkalmazhatók legyenek kifáradásnak ellenálló járműipari öntvények tervezésére):

- 1) A mikro-szerkezeti hosszú repedések keletkezése általános tönkremeneteli kritérium a járműiparban, hiszen nem feltétlenül biztosított a rendszeres ellenőrzés minden biztonságkritikus alkatrész számára,
- 2) Az alkatrészeket jellemzően nagyciklusra ill. a kifáradási határhoz közelebbi élettartamra tervezik,
- 3) Összetett geometria, feszültségi állapot és sok terhelési eset jellemző.

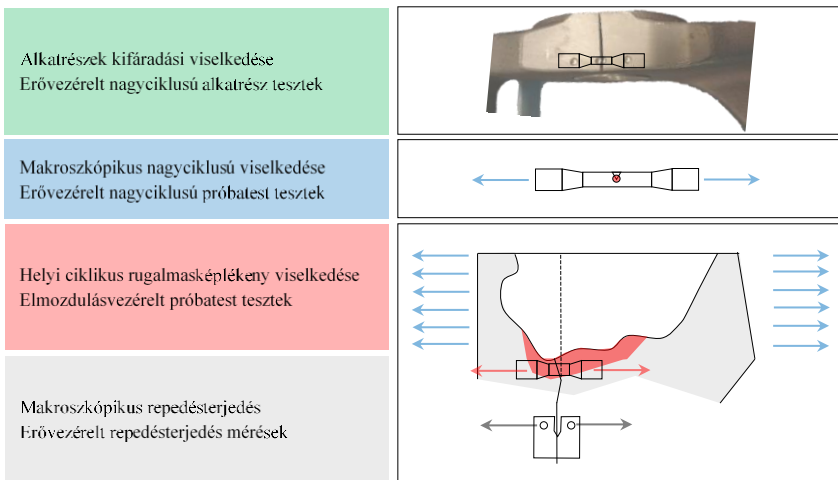
A ferrit-perlites öntöttvas öntvényhibáihoz kapcsolódó szakirodalom és az alkatrészekon végzett szemrevételezési vizsgálati program alapján a kutatás által vizsgált felületi hibák mérettartománya 50 – 2500  $\mu\text{m}$ .

### 1.3. Kutatási módszerek

A kutatás a felületi hibás alkatrészek kifáradási élettartamának számításaként definiált célt lépésről lépésre, a próbatestek viselkedéséből kiindulva, a modellek alkatrészesztekkel történő validációjával közelíti meg. A hibák hatásával befolyásolt kifáradási folyamat összetettsége a felületi hibák méretének, alakjának, morfológiájának, és a környező mikroszerkezet szabályozásával csökkenthető. A közvetlenül felület alatti hibák szemrevételezéses vizsgálattal nem detektálhatók, a kutatásban így azok csak a töretfelületek vizsgálatánál voltak azonosíthatók. A felületi alatti természetes eredetű anyaghibák hatását a szabályozott jellemzőkkel rendelkező mesterséges hibákkal való összehasonlítás útján értékelem. Az 1.2 ábra az értekezés témájának kísérleti megoldási módszeréről nyújt áttekintést. Az alkatrészek felületén tapasztalt hibákat kísérleti szempontból a húzó és négy pontos hajlító próbatestek és a tesztelt alkatrészek felületére munkált félgömb ill. ellipszoid alakú hibákkal veszem figyelembe. A szabályozott jellemzőkkel rendelkező megmunkált hibákat VE és kifáradási számításokban pontosan lehet figyelembe venni, így a mérések és számítások között biztosítható a lehető legkevesebb eltérés. Az 1.3 ábra bemutatja az aktuális probléma megoldásának elméleti megközelítési módszerét. Általános értelemben a jelen munka középpontjában a felületi hibákkal rendelkező alkatrészek nagyciklusú kifáradási viselkedésének megismerése áll. Pozitív közép feszültség mellett már a váltakozó szerkezeti feszültség is eléri a rugalmas-képlékeny tartományt a teljes ciklus egy részében a kifáradási határ közeli élettartammal rendelkező próbatestek esetén. Bemetszések jelenléte esetén a helyi ciklikus rugalmas-képlékeny viselkedés szoros kapcsolatban áll a tönkremeneteli folyamattal. A munkában a teljes kifáradási élettartam repedésekeletkezési és repedésterjedési fázisait elkülönítve vizsgálom a kifáradási folyamat alapos értelmezése céljából.



1.2 ábra. A kutatás kísérleti módszere.



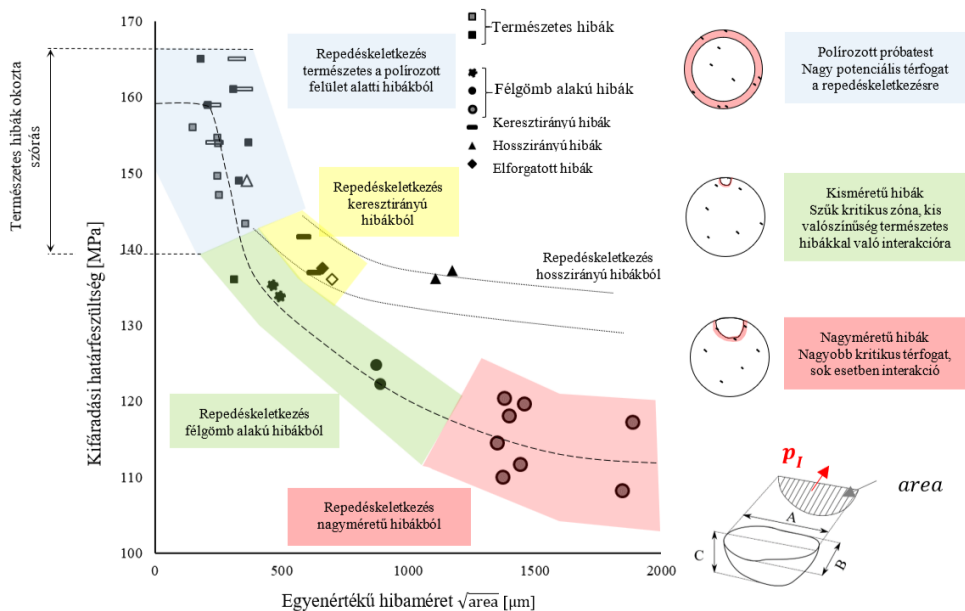
1.3 ábra. A kutatás elméleti megközelítésének bemutatása.

## 2. A KUTATÓMUNKA RÖVID BEMUTATÁSA

A különböző anyaghibák hatását jellemzően az ún. Kitagawa diagramon (Kitagawa és Takahashi úttörő munkája nyomán [7]) ábrázolja a szakirodalom. A Kitagawa diagram egy adott ciklusszámhoz rendelve a hiba méretének függvényében ábrázolja annak hatását a feszültségamplitúdóban kifejezett kifáradási szilárdságra (jellemzően a kifáradási határfeszültségre).

A polírozott és a különböző felületi hibákkal megmunkált hengeres próbatestek lüktető hűzásban ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.05$ ) végzett nagyciklusú fárasztómérések eredményeit az egyenértékű hibaméret függvényében mutatom be. A 2.1 ábra ábrázolja a lüktető hűzásban tesztelt próbatestek esetében a kísérleti Kitagawa diagramot, amelynél az egyenértékű hibaméretet a hiba első főfeszültségi irányra merőleges keresztmetszetének területének négyzetgyökeként értelmezem ( $\sqrt{\text{area}}$ ), a kifáradási határként pedig egyszerűsített értelemben a  $10^6$  terhelési ciklusszámhoz tartozó feszültségamplitúdót értem, ami egybevág az FKM 2012 Méretezési Irányelv értelmezésével.

A mérési eredményeket megértést segítő magyarázatokkal, és a trendeket jelző görbékkel, egészítettem ki a 2.1 ábrán. A polírozott próbatestek töretfelületének elektronmikroszkópos vizsgálatával azonosítottam azokat a természetes eredetű (gyártási folyamatból származó) felület alatti anyaghibákat (grafit dúsulások, zárványok), amelyek a kifáradási repedés kiindulópontjában álltak. A töretfelület-vizsgálat hiányában sokszor véletlenszerű szórásként értelmezett viselkedés egyértelmű trendet mutat, nagyságrendileg  $150\ \mu\text{m}$  felett a kis felület alatti hibák elkezdik csökkenteni a kifáradási határt. A marással mesterségesen előállított különböző alakú (félgömb, keresztirányú ellipszoid, hosszirányú ellipszoid és elforgatott ellipszoid) hibák a természetes eredetű hibáknál nagyobb mérettartományba esnek a jelen esetben. A félgömb alakú hibák hatása elválik az ellipszoid alakú hibák viselkedésétől, érdekes módon azok alatt fut, miközben az egyes ellipszoid alakú hibák feszültségkoncentrációs hatása kisebb, másoké nagyobb, mint a félgömb alakú hibáké. Ez alapján belátható, hogy egy lineárisan rugalmas feszültségeken alapuló módszer nem lesz képes a különböző alakú hibák viselkedésének leírására. A Murakami [8] által bevezetett  $\sqrt{area}$  paraméter igazoltan arányos egy 2D-ba leképezett megegyező kontúrral rendelkező repedés  $K_I$  feszültségintenzitási tényezőjével. Ez alapján kijelenthető, hogy a lineárisan rugalmas törésmechanikán alapuló elméletek nem tudják megmagyarázni a tapasztalt jelenséget, hiszen az a mérési pontoknak a  $\sqrt{area}$  paraméter alkalmazásával így közelítőleg egy görbére kellene esniük.



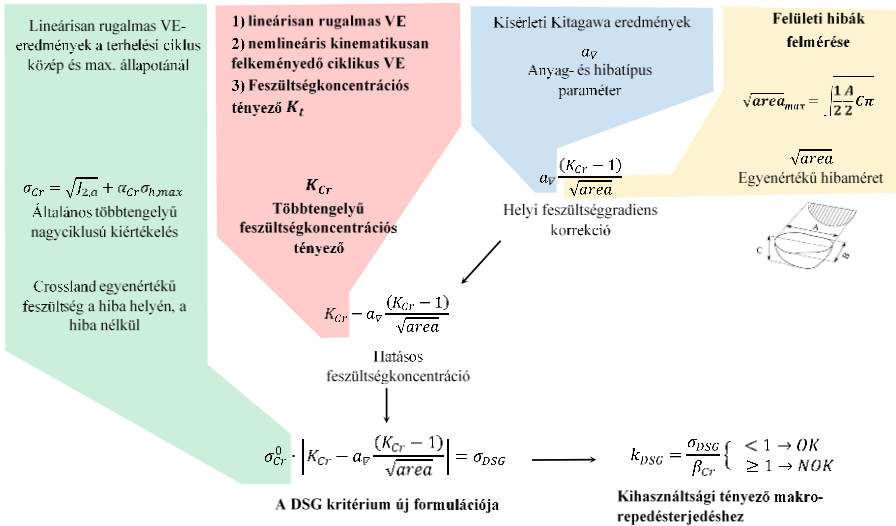
2.1 ábra. Kitagawa diagram hengeres próbatestek lüktető húzásban (R0.05) végzett nagyciklusú fárasztóméréseinek eredményeivel ISO 1083 500-7 anyagra.

## 2.1. A felületi hiba-feszültséggradiens (DSG) módszer továbbfejlesztése

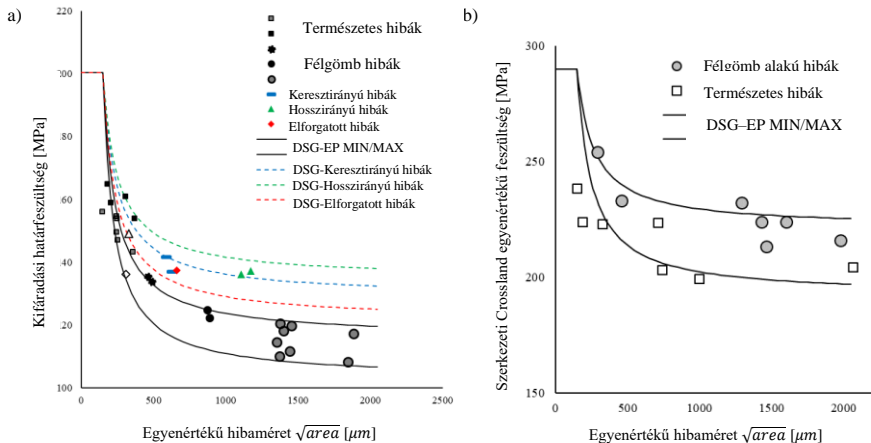
A felületi hiba-feszültséggradiens módszer az egyik napjainkban aktívan kutatott eljárás, amely számos fémes anyag (öntött alumínium és titán ötvözetek, hengerelt acél és öntöttvas) Kitagawa diagramjának modellezésére alkalmazható. A módszert több ponton továbbfejlesztettem az általános ipari alkalmazhatóság és az eredménypontosság növelése céljából. A 2.2 ábra ismerteti a módszert, az általam továbbfejlesztett részeket félkövérrel emeltem ki.



A 2.3 ábra bemutatja a rugalmas-képlékeny DSG számítások alapján ábrázolt Kitagawa görbék összehasonlítását az a) próbatestek és a b) alkatrészek mérési eredményeivel. A min/max jelölések az egyes hibafajtákhoz szimulált görbéknel (félgömb, keresztirányú, hosszirányú és elforgatott) a számított rugalmas-képlékeny töbtengelyű feszültségkoncentrációs tényező legkisebb és legnagyobb értékeire utalnak, amelyek eltérését a minden próbatest egyedi jellege okozza. A módszer alkalmas a különböző alakú mesterséges hibák hatásának pontos leírására próbatesteken és felületi hibás alkatrészek üzemi szilárdságának számítására is. Az egyszerűsített lineáris módszer a rugalmas-képlékeny számítási eredményeket kiértékelő eljáráshoz képest a biztonság felé eltérő eredményeket szolgáltat és a hibák hatásának vizsgálatához nincs szükség külön VE számításra.



2.2 ábra. A felületi hiba-feszültséggradiens módszer továbbfejlesztése.



2.3 ábra. a) Rugalmas-képlékeny (EP) DSG számítások és próbatestek és b) Alkatrészesztek eredményeinek összehasonlítása a Kitagawa diagramon.

### 3. A KIFÁRADÁSI ÉLETTARTAM SZEMPONTJÁBÓL MEGEGEDHETŐ FELÜLETI HIBÁK

A kifáradási élettartam szempontjából megengedhető felületi hibaméret VE- eredményező számítási módszeret kifejlesztettem meghatározott alakúnak tekintett hibák számára. Kutatásomban a nagyciklusú kifáradási szilárdságot  $10^6$  terhelési ciklusnál vizsgáltam, ami megegyezik a kifáradási határ FKM 2012 Méretezési Irányelv [9] szerinti értelmezésével. A DSG módszerben a Crossland többtengelyű kifáradási kritériumot alkalmazom, mely egy egyenértékű feszültség jellegű invariáns mennyiséget képez a többtengelyű feszültségállapot és a terhelési tényező leírására, továbbá a feszültséggradiens hatás korrekciójával biztosítom a helyi feszültségkoncentráció hatásának pontos figyelembevételét az üzemi szilárdságra. A pontonként megengedhető hibaméret eredményező fontos információt hordoz az öntödék számára, mely segít vevőik minőségbiztosítási rendszerének megfelelő alkatrész előgyártmányok előállításában. Ugyanez a megengedhető hibaméret mező használható a szemrevételezéses vizsgálatok során a minőségbiztosítási folyamat részeként. A megengedhető hibaméretet osztályai könnyen összehangolhatók a széleskörűen alkalmazott EN 1370 [1] szabvánnyal. Az értekezésemben determinisztikus tudományos módszert javaslok a felületi hibák üzem szilárdságot befolyásoló hatásának pontos számítására. A következőkben mellékeltem példát a megengedhető felületi hibaméret számítására a megkövetelt biztonságnak megfelelően skálázható és a kifáradási élettartam valószínűségi jellege a számításban figyelembe vehető.

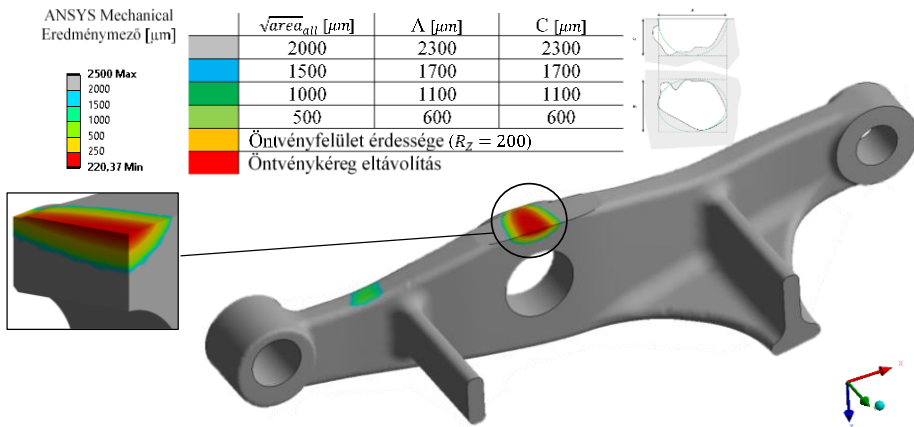
A megengedhető egyenértékű hibaméretet ( $\sqrt{area_{all}^{ell}}$ ) a következő összefüggéssel fejezhető ki az ideális anyag egy tervezési élettartamához (hosszú repedések keletkezéséhez vezető) tartozó  $\beta_{Cr}(N_{ic,i})$  kifáradási szilárdsághoz:

$$\sqrt{area_{all}^{ell}} = a_v \frac{\sigma_{Cr}^0 (K_{Cr}^{ell} - 1)}{K_{Cr}^{ell} \sigma_{Cr}^0 - \beta_{Cr}}$$

ahol  $a_v$  anyagszerkezeti paraméter,  $\sigma_{Cr}^0$  a szerkezeti Crossland egyenértékű feszültség és  $K_{Cr}^{ell}$  értékét a dolgozatban ismertetett, egyszerűsített eljárással becsülhetjük a biztonság felé eltérő módon. Több, egymáshoz közel elhelyezkedő hiba esetén az értekezésben ismertetett módszer alkalmazandó. Az eljárást a számítások és a teszteredmények összehasonlításával igazoltam. Az egyszerűsített módszer mesterségesen megmunkált felületi és természetes eredetű felület alatti természetes eredetű anyaghibák esetére egyaránt a biztonság javára eltérő eredményeket szolgáltat az alkatrész tesztekkel történt összehasonlítás alapján.

Az általános kifáradási ellenőrzés során kvázi-statisztikus terhelési eseteket jelölünk ki a terhelési ciklus figyelembevétele céljából. Ezekből az eredményekből ún. megoldás kombinációkat hozunk létre a feszültségamplitúdó és a középfeszültségi állapot leveztetésére. Egy adott megoldáskombinációhoz a megengedhető hibaméret mező számítható. Több egyszerre ható fárasztó jellegű terhelés esetén, amennyiben azok a kifáradási határhoz közeli élettartamot eredményeznek, a megengedhető hibaméretet egyszerűsítetten értelmezhetjük a különböző terhelésekhez számolt hibaméretet pontonkénti minimumaként. A megengedhető hibaméret mezőket a VE számítási eredményekből a kiértékelő felületen származtathatjuk. A számítási eredmények összhangba hozhatók a mértékadó szabványokkal, így például az EN 1370 [1] előírással. Érdemes a minőségbiztosítást végző személyzet számára közvetlenül összefoglaló hibaméreteket származtatni az elméleti egyenértékű hibaméret értéke helyett. A szemrevételezéses vizsgálat során a felületi hibák befoglaló méreteit összehasonlítják a megengedhető felületi hibaméret eredményezővel, amely egy elfogadás/elvetés jellegű döntéshez vezet az adott alkatrész tekintetében. Egy példa látható a 3.1 ábrán a megengedhető felületi hibaméret eredményezőre. A vizsgált terhelési állapot megegyezik a felvett tervezési céllal, ami az ideális alkatrész kifáradási határának megfelelő terhelés az alkatrésztesztek alapján; 32.33 kN a terhelő erő maximumát tekintve. Az eredmények az alkatrész felületközeli

térfogatában is értelmezhetők. A megengedhető hibaméret mező alapján a tervezési élettartam biztosításához egy szűk zónában az öntvénykéreg eltávolítása szükséges.



3.1 ábra. Az egyszerűsített felületi hiba-feszültséggradiens módszerrel számított megengedhető hibaméret eredménymező.

## 4. TÉZISEK

### 1. Tézis

A kísérleti eredményeim és a felületi hibák alakját vizsgáló végeelem módszeren alapuló kifáradási számításaim alapján megállapítottam, hogy az ISO 1083 500-7 gömbgrafitos vasöntvények esetében az azonos egyenértékű méretű (Murakami értelmezése szerinti  $\sqrt{area}$ ) felületi hibák hatása a nagyciklusú kifáradási élettartamra és szilárdságra az alakjuk függvényében különböző mértékű. Az eltérést a repedéskeletkezési folyamatot meghatározó, a felületi hibák alakjából származó feszültségkoncentrációs hatás befolyásolja.

Közvetlenül kapcsolódó publikációim

[I], [V]

## 2. Tézis

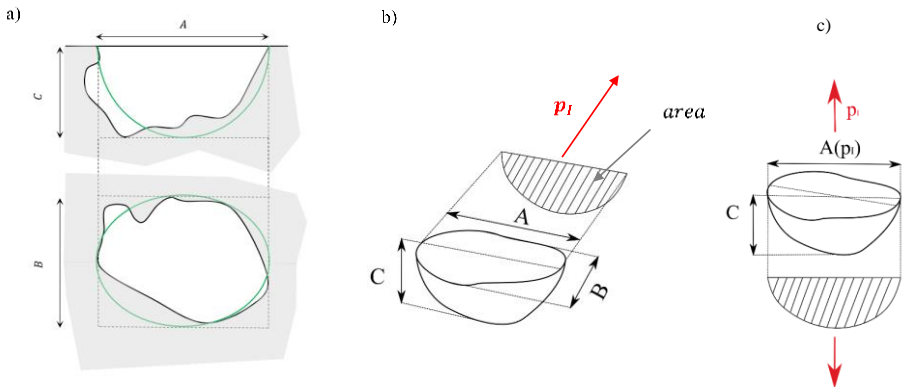
A szabad szemmel látható felületi hibák alakjának kifáradási élettartamra és szilárdságra való hatásának számszerűsítéséhez egy térbeli fél-ellipszoid alapú geometriai modellt vezettem be, és számításaimmal kimutattam, hogy az figyelembe veszi felületi hibák alakját is a nagyciklusú kifáradás-ellenőrzési folyamatban.

A modell a hibát az alakparamétereivel ( $B/A$  és  $C/A$ , amelyek a feszültségkoncentrációt és a kifáradási repedés keletkezését befolyásolják), és az irányultságát figyelembe vevő egyenértékű méretével ( $\sqrt{area}_\varphi$ ) jellemzi (amely a feszültséggradiensre és a potenciálisan kialakuló fáradásos repedés viselkedésére van hatással).

Egy felületi hiba a következő paraméterekkel jellemezhető a számítások során:

- $A$  [ $\mu\text{m}$ ] legnagyobb felületi hossz,
- $B$  [ $\mu\text{m}$ ] legnagyobb befoglaló szélesség az  $A$  méret vonalára merőlegesen a felület síkjában,
- $C$  [ $\mu\text{m}$ ] legnagyobb felülettől mért mélység,
- $\varphi$  [ $^\circ$ ] a felületre merőleges és  $A$  méret vonalát magába foglaló sík felületi normálisa és a  $\mathbf{p}_I$  első főirány által bezárt szög  $\varphi = \mathbf{n}_A \angle \mathbf{p}_I$ .

Egy felületi hiba alakját a  $B/A$  felületi- és  $C/A$  keresztmetszeti alakparaméterekkel írhatjuk le. Az ellipszoid alakú hiba egyenértékű mérete az  $A$  és  $C$  paraméterekkel  $\sqrt{area}_\varphi = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{A(\varphi)}{2} C\pi}$ . A 4.1 ábra segíti a hiba geometria paramétereinek értelmezését.



4.1 ábra. a) Hiba befoglaló méreteinek értelmezése, b) Egyenértékű hibaméret értelmezése a feszültségtenzor első főirányára merőlegesen irányult hibáknál és c) értelmezés általános irányultságnál.

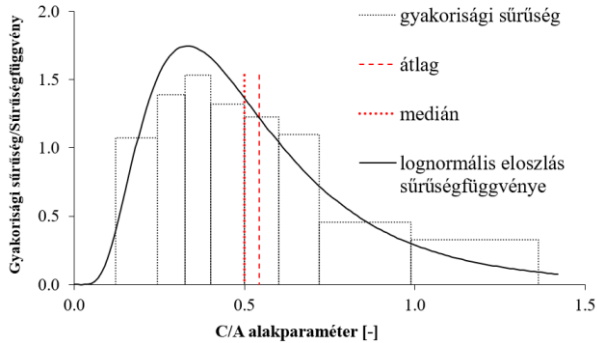
Közvetlenül kapcsolódó publikációm [1]

Korábbi értelmezés Y. Murakami szerint [8]

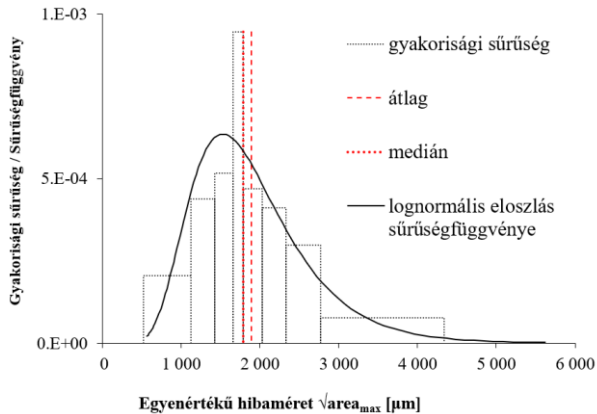
### 3. Tézis

A fél-ellipszoid geometriai hiba modell alkalmazásával és 106 db járműipari fékkar felületi hibái szemrevételezéses vizsgálatának statisztikai kiértékelésével megállapítottam, hogy a ISO 1083 500-7 gömbgrafitos vasöntvény alkatrészeken található pórusok és homokzárványok keresztmetszeti alakparamétere (C/A) és egyenértékű mérete ( $\sqrt{area_{max}} = \max\{\sqrt{area_{\phi}}\}$ ) lognormális eloszlást mutat.

A hibák keresztmetszeti alakparaméterének (C/A paraméter) és egyenértékű méretének ( $\sqrt{area_{max}}$ ) tapasztalati- és illetett lognormális valószínűségi sűrűségfüggvényét rendre a 4.2 és 4.3 ábrák mutatják.



4.2 ábra. A felületi hibák C/A keresztmetszeti alakparaméterének valószínűségi sűrűségfüggvénye.



4.3 ábra. A felületi hibák  $\sqrt{area_{max}}$  egyenértékű méretének valószínűségi sűrűségfüggvénye.

Közvetlenül kapcsolódó publikációim

[I], [VI]

#### 4. Tézis

A felületi hibák alakjának kifáradási szilárdságra és élettartamra gyakorolt hatását értelmeztem és számszerűen kimutattam az ennek érdekében általam módosított, a szakirodalomból ismert, felületi hiba-feszültséggradiens (DSG) kritériummal.

A hiba alakjából származó, méretétől független, feszültségkoncentrációs hatását jellemző  $K_{Cr}$  tényező bevezetésével a DSG egyenértékű feszültség a módosított DSG kritérium szerint:

$$\sigma_{DSG} = \sigma_{Cr}^0 \cdot \left[ K_{Cr} - a_v \frac{(K_{Cr} - 1)}{\sqrt{area_\varphi}} \right] \leq \beta_{Cr},$$

ahol,

- $\sigma_{DSG}$  a kritériumot meghatározó egyenértékű feszültség,
- $\sigma_{Cr}^0$  a szerkezeti Crossland egyenértékű feszültség,
- $a_v$  anyagszerkezeti paraméter,
- $K_{Cr}$  az alakfüggő többtengelyű feszültségkoncentrációs tényező,
- $\sqrt{area_\varphi}$  az egyenértékű hibaméret,
- $\beta_{Cr}$  az ideális anyag üzemi szilárdsága egy adott tervezési ciklusszámhoz Crossland egyenértékű feszültségként kifejezve.

A hosszú repedések keletkezéséhez vezető élettartam ( $N_{Ic.i}$ ):

$$N_{Ic.i} = \left( \frac{\sigma_{DSG}}{A_{W.Cr}} \right)^{\frac{1}{B_{W.Cr}}}$$

ahol  $A_{W.Cr}$  az egy terhelési ciklushoz tartozó elméleti Crossland kifáradási szilárdság,  $B_{W.Cr}$  pedig a Crossland kritérium által egyesített Wöhler görbe meredeksége. A hosszú repedések keletkezéséhez vezető élettartam a teljes kifáradási élettartamnak jó közelítése a kifáradási határ környezetében, ill. önmagában tervezési kritériumot képez a nagyciklusú kifáradási ellenőrzés során.

Az általam általánosított DSG kritériummal zárt alakban kifejeztem egy adott kifáradási élettartamhoz megengedhető  $\sqrt{area_{all}^{ell}}$  ellipszoid alakú hibaméretet (rögzített értékű feszültségkoncentrációt okozó állandónak tekintett hibaalak esetére):

$$\sqrt{area_{all}^{ell}} = a_v \frac{\sigma_{Cr}^0 (K_{Cr}^{ell} - 1)}{K_{Cr}^{ell} \sigma_{Cr}^0 - \beta_{Cr}}.$$

Közvetlenül kapcsolódó publikációm [1]

Korábbi egyenlet M. Vincent és társai szerint: [5]

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezésemben kibővíttem a kifáradási jelenségek tudományterületének aktuális eredményeit a felületi hibák alakjának vizsgálatával és a próbatestek és alkatrészek szintjén is alkalmazható módszerek fejlesztésével.

Kísérletekkel és számításokkal alátámasztottam, hogy a felületi hibák Murakami által javasolt egyenértékű mérete nem írja le azok kritikusságát a kifáradási élettartamra, azok térbeli alakja is meghatározó tényező. A jelenség értelmezéséhez új, fél-ellipszoid alapú térbeli hibamodellt javasoltam, és értelmeztem a hibaalak hatását a DSG kritérium továbbfejlesztésével. A fél-ellipszoid alapú hibamodell alkalmazásával a vizsgált ISO 1083 500-7 [3] öntöttvas alkatrészek szemrevételezéses vizsgálata alapján kimutattam, hogy azok C/A keresztmetszeti alaktényezője és egyenértékű mérete lognormális eloszlást követ. Bemutattam, hogy a repedéskeletkezés és a rövid repedések terjedése egyértelműen meghatározza a gömbgrafitos vasöntvények teljes kifáradási élettartamát a nagyciklusú tartományban. A dolgozatban a teljes kifáradási élettartam ezen szakaszait a hibák környezetében jelenlévő ciklikusan változó rugalmas-képlékeny feszültségmező felhasználásával jellemzem, amelyben a repedéskeletkezési és rövid repedésterjedési szakasz lezajlik.

A kutatás az ISO 1083 500-7 [3] ferrit-perlites gömbgrafitos öntöttvas anyagminőség kifáradási viselkedésének megismerésére irányult, amelyhez a kutatás megkezdésekor kevés szakirodalmi adat állt rendelkezésre. A kísérleti úton igazoltam, hogy az anyaghibák hatása elsőrendű szempont a gömbgrafitos öntöttvas anyag kifáradással szembeni ellenőrzésekor. Az értekezésben megvizsgáltam és megneveztem a felületi hibák hatását jellemző legfontosabb paramétereket, mint azok alakját, méretét, elhelyezkedését, morfológiáját és a környező mikroszerkezetet.

Mérnöki szempontból jól hasznosítható eredmény, hogy egy általános eljárást dolgoztam ki a felületi hibákkal rendelkező gömbgrafitos vasöntvény alkatrészek kifáradási ellenőrzésére, a megengedhető felületi hiba eredményező számítására és ennek a minőségbiztosítási folyamatba való beépítésére. A nemlineáris rugalmas-képlékeny VE számításokon alapuló DSG módszernek azt a képességét, hogy alkalmas számítani felületi hibák hatását a nagyciklusú üzemi szilárdságra, alkatrész tesztek eredményeivel való összehasonlítással igazoltam. Számításokkal és kísérletekkel igazoltam, hogy az idealizálttól eltérő anyag kifáradási viselkedése nagy pontossággal modellezhető a felületi hibák környezetében fellépő ciklikusan változó rugalmas-képlékeny feszültségállapot és a feszültséggradiens figyelembevételével. A lineárisan rugalmas feszültségkoncentrációs tényező alkalmazásával egyszerűsített módszer igazoltan a biztonság javára eltérő eredményeket szolgáltat.

Az értekezésben sikeresen átültettem a számítási modelleket, kísérleti adatokat és a levont tapasztalatokat a lüketető húzás alatt tesztelt kisátmérőjű hengeres fásasztó próbatestek és az általános terhelési állapotban lévő ipari alkatrészek között. Az elmélet és tapasztalat a kifáradás jelenségéhez kapcsolódó, különböző méretarányok közötti átvitelét sok esetben magától értetődőnek vagy garantálnak tekinti a szakirodalom. A jelen munka igazolja, hogy ez nem magától értetődő vagy garantált a szilárdságtani elméletének alkalmazásával. Az anyagtulajdonságok heterogenitása a keresztmetszet mentén, a ciklikus terhelésre adott anyagszerkezeti válasz, a szerkezeti és helyi feszültséggradiens és a repedéskeletkezési és terjedési fázis elkülönített vizsgálata szükséges ahhoz, hogy általánosan alkalmazható módszerrel rendelkezünk öntött alkatrészek nagyciklusú kifáradási élettartamának számítására.

Meglátásom szerint további lépés lehet az igazoltan pontos determinisztikus eredményeket szolgáltató DSG módszer valószínűségi alapokra helyezése. A kutatás során előremutató fejlesztéseket dolgoztam ki a heterogén anyagszerkezet és a kifáradási teszteredmények valószínűségi eloszlásának összekapcsolására [VI]. További több éves munka szükséges egy megbízható



valószínűségi modell fejlesztéséhez, amely magyarázza az élettartam várható szórását és a mérhető állapot anélkül, hogy az a pontosság és általános alkalmazhatóság kárára válna.

Az értekezéshez kapcsolódó méréseim és számításaim egyaránt állandó amplitúdójú terhelések alatt történtek. A kutatás folytatása során a következő szempont a változó amplitúdójú kifáradás és károsodáshalmozódás vizsgálata lehet. Az értekezés nem terjedt ki a környezeti feltételeknek a nem-tökéletes anyag üzemi szilárdságára kifejtett hatására, amely kutatás fontos kiegészítését képezheti a jövőben.

## TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓIM

- [I] Gróza M, Nadot Y, Váradi K. Defect size map for nodular cast iron components with ellipsoidal surface defects based on the defect stress gradient approach. *Int J Fatigue* 2018;112:206–15. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.03.025. IF 3.673, Q1.
- [II] Gróza M, Váradi K. Fatigue Design of Ferritic-Pearlitic Nodular Cast Iron Components with Surface Discontinuities. *Strojniški Vestn - J Mech Eng* 2018;64:373–82. doi:10.5545/sv-jme.2017.5120. IF 1.139, Q2.
- [III] Gróza M, Váradi K. Total fatigue life analysis of a nodular cast iron plate specimen with a center notch. *Adv Mech Eng* 2017;9:168781401774254. doi:10.1177/1687814017742546. IF 1.024, Q3
- [IV] Gróza M., Váradi K., A feszültségmező analitikus számítása felületi hibák környezetében Eshelby Egyenértékű Zárvány Módszerével, *GÉP Folyóirat*, 2016/5-6. LXVII. évfolyam, pp. 94-98, 2016
- [V] Gróza M, Nadot Y, Váradi K. Fatigue behaviour of defective cast iron. *Procedia Struct Integr* 2017;7:438–45. doi:10.1016/j.prostr.2017.11.110.
- [VI] M. Gróza, Y. Nadot, K. Váradi, Fatigue design of cast iron components with surface discontinuities, *MATEC Web of Conferences*, 2018.

## IRODALOM

- [1] DIN EN 1370 Founding - Examination of surface condition 2012.
- [2] ASTM A802 - Standard Practice for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Visual Examination 2015.
- [3] Spheroidal graphite cast irons — Classification, ISO 1083:2018(E) 2018:38.
- [4] Billaudeau T, Nadot Y, Bezine G. Multiaxial fatigue limit for defective materials: Mechanisms and experiments. *Acta Mater* 2004;52:3911–20. doi:10.1016/j.actamat.2004.05.006.
- [5] Vincent M, Nadot-Martin C, Nadot Y, Dragon A. Fatigue from defect under multiaxial loading: Defect Stress Gradient (DSG) approach using ellipsoidal Equivalent Inclusion Method. *Int J Fatigue* 2014;59:176–87. doi:10.1016/j.ijfatigue.2013.08.027.
- [6] Schuetz W. A history of fatigue. *Eng Fract Mech* 1996;54:263–300.
- [7] Kitagawa H, Takahashi S. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stages. *Proc. Second Int. Conf. Mech. Behav. Mater., Metals Park: American Society for Metals; 1976, p. 627–31.*
- [8] Murakami Y. Material defects as the basis of fatigue design. *Int J Fatigue* 2012;41:2–10. doi:10.1016/j.ijfatigue.2011.12.001.
- [9] FKM. Analytical Strength Assessment of Components. 6th ed. VDMA Verlag; 2013.