



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék

**Vasúti féktárcsák továbbfejlesztése
új öntöttvas anyagok alkalmazásával**

Weber Franz-Josef
okl. gépészmérnök

PhD értekezés téziszfüzet

Témavezetők
Prof.Dr. Zobory István, professzor emeritusz
Dr. Tulipánt Gergely, egyetemi docens

Budapest

2019

Tézisek

A cél vasúti járművek féktárcsáinak továbbfejlesztése, figyelembe véve az új öntöttvas fajták jellemzőit. Bemutatom és értékelem a közúti és vasúti jármű féktárcsa technológiák helyzetképét [18],[12] A vasúti járművek féktárcsaiban már évek óta csaknem ugyanazokat a technológiákat és anyagokat használják. Az autóiparban alkalmazott féktárcsák között új fejlesztési vívmányok és más alkalmazások bukkannak fel, de ezek csak kivételes esetben, mondhatni soha nem kerültek vasúti járművekbe [1],[9],[10],[20].

Megvizsgáltam a jelenlegi vasúti féktárcsa anyagokat, az acél anyagok és az új öntöttvas termomechanikai tulajdonságait, különösen a hőmérséklet-vezetési tényezőt (α_t), a fajlagos hőkapacitást (c_p), a hővezetési tényezőt (λ), a hőtágulási tényezőt (α_l), a folyáshatárt ($R_{p0,2}$) és a szakítószilárdságot (R_m).

1. tézis:

Ipari kutatás szolgáltatotta mérési eredmények [15],[16],[20] elemzésével feltártom, hogy az új, nagy széntartalmú öntöttvasak a féktárcsák esetében a λ hővezetési tényező és az α_t hőmérséklet-vezetési tényező szempontjából kedvezőbbek, mint az eddig használt lemezgrafitos vasöntvények vagy a kovácsolt acél féktárcsák:

Ezen belül $\pm 5\%$ pontossággal

- a) az eddig lemezgrafitos öntöttvasnál képest a λ hővezetési tényező középértékben 8%-kal és az α_t hőmérséklet-vezetési tényező, középértékben 10% -kal nő
- b) az eddig használt kovácsolt acélhoz képest a λ hővezetési tényező középértékben 45% és a α_t hőmérséklet-vezetési tényező, középértékben 50% -kal értékkel nő

(részletéve az értekezés 6.1. fejezetében)

2. tézis:

Ipari kutatás szolgáltatotta mérési eredményeket elemzésével [15],[16],[20] elemzésével feltártom, hogy az új, nagy széntartalmú öntöttvasak $R_{p0,2}$ folyáshatár és R_m szakítószilárdság szempontjából hátrányosabb, mint az eddig használt lemezgrafitos vasöntvények vagy a kovácsolt acél féktárcsák:

Ezen belül $\pm 5\%$ pontossággal

- a) az eddig lemezgrafitos öntöttvasnál képest a $R_{p0,2}$ folyáshatár és a R_m szakítószilárdság középértékben 30% értékkel csökken.

b) az eddig használt kovácsolt acélhoz képest a $R_{p0,2}$ folyáshatár és a R_m szakítószilárdság középértékben 80% értékkel csökken.

(részletéve az értekezés 6.1. fejezetében)

3. tézis:

Végelemes számítások eredményinek [55],[s5],[s7] elemzésével bizonyítottam, hogy a féktárcsa az új lemezgrafitos anyagból kerékhez vagy tengelyhez való csatlakozása kedvező kialakításának eredményeképpen a féktárcsa súrlódófelület közeli helyein a termomechanikai feszültségek több, mint 30%-kal csökkenthetők fékezés folyamat során. (részletéve az értekezés 7.5. fejezetében)

4. tézis:

Végelemes számításokkal eredményinek [8],[s6],[s1] elemzésével bizonyítottam, hogy nagy hővezető képességű anyagok felhasználásával a féktárcsa súrlódási felület közepső hőmérséklete több, mint 65°C-kal csökkenthető a számításaim szerint legnagyobb 320km/h sebességről történő fékezés során. Ez a hőmérséklet csökkenés lehetővé teszi az UIC szabványos fékbetétek széleskörű felhasználását. (részletéve az értekezés 7.4. fejezetében)

A kutatás előzményei, indoklása, célja

A vasúti jármű alapvető árendszereinek egyike a fékrendszer.

A mai gyakorlat szerint, a féktárcsák alapanyaga az lemezgrafitos öntöttvas [12]. Abban az esetben, amikor speciális körülmények indokolják, például nagy sebesség vagy alacsony tengelyterhelés igénye, a féktárcsákat acélból vagy alumíniumból készítik [1],[18],[6] Erre a felhasználásra azonban alapvetően egyik anyag sem optimális. Az alumínium azért nem, mert meghibasodás esetén a nagy hőfejlődés hatására vesztesen csökken a súrlódási tulajdonság. Az acél pedig azért nem, mert a hővezető képesség és a hőkapacitás nagyon alacsony, így speciális fékbetétre van szükség.

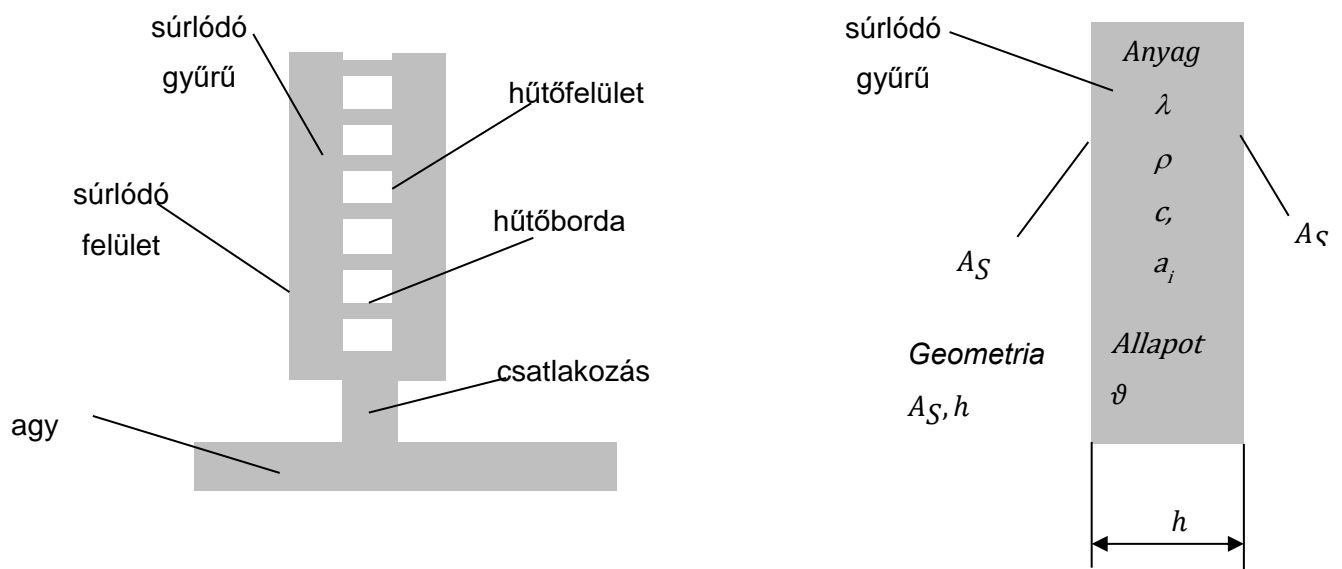
Az elmúlt húsz évben a gépjárműipar motor és féktárcsa fejlesztései új öntöttvas fajtákat is eredményeztek. Az egyik ilyen öntöttvas például a lamellás grafit helyett vermikuláris grafitot tartalmaz [10], egy másik pedig megnövelt széntartalom aránnyal bír [9],[11].

A féktárcsa formák és anyagi tulajdonságok területén végzett elmélyült irodalomkutatás után, általános analitikus számításokra kerül sor. Az számítások eredményként meghatározásra kerül a féktárcsa súrlódógyűrű vastagságának és a súlyának függése az

egyes alternatív anyagok tárcsafelületi súrlódási és kopási tulajdonságaitól. Ezután FEM számításra támaszkodó elemző következik, ami a féktárcsa deformációira és féktárcsa kisciklusú kifáradás vizsgálatra terjed ki.

Az értekezés célul tűzi ki kiválasztott féktárcsarendszereknek forgó alkatrészekhez történő csatlakoztatáshoz megfelelő technológiák feltárását.

Módszertan



ábra 1: A féktárcsa alrész: a súrlódó gyűrű tulajdonságai

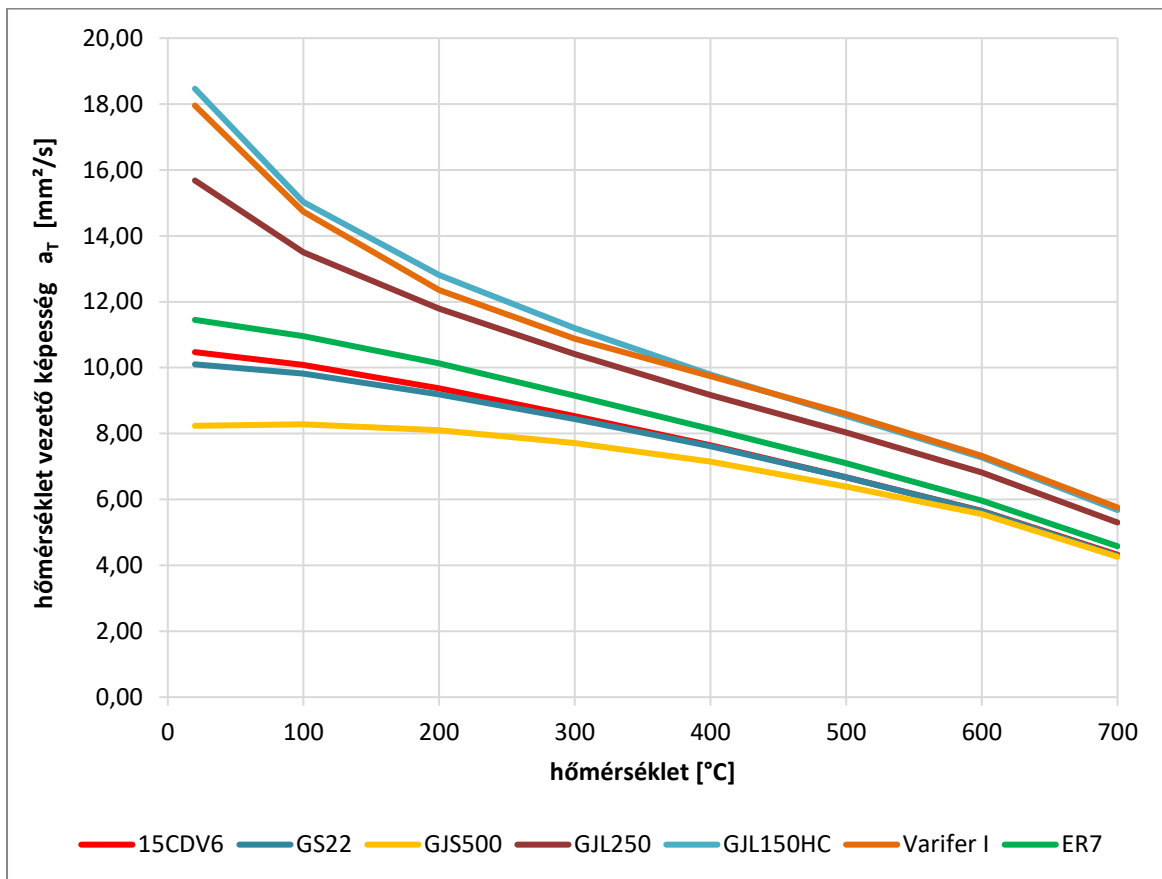
A felhasználható megoldások gyors megtalálásához az eredetileg végtelen oldal irányú kiterjedés folyik a kutatás. Ebben a tanulmányban a oldal irányú kiterjedés gyorsan csökkenthető az elérhető megoldásokká a korlátozott költségköltségek miatt. A vasúti jármű fékének sajátosságait, amelyeket a alkalmazott vezérlőrendszer és a vezérlés határoz meg, funkcionálisan elemezzük a hatáslánc vizsgálata során.

A lehetséges megoldási megoldások halmaza különálló kiterjedésre osztható. Egyrészt a súrlódó tárcsák megoldások halmaza, ami a féktárcsákat és a belsőégésűmotorok anyagait foglalja magában, melyek az utóbbi 8 évben kerültek bevezetésre. A második megoldása halmaza magában foglalja a súrlódó tárcsa összekapcsolását a forgó alkatrészekkel. Itt is azokra a megoldásokra koncentrálna, amelyeket az elmúlt nyolc évben vezettek be vagy szabadalmaztattak.

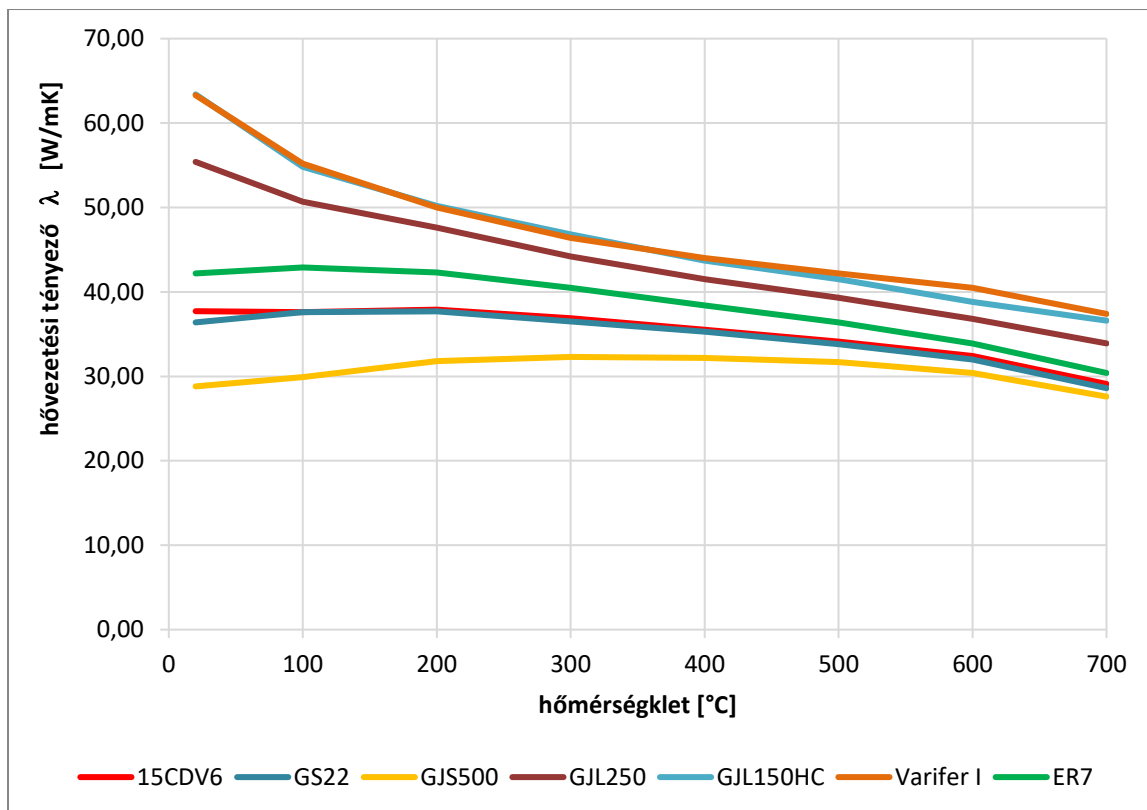
A kiválasztott technológiák potenciáljai a féktárcsa referenciatömege alapján lehet megbecsülni. Kisebb jelentőségű tényezőként a gyártás költségei kerülnek számításba. E vizsgálat keretében elegendő a költségek meghatározása a szükséges gyártási lépések egyszerű becsléseivel. Az összehasonlítást a GJL 250 sűrűdó anyagból készült, hagyományos, tengelyirányban osztott féktárcsa referenciaértékével végeztem

1. tézis

Az új, nagy széntartalmú öntöttvas minőségi tulajdonságai kedvezőbb tulajdonságot mutatnak a féktárcsák esetében a hővezetés és a hőkapacitás szempontjából, mint a szokásos lemezgrafitos vasöntvények vagy a kovácsolt acél féktárcsák



ábra 2: A hőmérséklet vezetési tényező a_T [15],[20]



ábra 3 A hővezetési tényező - λ [15],[20]

A hőmérséklet vezetési tényező az összes vizsgált anyag hőmérsékleti tartományában növekedő hőmérséklettel csökken. A három anyagcsoport lemezgrafitos öntöttvas, gömbgrafitos öntöttvas és az acél egyértelműen eltérő viselkedést mutat. Alacsony hőmérsékletre az öntöttvas fajták hőmérséklet vezetési tényező 1,5-nél nagyobb, mint az acélok hőmérséklet vezetési tényezője. Magasabb hőmérsékleten a különbségek csökkennek, de még mindig jelentősek.

A fajlagos hőkapacitás a hőmérséklet emelkedésével szigorúan monoton módon növekszik az összes vizsgált anyag esetében 20 °C és 700 °C között a majdnem kétszeresére nő. A lemezgrafitos öntöttvas körülbelül 5% -kal magasabb fajlagos hőkapacitással rendelkezik. A különbség a három anyagcsoport között a lemezgrafitos öntöttvas, gömbgrafitos öntöttvas és az acél között nem túl jelentős.

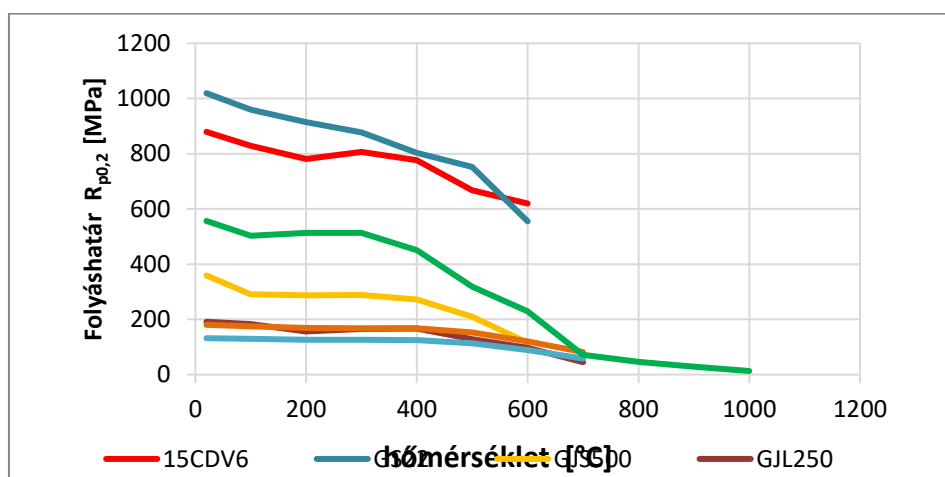
anyag	forrás	fajlagos hőkapacitás	hővezetési tényező	sűrűségű	hőmérséklet vezetési tényező
		c	λ	ρ	a_T
		J/kgK	W/mK	kg/m ³	mm ² /s
15CDV6	[53]	480	37,6	7814	10,02
GS22	[53]	490	37,6	7801	9,84
GJS500	[53]	510	29,9	7124	8,23
GJL250	[53]	520	50,7	7214	13,52
GJL150HC	[68]	510	54,8	7135	15,06
Varifer I	[68]	520	55,2	7176	14,79
ER7	[53]	500	42,9	7836	10,95
15CDV6 vs. GJL150HC		0,98	1,08	0,99	1,11
GJL500 vs. GJL150HC		1,06	1,46	0,91	1,50

táblázat 1: A vizsgált anyagok termomechanikai tulajdonságai 100°C-nél

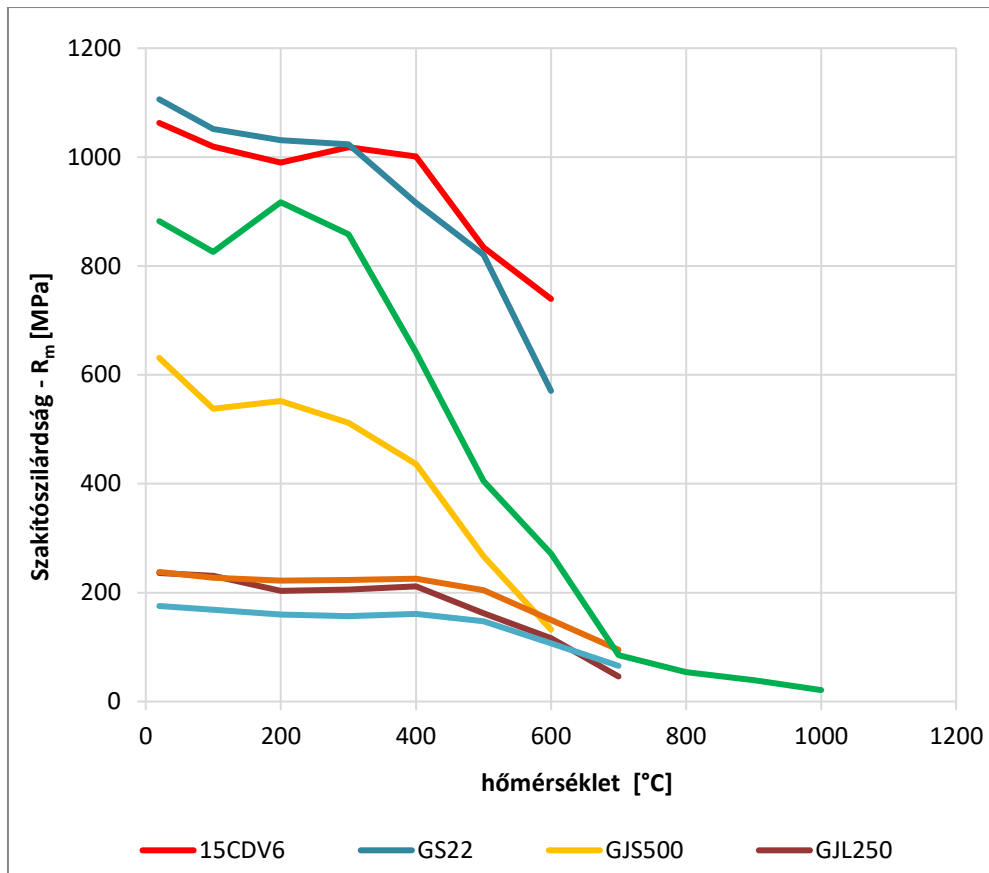
A lemezgrafitos öntöttvas GJL150HC, GJL250 és Varifer bizonyultak a legjobb teljesítményű anyagoknak.

2. tézis:

Az új, nagy széntartalmú öntöttvas minőségi tulajdonságai kedvezőtlen tulajdonságot mutatnak a folyáshatár és a szakítószilárdság szempontjából, mint a szokásos lemezgrafitos vasöntvények vagy a kovácsolt acél féktárcsák.



ábra 4: A folyáshatár- $R_{p0,2}$ [15],[20]



ábra 5: A szakítószilárdság - R_m [15],[20]

A folyáshatár, mint elsődlegesen figyelembe vett szilárdsági érték, a következőképpen alakul. Az acélok szilárdsága sokszor (3-6szor) nagyobb mint az öntöttvasoké. Érdemes megjegyezni, hogy a 15CDV6 és az ER7 folyáshatára enyhén növekszik a hőmérsékleti tartományban, nagyjából 300 °C -ig. Az különbség kicsit csökken a hőmérséklettel, de lényegében megmarad. Varifer azonban eléri a GJL250 anyag szilárdsági értékeit, és ez lényegesen magasabb, mint a GJL150HC. Ez különösen akkor lehet fontos, ha öntött bordák használnak a csatlakozás a súrlódó gyűrű és az agy között, amivel a gyorsított súly és a fékezési momentumok átadásra kerülnek.

A szakítószilárdság, mint másodlagosan figyelembe vett szilárdsági érték, a következőképpen alakul. Az acélok szilárdsága sokszor (3-6szor) nagyobb, mint az öntöttvasoké. Érdemes megjegyezni, hogy a 15CDV6 és az ER7 szakítószilárdsága enyhén növekszik a hőmérsékleti tartományban, nagyjából 300 °C -ig. Az különbség kicsit csökken a hőmérséklettel, de lényegében megmarad. Varifer itt is eléri a GJL250 anyag szilárdsági értékeit, és ez lényegesen magasabb, mint a GJL150HC-hoz tartozó érték.

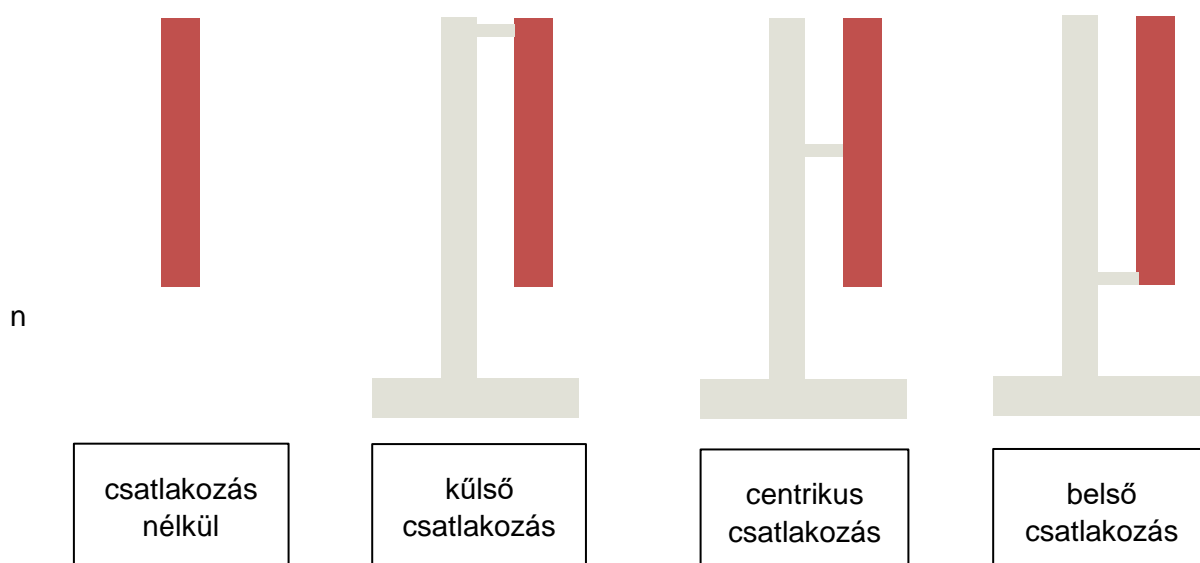
anyag	forrás	folyás- határ	szakító- szilárdság	rugalmassági modulusz	Poisson tényező	hőtágulási tényező
		$R_{p,0,2}$	R_m	E	ν	α_i
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		1/K
15CDV6	[53]	829	1019	205000	0,30	1,18E-05
GS22	[53]	959	1051	199500	0,30	1,24E-05
GJS500	[53]	291	538	168000	0,26	1,15E-05
GJL250	[53]	183	231	102000	0,26	1,09E-05
GJL150HC	[68]	129	168	108300	0,26	1,10E-05
Varifer I	[68]	175	227	122000	0,26	1,13E-05
ER7	[53]	556	826	202000	0,30	1,14E-05
15CDV6 vs. GJL150HC		0,70	0,73	1,06	1,00	1,01
GJL500 vs. GJL150HC		0,16	0,16	0,53	0,87	0,94

táblázat 2: A vizsgált anyagok termomechanikai tulajdonságai 100°C-nél

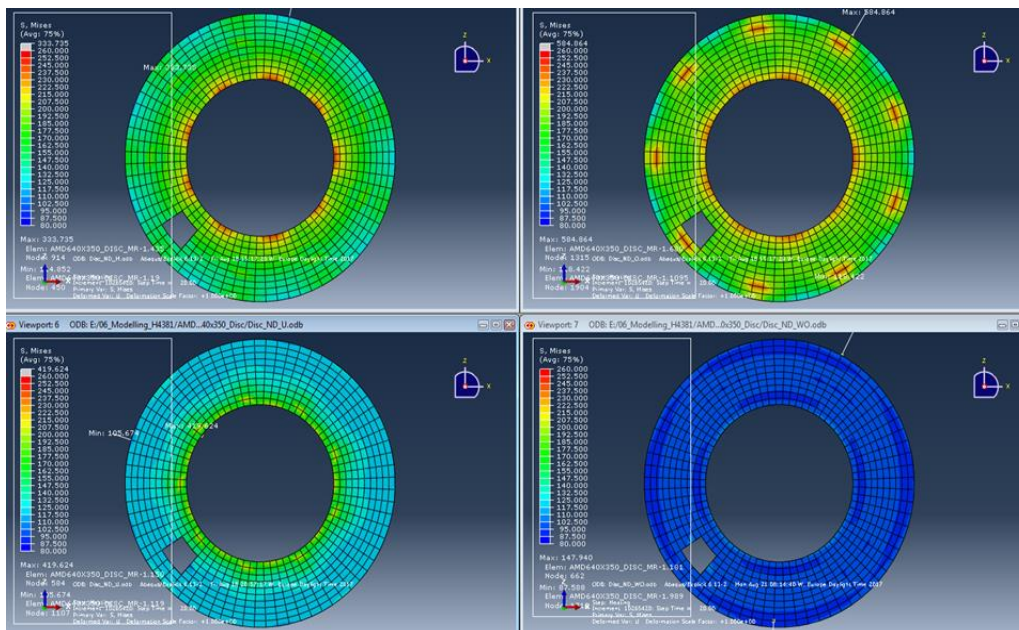
Az acél 15CDV6, GS22 és ER7, bizonyultak a legjobb teljesítményű anyagoknak

3. tézis:

A féktárcsa kerékhez vagy tengelyhez való csatlakozása kedvező kialakításának eredményeképpen a termomechanikai feszültségek több, mint 30%-kal csökkenthetők fékezési folyamat során



ábra 6: A vizsgált geometria változások



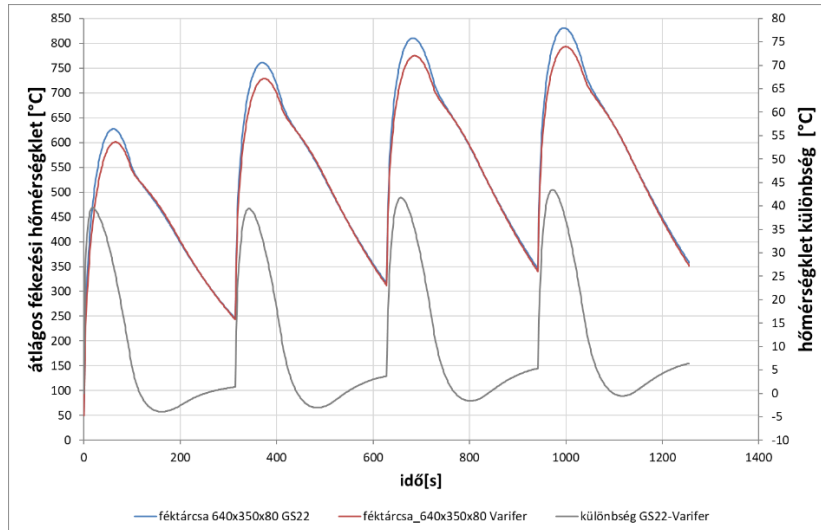
ábra 7: A Mises-féle feszültség a súrlódó felületen [17]

A súrlódó felületre eső feszültségek a féktárcsában továbbra is kicsik, anélkül, hogy a felületre közvetlenül kapcsolódnának a bordák. Az súrlódó felületeken forró pontok jelennek meg a kötési helyeken, pedig a kötések a hűtőfelületen vannak. Ezen kívül a feszültségi szint globálisan nagyobb mindhárom csatlakozástípus esetében, mint az irreális csatlakozás nélküli súrlódó felületek esetén. Különösen kritikus a belső sugár. A külső rögzítési pont megakadályozza a teljes súrlódó gyűrű szabad elmozdulását, és a hotspotok ismét megjelennek a külső csatlakozási ponttól befelé eső részen.

A rögzítési pontoknak globális hatása is van, még akkor is, ha a féktárcsa a rögzítési ponttól távol helyezkedik el, a feszültség jelentősen növekszik (lásd különösen a súrlódó gyűrű külső széléhez köttet képét).

4. tézis:

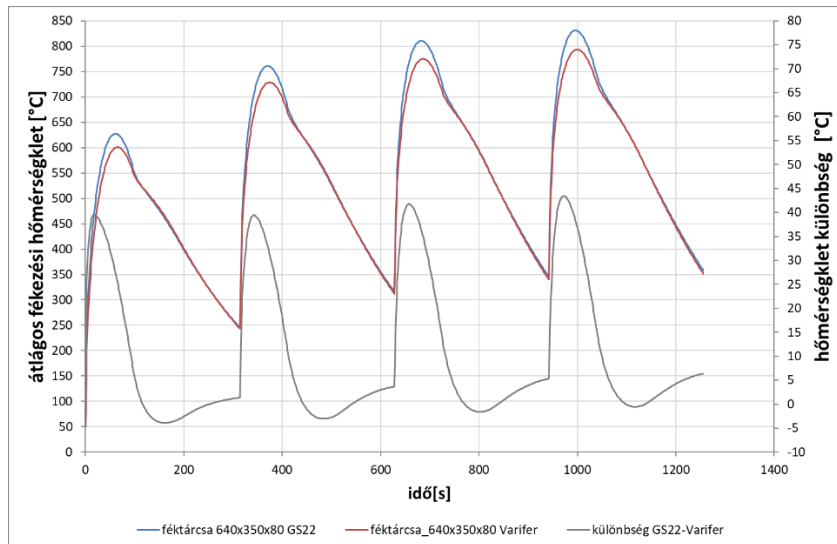
A nagy hővezető képességű anyagok felhasználásával a súrlódási felület hőmérséklete több, mint 65°C-kal csökkenthető a számításaim szerint legnagyobb 320km/h sebességről történő fékezés során.



nagy energia megfékezése - WBS 640x350x80 GS22 vs. Varifer

■ Maximum átlagos hőmérséklet GS22:	831 °C
■ Maximum átlagos hőmérséklet Varifer:	793 °C
■ Maximum hőmérséklet különbség:	43 °C

ábra 8: A hőmérséklet, sebesség - idő diagram nagy sebességnél [8]



nagy energia megfékezése - 640x350x80 GJL vs. Varifer

■ Maximum átlagos hőmérséklet GJL250:	784 °C
■ Maximum átlagos hőmérséklet Varifer:	767 °C
■ Maximum hőmérséklet különbség:	18 °C

ábra 9: A hőmérséklet, sebesség - idő diagram nagy sebességnél [8]

Az öntöttvas használatával a bordák geometriája könnyen illeszthető megnövelt felületekkel jobb hűtéssel. Ez ismét a súrlódási felület csökkenéséhez vezet.

Az anyagváloztatás és a borda geometriamódosítás együttes alkalmazásával a féktárcsa maximális hőmérséklete 831°C-ról 767 °C-ra, azaz 65 °C-kal csökkenthető a 4.dig fékezésnél

A hőmérséklet csökkentése fontosabb az első fékezésnél, ami minden járműtípusnál átvizsgáltnak.

Az első fékezésnél a féktárcsa maximális hőmérséklete 625 °C-ról 575 ° C-ra csökkenthető, azaz 50°C-os hűlés érhető el. A 600 °C határ hőmérséklet alatt már egyszerűbb fékbetétek használata is lehetséges.

Összefoglalás, továbbfejlesztési irányok, gyakorlati hasznosítási lehetőségek

Összefoglalás

Az új, magas széntartalmú öntöttvasak jobb üzemi jellemzőket nyújtanak mind a hővezetést, mind a hőkapacitást tekintve, mint a lemezgrafitos, a króm-molibdén-vanádium ötvözött kovácsolt acél és a hagyományos öntöttvas. A féktárcsák szempontjából kritikus a hőmérséklet vezetési tényező. A λ hővezetési tényező körülbelül 8% -kal növekszik a hagyományos lemezgrafitos öntöttvashoz képest, az a_t hőmérséklet vezetési tényező pedig körülbelül 11% -kal. A λ hővezetési tényező a szokásos kovácsolt acélhoz képest körülbelül 45% -kal, az a_t hőmérséklet vezetési tényező pedig körülbelül 50% -kal növekszik. A féktárcsa és a tengely összeköttetésének kedvező kialakítása révén a hőfeszültségek a fékezés során 31% -kal csökkenthetők. Nagy λ hővezetési tényezőjű anyagok felhasználásával a nagy v sebességnél felmelegedő súrlódó felület hőmérséklete több mint 65 ° C-kal csökkenthető. Ez lehetővé teszi az UIC alakú fékbetétek széleskörű felhasználását

Gyakorlati hasznosítási lehetőségek

Az öntöttvas anyagok egyértelmű potenciált rejtnek magukban vasúti járművek féktárcsájaként történő felhasználásakor. Az első vizsgálatok azt mutatják, hogy használatukkal hatékonyan csökkenthető a fékezési folyamat során kialakuló súrlódásos érintkezés hőmérséklete, valamint a féktárcsa feszültségei és deformációi. A gyakorlati alkalmazás szempontjából fontos azonban az új féktárcsa típusok kifejlesztése, amelyek kihasználják ezen anyagok kedvező tulajdonságait. A súrlódó felület tulajdonságán kívül az anyagjellemzők felhasználhatók a hűtési rendszer és a csatlakozás optimalizálásánál is. A hűtési rendszer tervezésénél a nagyobb hővezető képesség és jobb alakíthatóság az, amivel végül a hűtőbordák geometriája szabadabban választható meg a jobb hőelvezetés érdekében.

Továbbfejlesztési irány

Mint következő lépések, három kutatási területet látok:

- A fékbetét – féktárcsa együttműködése, termomechanikai és mechanikai szempontból új öntöttvas anyagok alkalmazásával. (deformáció, hőeloszlás)
- Az optimális csatlakozási hely és merevség kialakítása az új öntöttvas anyagoknál
- Az optimális hűtő rendszer kialakítása nagysebességű vonatoknál új öntöttvas anyagok alkalmazásával. (hűtőborda forma)

Saját irodalom

[s1]**Weber, F.J.:**

MultiPhysicsSimulation zur Lösung der Zielkonflikte bei der Entwicklung
klotzgebremster Eisenbahnräder.

6. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 2013

[s2]**Strommer, K. / Weber, F.J.:**

The ADI spoke wheel-new developments to meet new requirements

9, International Wheelset Congress, 16.-20. April 2019, Venice

[s3]**De la Prida, R. / Weber, F.J.:**

Development and Homologation of a Monobloc Wheel according EN 13979 /
UIC 510-5. Case Analysis of Cargo Alpine ®

First European Forum on Railway Running Gears – June 2011 – Leganés. Madrid.
Spain

[s4]**Kleinschuster, C. / Weber, F.J.:**

Heat Transfer in Railway Brake Disks - a critical review

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and
Rapid Transit (tervezett)

[s5]**Raninger, P./ Ecker, W./ Marsoner, S./ Schinagl, G./ Weber, F.J.**

Modeling of the in-service behavior of brake disks for railway applications,

Thermophysical data and low cycle fatigue behaviour, Int. J. Fatigue (tervezett)

[s6]**Stine, G. / Weber, F.J. / Zenz, R.:**

Hochleistungsbremsscheiben und Hochleistungsräder für Hochgeschwindigkeitszüge
ZEVrail Glasers Annalen 146 (tervezett)

[s7]**Weber, F.J., Zenz,R.;**

RAIL WHEEL WITH WHEEL-MOUNTED BRAKE DISK

AT514902 (A1) — 2015-04-15

Irodalom

- [1] **Alsaif, M. A. / Dahm, K. L. / Shrestha, S. / Dearnley, P. A. / Barton, D. C.:** Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) treated aluminium metal matrix composite rotors for lightweight automotive brakes. In: 6th European Conference on Braking, Lille, Frankreich, 24./25. November 2010
- [2] **Bertodo, R.:** Grey cast irons for thermal-stress applications Journal of Strain Analysis, Volume: 5 issue: 2, page(s): 98-109 April 1, 1970
- [3] **Blau, P. J. / Jolly, B. C. / Qu, J. / Peter, W. H. / Blue, C. A.:** Tribological investigation of titanium-based materials for brakes. In: Wear 263 (2007), S. 1202–1211, 2007
- [4] **Cueva, G. / Sinatora, A. / Guesser, W. L. / Tschiptschin, A. P.:** Wear resistance of castirons used in brake disc rotors. In: Wear 255 (2003), S. 1256–1260, 2003
- [5] **Füllgrabe, F.:** Neue Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe, Dissertation TU Darmstadt, 2012
- [6] **Kevorkijan, V. M. / Dragojevič, V. / Smolar, T. / Lenarčič, D.:** A brake disc in Al-based composite. In: Materiali in Tehnologije 36 (2002), 2002
- [7] **Kleiner, S., und Track, K.:** SiMo1000 – Ein aluminium-legiertes Gusseisen für Hochtemperaturanwendungen Giesserei 97 (2005)
- [8] **Kleinschuster, C.:** Wellenbremsscheibe Performancevergleich, Siemens RS BG EN SDE BRA, Graz, 2018, (kiadatlan)
- [9] **Keiner, W., Werning, H.:** Hochgekohter Grauguss GG-15HC—Idealer Werkstoff für Bremsscheiben und Bremstrommeln, Konstruieren Giessen 15 (4) (1990)
- [10] **Lampic, M., Walz, M.:** Innovative Eisengusswerkstoffe für Automobilteile - Six Sigma“ konform. konstruieren + giessen 30 (2005) H. 4, S. 16 - 22.
- [11] **Langmayr, F., Zieher, F. & Lampic, M.:** Thermomechanik von Gusseisen für Zylinderköpfe MTZ Motortech Z (2004) 65: 298.
- [12] **Le Gigan, G.; Lundén R.; Vernersson T.:** Improved performance of brake discs: State-of-the-art survey, Chalmers Applied Mechanics, Gothenburg Sweden, 2011, 55 pp.
- [13] **Lindecke, R.;** Thermal Behavior of Materials, ME2105
- [14] **Neudeck, D.; Wüllner, A.:** Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben. In: Breuer, nB.; Bill, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. ATZ/MTZ-Fachbuch, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006

- [15] **Raninger, P.; Ecker, W.:** . Projekt A6.15 Modeling of the in-service behavior of wheel-mounted brake disks for railway applications, MCL-A615, Leoben, 2014
- [16] **Raninger, P.; Ecker, W.:** . Projekt A6.15 Modeling of the in-service behavior of wheel-mounted brake disks for railway applications, Thermophysical data, MCL-A615-A-P1, Leoben, 2014
- [17] **Ristic, N.:** Einfluss der Anbindungsstelle an Spannungen und Verformungen der Bremsscheibe, Siemens RS BG EN SDE BRA, Graz, 2017, (kiadatlan)
- [18] **Saumweber, E.; Gerum, E.; Berndt, J.:** Grundlagen der Schienenfahrzeugbremse – Darmstadt, Hestra-Verl., 1990, (Archiv für Eisenbahntechnik ; 43)
- [19] **Severin, D.; Franke, U.; Lampic, M.:** Steigerung der Lebensdauer von Bremsscheiben durch beanspruchungskonforme Werkstoffentwicklung und werkstoffgerechte Prüfung. In: ATZ 104 (2002), Nr. 11, S. 1016–1023
- [20] **Walz, M / Becker R.:**
The development of cast iron materials for brake discs (Die Entwicklung von Gusseisenwerkstoffen für Bremsscheiben), 1. Internationale Fachtagung CastTec 2012, Die Welt der Gusseisenwerkstoffe - Vielfalt für die Zukunft, Krefeld, DE, 8.-9. Nov, 2012