

DIACONU, VASILE-LUCIAN – SJÖGREN, TORSTEN – SKOGLUND, PETER – DIÓSZEGI ATTILA

A molibdén hatása az öntöttvasak termomechanikus hőfárasztási tulajdonságaira

A vizsgálat célja a molibdénnel ötvözött átmeneti- és lemezgrafitos öntöttvasak hőfárasztási tulajdonságainak meghatározása és összehasonlítása volt. A kísérleti program szerint négy különböző molibdéntartalmú átmeneti- vagy vermikulárgrafitos és egy GJL 300 minőségű lemezgrafitos öntöttvasból öntött hengerből kimunkált próbatesten végeztük a méréseket. A próbatesteket különböző átmérőjű öntött hengerekből munkáltuk ki azzal a céllal, hogy kimutatható legyen az eltérő dermedési és lehülési viszonyok hatása is. A vizsgálatok eredményei minden esetben összefüggést mutattak a molibdéntartalom és az átmenetigrafitos öntöttvas termomechanikus hőfárasztási tulajdonságai között.

1. Bevezetés

A gépjárműmotoroknak a korábban gyártottakhoz képest nagyobb hőmérsékleten és nagyobb nyomáson kell működniük ahhoz, hogy megfeleljenek az új teljesítménykövetelményeknek és a szigorúbb kipufogógáz-kibocsátási előírásoknak. Ennek érdekében a motorgyártók egyre több, korábban lemezgrafitos öntöttvasból gyártott alkatrészt átmenetigrafitos öntöttvasból készítenek (pl. motorblokk), hogy a hőigénybevételnek kitett öntvények termikus kifárasztási ellenállása nagyobb legyen. Ez különösen igaz a dizelmotor-hengerfejek esetén, ame-

lyek a leginkább hajlamosak a hőfárasztási károokra és kúszási jelenségekre az égéstérhez közeli helyzetük miatt.

A termomechanikus hőfárasztás (TMF) lényege az, hogy a szakítóvizsgálatoknál alkalmazotthoz hasonló, menetes befogófejjel rendelkező, de belső átmenő furattal kialakított próbatesteket előmelegítés után egy merev keretrendszerben rögzítik, majd szabályozott körülmények között, a próbatest eltöréséig, ciklikusan felhevítik és lehűtik. A hevítést a próbatest palástjára rögzített hőelemmel, a hűtést a furaton keresztül áramoltatott vízzel végzik. Felhevítés közben nyo-

mófeszültség, lehűtés közben húzófeszültség jön létre, s a fárasztást a hőmérséklet változása közben akadályozott méretváltozás hozza létre.

A termomechanikus fárasztás több mechanizmust foglal magába, a „tisztta” fáradásos igénybevétel mellett a nagy hőmérsékleten kialakuló kúszás és oxidáció közvetlenül hozzájárul a tönkremenetelhez [1].

A termomechanikus fárasztás terhelése általában kétféle, „in phase” (IP) vagy „out of phase” (OP) típusú. „In phase” típusú terhelés esetén a maximális hőmérséklet és nyúlás ugyanabban az időpontban fordul elő. Az „out of phase” típusú terhelésnél nagy hőmérsékleten nyomófeszültség, kis hőmérsékleten húzófeszültség lép fel a próbatestben. Az „in phase” típusú terhelés nagyobb valószínűséggel okoz kúszási kárt a nagy hőmérsékleten fellépő húzófeszültségek következtében. Az „out of phase” típusú terhelés esetén jobban észrevehető az oxidációs kár, mert nagy hőmérsékleten egy oxidhártya alakulhat ki, majd a törés a ciklus kis hőmérsékletű, húzófeszültségnek kitett fázisában jön létre, ahol az oxidhártya törékenyebb [2].

Amikor külső feszültséggel terhelünk egy munkadarabot, az úgy viselkedik, hogy ezzel a feszültséggel egyenlő és ellentétes irányú belső feszültség alakul ki benne. Ha ez a terhelés folyamatos, akkor a belső feszültség az idő függvényében csökkenni fog.

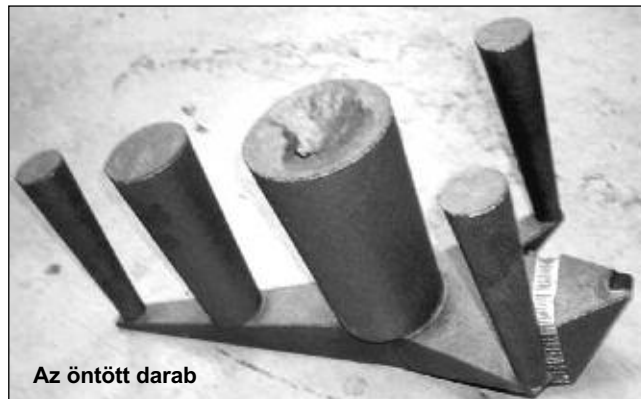
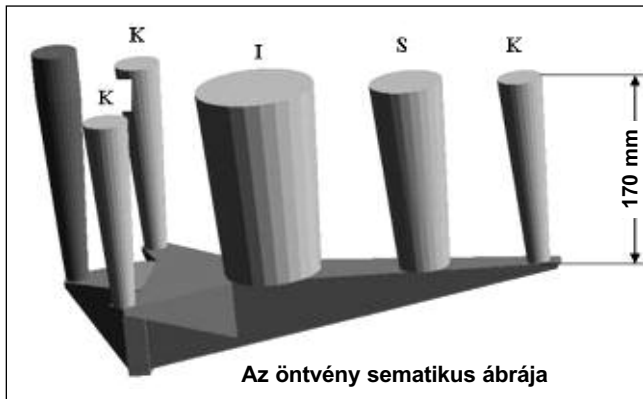
Ezt a jelenséget feszültségrelaxációnak nevezzük. A feszültségrelaxáció kialakulása egy anyagban vagy munkadarabban azzal magyarázható, hogy a rugalmas alakváltozás

Diaconu, Vasile-Lucian okl. kohómérnök. 2004-ben végzett a Miskolci Egyetem Anyag- és Kohómérnöki Karán. 2007 óta doktorandusz a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolában. 2012 decemberében sikeresen megvédte doktori dolgozatát.

Sjögren, Torsten PhD, az SP Technical Research Institute of Sweden (Borås, Svédország) munkatársa és a Jönköpingsi Egyetemen a Gépészeti, öntéstechnológiai és öntészeti anyagok tanszék vasöntészeti témájú kutatómunkával foglalkozó csoportjának tagja.

Skoglund, Peter PhD mérnök, a SCANIA CV AB Materials Technology, UTMT, Södertälje, Svédország munkatársa.

Dr. habil. Diószegi Attila PhD a Jönköpingsi Egyetem Gépészeti, öntéstechnológiai és öntészeti anyagok tanszékének kutatóprofesszora, a Miskolci Egyetem címzetes egyetemi tanára. Kutatási területének középpontjában az öntöttvas áll. További információ: <http://hj.se/jth/en/research/staff/materials-and-manufacturing/attila-dioszegi.html>



■ 1. ábra. A próbatetek kimunkálásához öntött próbadarabok

képlékeny alakváltozássá alakul át. A feszültség csökkenésének mértéke az ötvözőelemek mennyiségének és minőségének, a hőmérsékletnek és az időnek a függvénye [3].

A feszültség csökkenését a próbatest adott terhelése mellett hosszú ideig tartó és állandó nagy hőmérsékleten mérik [4, 5, 6].

2. Kísérleti körülmények

A vizsgálatokat négy különböző molibdéntartalmú átmenetigrafitos és egy lemezgrafitos öntöttvas adagból kimunkált próbatesteken végeztük. Az átmenetigrafitos öntöttvas molibdéntartalma 0,0 és 1,01% között változott. Az egyes adagok összetétele az 1. táblázatban látható. Az átmenetigrafitos öntöttvas adagok jelölése

V, a lemezgrafitos adag jelölése L.

A vizsgálatokhoz az 1. ábrán látható öntvényt furángyantás homokból készített formába öntöttük. A 2. ábrán látható próbatestet a különböző átmérőjű hengerekből munkáltuk ki. A K jelű próbatestnél $\varnothing 20$ mm, az S jelűnél $\varnothing 55$ mm, az I jelűnél $\varnothing 85$ mm volt a legkisebb méret.

A hőfárasztó vizsgálatához használt próbatest hossza 120 mm. Az öntött darabok hossza 170 mm volt, hogy az esetlegesen fellépő zsugorodási vagy más típusú hibák a próbatest kimunkálására használt öntvényrészben kívülre essenek.

A 2. táblázatban a vizsgált anyagok szobahőmérsékleten mért mechanikai tulajdonságainak átlagértéke és szórása látható.

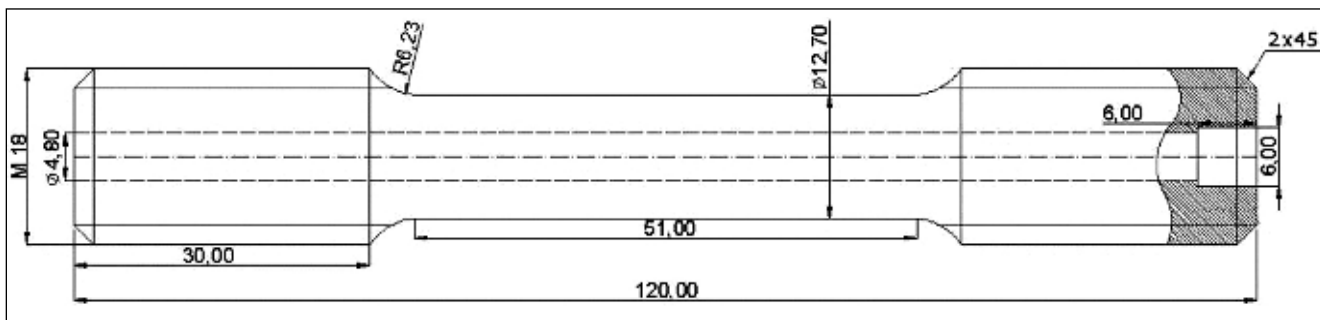
A mérési eredmények azt mutatják,

hogy 0,23% molibdén adagolásával növekszik minden vizsgált mechanikai tulajdonság, majd a további molibdénadagolás hatására csökken.

Az eutektikus összetételű olvadékban 0,23% fölötti molibdéntartalom esetén egyre nagyobb a primer dendritok aránya kristályosodás közben.

A primer dendrites szerkezet a grafit mennyiségét és eloszlását is befolyásolja. A grafit mennyisége (aránya) csökken, térbeli eloszlása dendritközi jellegűvé válik, ezáltal a szakítópróbatest törési felülete a nagyobb grafit-tartalmú részeken jön létre, ami a szilárdsági tulajdonságok csökkenését okozza.

Az átmenetigrafitos öntöttvas szövetszerkezetének jellemzése a Swerea SWECAST közreműködésével készült. A vizsgált terület 28,74



■ 2. ábra. A vizsgálatokhoz használt próbatest rajza

1. táblázat. A vizsgált adagok összetétele

Jelölés	Kémiai összetétel, %											
	C	Si	Mn	P max.	S max.	Cr max.	Mo	Ni max.	Cu	Sn	Mg cca.	CE
1V	3,58	2,30	0,56	0,006	0,008	0,05	0,00	0,03	0,57	0,156	0,011	4,35
2V	3,55	2,21	0,59	0,012	0,009	0,04	0,23	0,03	0,59	0,146	0,011	4,29
3V	3,50	2,18	0,56	0,016	0,012	0,05	0,46	0,03	0,58	0,140	0,011	4,23
4V	3,70	2,20	0,58	0,032	0,009	0,04	1,01	0,03	0,60	0,146	0,011	4,44
1L	3,10	1,75	0,80	0,05	0,08		0,00		0,70			3,70

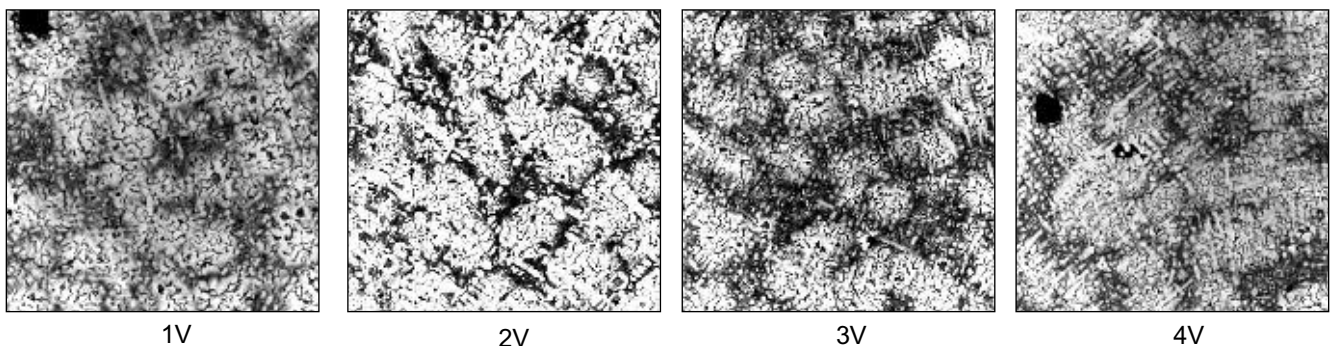
CE (karbonegyenérték) = C% + (Si% + P%)/3

2. táblázat. Az átmenetigrafitos öntöttvas mechanikai tulajdonságai szobahőmérsékleten

Jelölés	Öntvény- méret, (mm)	Szakító- szilárdság, (MPa)	0,2%-os határ, (MPa)	Nyúlás, (%)	Rugalmassági együttható, (GPa)	Brinell keménység, BHN
1V	Ø20	506 ± 8	404 ± 8	1,58	148 ± 4	231
	Ø55	463 ± 2	366 ± 1	1,63	144 ± 7	
	Ø85	423 ± 14	361 ± 4	1,08	152 ± 5	
2V	Ø20	557 ± 8	436 ± 1	1,83	154 ± 1	238
	Ø55	493 ± 56	392 ± 2	1,66	154 ± 4	
	Ø85	497 ± 8	395 ± 2	1,61	157 ± 1	
3V	Ø20	472 ± 9	427 ± 4	0,76	150 ± 0,3	243
	Ø55	463 ± 14	378 ± 1	1,35	151 ± 0,7	
	Ø85	460 ± 2	379 ± 2	1,30	155 ± 0,9	
4V	Ø20	310 ± 20	n/a	0,31	n/a	253
	Ø55	460 ± 32	391 ± 2	1,07	159 ± 13	
	Ø85	397 ± 67	381 ± 4	0,75	150 ± 1	

3. táblázat. Az átmenetigrafitos öntöttvas mikrostruktúrájával kapcsolatos adatok

Jelölés	Öntvény- méret, (mm)	Gömbösödési arány, (%)	Átmenetigrafit arány, (%)	A grafitrészcsek száma, (1/mm ²)	A grafitrészcsek átlagos területe, (µm ²)	A grafitrészcsek körszerűsége	A grafit átlagos hossza, (µm)	A perlit lemeztávolsága, (nm)	A porozitás maximális hossza, (µm)
1V	Ø20	9	85,2	150	768	0,35	52	226	300
	Ø55	7		239	473	0,35	45	283	62
	Ø85	12		232	456	0,41	41	327	205
2V	Ø20	6	84,5	339	322	0,33	36	198	277
	Ø55	13		214	497	0,40	42	289	277
	Ø85	15		380	936	0,40	56	267	416
3V	Ø20	4	83,8	274	281	0,32	35	172	233
	Ø55	7		367	387	0,34	39	251	556
	Ø85	9		393	768	0,35	52	276	324
4V	Ø20	5	77,8	269	323	0,33	36	140	1389
	Ø55	7		177	416	0,35	40	257	1778
	Ø85	8		204	613	0,36	48	279	627



3. ábra. Az Ø20 mm-es próbatestekről készült mikroszkópos felvételek (színes maratás, N = 200x)

mm² volt, ami meghaladja a szabványban [7] előírt vizsgálandó terület értékét (4 mm²). A 3. táblázatban szerepelnek az átmenetigrafitos öntöttvas mikrostruktúráját minősítő, képelemzés-sel meghatározott adatok. A 3. ábrán a próbatestek szövetéről színes maratás után készített felvételek láthatók.

A perlit lemeztávolságának meghatározása pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével három-öt helyen történt. A 3. táblázatban a mért legkisebb távolság szerepel, mivel ez felel meg leginkább a lemeztávolság merőleges irányú mérésének.

A molibdénrel ötvözés finomítja a perlitet, és ezzel az eutektikus cella méretét is. A molibdén egy intenzív karbidstabilizáló elem, a dendritágak peremén, a dendritközi térben dúsul, ami azt jelenti, hogy az olvadékban dúsul az ausztenit/olvadék határán. A vizsgált nagyobb molibdéntartalmú adagok esetén az eutektikus cellák között karbidfázisok találhatóak.

2.1. Hőfárasztó vizsgálatok

A vizsgálatokat más kutatóhelyek [8] által bemutatott rendszerhez hasonló műszer segítségével végeztük.

A termikus ciklus kezdetén a próbatestet felhevítettük 108 °C-ra. Ezen a hőmérsékleten történt a darab befogása. A beállítások után 80 másodperc alatt tovább hevítettük 600 °C-ra, ezen a hőmérsékleten tartottuk 150 másodpercig, majd 180 másodperc alatt hűtöttük le. A próbatest ismételt felhevítése azonnal folytatódott. A darab mindenféle axiális mozgása korlátozva volt, ezáltal a vizsgálat tengelyirányú feszültségciklusokból állt. A folyamat első tíz ciklusának hőmérséklet-és feszültségviszonyát a 4. ábrán mutatjuk be (az ábrán látható különbö-

4. táblázat. Hőfárasztási ciklusok száma a vizsgált anyagok esetén

Jelölés	Ø 20 mm			Ø 55 mm			Ø 85 mm
	Egyedi	Átlag	Szórás	Egyedi	Átlag	Szórás	Egyedi
1V	131 271 527	310	201	364 422	393	41	221
2V	992 892 1025	970	69	-			986
3V	676 1154 1544	1125	435	1086			-
4V	1806 898 2064	1589	612	-			-
1L	195 232 224	217	19	-			-

ző színárnyalatú görbék három anyagminőségből származó próbatestek értékei). A vizsgálatokat a darab töréséig folytattuk.

A töréshez tartozó ciklusszám adatait a 4. táblázat és az 5. ábra mutatja.

Megvizsgáltuk a molibdéntartalom, a vizsgált anyagok mikrostruktúrája (a perlit lemeztávolsága), valamint az átmenetigrafit aránya és a hőfárasztási ciklusok száma közötti összefüggéseket.

Az átmenetigrafit arányát (R, %) az alábbi képlet alapján lehet számolni:

$$R = \frac{S_{AG}}{S_{OG}} \times 100$$

ahol S_{AG} az átmenetigrafit, S_{OG} az összes grafit területe egy adott metallográfiai mezőben.

Az átmenetigrafit arányát egy képlemező szoftver segítségével határoztuk meg. A szoftver használja az Otsu-

féle szegmentálást és az egyszeri bináris nyitást [9].

A szegmentálás célja megtalálni azokat a küszöböt, amelyek az értékészletet intenzitás osztályokra bontják. Ennek eredménye az objektumok címkézése alapján az intenzitás osztályba sorolás.

A bináris nyitás és zárás az apróbb objektumok, a zaj eltüntetésére szolgál, és attól függően alkalmazandó, hogy a háttérből kívánunk-e szűri szükségtelenül detektált elemeket, avagy az objektumokban maradtak apró detektálatlan képpontok [9].

A 6. ábra a hőfárasztási ciklusok számának változását mutatja a molibdéntartalom, az átmenetigrafit-arány és a perlit lemeztávolság változásának hatására. A 6. ábrán bemutatott eredmények alátámasztják (bizonyítják) Wu Shengqing [10] állítását, amely szerint minél alacsonyabb az átmenetigrafit-arány, annál hosszabb a

hőfárasztásnak kitett próbatest élettartama.

2.2. Feszültségrelaxációs vizsgálatok

Megvizsgáltuk a termikus feszültség leépülésének időbeli változását, relaxációját is. A feszültségrelaxációs vizsgálatok során használt rendszer meggyezik a hőfárasztási vizsgálatok során használtak egyikével. A vizsgált darabokat a beömlőrendszerrel legtovábbra lévő, 20 mm átmérőjű próbatestekből munkálták ki.

A feszültségrelaxációs vizsgálatokat 350 és 600 °C-on végeztük. Lépései a következők voltak:

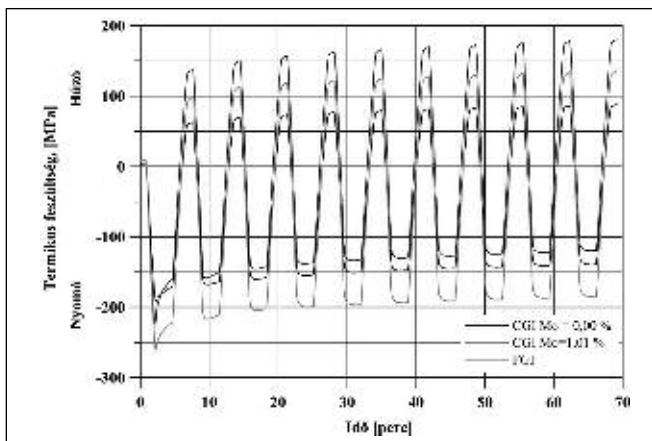
1. a próbatest felhevítése 108 °C-ra;
2. a próbatest mérőkeretbe rögzítése 108 °C-on;
3. a próbatest felhevítése 350, illetve 600 °C-ra;
4. hosszú ideig hőntartás a beállított hőmérsékleten.

A 7. ábrán látható a 350 és a 600 °C-on végzett feszültségrelaxációs mérések eredményeinek összehasonlítása három vizsgált anyagminőségből öntött próbatestek esetében.

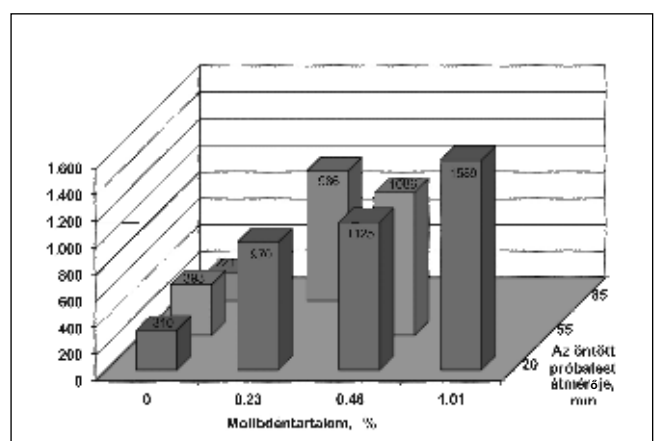
3. Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok megmutatták a molibdéntartalom és a hőfárasztási ciklusok száma közti kapcsolatot. A molibdéntartalom növelésével nő az átmenetigrafitos öntöttvas melegszi-lárdtsága. Az átmenetigrafitos öntöttvas termomechanikus fárasztási ellenállása nagyobb, mint a lemezgrafitos öntöttvasé.

A hőfárasztási ciklusok száma függ



4. ábra. A termikus feszültség változása az idő függvényében az első tíz ciklus alatt



5. ábra. Hőfárasztási ciklusok átlagértéke a molibdéntartalom függvényében különböző átmérőjű öntött próbatest esetén

a perlitlemez vastagságától is, amely egyébként a molibdén hatására finomodik. Minél finomabb a fémes mátrix, annál nagyobb a vizsgált öntöttvas termomechanikus hőfárasztási ellenállása.

Az átmenetigrafitos öntöttvas tulajdonságai, így a hőfárasztási ciklusok száma is, függ az átmenetigrafit arányától.

A molibdéntartalom jelentősen befolyásolja az átmenetigrafitos öntöttvasok feszültségrelaxációját. Minél több a molibdén, annál nagyobb a melegszilárdság. Jobb kúszási ellenállás esetén kisebb húzófeszültségek alakulnak ki a termomechanikus hőfárasztási vizsgálatok alatt, ezáltal a próbatestek hőfárasztási ellenállása, a töréshez tartozó ciklusok száma nő.

4. Köszönetnyilvánítás

A méréseket egy, az IEC – CIC (Institute Excellence Centre – Casting Innovation Centre), a Jönköpinger Egyetem, a Swerea SWECAST és a svéd öntőipar által finanszírozott projekt keretében végeztük. Külön köszönet illeti a Volvo Powertrain AB-t, ahol a projektben vizsgált anyagok próbadarabjait öntöttük, és a Scania CV AB-t, ahol a vizsgálatokat végeztük.

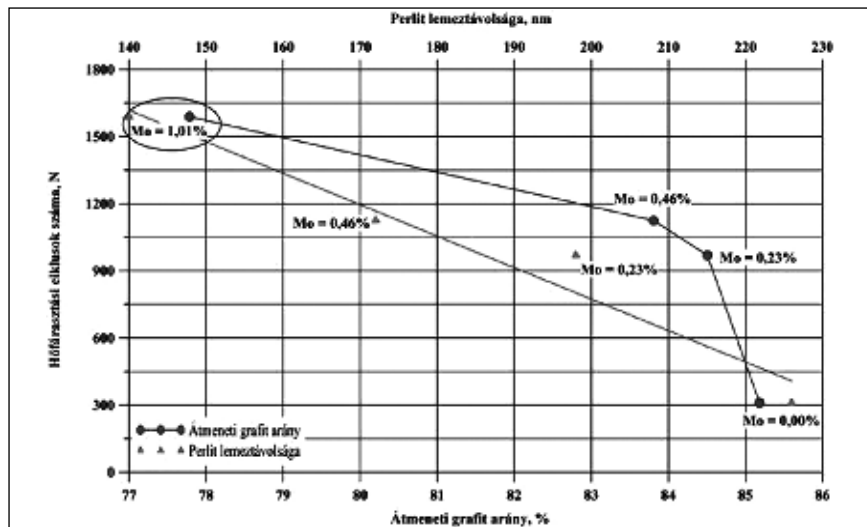
A közlemény a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

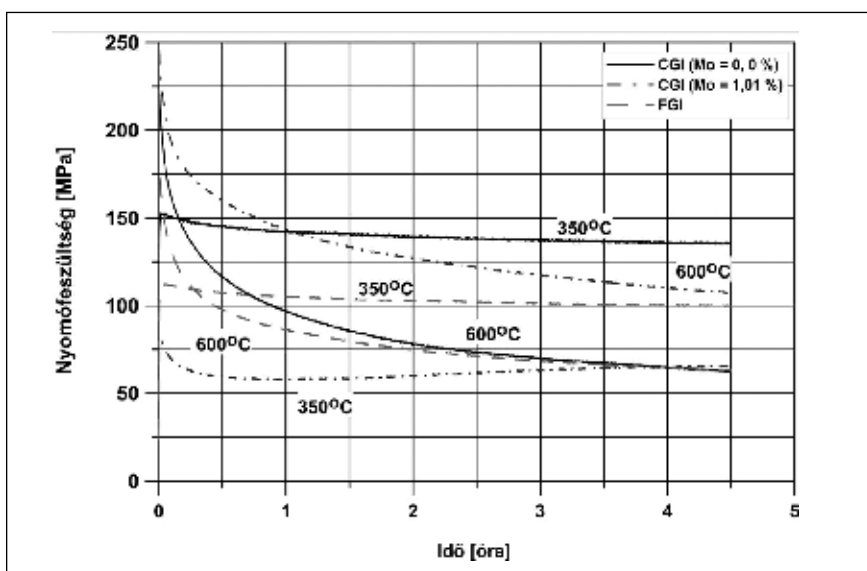
[1] *Sehitoglu, H.*: Thermal and Thermo-mechanical Fatigue of Structural Alloys. ASM Handbook, vol. 19 – Fatigue and Fracture, 527–557. old., ASM International, 1996

[2] *Socie, D. A., –Socie, B.*: Thermo-mechanical Fatigue Made Easy. Fatigue 2007, http://www.cdm.unicas.it/files/Download/TMF_Made_Easy.pdf.

[3] *Tyler, D. E.*: Wrought Copper and Copper Alloy Products. ASM Handbook, vol. 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials, 241–264. old.



6. ábra. Összefüggés a hőfárasztási ciklusok száma és az átmenetigrafit-arány, illetve a perlit lemezvastagsága között különböző molibdéntartalmú öntöttvasok esetén



7. ábra. Különböző hőmérsékleten végzett feszültségrelaxációs vizsgálatok eredményeinek összehasonlítása

[4] http://www.instron.co.uk/a/applications/test_types/creep_stress_relax.aspx

[5] *Gundlach, R. B.*: Thermal Fatigue Resistance of Alloyed Gray Iron for Diesel Engine Components. AFS Transactions vol. 87 (1979), 551–560 old.

[6] *Gundlach, R. B.*: The Effects of Alloying Elements on the Elevated Temperature Properties of Gray Irons. AFS Transactions, Vol. 91, 1983, 389–422 old.

[7] ISO 16112:2006.

[8] *Diaconu, V. L., – Sjögren T., – Skoglund P., – Diószegi A.*: Influence of molybdenum alloying on thermomechanical fatigue life of compacted graphite irons. International Journal of Cast Metal Research, DOI10.1179/1743133612Y.0000000021.

[9] *Gács Z. – Sárközi G. – Réti T. – Kovács J. – Csepeli Zs. – Merlinger V.*: Sztereológia és képelemzés. Egyetemi Tankönyv, 2001.

[10] *Shengqing, W.*: Effect of Compacted / Vermicular Graphite Amount on the Elevated Temperature Properties of Cast Iron. Transaction of the Japan Foundrymen's Society 13 (1994), 30–36. old.