

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Digitális képfeldolgozás és színes metallográfia alkalmazása gömbgrafitos öntöttvasak szövetszerkezetének jellemzésére



Kardos Ibolya

Tudományos témavezető: Dr. Gácsi Zoltán

Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
Anyagtudományi Intézet

Miskolc

2009

Tartalom

TARTALOM	2
BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	4
1. ÖNTÖTTVASAK OSZTÁLYOZÁSA ÉS FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEI	6
1.1. ÖNTÖTTVASAK OSZTÁLYOZÁSA	6
1.2. ÖNTÖTTVASAK FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEI	8
1.3. ÖNTÖTTVASAK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE	10
2. ÖNTÖTTVASAK DERMEDÉSE ÉS MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI	13
2.1. FE-C ÖTVÖZETEK EGYENSÚLYI FÁZISDIAGRAMJA	13
2.2. PRIMER AUSZTENIT DERMEDÉSE	15
2.3. GRAFITOS EUTEKTIKUM	16
2.3.1. <i>A grafitos eutektikum kristályosodása</i>	16
2.3.2. <i>A grafitos eutektikum morfológiája</i>	18
2.4. GÖMBGRAFITOS EUTEKTIKUM KELETKEZÉSE ÉS NÖVEKEDÉSE	21
2.5. ÖNTÖTTVASAK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI	24
3. ÖNTÖTTVAS SZÖVETSZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZEREI	30
3.1. SZÖVETSZERKEZET JELLEMZÉSE PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPPAL	30
3.2. VISSZASZÓRTELEKTRON DIFFRAKCIÓ (EBSD) ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI	32
3.3. FÁZISOK AZONOSÍTÁSA SZÍNESMARATÁS SEGÍTSÉGÉVEL	35
3.3.1. <i>A színesmaratás alapjai</i>	36
3.3.2. <i>Színesmaratás során alkalmazott marószerek</i>	37
4. SZÍNESMARATÁS ALKALMAZÁSA ÖNTÖTTVAS SZÖVETSZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATÁRA	42
4.1. KARBID KIMUTATÁSÁRA SZOLGÁLÓ SZÍNES MARÓSZEREK	42
4.1.1. <i>Nátrium-metabiszulfid vagy kálium-metabiszulfid és sósav</i>	43
4.1.2. <i>Beraha kadmium-klorid (Beraha CdS) reagens</i>	48
4.1.3. <i>Beraha nátrium molibdát (Beraha Na-Mo) reagens</i>	49
4.1.4. <i>Beraha által módosított Klemm I reagens</i>	52
4.2. ÖNTÖTTVAS FERRIT ORIENTÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA VISSZASZÓRTELEKTRON DIFFRAKCIÓVAL (EBSD)	55
5. ÖNTÖTTVASAK JELLEMZÉSE AZ IPARI GYAKORLATBAN	59
5.1. AZ MSZ EN ISO 945:2000 ÉS AZ MSZ 5716:1974 SZABVÁNY	59
5.2. DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALKALMAZÁSA	61
6. MÓDSZER GRAFITSZEMCSÉK ALAK ÉS MÉRET SZERINTI OSZTÁLYOZÁSÁRA	63
6.1. A GRAFITSZEMCSÉK ALAKJÁNAK ÉS MÉRETÉNEK JELLEMZÉSE HAGYOMÁNYOS ELJÁRÁSSAL	63
6.2. A GRAFITSZEMCSÉK MÉRET ÉS ALAK SZERINTI OSZTÁLYOZÁSA	64
6.2.1. <i>Grafitszemcsék méret szerinti osztályozása a digitális képfeldolgozás segítségével</i>	64
6.2.2. <i>A grafitszemcsék alakjának jellemzése a digitális képfeldolgozás segítségével</i>	65
6.2.3. <i>A digitális képfeldolgozás és a hagyományos módszer összehasonlítása</i>	70
6.3. A DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS SORÁN ALKALMAZOTT KÉPÁTALAKÍTÁSOK	71
7. DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALKALMAZÁSA AZ IPARI GYAKORLATBAN	78

7.1. A GRAFTSZEMCSE ALAKJÁNAK GYÁRTÁSKÖZI ELLENŐRZÉSE, IPARI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT (HAGYOMÁNYOS ELJÁRÁS)	78
7.2. A VERMIKULÁRIS ÉS A GÖMB ALAKÚ GRAFIT ELKÜLÖNÍTÉSE DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁSSAL AZ IPARI GYAKORLATBAN	79
7.3. AZ ALGORITMUSSEL ELVÉGZETT MÉRÉSEK	83
ÖSSZEFOGLALÁS	86
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	88
AZ ÚJ EREDMÉNYEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA	95
SUMMARY	96
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	98
IRODALOMJEGYZÉK	99
MELLÉKLET	102

BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Napjainkra az öntöttvas felhasználási területe jelentős mértékben kiszélesedett, ami annak köszönhető, hogy az öntöttvasból nagyon változatos tulajdonságokkal rendelkező termékek hozhatók létre. Az alapanyag szövetszerkezetére, a grafit szemcsék alakjára és természetesen az ezekből következő mechanikai és egyéb tulajdonságokra igen magas kritériumokat írnak elő az öntvényeket alkalmazó iparágak, különösen az autóipar.

A grafit szemcsék alakja döntő jelentőségű az öntvény tulajdonságainak szempontjából [1]. Ennek fontossága miatt már a termelés korai szakaszában, a gyártásközi ellenőrzés során kiszűrésre kerülnek a nem megfelelő grafit szemcsét tartalmazó félkész termékek. A nemzetközi szabványok lehetőséget adnak arra, hogy a mindenki által ismert jelölési rendszerben történjen a grafit szemcsék kiértékelése [46]. A szabványok alkalmazásának, értelmezésének egyszerűségéből adódóan az értékelések gyorsak, de meglehetősen szubjektívek. Ez a megállapítás az összehasonlítási eljárásokon alapuló vizsgálati módszerek mindegyikére igaz. A digitális képfeldolgozás ipari térhódításának egyik célterületévé ezek a vizsgálati metodikák váltak. A törekvés az, hogy az igen nagy anyagi vonzattal járó döntéseket függetlenítsük a vizsgáló személy szubjektivitásától, és megbízható, reprodukálható eredményt szolgáltatassunk. A gyártásközi ellenőrzésbe való beépítés egyik sarokpillére, hogy a termelést nem szabad késleltetni, a másik, hogy könnyen kezelhető és érthető szoftvert kell a vizsgáló személy rendelkezésére bocsátani. A grafit alak megállapítására kidolgozott, és mindenki által könnyen beszerezhető digitális képfeldolgozáson alapuló szoftverek nem minden esetben bizonyulnak megbízhatónak, így az alak meghatározása további vizsgálatokat igényel.

A grafit alakjának befolyásoló hatása jelentős, de kiemelt szerepe van a szövetszerkezetnek is [1]. A jelenlévő fázisok különböző maratási eljárással hívhatók elő a legegyszerűbben. A gyakran alkalmazott hagyományos, oldódási (korróziós) maratások mellett egyre inkább előtérbe kerül a színesmaratás, amely számos – a hagyományos maratás által nem elkülöníthető – információt tár fel a szövetszerkezetben [41][40]. Az eljárás alkalmazhatóságának leginkább a tapasztalatlanság és az információk hiánya szab határt. Az öntöttvas szövetszerkezetében jelenlévő fázisok megkülönböztetése és mennyiségi meghatározása miatt különösen nagy szükség lenne olyan reprodukálható színesmaratási eljárásra, amellyel például a karbid jól azonosíthatóvá, mérhetővé válna. Az autóipari felhasználásra gyártott öntvények esetén ennek szintén nagy jelentősége van, mivel a mátrixban található karbidok mennyiségére pontos előírás vonatkozik.

Az irodalom tanulmányozása után több nyitott kérdés is felmerült:

- Mennyire szubjektív az ipari gyakorlatban elterjedt hagyományos összehasonlítási eljárásen alapuló módszer a grafit alak meghatározására?
- A digitális képfeldolgozás módszerével kialakítható-e olyan algoritmus, amellyel a grafit alaktípusok jellemzése a hagyományos vizsgálati eljáráshoz képest objektívebb eredményt ad?
- A digitális képfeldolgozás módszere integrálható-e az iparba, a gyártásközi ellenőrzés folyamatába?
- A színesmaratási eljárás segítségével milyen újabb szövetszerkezeti információkat kaphatunk?
- A színesmaratás mennyiben segít az egyes szövetszerkezeti elemek különválasztásában?

Mindezek alapján a disszertációm célkitűzései a következők:

1. Digitális képfeldolgozási algoritmus kialakítása az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban szereplő grafitszemcse alaktípusok kategorizálására.
2. Az algoritmus ipari alkalmazásra történő módosítása, amellyel nagy biztonsággal elkülöníthető a kompakt grafit (III), a szabálytalan gömbgrafit (IV) és a szabályos gömb alakú grafit (VT).
3. A digitális képfeldolgozó algoritmus alkalmazása során elengedhetetlen olyan képfeldolgozási művelet használata, amellyel az információ nem torzul, de a pontos mérést nagymértékben megkönnyíti. Ezért ki kell alakítani egy képtranzformációs algoritmust, amely segítségével pontosan elvégezhető a grafitszemcsék kiértékelése.
4. Az öntöttvas szövetszerkezetének kimutatására szolgáló színesmaratási reagensek maratási paramétereinek optimalizálása és alkalmazási lehetőségeinek feltárása.

1. ÖNTÖTTVASAK OSZTÁLYOZÁSA ÉS FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEI

Az öntöttvas kifejezést a vasötvözetek azon széles családjára alkalmazzák, melyek Fe-C alapú ötvözetek és eutektikum formájában szilárdulnak meg. A karbon stabil grafit vagy metastabil vas-karbid formájában jelenik meg a vasötvözetekben. Így az eutektikumnak két alaptípusa van, az egyik ausztenit-grafit fázisokból, míg a másik ausztenit-vas-karbid (Fe_3C) fázisokból áll.

Az öntöttvasak összetett ötvözetrendszeréből következik, hogy széles szövetszerkezeti skálával rendelkeznek, amelyek változatos tulajdonságokat eredményeznek. Ez a jelenség az összetétel, a megszilárdulási körülmények és a hőkezelési eljárások függvénye.

1.1. Öntöttvasak osztályozása

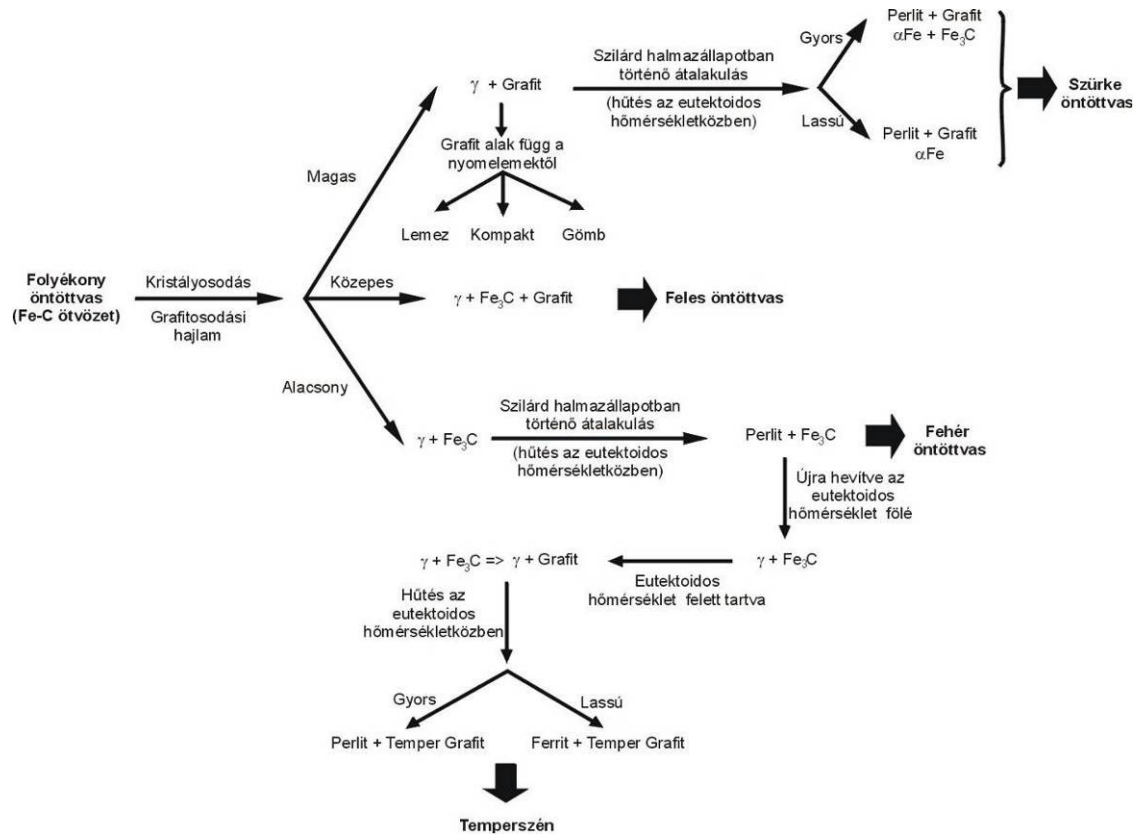
A történelmileg kialakult első osztályozási szempont az öntvények töretfelületének jellemzése volt. Ezek alapján megkülönböztethető a szürke és fehér töretű öntvény. A fehér töret esetén a törés a cementit lemezek (Fe_3C) mentén történik, így a felület fehérnek látszik. Szürke töretnél a törés a grafitlemezek mentén történik, ezért a felület szürke színű. Feles öntvéynél mind a fehér mind a szürke öntvényre jellemző töretfelület megtalálható.

A vizsgálati módszerek fejlődésével és az így megfigyelhető szövetszerkezeti sajátosságok miatt (grafit alak és az alapanyag) újabb csoportosítások jöttek létre. A grafit alak szerint négy típus különböztethető meg: lemezes grafit (FG^1), gömbgrafit (SG^1), kompakt/vermikuláris grafit (CG^1), temperszén (TG^1). Alapanyag szerint öt osztály hozható létre: ferrites, perlites, ausztenites, martenzites, bainites (ausztemperált).

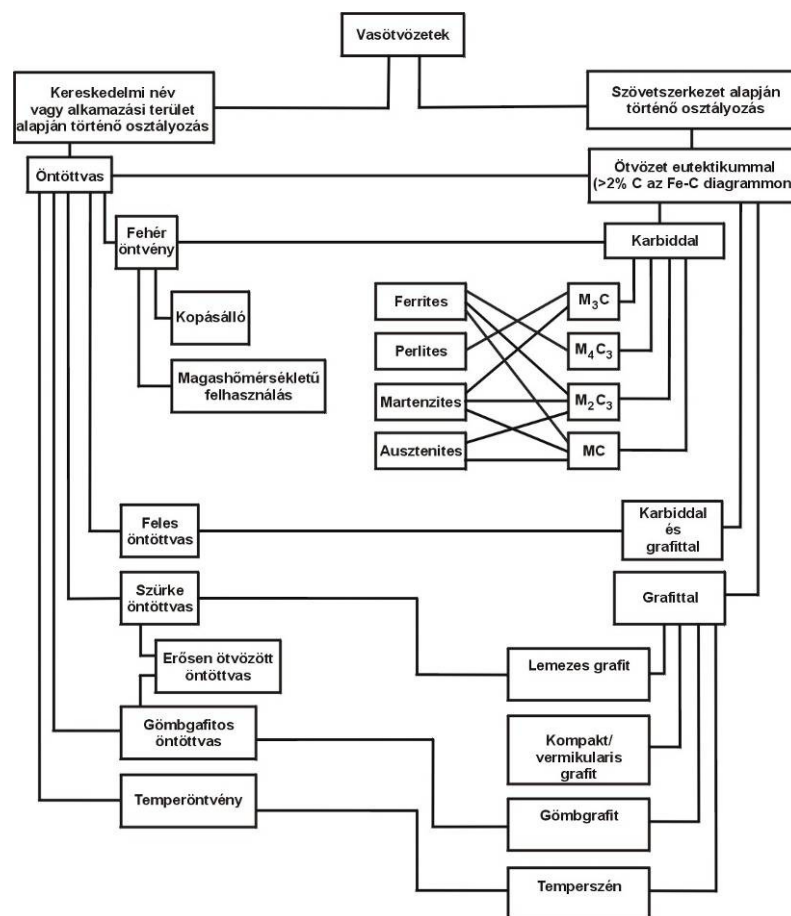
Az öntöttvasak ritkábban használt csoportosítási módja az alkalmazási terület szerinti. Ebben az esetben két csoportot alakítanak ki: az általános felhasználású (ötvözetlen és gyengén ötvözött öntöttvasak), a másik pedig a speciális felhasználási területű (pl. magas hőmérsékleten történő alkalmazás, korrózióval szembeni ellenállás, kopásállóság, 3%-nál nagyobb ötvöző tartalommal).

Az öntöttvasak csoportosításának szemléltetésére többféle módszer ismeretes, rendszerint folyamatábrák vagy táblázatok mutatják be a legfontosabb szövetszerkezeti jellemzőket, az alkalmazási területeket, valamint a gyártástechnológia paramétereit. Az 1.1. ábra az egyes öntöttvas típusok kristályosodási és átalakulási folyamatait szemlélteti. Az 1.2. ábrán szintén az öntöttvas típusok találhatók, de ebben az esetben a szövetszerkezet alapján történő osztályozás összekapcsolódik az alkalmazási területekkel [1][2].

¹ Angol kifejezés: FG: flake graphite, SG: spherical graphite, CG: compacted/vermicular graphite, TG: temper graphite



1.1. ábra. Öntöttvas osztályozása [1]



1.2. ábra. Öntöttvas osztályozása [2]

1.2. Öntöttvasak felhasználási területei

Az öntöttvas gyártási technológiáját Kínában dolgozták ki. A legkorábbi felhasználási területek közé tartozik az ágyú és az ágyúgolyóként történő alkalmazás, majd 1707-ben Angliában szabadalmaztatták a vékonyabb falú edények gyártási módszerét, melynek köszönhetően olcsóbb lett a gyártás. Ezt követően a gőzmozdony kifejlesztésével új piac nyílt meg az öntöttvas előtt. A szerkezeti célokra való felhasználása az 1770-es évek végén kezdődött, amikor több híd alapanyagául is öntöttvasat használtak. Ezeket az öntöttvas hidakat a vasút korai időszakában igen széles körben használták, egészen addig, míg néhány ilyen híd össze nem omlott. Végül az öntöttvas hidakat acél hidakra cserélték. Egy másik fontos felhasználási területe a textilipar volt. Mivel a textilművek riasztó mértékben voltak kitéve tüzeseteknek, azt a megoldás találták, hogy teljes mértékben éghetetlen öntöttvas szerkezetből építették fel ezeket az épületeket.

Az ipari forradalom ideje alatt pedig már széles körben használták fel az öntöttvasat gépi berendezések kereteihez és egyéb részeihez, valamint a fonószerket, majd később a szövőszéket is öntöttvasból gyártották. Sok városban épültek öntödék, melyek gépi berendezéseket gyártottak, nem csak az ipari szektor, hanem a mezőgazdasági szektor részére is, és így az öntöttvas egyre népszerűbb lett [3][4][5][6].

Napjainkra a felhasználási területek nagymértékben kiszélesedtek. Mindez köszönhető annak, hogy a fejlesztések hatására nagyon változatos szövetszerkezetet és mechanikai tulajdonságokkal rendelkező öntöttvas minőségeket dolgoztak ki. Az 1.1. és az 1.2. ábrán látható öntöttvas típusok leggyakoribb felhasználási területei az alábbiakban olvashatók.

Szürke öntöttvas (FG) alkalmazási területe igen széles, hiszen a létrehozott mechanikai tulajdonságai is széles skálán mozognak. Jól megmunkálhatók, mivel az öntvényben található grafitlemezek kenik a forgácsoló szerszámot. Így olyan alkalmazásban, ahol kopás léphet fel, előnyös, hiszen segít megtartani a kenőanyagot. Felhasználási területei pl.: autóiparban, mezőgazdasági gépiparban, építőipari berendezésekben, motorokban, fűtő és hűtőtestekben, olaj és gáz szivattyúkban és kompresszorokban, háztartási gépekben, bányaiiparban alkalmazott gépekben, lendkerék, fogaskerék és csövek alapanyaga [7].

Gömbgrafitos öntöttvasat (SG) különösen olyan szerkezeti elemeknél használják, ahol a szilárdsági és szívóssági követelmények mellett megkövetelt még a könnyű alakíthatóság és alacsony előállítási költség. Fő alkalmazási terület az autóiparban és a mezőgazdasági gépiparban van. Számos alkatrész készül belőle pl.: turbómotor burkolat, szelepek, csapágyfedelek, csapágyházak stb. Az autóiparon kívül alkalmazzák még pl.: szivattyúk, kompresszorok, csövek és szerelvények, építőipari gépek, textiliparban alkalmazott berendezések, fa és papírfeldolgozó gépek, fűtő és hűtőtestek, klimatizálás, erőátviteli szerkezetek esetében [5][6].

Kompakt/vermikuláris grafit (CG) tulajdonságai a szürkeöntvény és a gömbgrafit tulajdonságai között képez egy átmenetet, így ez határozza meg az öntvény felhasználási területeit is. A CG a SG-hez képest nagyobb hőtágulási és rezgéscsillapítási képességgel rendelkezik, jobban önthető, nagyobb az öntési hozama és a bonyolult öntési formáknál előnyösebb ezt a típust használni. A CG helyettesítheti FG-t, főleg azokon a területen, ahol már nem elég a FG szilárdsága. Az ipar azon alkalmazási területein, ahol a hő okozta kifáradás léphet fel a CG-t előnyösebb használni, mint a SG-t pl.: hengerfej, kipufogócsonk, féktárcsa. Látható, hogy ezen öntvénytípusnál szintén jelentős az autóiipari alkalmazás [7][8].

Temperszén (TG) és a SG jelentős képlékenységgel, valamint nagy szívóssággal és szilárdsággal bír, így a TG és a SG típusú öntvényeket közel azonos területen alkalmazzák. A gazdasági szempontok döntik el, hogy végül melyik öntvénytípus kerül felhasználásra. Nagy a korróziós ellenállósága, jó a rezgéscsillapítása. A hosszú élettartalmú berendezések készítésénél érdemes ezt az öntvénytípust alkalmazni. Viszont ha kis öntési zsugorodás a követelmény, akkor használata nem javasolt és mindenképp a SG-t kell alkalmazni. Széles ipari felhasználására néhány példa: lengőkar, láncszem, lőszer, kéziszerszám, kerékagy, rugóbak, kardáncsuklós csatlakozás [8][9][10].

A fehér öntöttvas kemény és túl rideg, így számos szerkezeti komponenshez nem használható fel. Viszont jó keménységi fokkal és kopásállósággal rendelkezik, valamint viszonylag alacsony költségvonzattal gyártható. Leggyakrabban kopófelületeknél használják pl.: munkakerekek, iszappumpák, csapágybélések, golyók, gyűrűk, szénőrlő malom és kotrógépek fogai.

A feles öntvények esetén szürke és fehér töretű rész is megtalálható. A karbidosan kristályosodó felületi réteget gyors hűtéssel hozzák létre. A kialakult réteg kemény és kopásálló lesz. Ezzel szemben az öntvény belseje grafitosan kristályosodik, és egy szívós mag alakul ki. Az öntvény eredménye az úgynevezett kéregöntvény. Tipikus alkalmazási területe a hengerek és görgők [11][12].

1.3. Öntöttvasak kémiai összetétele

Az öntöttvas a 2%-nál nagyobb karbontartalom mellett egyéb ötvöző- és szennyező elemeket is tartalmaz. Az ötvözőelemeket az önthetőség, a kristályosodás illetve a hőkezelések feltételeinek javítása érdekében adagolják, a szennyező elemek szándékunk ellenére kerülnek a vasöntvényekbe. Az 1.1. táblázatban a nem ötvözött és az alacsonyán ötvözött öntöttvas típusok kémiai összetétel szerinti csoportosítása látható.

1.1. táblázat. Ötvözetlen és az alacsonyán ötvözött öntöttvasak kémiai összetétel szerinti csoportosítása [13]

Öntöttvas típusok	Összetétel, %				
	C	Si	Mn	P	S
Szürke, lemezes öntöttvas (FG)	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,002-1,0	0,02-0,025
Kompakt grafitos öntöttvas (CG)	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03
Gömbgrafitos öntöttvas (SG)	3,0-4,0	1,8-2,8	0,1-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03
Fehér öntöttvas	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,8	0,06-0,2	0,06-0,2
Temperöntvény (TG)	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,2	0,02-0,2	0,02-0,2

Az öntöttvasak összetételét alkotó elemek között három fő csoport alakítható ki:

- főbb elemek,
 - kis mennyiségű, de a kristályosodás során kritikus elemek,
 - nyomelemek, melyek az anyag szövetszerkezetére és/vagy a tulajdonságaira vannak hatással.
- a) A fő elemek az 1.1. táblázatban is látható C, Fe és Si. A legtöbb öntvényt 3-3,5 % C és 1,8-2,4% Si tartalommal gyártják. A C és Si nagy hatással van a vasöntvények kristályosodására. A CE (karbon egyenérték) számításának bevezetésével pontos információt kaphatunk arról, hogy az adott összetételű ötvözet dermedési tulajdonságai milyen összetételű anyagnak felelnek meg a Fe-C állapotábrában, pl. CE=4,3 az ötvözet dermedési tulajdonságai megegyeznek az eutektikus öntöttvas dermedési tulajdonságával. A CE a következő képlettel számítható:

$$CE = C, \% + \frac{Si, \%}{3},$$

A foszfor figyelembe vételével még pontosabb eredményt kaphatunk,

$$CE = C, \% + \frac{(Si, \% + P, \%)}{3}.$$

- A P, Mn és a S tartozik ebbe a csoportba. P minden szürke öntvényben van, habár nem szándékosan történik az adagolása. Javítja az önthetőséget és a formakitöltő képességet.

Alacsony olvadáspontú foszfidot képez, amely megjelenik a szövetszerkezetben, steadit (ternér eutektikum: Fe-C-P) néven ismert. A nagyszilárdságú öntöttvasaknál, mint például a gömbgrafitos öntöttvasnál is a foszfortartalmat próbálják olyan szinten tartani, hogy ne jelenjen meg a steadit. A legtöbb öntvényt 0,02-0,10% P tartalommal gyártják. A S mennyisége sok vita tárgyát képezi még napjainkban is. Bizonyítottan fontos szerepe van a gömbgrafit gömbösödése során. Számos vélemény alapján az optimális mennyisége 0,05-0,12% között van. Fontos viszont, hogy a S és Mn mennyisége egyensúlyban legyen a MnS zárványképződés miatt. A következő egyenlettel lehet a Mn mennyiséget számolni:

$$Mn, \% \geq 1,7S, \% + 0,3\%$$

- c) Számos nyomelem ismeretes, amelyek befolyásolják az öntöttvas tulajdonságait. Az 1.2. táblázat ezek hatását és forrását foglalja össze.

Az 1.2. táblázatban látható nyomelemek közül a bizmut, ólom, tellúr, antimon, ón és az arzén zavarják a grafit gömbösödését. Legerősebb zavaró hatása a bizmutnak, ólomnak és a tellúrnak van. Ismeretes olyan elképzelés, hogy a bizmut hatást gyakorol a felületi feszültségre, amelynek fontos hatása van a gömbgrafit kialakulására, amelyről a 2.4. fejezetben lehet bővebben olvasni. Már kis mennyiségű ólom hatására a gömbgrafit elfajul. A tellúr hatása nem egyértelmű, de feltételezhető, hogy az ólommal együtt erősen növelik a túlhűlési hajlamot, ezenkívül rendkívül intenzíven gátolja a grafitos eutektikum növekedését, így az öntöttvas a metastabil rendszer szerint dermed.

Az ón, molibdén, réz, nikkel, antimon, alumínium és a volfrám természetesen az öntöttvas összetételétől függően különböző mennyiségben, különböző mértékig növelik az öntöttvas szakítószilárdságát. Az ólom és az arzén viszont csökkenti. A króm rendkívül erős karbidstabilizáló. A króm és réz, valamint a króm és molibdén egyidejű ötvöztetésével jelentősen növelhető a szilárdság [2][11][12][13].

1.2. táblázat. Az öntöttvasban előforduló nyomelemek és azok hatásai és forrásai [2]

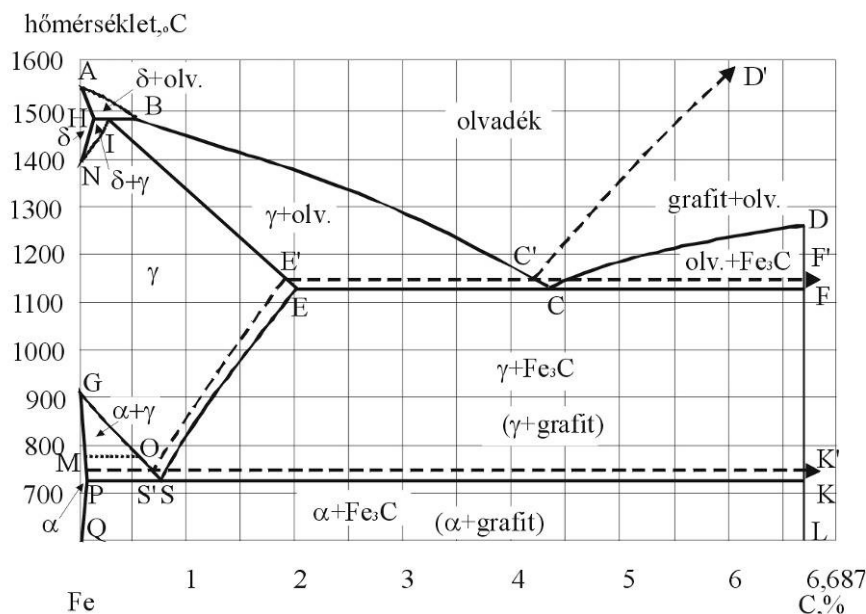
Elem	Mennyiség	Hatás	Forrás
Alumínium	$\leq 0,03$	Elősegíti a hidrogén okozta lyukképződést, különösen akkor, ha nyersformát használnak és a mennyisége 0,005% felett van. Semlegesíti a nitrogént.	Szándékos adagoláskor, vasötvözetekből, alumínium tartalmú komponensekből, szennyezett hulladékból, módosító anyagból.
Antimon	$\leq 0,02$	Elősegíti a perlit képződést.	Szándékos adagoláskor, zománcos hulladékból, acélhulladékból, fehérfémből.
Arzén	$\leq 0,05$	Elősegíti a perlit képződést.	Nyersvasból, acélhulladékból.
Bizmut	$\leq 0,02$	A karbid és a kedvezőtlen grafit formák kialakulását segíti elő, csökkenti az alakíthatóságot.	Szándékos adagoláskor, bizmut tartalmú öntőformából.
Bór	$\leq 0,01$	Karbidok képződését elősegíti a könnyűszelvényekben, különösen 0,001%-nál nagyobb mennyiség esetén.	Szándékos adagoláskor, zománcos hulladékból.
Króm	$\leq 0,2$	Elősegíti a gyors lehűlést vékonyfalú öntvényeknél.	Ötvözött acélból, jó minőségű nyersvasból.
Réz	$\leq 0,3$	Nyomelemnyi mennyiségben nincs jelentős hatása.	Réz huzalból, nemfémes ötvözetekből, acélhulladékból, jó minőségű nyersvasból.
Hidrogén	$\leq 0,0004$	Hólyagok és repedések kialakulását idézheti elő. Elősegíti a lassú lehűlést és a durva grafit kialakulását.	Szándékos adagoláskor, nedves öntőformából.
Ólom	$\leq 0,005$	Widmanstätten szövet kialakulását eredményezi. Húzószilárdságot csökkenti.	Jó minőségű nyersvasból, automataacélból, nemfémes ötvözetekből, ólom bevonatú lemezből, nyersvasból, fehérfémből.
Molibdén	$\leq 0,05$	Elősegíti a perlit képződést.	Jó minőségű nyersvasból, acélhulladékból.
Nikkel	$\leq 0,01$	Nyomelemnyi mennyiségben nincs jelentős hatása.	Acélhulladékból.
Nitrogén	$\leq 0,02$	Növeli a szilárdságot és elősegíti a perlit képződést. Hólyagok és repedések kialakulását idézheti elő. Alumínium és titán semlegesíti a hatását.	Kokszból, néhány vasötvözetből, acélhulladékból, magkötő anyagból.
Tellúr	$\leq 0,003$	Perlit képző.	Szándékos adagoláskor, automata-sárgarézből.
Ón	$\leq 0,15$	Erősen perlit képző.	Szándékos adagoláskor, acélhulladékból, zománcos hulladékból.
Titán	$\leq 0,15$	Túlhűtött grafitot hoz létre. Nitrogént adagolnak, hogy a hatását csökkentsék.	Szándékos adagoláskor, nyersvasból, acélhulladékból, zománcos hulladékból.
Volfrám	$\leq 0,05$	Elősegíti a perlit képződést.	Szerszámacélból.
Vanádium	$\leq 0,08$	Karbid és perlit képző.	Acélhulladékból, nyersvasból.

2. ÖNTÖTTVASAK DERMEDÉSE ÉS MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

A dermedési, kristályosodási folyamatok közben kialakuló primer szerkezet és grafit morfológia nagymértékben befolyásolja az öntöttvas tulajdonságait. Természetesen a kialakult szövetszerkezet módosítható különböző hőkezelési eljárások alkalmazásával, de ezek hatékonyságát is nagymértékben befolyásolja a dermedés közben kialakult primer szerkezet. Az öntöttvas szövetszerkezeti sajátosságainak megismerése indokoltá teszi a dermedési folyamatok ismertetését.

2.1. Fe-C ötvözetek egyensúlyi fázisdiagramja

A Fe-C ötvözetek egyensúlyi fázisdiagramjában, közös koordináta rendszerben két diagramot is szokás ábrázolni, ezért ezt a diagramot Heyn-Charpy-féle ikerdiagramnak is nevezik, amely a 2.1. ábrán látható. A diagram az egész ötvözetrendszert a csupán 6,67 % karbontartalomig ábrázolja. A nagyobb karbontartalmú ötvözeteket illetően nincs sok megbízható adat, de ezeknek a vasötvözeteknek nincs gyakorlati jelentősége. Ikerdiagramra azért van szükség, mert a karbon a vasötvözetekben kétféle alakban jelenhet meg; mint elemi karbon grafit alakjában, vagy megkötött karbon, vas-karbid (Fe_3C) vagy más néven cementit alakjában. A két diagram közül az egyensúlyi feltételeknek a grafitos rendszer felel meg, ezért ezt stabilis rendszernek hívjuk, szemben a metastabilis karbidos rendszerrel. A diagramban folytonos vonallal ábrázoltuk a karbidos állapotokra érvényes részeket. A grafitos vagy másnévvel stabilis rendszer vonalai sok helyen megegyeznek a karbidos rendszer megfelelő vonalaival. Ahol a két diagram között eltérés van, ott a grafitos rendszerre érvényes vonalakat szaggatottal jelöltük, amelyek mindig nagyobb hőmérsékleten futnak, mint a megfelelő metastabilis vonalak. A szaggatott vonalakhoz tartozó betűjeleket vesszővel (pl. E') jelöltük. A diagramnak csak az öntöttvas dermedésére vonatkozó részét ismertetem részletesebben.



2.1. ábra. A Fe-C ötvözetek Heyn-Charpy-féle ikerdiagramja [14]

Öntöttvasban a primer fázisok túltelített folyékony olvadékból kristályosodnak, amelyben a diffúzió aránylag nagy sebességű, és ez kedvező feltételeket teremt a csírák növekedéséhez. A 2,06-4,3% karbontartalmú hipoeutektikus ötvözetekben az olvadékból közvetlenül primer γ -vas/ausztenit kristályosodik. Az ausztenit dendritok képződése alatt az olvadék karbontartalma 4,3%-ig növekszik. Ez a pont a C-eutektikus pont, ahol az olvadék 1147°C-on eutektikumként kristályosodik. Ennek az eutektikumnak a fázisai az E pontnak megfelelően 2,06% karbontartalmú γ -vas és az F pontnak megfelelő összetételű Fe_3C . A kristályosodás a hipoeutektikus ötvözetekben γ -vas és eutektikum, míg a 4,3-6,67% karbontartalmú hipereutektikus ötvözetekben primer Fe_3C és eutektikum van.

Az eutektikumban két szilárd fázis található, melynek típusa attól függ, hogy metastabil vagy stabil rendszerben ment végbe az eutektikum kristályosodása. Metastabil esetben ausztenit–vas-karbid, stabil esetben pedig ausztenit–grafit alkotja az eutektikumot. Amikor az eutektikum kristályosodása befejeződik, már nincs jelen a rendszerben olvadék, a további reakciók szilárd állapotban mennek végbe.

Hipereutektikus öntöttvasak kristályosodásakor a primer fázis lehet vas-karbid és grafit is. Primer Fe_3C esetén ezt az öntöttvas típust hipereutektikus fehér öntöttvasnak nevezik. Ezzel az öntöttvas típussal a szakirodalom nem foglalkozik, mivel kis szilárdsága miatt nem használatos. Primer grafit kristályosodása esetén a grafit morfológiáját tekintve lehet lemezes vagy gömb [2][12][14].

2.2. Primer ausztenit dermedése

Az öntöttvasak dermedését tanulmányozó szakirodalmakban az eutektikus cella kialakulása, mennyisége és morfológiája kitüntetett figyelmet kap. Ezzel szemben az ausztenit dendritek növekedési karakterisztikája kevesebb érdeklődésre tart számot. Ennek több oka lehet, az egyik és talán a legnyilvánvalóbb az, hogy az eutektikus cellával szemben ezek a dendritek kevésbé jól megfigyelhetők. A primer ausztenit legjobban a fehér töretű öntöttvasban mutatható ki, ugyanis ebben az esetben világosan és élesen elválik az eutektikumtól, ill. az eutektikus ausztenittől.

A primer ausztenit általában dendritek alakjában válik ki, és jellegét a későbbi fázisátalakulások folyamán is megtartja. A leggyakrabban alkalmazott öntöttvas minőségénél (ahol a telítési szám²: 0,8-1) a primer dendritek csakis rendkívül korlátozott mennyiségben várhatóak. Azonban, ha több dendritet találunk, mint amennyi elméletileg megengedett lenne, akkor azt feltételezzük, hogy ezt az eutektikus szilárdulás lelassulása okozta, mely következképpen túlhűtést eredményez. A túlhűtés függ az olvasztási és az olvadékkezelési technikától, mely azt jelenti, hogy dendritek megjelenése úgy tűnik, hogy kihangsúlyozza a kevésbé jól ellenőrzött olvasztási folyamatot. A magas olvasztási hőmérséklet megnöveli a tisztán dendrites és orientált struktúrát. Másrészt, az alacsony olvasztási hőmérséklet kisebb dendriteket okoz, melyek sokkal véletlenszerűbben orientálódnak. Ez a hatás akkor is bekövetkezik, amikor alacsony az öntési hőmérséklet, mert a folyékony fém hosszabb időtartamig volt hűntartva. Amikor a csapolás és az öntés között rövid az idő és így magas hőmérsékleten történik az öntés, akkor főként hosszú dendriteket fogunk találni. Ha az anyagot hosszabb ideig hűn tartjuk a beoltás után, akkor az orientált dendrites struktúra eltűnik. Amikor a dermedés eléri az eutektikus hőmérsékletet, a dendritek struktúrája már nem változtatható [16][17].

² Telítési szám: a karbonegyenérték (CE) alapján jellemzi az adott összetételű öntöttvasat az eutektikus összetételhez képest (ha a telítési szám=1, akkor eutektikus összetételű az öntöttvas, ha a telítési szám < 1, akkor hipoeutektikus, ha a telítési szám >1, akkor hipereutektikus)

2.3. Grafitos eutektikum

Az öntöttvas dermedése során különösen nagy hangsúlyt kap az eutektikum kialakulása, melyet a stabil rendszerben ausztenit és grafit alkot. Az öntöttvas mechanikai tulajdonságait pedig nagymértékben befolyásolja ennek a grafitnak az alakja, eloszlása és mérete. Az öntöttvas szilárdsága - a grafitos fázist tekintve - annál nagyobb:

- minél kisebb a grafit mennyisége,
- minél kedvezőbb alakban (gömb alak) van a grafit,
- a grafit eloszlása minél egyenletesebb, ez egyben azt is jelenti, hogy minél finomabb az eutektikus cella.

A szürke öntöttvas gyártása során a cél a karbidos kristályosodás csökkentése, az eutektikus cellák finomítása és ezen keresztül a grafitméret és -eloszlás javítása, továbbá a grafit alakjának megváltoztatása.

2.3.1. A grafitos eutektikum kristályosodása

Az eutektikum kristályosodása és az eutektikum átalakulása az öntöttvas kristályosodásának legfontosabb és legjellemzőbb szakasza. Az eutektikum kristályosodása egy úgynevezett eutektikus cella képződésével jár, amelyet a grafit megjelenési formái miatt eltérő morfológia jellemez. A kristályosodás során az eutektikus cellán belül a grafit a vezető fázis, amely különböző csírából kristályosodhat ki.

A homogén csíráképződés abból a megállapításból indul ki, hogy az olvadékból az olvasztás és túlhevítés ellenére is visszamaradnak saját kristálycsíra maradványok (grafit, karbid), melyek bevitelére nem tudatos. A kristályosodási folyamat túlhűléssel indul, a metastabil és a stabil rendszer szerinti kristályosodás hőmérséklete között pedig nincs nagy különbség. A grafitos eutektikum növekedése igen lassú, az olvadék hőmérséklete tovább csökken, mindaddig, amíg az eutektikum képződése miatt keletkezett dermedési hő meg nem növeli azt. Ez a hőmérséklet pedig a stabil eutektikum képződési hőmérséklete alatt van. A külső hőhatások következtében a hőmérséklet újból csökken egészen addig, amíg az eutektikum kristályosodása be nem fejeződik. Amennyiben a grafitcsíra képződés nem megfelelő időben indul meg, stabil eutektikum helyett metastabil eutektikum kristályosodik. Hipoeutektikus öntöttvasnál az eutektikum kristályosodása során már primer ausztenit dendritek vannak a rendszerben, viszont ezek nem lehetnek grafitcsíra képzők, mivel kristályszerkezetük nem felel meg a kristályosodó fázisénak.

Mindezen tényezők miatt, a kívánt tulajdonságok elérésének céljából a gyártás során modifikátorokat kell alkalmazni. A módosítás során rendkívül aktív csírákat hoznak létre, melyek

segítségével a kristályosodás kis túlhűléssel, kevésbé a grafitos eutektikum hőmérséklete alatt végbemegy. A nagyszámú grafitsíra további kellő mennyiségű hőt szabadít fel, és így kompenzálja a külső hőhatás okozta hőelvezetést. Azokat a modifikátorokat, amelyek nem a grafit alakját, hanem elsősorban a méretét, eloszlását és mennyiségét befolyásolják, elsőrendű modifikátoroknak nevezik, míg a grafit alakját megváltoztatókat másodrendűnek.

Meglehetősen széles változata van azoknak a vegyületeknek, amelyek lemezgrafit-ausztenit eutektikumban heterogén gócképzőként szerepelhetnek. Ezek pl. oxidok (szilícium-dioxid), karbidok (Al_4C_3), szulfidok, nitridek (bór-nitrid).

A szilícium-dioxid az egyensúlyi hőmérséklet alatt szilárd szilícium dezoxidációja során alakul ki, az egyensúlyi hőmérséklet felett pedig lebomlik. Ezek a szilícium-dioxidok gócot képeznek a grafit kialakulásához, de azok kialakulása is gócképződést követel meg, amelyet a beoltó anyagokkal lehet elősegíteni. A beoltásnál kialakuló dezoxidációs folyamatok feltételei a következők:

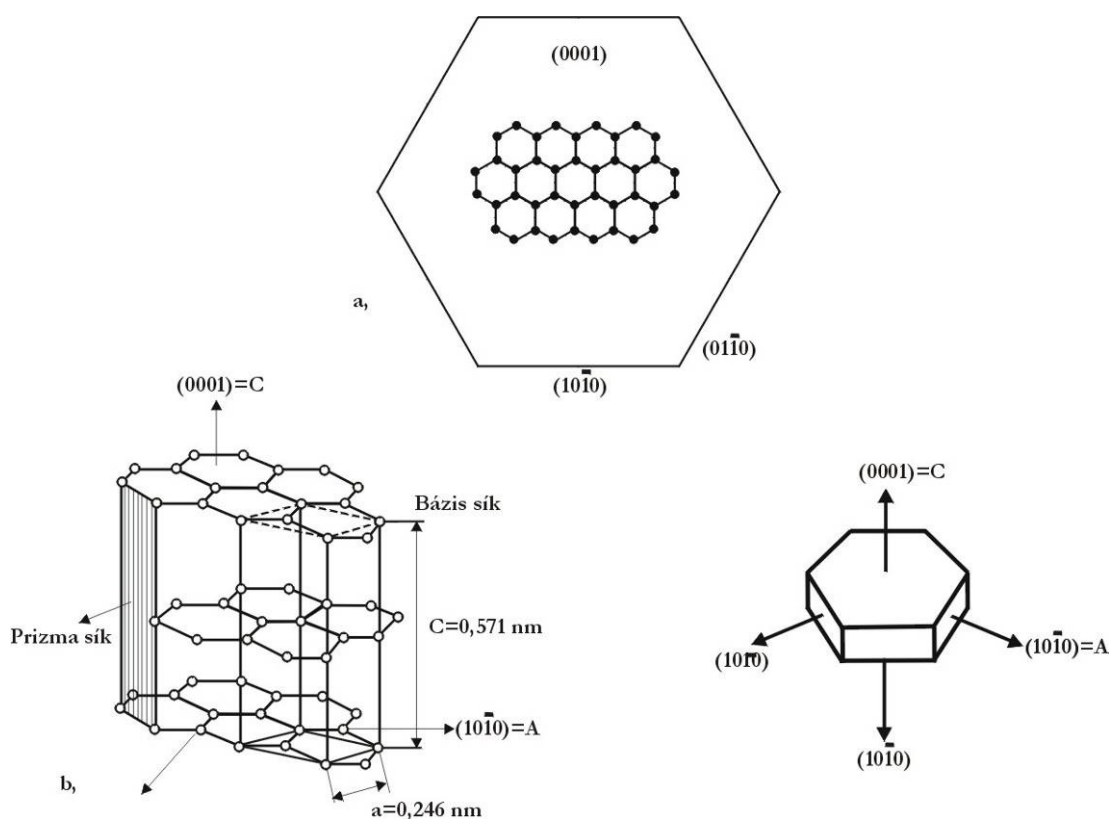
- 1) elegendő oxigénnek kell jelen lenni,
- 2) olyan elemeket kell adagolni, amelyek affinitása/reakcióképessége nagy pl. kalcium, alumínium, bárium, ezek hozzák létre a gócot a szilícium-dioxid számára,
- 3) a beoltásnak maximum 50°C -kal az egyensúlyi hőmérséklet felett kell lenni, hogy elkerüljük a szilícium-dioxid feloldódását,
- 4) a beoltás után a hűtési sebességnek elég alacsonynak kell lenni ahhoz, hogy megfelelő idő legyen a szilícium-dioxid kialakuláshoz, viszont elegendően nagyak kell lenni ahhoz, hogy megakadályozza szilícium-dioxid kiválását.

A karbidos grafitsírák kristályszerkezete hasonló a grafitéhoz, amelyekben a karbon, C^{2-}_2 ionként van jelen. A következő sószerű góccok alakulhatnak ki, annak függvényében, hogy milyen fémeket használnak gócképzőnek: NaHC_2 , KHC_2 , CaC_2 , SrC_2 , BaC_2 , YC_2 , LaC_2 . Mindezek gócképző szerepét alátámasztja az, hogy a karbon és a fém közötti erős ionos kötés miatt nem oldódnak fel az olvadékban, viszont oldhatatlan részecskeként kiválnak.

A grafit alak kialakulására nincs hatása a góc típusának, mivel azt tapasztalták, hogy a FG típusú öntöttvasban lévő csíráképzők a SG-nél is hatékony csíráképzőként szerepelnek. A SG -nél szereplő legtöbb típusú csíráképző vegyület a grafit közepén található, melyek pásztázó elektronmikroszkóppal is megfigyelhetők voltak. A következő vegyületeket találták pl.: $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $x\text{MgO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot z\text{SiO}_2$, $x\text{MgO} \cdot y\text{SiO}_2$, $x\text{MgO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{MgS}$, MgS , $\text{Te} + \text{Mn} + \text{S}$ és lantanoid szulfidok. Feltételezhető, hogy a csíráképződési folyamat komplex szulfidok kialakulásával indul, amelyek a komplex oxidoknak szolgálnak csíráképzőként, amelyek végül a gömbgrafitnak lesznek a csírái [1][12][15][17][18][19][21][22].

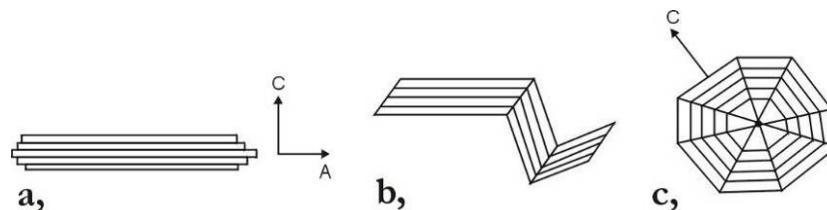
2.3.2. A grafitos eutektikum morfológiája

A grafit fázis atomosan sík módon kristályosodik. A grafit kristályosodása a Fe-C olvadékból a (0001) és $\{10\bar{1}0\}$ határu síkoknál figyelhető meg, melyet a 2.2.a ábra szemléltet. A grafit kristály lehetséges növekedési irányai „A” (prizma sík) és „C” (bázis sík), amelyet a 2.2.b ábra mutat. A grafit atomok között erős kovalens kötés ($4,19 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$ J/mol) van és minden egyes atom a szomszédjaival három elektronos kötést hoz létre, a negyedik elektron közös a réteggel, így kap a grafit fémes tulajdonságokat. A rétegek között gyenge molekuláris erők vannak ($4,19 \cdot 10^3 - 8,37 \cdot 10^3$ J/mol). A prizma sík („A”) nagy energiájú sík, melyen a szennyező elemek abszorbeálódnak. A bázis sík („C”) irányában növekedő grafit kristálynak a szilárdsága és keménysége nagyobb.



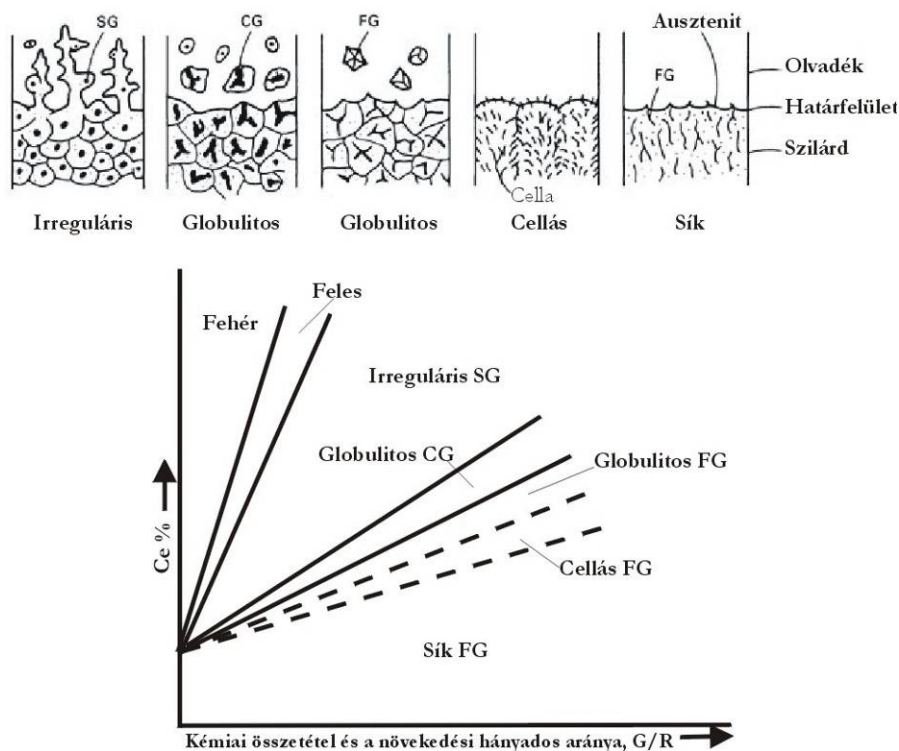
2.2. ábra. Grafit kristályos szerkezete (a) Grafit kristály (0001) és (1010) típusú síkjai (b) Grafit hexagonális szerkezete, a (0001) és (1010) síkokkal ábrázolva [17]

Az ausztenit-grafit eutektikumban a grafit alakját tekintve a 2.3. ábrán látható három különböző grafit alak szilárdul meg. A lemezgrafit „A” (2.2. ábrán is feltüntetett) vagyis a prizma sík irányába növekszik, ezzel szemben a gömbgrafit a „C”, vagyis a bázis sík irányába. A kompakt/vermikuláris grafit esetén a $(10\bar{1}0)$ síkon, vagyis a prizmasíkon létrejövő ikerképződés $(10\bar{1}2)$ játszik szerepet a grafit alak kialakulásában.



2.3. ábra. Grafit típusok sematikus ábrája az ausztenit-grafit eutektikumban (a) lemezgrafit (b) kompakt/vermikuláris grafit (c) gömbgrafit [17]

A 2.3. ábrán feltüntetett grafit morfológia kialakulásában számos tényező játszik szerepet pl.: kémiai összetétel, hőmérséklet/növekedési sebességi hányados (G/R) és a hűtési sebesség ($G \cdot R$). A 2.4. ábrán látható, hogy a G/R arány és a szennyező mennyiségének (pl. Ce) változtatásával hogyan alakul a grafit morfológia. Megfigyelhető, hogy ennek a két paraméternek a változtatásával igen változatos grafit alak hozható létre [17].

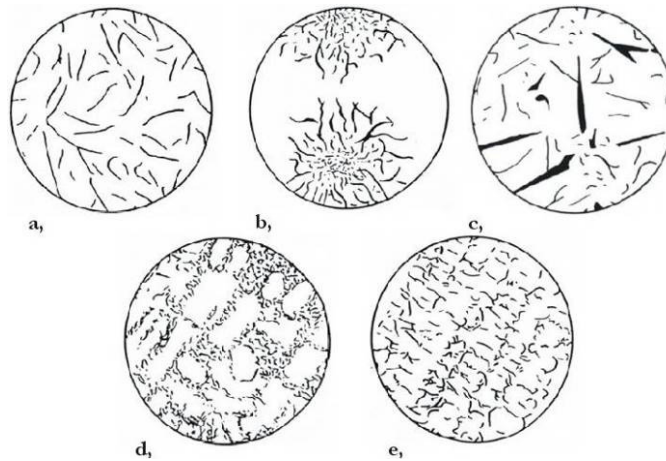


2.4. ábra. Szennyezőknek (pl. Ce) és a G/R hányadosnak a Fe-C-Si ötvözetekben lévő eutektikum morfológiájára gyakorolt hatása [17]

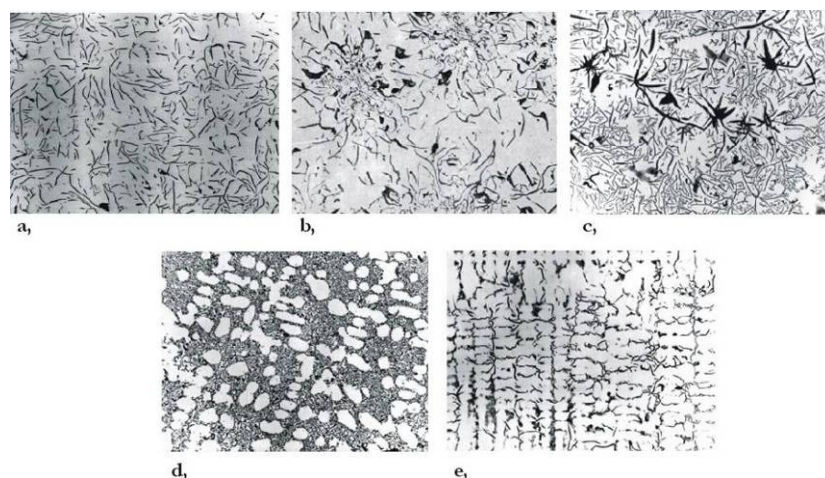
A lemezgrafit szerteágazó egykristály sok rácshibával, amelyek összekapcsolódnak egymással az őket körülvevő ausztenitben. A grafitlemezek hosszával összefüggésben öt eloszlási típus különböztethető meg, melyek fontos információt hordoznak az öntvény dermedésével kapcsolatban. Ezekről a típusokról az öntöttvas szövetszerkezetét jellemző szabványokban

sematikus ábrasorozat található, mely a 2.5. ábrán is megfigyelhető. A 2.6. ábrán pedig a típusokról készült fénymikroszkópos felvételek láthatók.

A típusokat „A”-tól „E”-ig terjedő betűkkel jelölik. Az „A” típusban a grafitlemezek véletlenszerűen rendeződnek az alapanyagban, és az optimálisan túlhűtött állapotból dermedt öntöttvasban találhatók meg. Mechanikai tulajdonságai kedvezőek. A „B” típus esetén a grafitlemezek finom rozettákban helyezkednek el, kialakulásához erősebb túlhűlés szükséges. A „D” és „E” típus keletkezésénél nagy a túlhűlés, de még nem elegendő ahhoz, hogy vas-karbid alakuljon ki. A „D” típus esetén a lemezek véletlenszerűen helyezkednek el, amíg az „E” típusnál meghatározott orientáció látható. Mindkét fajta erősen hipoeutektikus öntöttvasakban figyelhető meg. A „C” típusra durva egyenes lapokhoz hasonlító primer grafit megjelenése a jellemző, amely a hipereutektikus öntöttvasakban alakul ki. Ezen típus esetén számítani lehet a rosszabb mechanikai tulajdonságokra, viszont jó hővezető képességgel rendelkezik [2][17].



2.5. ábra. A grafitlemezek eloszlási módjait szemléltető etalonsorozat (a) A típus (b) B típus (c) C típus (d) D típus (e) E típus [23]



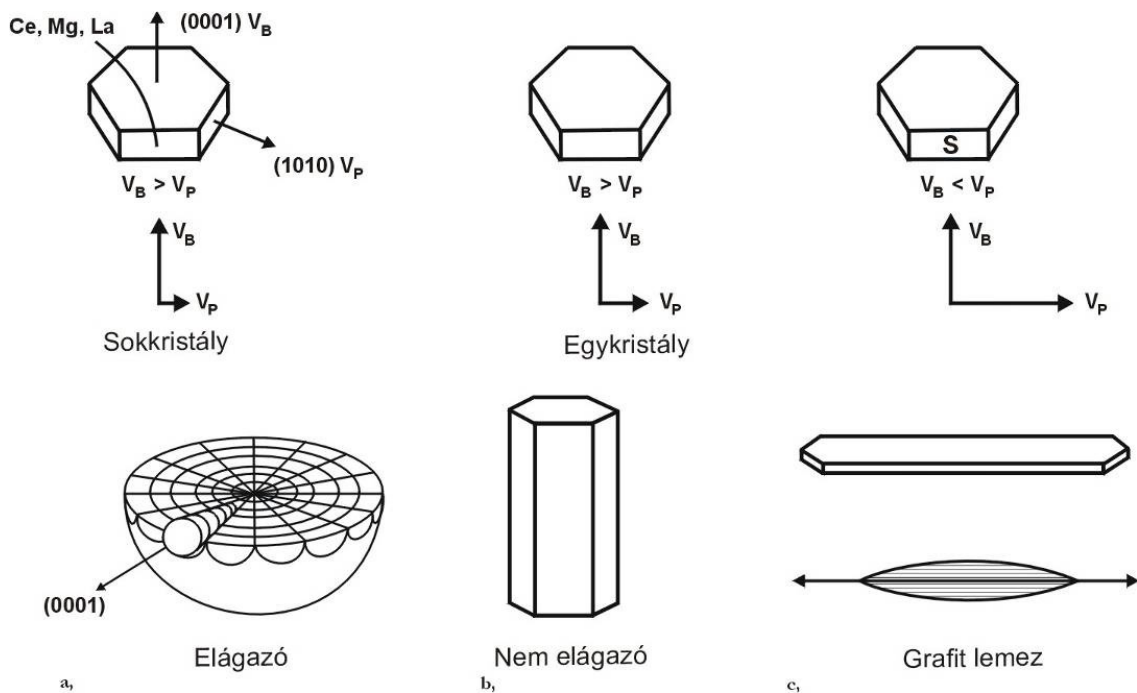
2.6. ábra. A különböző eloszlású grafitlemezekről készült mikroszkópos felvételek (a) A típus (b) B típus (c) C típus (d) D típus (e) E típus [23]

A grafitlemezek nagysága szintén befolyásolja az öntvény mechanikai tulajdonságait. Az erőteljesen hipoeutektikus és a gyorsan kristályosodó öntöttvasokban kicsi, rövid lemezek alakulnak ki. Ezzel a mérettel kedvező alakítási tulajdonságok és finom, szép öntvényfelület érhető el. Nagyméretű lemezek jellemzően a „C” típusnál és a lassan hűlő öntvények esetén keletkezhetnek. Jelenlétük akkor kívánatos, ha nagy hővezetésre és rezgéscsillapítási képességre van szükség [2][17][20].

2.4. Gömbgrafitos eutektikum keletkezése és növekedése

Az öntöttvas történelmileg az egyik legrégebbi vasötvözet és bizonyosan az egyetlen, amelynek két „élete” van: az egyik a gömbgrafitos öntöttvas felfedése előtt, a másik pedig ezt követően.

A gömbgrafit a korábban bemutatott lemezgrafittól eltérően polikristallit, melynek növekedése a „C” vagyis a bázis sík irányába történik (lásd 2.2.-2.3. ábra). A gömbgrafit kialakulásának és növekedésének magyarázatára számos teória született. Ezek közül az egyik a grafit morfológiáján alapuló túlhűlés elmélet, mely szerint az alak kapcsolatban van a szerkezeti és kinetikus túlhűléssel. Minden egyes grafit alaknak egy saját növekedési hőmérséklete van, melyet egy speciális hűtési sebességgel és összetétellel lehet elérni.

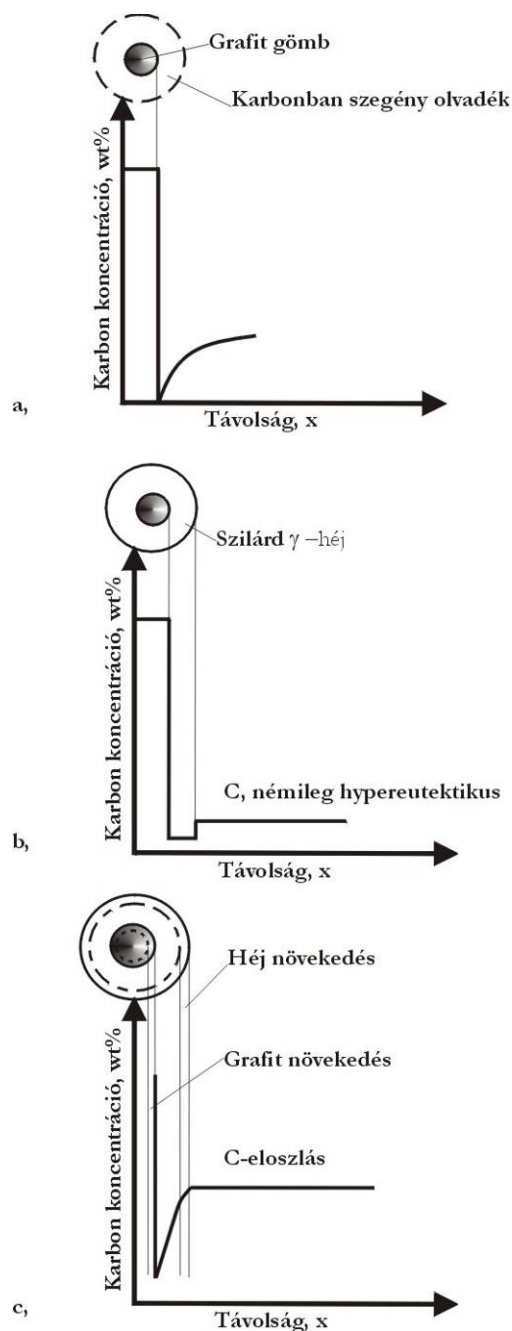


2.7. ábra. A növekedési irány változása különböző idegen atomok abszorpciója miatt (a) gömbösítő adagolásakor (b) tiszta környezetben (c) felületaktív szennyezők esetén pl. S, O [17]

A legnépszerűbb és a legelfogadottabb elmélet a „felület abszorpciós elmélet”. Ezen elmélet szerint a növekedési sebesség fordítottan arányos a síkon elhelyezkedő atomok elhelyezkedésével.

Ennek megfelelően egyensúlyi körülmények között a legnagyobb atomsűrűségű kristálytani síkon legkisebb a határfelületi energia és a legnagyobb a felületi csíráképződés valószínűsége.

Szennyezett olvadék esetén a különböző felületaktív elemek (pl. kén és oxigén) abszorbeálnak a



2.8. ábra. A gömbgrafit izotermás növekedése (a) gömbgrafit növekedés az olvadékban (b) ausztenit burok kialakulása (c) gömbgrafit növekedése az ausztenit héjon keresztül [17]

nagy felületi energiájú $(10\bar{1}0)$ síkon és gyenge kötést hoznak létre. Ennek a $(10\bar{1}0)$ síknak alacsonyabb lesz a felületi energiája mint a (0001) síknak, ezért ez lesz a növekedési irány. Ebben az esetben alakul ki a lemezgrafit. Amennyiben reaktív szennyezőket (pl. magnézium, cérium, lantán) adagolnak az olvadékba, a növekedés blokkolódik a $(10\bar{1}0)$ síkon, és ez polikristályos gömbgrafitot eredményez. Az elmélet magyarázatának sematikus ábrája a 2.7. ábrán látható. A 2.7. ábra a és b esetben a bázissík sűrűsége (V_B) nagyobb, mint a prizma sík sűrűsége (V_P) és ez eredményezhet elágazó vagy nem elágazó egykristályt is. A c, esetben ahol a $V_B < V_P$, a kén abszorbeálódik a prizma síkon és ez lesz a legsűrűbb megszállt sík, és ez lemezgrafitot eredményez [17].

A gömbgrafitos eutektikum növekedése összetettebb, mint a lemezgrafit növekedése (amelynél megállapított, hogy a növekedés során mindkét eutektikus fázis a grafit és az ausztenit is kapcsolatban van az olvadékkal). Széles körben elfogadott az a feltételezés, miszerint a gömbgrafitos eutektikumnak a növekedése a folyadékfázisban történő csíráképződéssel és növekedéssel indul. A csíráképződés és növekedés hatására csökken az olvadék karbontartalma, ami kedvező feltételt teremt az ausztenit képződéséhez és növekedéséhez a grafitcsíra körül. Végül a csíra beágyazódik az őt körülvevő ausztenit burokba. Amint kialakul a burok, a grafit további növekedése csak úgy

lehetséges, ha a karbon az auszteniten keresztüldiffundál. Ennek a folyamatnak a sematikus ábrája a 2.8. ábrán figyelhető meg [20].

Mindamellett, hogy a gömbgrafitos eutektikum képződése egy összetett folyamat, az ausztenit dendritok megszilárdulásának is fontos szerepe van az öntöttvas dermedése során. A primer fázist figyelembe véve, az öntöttvas megszilárdulása a következő lépésekből áll:

- 1) Az eutektikus hőmérsékleten az ausztenit dendritok és a gömbgrafit csírák keletkezése egymástól függetlenül zajlik a folyékony fázisban.
- 2) A gömbgrafit növekszik az olvadékban.
- 3) Az olvadékban történő áramlás következtében a grafit csírák ütköznek az ausztenit dendritokkal.
- 4) A gömbgrafit csíra bezáródik az ausztenit héjba és a primer ausztenit dendritágak közötti térbe is.
- 5) A grafit ezt követően a héjon keresztül történő diffúzió segítségével növekszik [17].

A grafit növekedésével és az ausztenit dendritok szerepével kapcsolatban több elmélet is létezik. A fő különbség a meglévő elméletekben abban a feltevésben rejlik, hogy a gömbszemcse finom pelyhekből épül fel, amely végleges alakját a körülötte lévő ausztenit dendritágak segítségével éri el, mivel a grafit pelyhek a dendritágak összezáródása miatt összenyomódnak, és így végül gömbszemcsét alkotnak. A kísérletek során használt öntöttvas összetételek mindegyike kissé hipoeutektikus volt. Ezzel jelezve, hogy a dendritnövekedési elmélet csakis ezekre az összetételekre alkalmazható [24].

2.5. Öntöttvasak mechanikai tulajdonságai

Heterogén ötvözetek mechanikai tulajdonságai a mátrixban található fázisok mechanikai tulajdonságaitól függenek. Az öntöttvasban, ahol lágy és kemény, szívós és rideg fázisok együtt fordulnak elő, bonyolultabb összefüggések találhatók, mint a hasonló tulajdonságú fázisokat tartalmazó heterogén ötvözetekben.

A mechanikai tulajdonságok szempontjából a legfontosabb paraméter, hogy az adott öntöttvas milyen fázisokat, illetve szövetelemeket tartalmaz. Így a következőkben ismertetem az öntöttvasban található szövetelemek, fázisok jellemzőit.

Ferrit: alacsony karbontartalmú α -vas fázis, amely lágy és így jól alakítható. Ferritképző elemek: alumínium, arzén, bór, berillium, króm, molibdén, nióbbium, oxigén, foszfor, kén, antimon, szilícium, ón, titán, vanádium, wolfram, cirkon. A Si az öntöttvasak fő ötvözői közé tartozik (lásd 1.3. fejezet), mennyiségének növelése esetén nő az öntöttvas ferrit tartalma. Az öntvény hűlési sebesség változtatása során az alacsony hűtési sebesség kedvez a ferrit kialakulásának.

Cementit vagy karbid: kemény, rideg fázis. A karbid lehet vas-karbid (Fe_3C), vagy pl. króm-, molibdén-, vanádium-, titán-karbid. A cementit (vas-karbid) elsősorban a gyors hűlés hatására alakul ki pl. az öntvény sarkainál vagy az öntvény felületén. Cementitképző ötvözőelemek a következők, hatásuk erősödésének sorrendjében: wolfram, mangán, molibdén, kén, króm, vanádium, magnézium, cérium.

Perlit: a Fe-C rendszer eutektoidja, egymással váltakozó ferrit és cementit lemezek alkotják. A ferritnél nagyobb keménységgel és szakítószilárdsággal rendelkezik, viszont kisebb a szívóssága. A perlit szerkezetét alkotó lemezek közötti távolság összefüggésben van a fázis keménységével és a szakítószilárdsággal. Magas értékek esetén finom lemezes a perlit szerkezete, amely gyorsabb hűléssel vagy ötvözéssel érhető el. A nióbbium, réz és ólom növeli perlit/ferrit arányt.

Steadit: a Fe-P-C rendszer ternér eutektikuma, melynek 930°C -on van az olvadáspontja. Jellemzően az utoljára dermedő folyékony fázis, így az eutektikus cella és a primer ausztenit érintkezési felületén kristályosodik. A steadit, hasonlóan a cementithez rontja az öntvény mechanikai tulajdonságait.

Más egyéb szövetszerkezeti elemek is létrehozhatók az öntöttvasban, a hűtés és az ötvöző elemek változtatásával, pl. *bainit és martenzit*. A bainites szövetszerkezet megfelelő összetétel

esetén öntött állapotban is elérhető, elsősorban azonban hőkezelési eljárásokkal az ausztenit bomlástermékeként hozzák létre. A bainites öntöttvas fő ötvözői a nikkel és a molibdén. Martenzites szövet kialakítása hőkezeléssel történik, amely során az öntvényt az ausztenitesítő izzítást követően gyorsan lehűtik. A bainites öntöttvasat nagy szilárdság és szívósság, míg a martenzitest nagy kopásállóság, mérsékelt szilárdság és szívósság jellemzi.

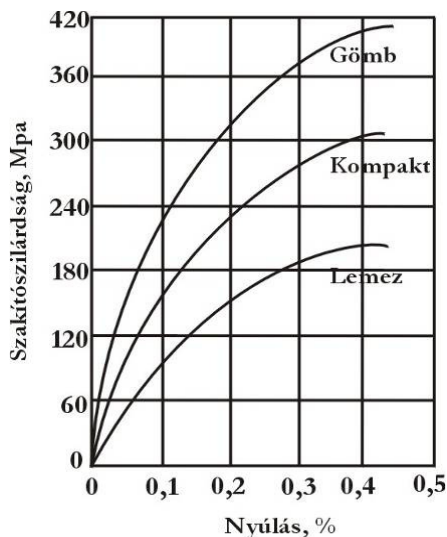
Ausztenit: a tiszta Fe és Fe-C ötvözetekben csak nagy hőmérsékleten stabil, de különböző ötvözőkkel pl. nikkel (18-36%) segítségével szobahőmérsékleten is stabillá tehető. A gömbgrafitos ausztenites öntöttvas szilárdsága nagyobb, mint a lemezgrafitosé. Általában hő- és korrózióállóságuk is nagyobb, mint a hasonló összetételű lemezgrafitos öntöttvasnak. Ausztenitképző elemek: arany, karbon, kobalt, réz, hidrogén, magán, nitrogén, nikkel.

Mangánszulfid (MnS) zárvány: gyakran található véletlenszerűen elhelyezkedve a mátrixban. Galambszürke színű, meghatározott formájú zárványok, amelyek az utolsó megszilárduló fázis előtt keletkeznek. Szándékos adagolás következtében kialakuló mangánszulfid zárványok képződésével megelőzhető, hogy rideg vas-szulfid zárványok alakuljanak ki a szemcsehatáron [11][12][25]. Az öntöttvasban található néhány szövetelem mechanikai tulajdonságai a 2.1. táblázatban láthatók.

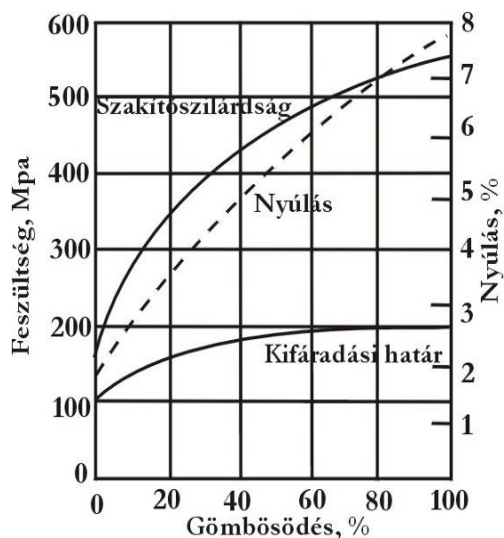
2.1. táblázat. Öntöttvas szövetelemeinek mechanikai tulajdonságai [12]

Szövetelem	Szakítószilárdság (MPa)	Nyúlás (%)	Keménység (HV)
Ferrit	250-350	25-40	80-100
Perlit	750-1000	10-15	200-300
Cementit	30	-	900
Steadit	30	-	600
Grafit	-	-	-
MnS	-	-	-

A grafitnak, mint a szövetszerkezetben jelenlévő rideg fázisnak, döntő jelentősége van az öntvény mechanikai tulajdonságai szempontjából, mivel a szívós, közepesen szilárd ferrit és az ugyancsak szívós és jelentős szilárdságú perlit mellett egy olyan rideg fázis van, melynek szilárdsága és szívóssága gyakorlatilag sincs. Lemezgrafitos öntöttvas esetén a lemezgrafit hatása 10-15-ször akkora, mint amekkora a fázis mennyisége alapján várható lenne. Mindezt a lemezgrafit éleinek „bemetsző hatása” okozza, amely az alapszövet szilárdságának csak kis hányadát engedi érvényesülni, a szívósságból pedig szinte semmit. Így megállapítható, hogy alapvetően a grafit mennyisége határozza meg a tulajdonságait.



2.9. ábra: A grafit morfológiai hatása a feszültség-nyúlás görbére [1]



2.10. ábra: A grafit gömbösödésnek hatása néhány mechanikai tulajdonságra [1]

Gömbgrafitos öntöttvasnál - azonos összetétel esetén - a grafit mennyisége aránylag tág határok között változhat anélkül, hogy a tulajdonságai lényegesen változnának. Egyedül a $R_{p0,2}$ -t befolyásolja egyértelműen a grafit mennyisége. Mindazonáltal a grafitnak az öntöttvasak mechanikai tulajdonságaira gyakorolt káros hatása a gömbgrafitos öntöttvasakra is érvényes, de sokkal kisebb mértékben. A 2.9. ábrán a grafit morfológiájának a feszültség-nyúlás görbére gyakorolt hatása figyelhető meg. Jól látható, hogy a gömbgrafit esetén kétszer nagyobb szakítószilárdsági értékek várhatók, mint lemezgrafit esetén.

A 2.10. ábrán pedig látható, hogy a grafit gömbösödésével hogyan változik néhány mechanikai tulajdonság. Egyértelmű, hogy amint a grafit alakja közelít a gömb alak felé, megszűnik a grafitlemezek éleinek az alapszövetre gyakorolt „bemetsző hatása” és így nőnek a nyúlás és szakítószilárdsági értékek is.

Az öntöttvasban hőkezeléssel számos szövetelem létrehozható, de a szövetet lényegében az összetétele és az öntött állapotból való lehűlés sebessége határozza meg. Minél nagyobb a karbon- és a szilíciumtartalom, annál inkább alakul ki a stabilis rendszer szerinti szövet. A lehűlési sebesség növelése

viszont a metastabilis rendszer folyamatainak kedvez. Az öntést követő lehűlési sebesség az öntőforma hőelvonó képességétől és az öntvény falvastagságától függ. A karbon, a szilícium, és a lehűlési sebesség hatását az úgynevezett öntöttvas diagramokban foglalják össze. A klasszikus Maurer-diagram egy adott lehűlési sebesség mellett a karbon- és a szilíciumtartalom alapján adja meg az öntöttvas szövetét. A diagram azt az egyszerű elképzelést használja fel, miszerint kis szilícium- és nagy karbontartalom esetén az öntöttvas karbidosan kristályosodik, míg kis karbon és nagy szilíciumtartalomnál grafitosan. Ennek függvényében az öntöttvas lehetséges szövetelemeit a 2.2. táblázat tartalmazza [11][12][25].

2.2. táblázat. Az öntöttvasak kristályosodásának és átalakulásának lehetséges módjai és az ez alapján kialakuló szövetelemek

Kristályosodás	Átalakulás	Szövetelemek
Karbidos	Karbidos	Lédeburit ³ +perlit
Karbidos+grafitos	Karbidos	Lédeburit+grafit+perlit
Grafitos	Karbidos	Grafit+perlit
Grafitos	Karbidos+grafitos	Grafit+ferrit+perlit
Grafitos	Grafitos	Grafit+ferrit

A 2.2. táblázatban feltüntetett szövetelemeken kívül, ahogy említettem, hőkezeléssel számos más szövetelem is létrehozható. A 2.3. táblázatban egy olyan részletes osztályozás látható, amelyben a hőkezelési eljárásokkal létrehozott szövetelemek is megtalálhatók, és emellett különbséget tesz a grafit morfológiájában is. Látható még, hogy a grafit alak milyen töretfelületet eredményez, és azt, hogy a végleges megjelenési forma a megszilárdulási folyamatok végére alakul ki, vagy csak hőkezeléssel érhető el.

2.3. táblázat. Az öntöttvas típusok osztályozása az alpmátrixban található szövetelemek, a karbonban telített fázis megjelenési formái és a töretfelület alapján [1]

Öntöttvas típusok	Karbonban gazdag fázis	Mátrix	Töretfelület	Szövetszerkezet kialakítható
Szürke öntöttvas	Lemezgrafit	Perlit	Szürke	Megszilárdulás során
Gömbgrafitos öntöttvas	Gömbgrafit	Ferrit, perlit, ausztenit	Ezüstszerű	Megszilárdulás során, vagy hőkezeléssel
Kompakt grafitos öntöttvas	Kompakt/vermikuláris grafit	Ferrit, perlit	Szürke	Megszilárdulás során
Fehér öntöttvas	Fe ₃ C	Perlit, martenzit	Fehér	Megszilárdulás során és hőkezeléssel
Feles öntöttvas	Lemezgrafit + Fe ₃ C	Perlit	Feles töretű	Megszilárdulás során
Temperöntvény	Temper grafit	Ferrit, perlit	Ezüstszerű	Hőkezeléssel
Ausztemperált gömbgrafitos öntöttvas	Gömbgrafit	Bainit	Ezüstszerű	Hőkezeléssel

A különböző szövetszerkezetű öntöttvasak különféle morfológiájú grafitot tartalmazhatnak, így a várható mechanikai tulajdonságaik is igen változatosak lehetnek, hiszen az

³ Lédeburit: a metastabil rendszer 4,3% C-tartalmú eutektikuma

alapszövetnek és a grafit morfológiának is nagy hatása van. A 2.4. táblázatban néhány öntöttvas típus mechanikai tulajdonságai találhatók különféle szövetszerkezetű alapanyag esetén.

2.4. táblázat. Különböző öntöttvas típusok mechanikai tulajdonsági különböző szövetszerkezet esetén [1][7][9][10][26][27][28][29]

Grafit	Szövelelem	Keménység (HB)	Szakítószilárdság MPa	Nyúlás, %
Lemez	Ferrit	100	108	-
	Ferrit+perlit	170-229	min. 124	-
	Perlit	187-269	207-276	-
Gömb	Ferrit	143-187	415	18
	Ferrit+perlit (a legtöbb mennyiség a ferritből van)	131-220	min. 448	min. 12
	Ferrit+perlit	187-269	min. 555	3-6
	Perlit	241-302	min. 689	min. 3
	Martenzit	269-321	min. 827	0
		388-477	min. 1379	1
	Ausztenit	<175	min. 345	min. 20
		<190	min. 379	min. 7
Kompakt	Ferrit	138-156	338-420	6-8
	Ferrit+perlit	128-164	300-400	3,5-7
	Perlit	200-220	400-550	0,5-1,5
Temperszén	Ferrit	<156	354-365	10-18
	Perlit (megeresztett)+ferrit	163-241	414-552	4-10
	Martenzit (megeresztett)	217-321	586-724	1-3

A 2.4. táblázatban nagyon jól látható, hogy milyen széles skálán változtathatók az öntöttvas mechanikai tulajdonságai. Amennyiben a grafit alakja nem változik, akkor természetesen az alapmátrixban található szövelelemeknek van leginkább hatása. Mindamellet meg kell említeni, hogy azonos grafit alak esetén hatása van a grafit mennyiségének, s ezzel szoros összefüggésben pedig a grafit méretének is. Itt most ezeket a tényezőket nem vizsgáljuk.

A gömbgrafitos öntöttvasnál, ahol a grafit alak miatt a legkedvezőbbek a tulajdonságok, az alapszövetben lévő fázisoknak jobban érvényesülnek a szilárdsági és szívóssági tulajdonságai. Egy ferrites szövetszerkezetnél elért maximum 415 MPa szakítószilárdsági érték egy martenzites szövetszerkezetnél akár ennek közel a négyszerese is lehet, 1379 MPa. Mindez más grafit alak esetén nem érhető el. Már ez is jól demonstrálja azt a tényt, hogy a grafit alak befolyásoló hatása jelentős. Amennyiben összehasonlításképpen megnézzük a ferrites alapszövetnél elért értékeket mind a négy grafit alaknál, szintén ugyanez a következtetés vonható le. A lemezgrafit élének bemetsző hatása alacsony szakítószilárdságot eredményez, de amint a grafit alakja a gömb felé közelít, az értékek növekedni kezdenek, és végül a gömb esetén a legnagyobbak. Ez a hatás a 2.10. ábrán is jól megfigyelhető.

Összegezve: a kristályosodása közben kialakuló primer szerkezetnek és ezen belül a grafitos eutektikumnak igen jelentős hatása van az öntöttvas tulajdonságaira. Fontos ismerni azokat a tényezőket, melyek szerepet játszanak a grafit morfológiájának kialakításában. Lényeges körülmény, hogy a kristályosodás kezdeti szakaszában a grafitcsíra kialakulásakor és növekedésekor a grafit teljesen felveszi végső alakját. A mechanikai tulajdonságok szempontjából a legfontosabb paraméter, hogy az adott öntöttvas milyen fázisokat, illetve szövetelemeket tartalmaz. A grafitnak, mint a szövetszerkezetben jelenlévő rideg fázisnak (mennyiségének, méretének és alakjának) döntő jelentősége van az öntvény mechanikai tulajdonságai szempontjából, mivel a szívos, közepesen szilárd ferrit és az ugyancsak szívos és jelentős szilárdságú perlit mellett egy olyan rideg fázis van, melynek szilárdsága és szívóssága gyakorlatilag nincs. A gömbgrafitos öntöttvasnál – ahol a grafit alak miatt a legkedvezőbbek a tulajdonságok – az alapszövetben lévő fázisoknak jobban érvényesülnek a szilárdsági és szívóssági tulajdonságai, míg a lemezgrafitos öntöttvasokban a grafit éleinek bemetsző hatása alacsonyabb szakítószilárdságot eredményez, de amint a grafit alakja a gömb felé közelít, az értékek növekedni kezdenek, és végül a gömb esetén a legnagyobbak.

3. ÖNTÖTTVAS SZÖVETSZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZEREI

Az öntöttvas szövetszerkezeti vizsgálatai során legelterjedtebbek a fénymikroszkópos vizsgálati módszerek. Ezek sok esetben a megfelelően kiválasztott reagenssel és kontraszteljárással elegendőek ahhoz, hogy feltárják a szövetszerkezetben lévő fázisokat. Amennyiben több, ezzel a módszerrel már nem vizsgálható információkra van szükség, leggyakrabban a pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope, SEM) használata a legkézenfekvőbb. Az elektronmikroszkópba helyezett, a visszaszórtelektron diffrakción (Electron Back Scattering Diffraction, EBSD) alapuló eljárással pedig még több információt kaphatunk a vizsgált anyagról.

3.1. Szövetszerkezet jellemzése pásztázó elektronmikroszkóppal

A pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope, SEM) olyan berendezés, amelyben egy jól fókuszált elektronnyaláb végigpásztázza a vizsgálandó test felületét. Ennek a sugárzásnak a hatására elektronok lépnek ki a minta felszínközeli rétegeiből. A pásztázással szinkronban egy másik elektronnyaláb egy katódsugárcső (monitor) képernyőjét pásztázza, a mintából kilépő elektronok számával arányos intenzitással. Így a monitoron megjelenik a próbatest felszínének képe. A nagyítást a két pásztázás méretaránya adja.

A beérkező elektronnyaláb a minta anyagával kölcsönhatásba lép, amelynek eredményeként a következő jelenségek játszódnak le. A gerjesztett anyagban Auger elektronok, szekunder elektronok, visszaszórt elektronok, karakterisztikus röntgensugárzás, háttér röntgensugárzás, fluoreszcens röntgensugárzás keletkezik. Az M.1. mellékletben részletesen ismertetem a pásztázó elektronmikroszkópos mérések során felhasznált jeleket.

A szekunder elektronok a gerjesztett térfogat 1-10nm mélységéből (lásd M.1.-1. ábra) távoznak, tehát közel a felülethez, így rendkívül érzékenyek a felületi egyenetlenségekre. Ennek következtében jó topográfiájú felvételek készíthetők velük. Ezzel szemben a visszaszórt elektronok mélyebbről 0,1-1 μ m távolságban (lásd M.1.-1. ábra) keletkeznek az anyagban, ezért ezek már kevésbé érzékenyek a felület minőségére. Viszont nagyon jó rendszámkontrasztos felvételek készíthetők a visszaszórt elektronok segítségével. A 3.1. ábrán egy lemezgrafitos öntöttvasról készült szekunder elektron felvétel, a 3.2. ábrán pedig egy visszaszórt elektron felvétel figyelhető meg [31].

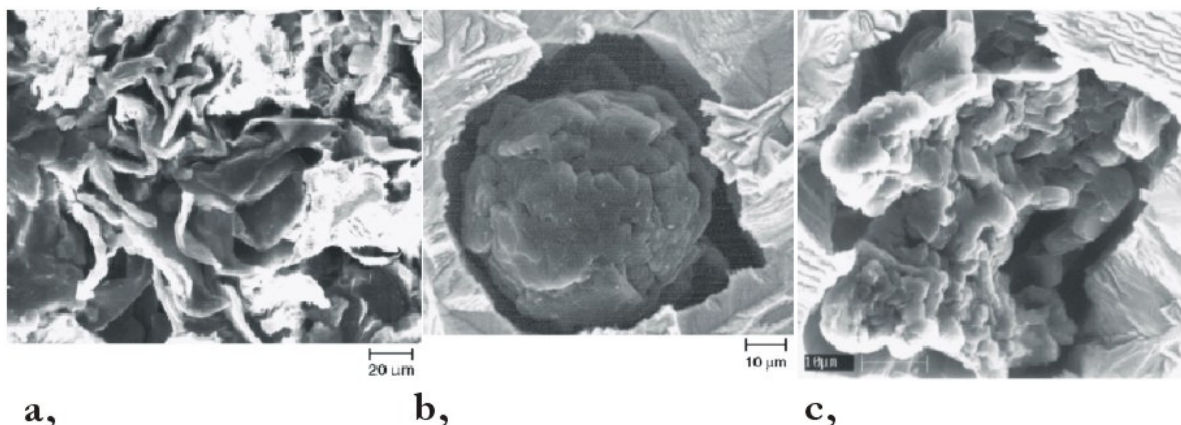


3.1. ábra. Lemezgrafitos öntöttvas pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (szekunder elektron=SE, eredeti nagyítás: 500x) [14]

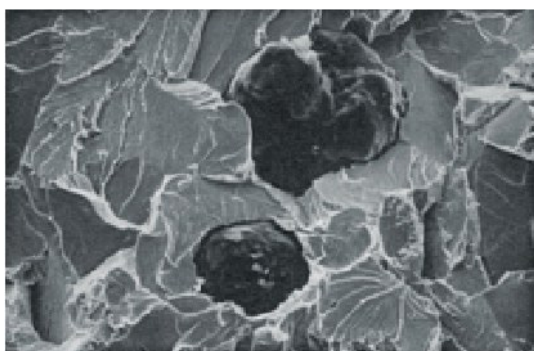


3.2. ábra. Lemezgrafitos öntöttvas pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (visszaszórt elektron=BSE, eredeti nagyítás: 500x) [14]

A szekunder elektronnal alkotott kép segítségével jól vizsgálható pl. a grafit alakja és persze az öntöttvas töretfelülete is. A 3.3. ábrán látható lemezes, gömb és a kompakt grafit szemcse pásztázó elektronmikroszkópos felvétele. A mintákat a vizsgálatra mélymaratással állították elő, melynek hatására az alapanyagban lévő grafit szemcsék jól láthatóvá váltak.



3.3. ábra. Elektronmikroszkópos felvételek különböző típusú grafitról (felvételek szekunder elektronnal készültek, SE) a, lemezgrafit (eredeti nagyítás: 1000x) b, gömbgrafit (eredeti nagyítás: 1000x) c, kompakt grafit (eredeti nagyítás: 1500x) [13]

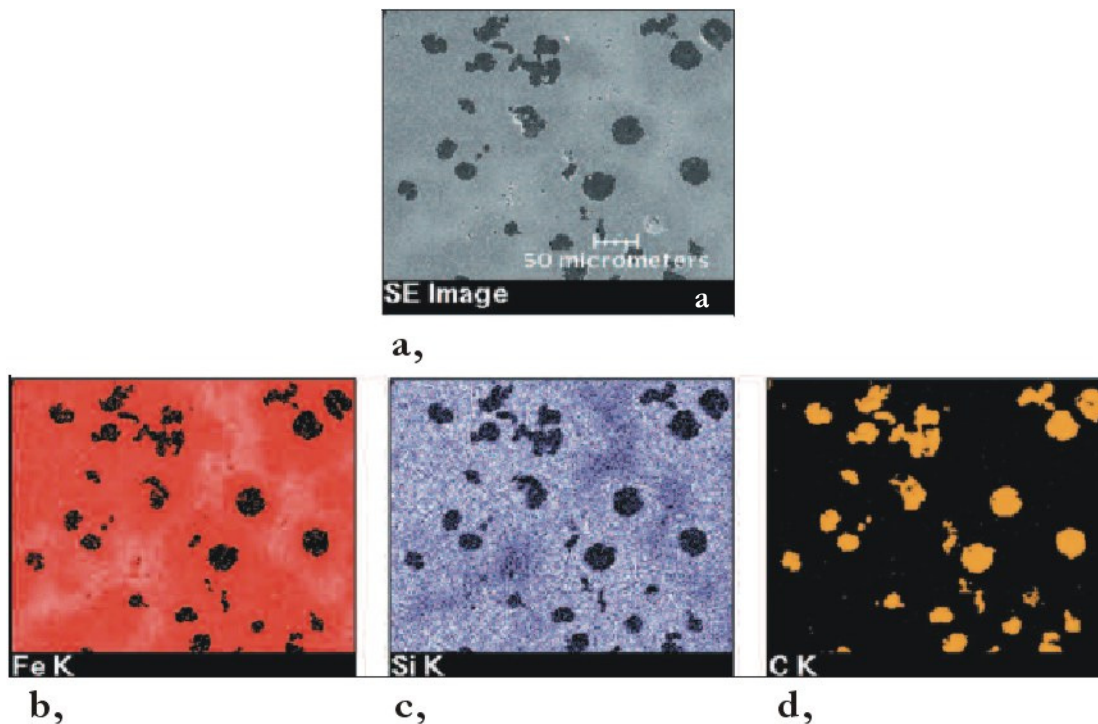


3.4. ábra. Ferrit-perlites alapszövetű gömbgrafitos öntöttvas töretfelülete (eredeti nagyítás: 715x) [30]

A töretfelületek vizsgálatának egyik leghatékonyabb vizsgálóberendezése a pásztázó elektronmikroszkóp, amely az öntöttvasaknál is jól alkalmazható. A 3.4. ábrán egy ferrit-perlites alapszövetű gömbgrafitos öntöttvas töretfelülete látható.

A beeső elektronnal hatására keletkező karakterisztikus röntgensugárzást energia szerint felbontva az energiadiszperzív

röntgenspektrumhoz (EDS) jutunk. Az EDS legnagyobb előnye az, hogy a minta egy tetszőlegesen kiválasztott területét, esetleg egyetlen pontjának (pontosabban rendkívül kis térfogatának) összetételét meghatározhatjuk. Ez a lokális analízis egyedülállóvá teszi az EDS-t a többi kémiai analitikai módszer között, amelyekkel csak átlagos összetételt mérhetünk, de nem tudjuk kimutatni a helyi dúsulásokat [31]. A 3.5. ábrán pásztázó elektronmikroszkóppal készült szekunder elektron felvétel és ugyanazon területről készült röntgen képeken figyelhető meg a vas, a szilícium és a karbon eloszlása.



3.5. ábra. Öntöttvasról készült különböző elemek Rtg képe a, szekunder elektron felvétel b, vas Rtg képe c, szilícium Rtg képe d, karbon Rtg képe [32]

3.2. Viasszaszórtelektron diffrakció (EBSD) alkalmazási lehetőségei

Hagyományos technikai anyagaink nagy része polikristályos fém, azaz olyan térfogatrészek (szemcsék) építik fel, melyeken belül a kristálytani szerkezet (a kristályhibáktól eltekintve) azonos. Ezek mérete a néhány mikrométertől a néhány száz mikrométerig terjed, emiatt bizonyos tulajdonságaik mikroszkópos, illetve elektronmikroszkópos technikákkal vizsgálhatók. A szemcsét felépítő kristálytani rend és a test makroszkópikus kiterjedése közti geometriai kapcsolatot szemcseorientációnak hívjuk. A szemcsehatár közvetlenül csak nagyon nehezen vizsgálható (pl. atomerő-mikroszkóp segítségével), tulajdonságaira mégis következtethetünk, ha az általa elválasztott két szemcse egymáshoz képesti orientációját ismerjük. Ezt a mennyiséget elorientáltságnak nevezzük, és többféleképpen meghatározhatjuk.

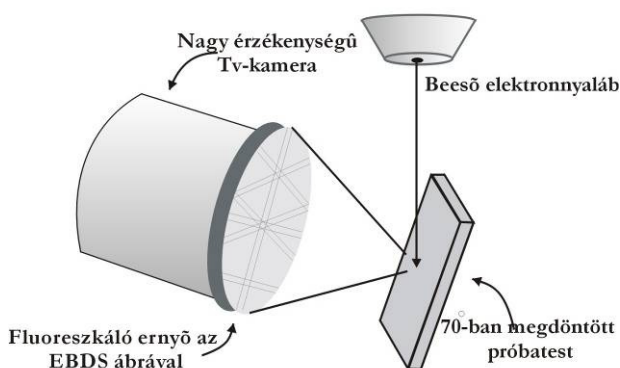
A szemcseorientáció meghatározásának legelterjedtebb módja a transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálat. A transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok legnagyobb hátránya a bonyolult mintaelőkészítés. Az egyedi szemcseorientáció meghatározása a pásztázó elektronmikroszkópban (Scanning Electron Microscope, SEM) 1973-ban sikerült először. 1987-ben alkalmazták először az on-line indexelési technikát, amelynek segítségével a pásztázó elektronnyaláb által besugárzott térfogat orientációját a pásztázás sebességével összemérhető gyorsasággal tudták meghatározni.

A vizsgálat a visszaszórtelektron diffrakción (Electron Back Scattering Diffraction, EBSD) alapul. A primer elektronnyaláb útjában elhelyezett mintában a primer elektronok rugalmatlan szóródást szenvednek, majd ezek a rugalmatlanul szórt elektronok az egyes kristálytani síkokon rugalmas, a Bragg-feltételnek megfelelő újabb szóródáson mennek keresztül.

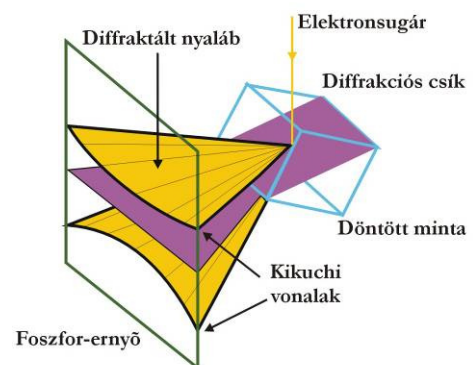
$$n\lambda = 2d \sin \Theta$$

- λ : az elektronok hullámhossza, d : a kristálysíkok közötti távolság, Θ : a beesési szög, n : visszaverődés rendje.

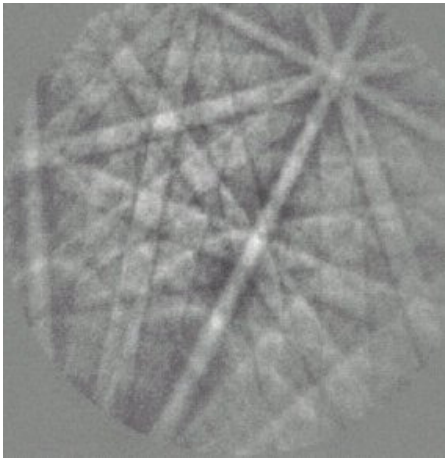
Ez utóbbi diffrakció eredményeképpen az elektronok a kristálytani síkról egy kúppalást mentén szóródnak, és ennek a kúppalásnak, valamint egy alkalmas helyen elhelyezett felfogó ernyőnek a metszés-síkjában egy jellegzetes vonalas rajzolat, az ún. Kikuchi-ábra alakul ki. A berendezés elvi felépítése a 3.6. ábrán, a Kikuchi-vonalak keletkezése a 3.7. ábrán, az ún. Kikuchi-ábra pedig a 3.8. ábrán látható. A vonalak elhelyezkedéséből a vizsgált pont (illetve annak környezetének) kristálytani szerkezete és orientációja meghatározható, azaz a Kikuchi-ábra azonosítható és indexelhető, amely a 3.9. ábrán figyelhető meg.



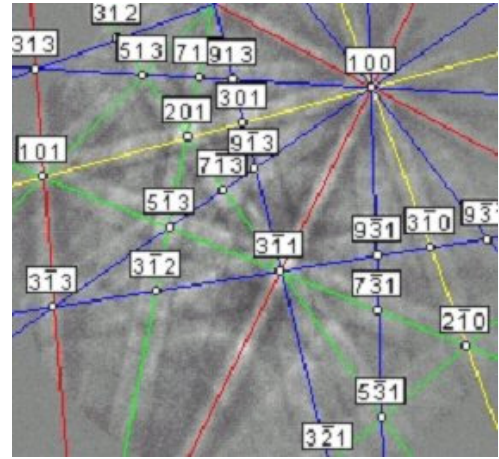
3.6. ábra. Az EBSD elvi felépítése [33]



3.7. ábra. Kikuchi-vonalak keletkezése [33]

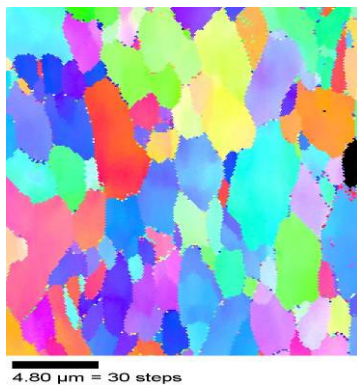


3.8. ábra. Kikuchi-ábra [33]

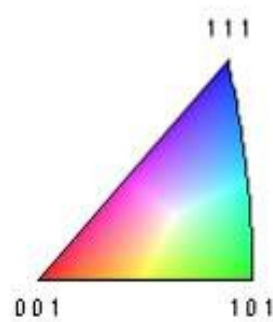


3.9. ábra. Indexelt Kikuchi-ábra [33]

A minta egy pontjának orientációját többféleképpen is megadhatjuk, de minden esetben azt az információt kell meghatároznunk, hogy a test makroszkópikus kiterjedéséhez képest a kristályrács hogyan helyezkedik el. Egy 30.000 pontból álló orientációs térkép (melynek elkészítése nagyjából 50 percet vesz igénybe) látható a 3.10. ábrán. Az egyes mérési pontok orientáció-megadása az inverz pólusábra egységháromszögének színkódolásával történik, amely a 3.11. ábrán figyelhető meg. Az inverz pólusábra azt mutatja meg, hogy a próbatest makroszkópikus felületének normálisa milyen kristálytani iránynak felel meg. A 3.10. ábrán megfigyelhető, hogy egy szemcsén belül is tapasztalhatunk színárnyalat-eltérést, azaz lokális orientáció-változást [33][34].

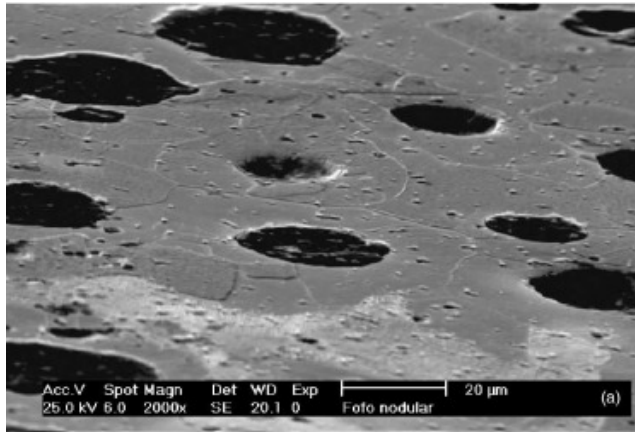


3.10. ábra. Ferrites acél minta orientációs térképe [33]

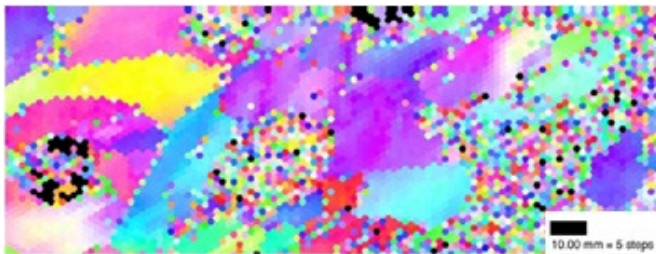


3.11. ábra. Inverz pólusábra egységháromszögének színkódolása [33]

Szemceorientáció meghatározást végeztek gömb, lemez és kompakt grafitot tartalmazó öntöttvasak esetén is. A vizsgálatok célja az volt, hogy megállapítsák, hogy ezen típusú öntöttvasak mikroszerkezetére milyen textúráltság jellemző.



3.12. ábra. 75°-ban megdöntött gömbgrafitos öntöttvas pásztázó elektronmikroszkópos felvétele (szekunder elektron=SE) [35]



3.13. ábra. Gömbgrafitos öntöttvas orientációs térképe [35]

A 3.12. ábrán a gömbgrafitos öntöttvas szekunder elektronnal készített pásztázó elektronmikroszkópos felvétele látható. A 75°-ban megdöntött mintán elvégzett EBSD mérés eredménye, az orientáció térkép a 3.13. ábrán figyelhető meg. A sötét foltok a grafit részecskékhez, a rendszertelenül elhelyezkedő színes pontok a perlit kolóniákhoz, a homogén színes területek pedig a ferrit szemcsékhez tartoznak. A gömb, lemez és kompakt grafitot tartalmazó öntöttvasakon elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a ferrit szemcsék orientációs eloszlása véletlenszerű, ami a gyártási folyamat következménye. A jellegzetes textúra hiánya a gyártás elején alkalmazott beoltásnak köszönhető, a véletlenszerűen bejuttatott csírák okozzák [35].

3.3. Fázisok azonosítása színesmaratás segítségével

A fémekben és az ötvözetekben található különböző fázisok azonosítása meglehetősen összetett feladat. A kémiai összetételből, az esetleges alakítási és hőkezelési előéletből, illetve a fázisdiagramokból következtetni lehet arra, hogy milyen fázisok vannak jelen a vizsgált mintában. Mindezek ellenére mégis nagy problémát jelenthet a várható szövetszerkezet előhívása.

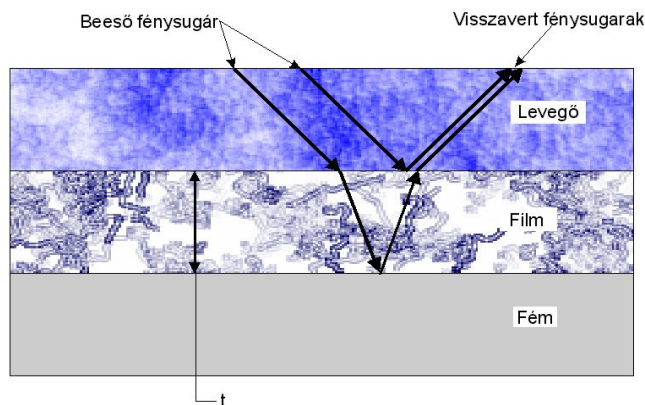
A metallográfiában fázisok kimutatására a fázisok oldékonysági potenciáljának különbségén alapuló korróziós (oldódási) jellegű, úgynevezett korróziós maratás mellett egyre nagyobb teret nyernek a színesmaratási technikák, mivel egyes fémek és ötvözetek mikroszerkezetéről több információhoz juthatunk, ha a színes marószereket alkalmazunk. Öntöttvas esetén, ahol egyszerre több fázis is jelen lehet, fontos, hogy jól elkülöníthetők, azonosíthatók legyenek a fázisok. Színesmaratás hatására olyan részletek is jól láthatóvá

válhatnak, melyek hagyományos korróziós (oldódási) maratással csak igen nehezen különíthetők el. A maratás során létrehozott színekülönbségnek köszönhetően pedig különböző kvantitatív értékelések is elvégezhetők.

3.3.1. A színesmaratás alapjai

A színesmaratás során alkalmazott marószereket a megfelelő elszíneződés érdekében kémiai úton állítják be, hogy a minta felületén egy stabil általában $0,04\text{--}0,5\ \mu\text{m}$ vastagságú filmet képezzenek. Ezek a vékony filmek oxid, szulfid, komplex molibdát, szelén vagy kromát típusú filmek lehetnek, melyek az interferencia hatásnak köszönhetően különbözőképpen színeződnek.

Az interferencia erősen függ a keletkezett film vastagságától, így a passzíváló filmek, amelyek alumínium vagy saválló anyagok felületén jelentkeznek, nem teszik láthatóvá a mikroszerkezetet, mivel túl vékonyak. Más eljárásokkal is létre lehet hozni interferencia filmet, pl. hőfuttatás és a különböző elemek gőzfázisú leválasztásával. Bármilyen módszerrel is hozzuk létre a filmet, az interferencia jelenség annak eredményeként figyelhető meg, hogy a filmréteggel bevont fém felületre beeső fénysugarakat a film felülete és a fém felülete is visszaveri. Ez a jelenség függ a fényforrás levegőben mért hullámhosszától (λ), a film vastagságától (t) és a film törésmutatójától (n). A levegő–film–fém interferenciahatás vázlatos rajza a 3.14. ábrán látható.



3.14. ábra. A levegő–film–fém interferenciahatás vázlatos rajza [37]

Interferencia jöhet létre abban az esetben, ha a két felület által visszavert fény effektív úthossza egymásnak a $\lambda/2$ páratlan számú többszöröse. A visszavert fény effektív úthosszaiban lévő különbség arányos a film vastagságának kétszeresével. Így, ha a fénynek a filmben mért alacsonyabb sebessége által okozott fázisváltásokat elhanyagoljuk, interferenciát figyelhetünk meg az

egymással a $\lambda/4$ páratlan számú többszöröseiben különböző filmvastagságnál. Ha a fénynek a filmben mért alacsonyabb sebességét figyelembe vesszük, az interferenciát a $\lambda/4n$ páratlan számú többszörösénél találjuk. Ha megnézünk egy fehér fényt, amely egy olyan levegő–film–fém rendszerre esik, amelynek filmrétege olyan vastag, hogy a fém felületéről visszavert fény zöld komponense és a film felületéről visszavert fény zöld komponense pontosan $\lambda/4$ (vagy ennek páratlan számú többszöröse) fáziseltolódásban van egymáshoz képest, akkor a zöld fény interferenciáját figyelhetjük meg, vagyis a fény zöld komponense kioltódik, és a visszavert fény

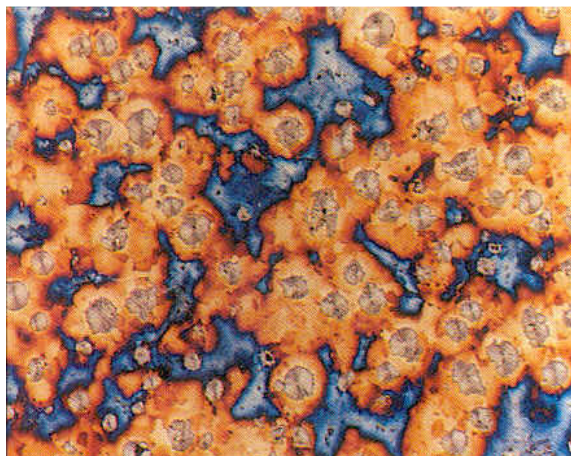
bíborszínű lesz, amely a zöld komplementer színe. (A fehér fényből az egyetlen alapszín kivonásával nyert szín az alapszín komplementer színe.) Ha megfigyelünk egy a fém felületén fokozatosan vastagodó filmet fehér fényben, akkor a következőket tapasztalhatjuk. Amennyiben a film nagyon vékony, az interferenciája az ultraviola tartományban fordul elő, és így nem figyelhetők meg színek. Ha film fokozatosan vastagodik, akkor az interferencia eléri a kék–ibolya tartományt ($0,45\ \mu\text{m}$) és a felületről visszavert kék fény eltolódik, és a komplementer sárgát fogjuk látni. A film további vastagodása során a zöld ($0,5\ \mu\text{m}$) hullámok fognak interferenciát szenvedni, és a bíbor szín látható. A sárga tartományban lévő interferencia esetén a kék színt látjuk. Végül elérjük a színek első sávjának végét, és az interferencia kilép a látható tartományból. Ez történik mielőtt az interferencia a második illetve a harmadik sávot tartalmazó filmvastagságot eléri. Az első sávban lévő színeket elsőrendű színeknek nevezik. A színek sorrendjének ismétlődése a második sávban ugyanaz lesz, de a köztük lévő intervallum különbözni fog. Nem mindegyik szín lesz benne az összes sávban [36][37].

3.3.2. Színesmaratás során alkalmazott marószerek

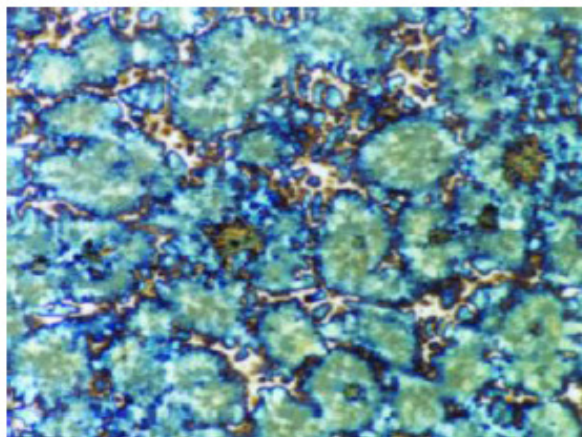
Az elektropotenciál a minta felületén mikroszerkezeti lépték során változik, így a szemcsék és a szemcsehatár között is változik. Ezt az elektrolitikus aktivitást, amely a filmképződést is eredményezi, a helyi fizikai vagy kémiai heterogenitások hozzák létre, amelyek a specifikus maratási körülmények között egyes fázisokat anódossá, másokat katódossá tesznek.

Beraha aszerint csoportosította a színes marószereket, hogy a film a katódos (pl. karbidok, nitridek) vagy az anódos mikroszerkezeti elemeken (pl. ferrit, ausztenit) alakul-e ki. Vannak olyan komplex reagensek, melyek mind az anódos, mind a katódos fázisokat elszínezik. Gyakorlati tapasztalatok alapján levonható az a következtetés, hogy az anódos fázisokon könnyebb létrehozni az interferencia filmet. Ahogy az oldódási (korróziós) maratásnál, itt is befolyásoló hatása van a kristálytani orientációnak, amely leginkább az anódos fázisnál figyelhető meg. A különböző orientációval rendelkező anódos fázisokon más a film vastagsága, és így különböző színárnyalatokban színeződnek el. A katódos fázison lévő film vastagsága általában konstans, így csak egy szín látható. A filmképződéshez úgy kell beállítani a marószer pH-ját, hogy a kialakuló film ne oldódjon fel. A létrejött film alatt gyakorlatilag a minta nem maródik. A legtöbb színes marószer Beraha és Klemm nevéhez fűződik, akik számos olyan receptúrát hoztak létre, melyek segítségével vas-, alumínium- és rézbázisú anyagok mikroszerkezeti sajátosságai tárhatók fel. Ahogy korábban említettem, különböző típusú filmek keletkeznek a minta felületén. A *szulfid filmet* létrehozó színes marószerek, melyek az anódos fázisokat színezik el a legkönnyebben alkalmazhatók. Ezek közül talán a legismertebbek alkotóelemei a következők: nátrium-metabiszulfid ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), kálium-metabiszulfid ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

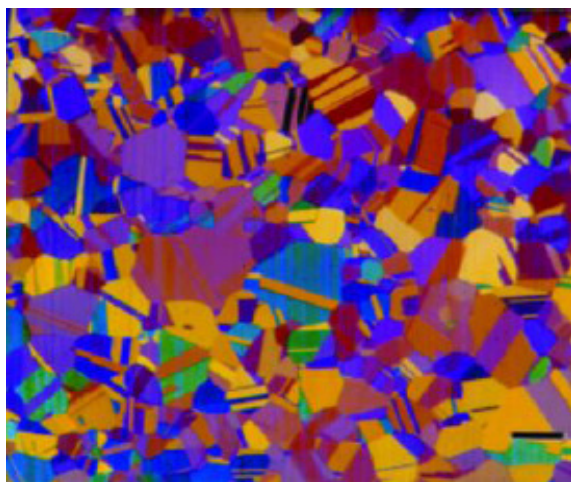
A metabiszulfid só a desztillált vízben lebomlik amint érintkezésbe kerül a minta felületével, és eközben SO_2 , H_2S és H_2 keletkezik.



3.15. ábra. Öntöttvas mikroszkópos felvétele Klemm I reagenssel történő maratás után (Eredeti nagyítás: 100x) [40]



3.16. ábra. Öntöttvas mikroszkópos felvétele Klemm I reagenssel történő maratás után (Eredeti nagyítás: 100x) [41]

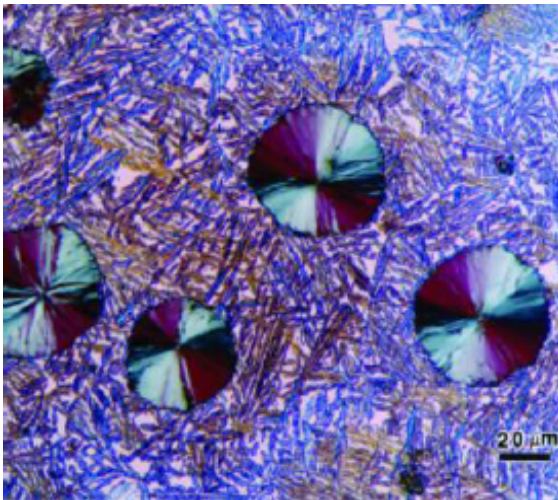


3.17. ábra. Ausztenites saválló acél mikroszkópos felvétele Beraha BI reagenssel történő maratás után (polarizált fény, nagyítási lépték: 100 μm) [41]

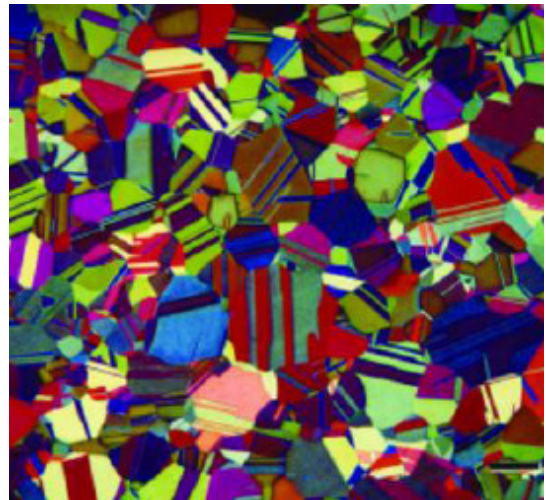
A 3.15. és a 3.16. ábrán a Klemm I. reagenssel maratott öntöttvas mikroszkópos felvételei láthatók (reagens összetételét lásd M.2. mellékletben). A 3.15. ábrán megfigyelhető, hogy a szilíciumban szegény részek kék színűek a szilíciumban gazdag részek pedig sárgásbarna színűek. A gömbgrafit körüli Si-ban dúsult réteg fehér színű lesz. A 3.16. ábrán az alacsony foszfor tartalmú eutektikus cellák színeződtek el kéken, a fehér pedig a gyakorlatilag nem „maródó” nagy foszfortartalmú steadit. A kálium-metabiszulfidhoz ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) különböző mennyiségű sósav (HCl) és ammónium-bifluorid (NH_4FHF) adagolásával kialakítható egy olyan koncentráció sorozat, amellyel különböző vasbázisú ötvözeteken lehet létrehozni az interferencia filmet. Így színesmaratási eljárással saválló és hőálló ötvözetek is vizsgálhatók lesznek. A 3.17. ábrán egy ausztenites saválló acél szövetszerkezeti felvétele látható, melyet polarizált fény használatával készítettek (reagens összetételét lásd M.2. mellékletben). Különböző reagensekkel létrehozott színekülönbségek nem minden esetben hoznak létre olyan kontrasztkülönbséget, amely elégséges lenne egy kvantitatív fázisazonosításhoz. Ezekben az esetben kell olyan kontraszteljárásokat alkalmazni, melyek segítségével javítható a kontraszt pl.

polarizált fény. A polarizált fény tisztán optikai módszer, mellyel színes kép állítható elő.

A nátrium-tioszulfátot ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), ólom-acetátot ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Pb}$) vagy kadmium-kloridot (CdCl_2) és citromsavat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) tartalmazó komplex marószert szintén szulfid típusú filmet hoz létre, amely rézbázisú ötvözeteknél alkalmazható hatékonyan. A 3.18. ábrán ausztemperált gömbgrafitos öntöttvas mikroszkópos felvétele látható, melyen a kékre és barnára színeződött fázis a martenzit, a fehér pedig a maradék ausztenit (reagens összetételét lásd M.2. mellékletben).

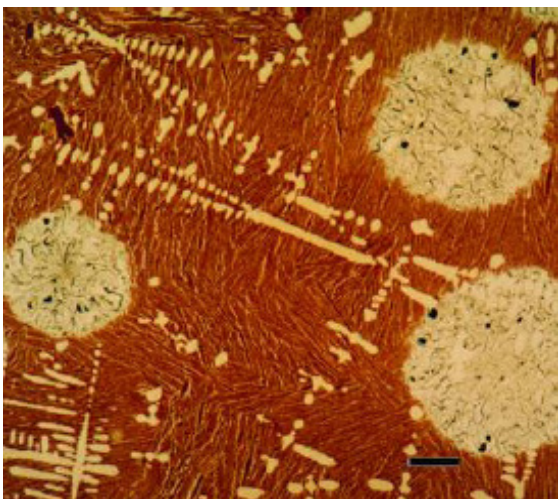


3.18. ábra. Ausztemperált gömbgrafitos öntöttvas mikroszkópos felvétele Beraha CdS reagenssel történő maratás után (polarizált fény) [41]



3.19. ábra. Sárgaréz ($\text{Cu-30\%Zn}$) mikroszkópos felvétele Beraha PbS reagenssel történő maratás után (polarizált fény) [41]

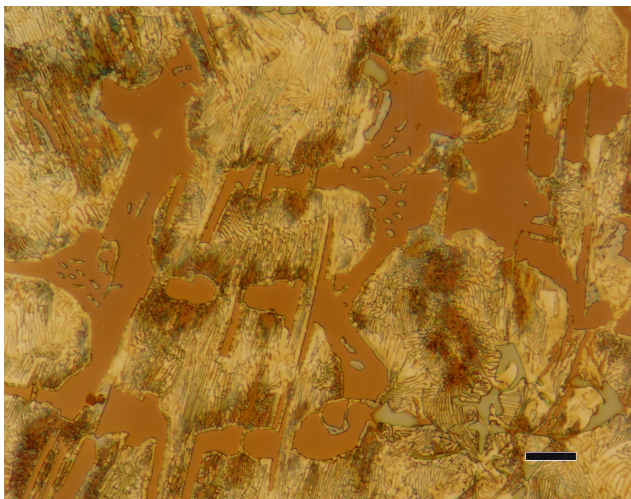
A 3.19. ábrán pedig egy sárgaréz ötvözet mikroszkópos felvétele figyelhető meg, amelyen a polarizált fényű megvilágításnak köszönhetően a szemcsék között nagyon jó kontraszt jött létre.



3.20. ábra. Szürke öntvény mikroszkópos felvétele Beraha szelénsavas reagenssel történő maratás után (nagyítási lépték: $50\mu\text{m}$) [41]



3.21. ábra. Hipoeutektikus szürke öntvény mikroszkópos felvétele Beraha szelénsavas reagenssel történő maratás után (nagyítási lépték: $100\mu\text{m}$) [42]



3.22. ábra. Fehér öntöttvas mikroszkópos felvétele Beraha nátrium-molibdát reagenssel történő maratás után (nagyítási lépték: 20 μ m) [42]

Az elemi szelént tartalmazó filmet létrehozó receptúrák a katódos fázist színezik el. A marószert szelénsavat ($\text{H}_2\text{Se}_2\text{O}_2$) és sósavat (HCl) tartalmaz, amelyek arányának változtatásával a vas, nikkel- és rézbázisú ötvözetek esetén is jól alkalmazható, és kiváló eredmény érhető el öntöttvasaknál is. A 3.20-3.21. ábrán gyakorlatilag hasonló lemezgrafitos szürke öntöttvas látható (reagens összetételét lásd M.2. mellékletben). A „maratás” hatására a cementit narancssárgára színeződött, a ferrit pedig

fehér maradt, mivel a reagens ezt a fázist nem színezte meg. Mindkét felvételen jól láthatók a ferrit által kirajzolt, és a maratás hatására jól láthatóvá tett dendrit ágak. *Komplex molibdát film* esetén a marószert nátrium-molibdátot (Na_2MoO_4) tartalmaz, amely szintén a katódos fázisokon fog redukálódni. Amennyiben az oldatot salétromsavval (HNO_3) savanyítom, akkor öntöttvasaknál és acéloknál használható, sósavas (HCl) savanyításnál pedig az alumínium ötvözeteknél alkalmazható. Minimális mennyiségű ammónium-bifluorid (NH_4FHF) adagolásával tovább javítható az acéloknál elért színeződés. A 3.22. ábrán egy fehér öntvény látható, amelyben a cementit a marószert hatására narancssárgára színeződött el (reagens összetételét lásd M.2. mellékletben).

Bármely típusú színes marószerttel is dolgozunk, a mintát a bemeztési eljárással „maratjuk” meg. A mintát a marószertbe mártva, nem mozgatva, megvárjuk míg a keletkezett film eléri a kívánt makroszkópos szint. Ezt követően folyóvízbe majd alkoholba mártjuk, és meleg levegővel szárítjuk. Fontos, hogy a filmet ne sértsük meg semmivel. Több esetben a színesmaratás előtt egy általános marószerttel előmaratást kell végezni, hogy eltávolítsuk a Beilby-réteget, és azért, hogy kontrasztosabb elszíneződést érjünk el. Az előkészítés során törekedni kell a tökéletesen karcmentes felületre, mivel a maratás során a karcok erősen láthatóvá válnak, és a mintán maradt szennyeződések értékelhetetlen csapadékot eredményeznek [38][39][41][42][43].

Összegezve: a pásztázó elektronmikroszkóp a grafit morfológiájának és töretfelületeknek vizsgálatára szolgál, míg az EBSD lehetővé teszi, hogy egy mérési pont (pontosabban annak véges térfogatú környezetének) kristályszerkezetét, rácsállandóját és kristálytani orientációját meghatározzuk. Ezzel orientációs térképet lehet létrehozni, amelyen belül ki lehet jelölni azokat a tartományokat, melyeknek az orientációja közel azonos. Az orientáció nagyon fontos adat, de ez a vizsgálati technika igen drága és kevésbé elterjedt. A színesmaratás olyan kémiai módszer, amelynek segítségével különböző vastagságú és típusú filmet hoznak létre a próbatetek

különböző fázisain, és az így létrejövő színes kontraszthatás eredményeként a fázisok jól elkülöníthetővé válnak. A szakirodalom számos és természetesen nem csak vas alapú ötvözetekhez tartalmaz különböző reagenseket, melyek viszonylag könnyen reprodukálhatók. Az öntöttvasakra is több ilyen marószert ismeretes. A receptúra működésének optimális feltételei, az alkalmazott paraméter együttes nem minden esetben áll rendelkezésünkre. A színes reagensek alkalmazásával olyan részletek - pl. némi elem dúsulása vagy az eutektikus cellák között elhelyezkedő steadit - válnak láthatóvá, melyek hagyományos maratással nem, vagy csak nehezen figyelhetők meg.

4. SZÍNESMARATÁS ALKALMAZÁSA ÖNTÖTTVAS SZÖVET-SZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATÁRA

A színesmaratás olyan maratási eljárás, amely során a minta felületén 0,04–0,5µm vastagságú filmet hozunk létre, amely az interferencia jelenség hatására különböző színekben jeleníti meg a mintában lévő eltérő fázisokat. A színesmaratás alapjait és a marószereket a 3.3. fejezetben részletesebben ismertettem. A fémek, ötvözetek széles családja maratható ezzel az eljárással és nem kivétel ez alól az öntöttvas sem. Ebben a fejezetben saját színesmaratási kísérleteimet ismertetem, a szakirodalomban talált receptúrák felhasználásával.

Mindezek a maratási kísérletek akkor váltak szükségessé, amikor az öntöttvas mintában jelenlévő különböző fázisok mennyiségét számszerűsíteni kellett. Gyakori feladat például a ferrit mennyiségének meghatározása, amely a metallográfiai laboratóriumokban található egyszerű képelemző szoftver segítségével is megoldható. Legtöbb esetben az öntöttvas mintában a ferrit mellett perlit és természetesen grafityszemcse található. Durva lemezes perlit esetén a 2%-os Nitallal történő maratás hatására a perlit lemezes szerkezete jól láthatóvá válik, a cementit lemezek hasonlóan a ferrithez nem maródnak, vagyis fehér színűnek látszódnak, és ezeknek a mérés során zavaró hatásuk van. Nyilvánvaló, hogy a cégek által a fázis mennyiségének meghatározására készített szoftverekben olyan képátalakítási műveleteket építettek be, amelyek kiküszöbölik azokat a mérési nehézségeket, amelyek a maratási egyenetlenségből, vagy a fázis sajátosságaiból adódnak. Probléma akkor merül fel, ha a maratás hatására a fehéren látszó ferrit mellett más olyan fázis is van, amely fehérnek látszik, például a karbid. A színesmaratással a különböző fázisok eltérő módon színeződnek, és így lehetőség adódik a fázisok mennyiségének képelemzővel történő meghatározására.

4.1. Karbid kimutatására szolgáló színes marószerek

A következőkben olyan mintákat vizsgállok meg, amelyekben vas-karbid (cementit) található. A vizsgálatok során különböző színesmaratási receptúrákat alkalmazok a cementit láthatóvá tételére. Az M.3. mellékletben a maratott minták kémiai összetétele található.

4.1.1. Nátrium-metabiszulfid vagy kálium-metabiszulfid és sósav

A maratás előtt és főleg a színesmaratás előtt nagyon fontos lépés a minták előkészítése. A csiszolást követő polírozás során törekedni kell arra, hogy tökéletes felületet hozunk létre. Gyakran sokkal finomabb végpolírozást kell alkalmazni, mint amelyet egy korróziós maratás során megkívánna a minta felülete. A színesmaratás eredményét nagymértékben befolyásolja a felület minősége. A maratás hatására a mintán lévő karcok felerősödnek, és amíg ezek a karcok csak esztétikai problémát okoznak, addig a mintán lévő más szennyeződések tarka csapadékfoltokat hoznak létre, melyek rontják a maratás értékelhetőségét.

Az első két reagens, amelyet a maratási kísérleteim során alkalmaztam a következő komponensekből áll:

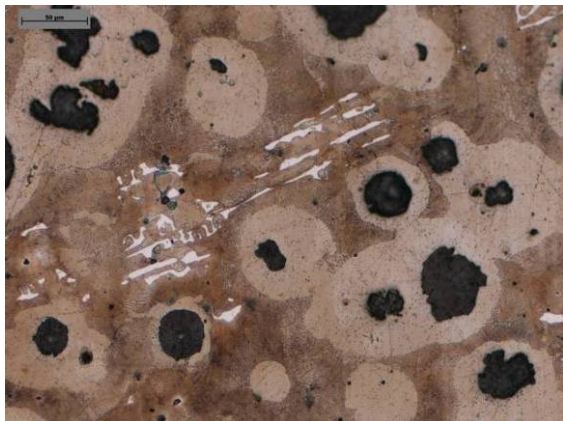
- ***nátrium-metabiszulfid reagens:*** 100ml H_2O , 1g $Na_2S_2O_3$, 1ml HCl (Beraha 0, általam módosított reagens)
- ***kálium-metabiszulfid reagens:*** 100ml H_2O , 1g $K_2S_2O_3$, 1ml HCl (Beraha 0 reagens)

Ismereteim és a vonatkozó szakirodalom [41] szerint a Beraha 0 reagenst nem alkalmazták eddig még öntöttvas maratására.

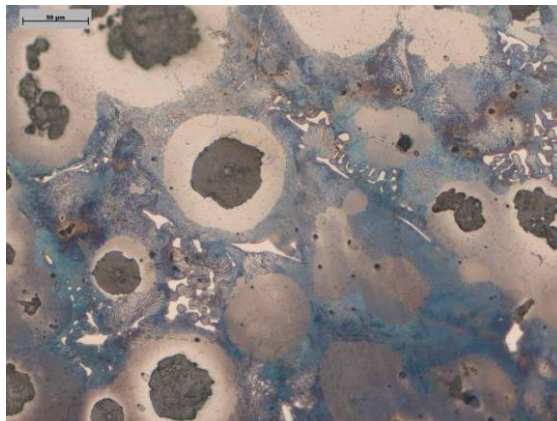
A legtöbb színes reagensnél, ahogy ezeknél is, a mintát maratás előtt kis mértékben elő kell maratni (ennek célja a csiszolással és polírozással képlékenyen alakított felületi réteg, az úgynevezett Beilby-réteg eltávolítása). Az előmaratás során általános korróziós marószert alkalmazunk, amelyeket acélok esetén a legtöbb esetben a fázisok előhívására használunk, pl. Pikral (4%-os pikrinsav) vagy 2% Nital. Az előmaratás egy valóban rövid ideig történő maratás, amely során nem válik teljesen láthatóvá a szövetszerkezet. Ezt követően bemerítéses eljárással, a mintát az oldatba tartva, nem rázogatva addig maratjuk, amíg annak felületén egybefüggő makroszkópos elszíneződést nem tapasztalunk. A következőkben a kálium- és a nátrium-metabiszulfidot tartalmazó reagens maratási idejét, és a maratás hatására láthatóvá vált szövetszerkezetet fogom ismertetni.

A 12-es jelű gömbgrafitos öntöttvas (összetétele az M.3. mellékletben látható) mintán végeztem el a kísérleteket, amely során minden esetben frissen csiszolt és polírozott felületet marattam szobahőmérsékleten. A színesmaratást három másodperces előmaratás előzte meg, majd ezt követően legalább 4 perces várakozás után végeztem el bemerítéses eljárást. A várakozás azért szükséges, mert az előmaratás után meleg levegővel történő szárítás befolyásolja a színesmaratás eredményeit. A legtöbb esetben nem képződik megfelelő csapadék a minta felületén még a kívánt idejű bemerítés ellenére sem. A színes marószert minden esetben frissen készítettem és a maratás előtt tíz percet vártam, hogy marószer megfelelő és mindig ugyanolyan

hatékonysággal tudjon működni. A kísérletek során csak a maratási időt változtattam, és négy különböző időpontban (10, 15, 20 és 25 másodperc) vizsgáltam meg a mintát. A mintáról 10 másodperces bemerítés után készült fénymikroszkópos felvételek a 4.1. és a 4.2. ábrán láthatók.

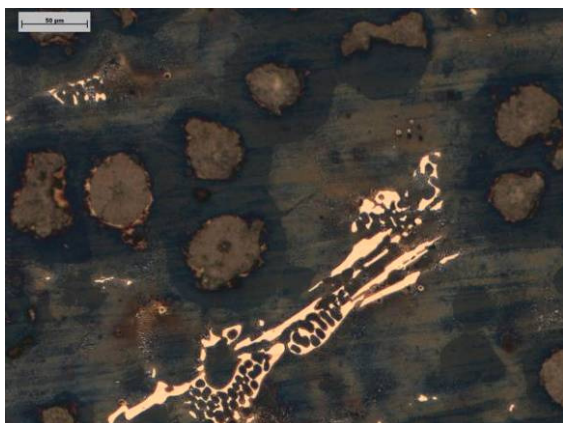


4.1. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 10 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, nátrium-metabiszulfid reagens)

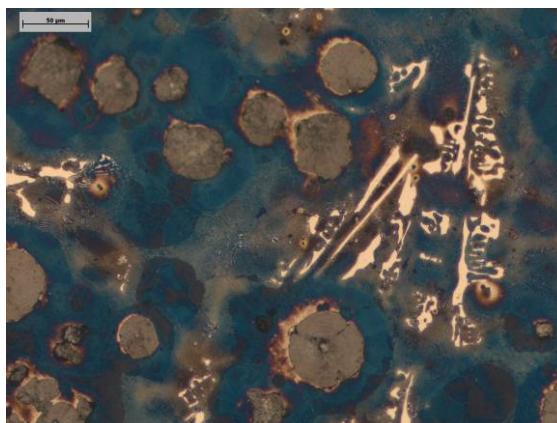


4.2. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 10 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, kálium-metabiszulfid reagens)

A felvételeken jól látható, hogy mind a két reagensnél a cementit fehérre színeződött, így egyértelműen elkülöníthető az alapszövettől. Az eltérés a perlit színében van, a nátrium-metabiszulfid reagensnél barnás, míg kálium-metabiszulfid reagensnél kék. A bemerítési idő kevésnek bizonyult, mivel a grafitszemcsék körül látható ferriten még nem képződött megfelelő vastagságú csapadék, ezért még mindig fehér színűek. A maratási időt 5 másodperccel megnőveltem, a felvételek a 4.3. és a 4.4. ábrán láthatók.

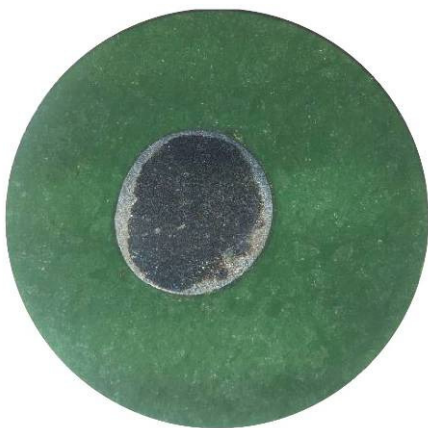


4.3. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, nátrium-metabiszulfid reagens)



4.4. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, kálium-metabiszulfid reagens)

A 15 másodperces maratás után erősebb elszíneződés tapasztalható. Mindkét reagens közel azonos színt hozott létre, amelyet a csapadékfilm vastagsága határoz meg. A cementit mind a két esetben jól látható, de a kálium-metabiszulfid reagensnél még nem egyenletes a ferriten kialakult csapadék, mivel az helyenként még fehéren látszik. Más különbség is található a két marószer között, amely a minták felületéről készült makroszkópos felvételeken figyelhető meg (lásd 4.5.-4.6. ábra).

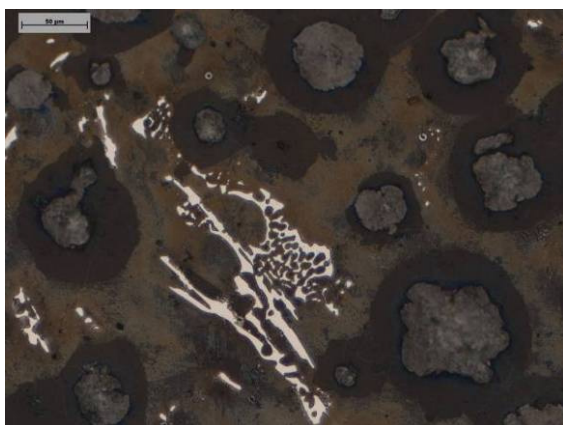


4.5. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (nátrium-metabiszulfid reagens)

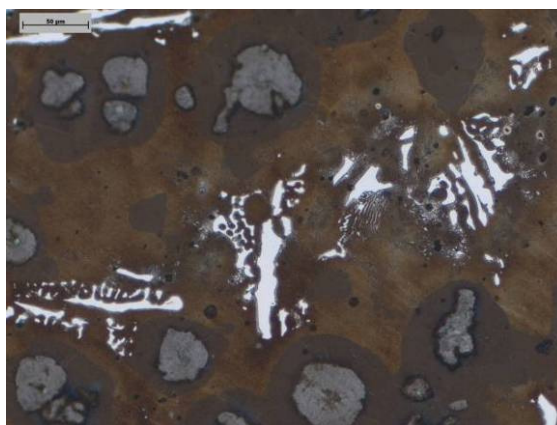


4.6. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (kálium-metabiszulfid reagens)

A nátrium-metabiszulfid reagens esetén, a minta felületén, nagyobb területen alakult ki csapadék, mint a kálium-metabiszulfid reagensnél. A bemeztési időt ismét megnöveltem 5 másodperccel, a felvételek a 4.7. és a 4.8. ábrán találhatók.



4.7. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, nátrium-metabiszulfid reagens)

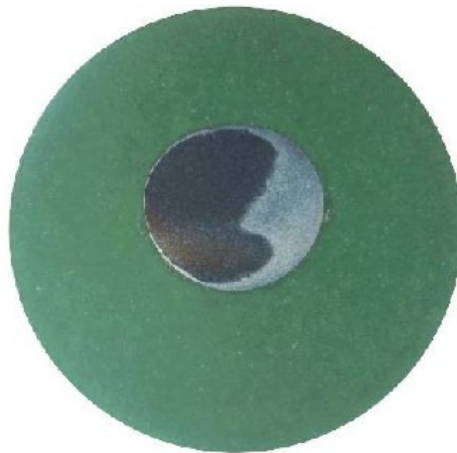


4.8. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, kálium-metabiszulfid reagens)

A 20 másodperces maratás után mindkét marószernél azonos eredmények tapasztalhatók. A ferriten és a perliten barnás színűnek látszó csapadék alakult ki, a cementit pedig fehér és jól elkülöníthető. A 4.10. ábrán megfigyelhető, hogy a mintán már nagyobb felületen alakult ki a csapadék réteg a korábbi 15 másodperces maratáshoz képest. A nátrium-metabiszulfid reagens által kialakított csapadékréteg (lásd 4.9. ábra) mérete közel azonos a korábbi maratási eredményhez.

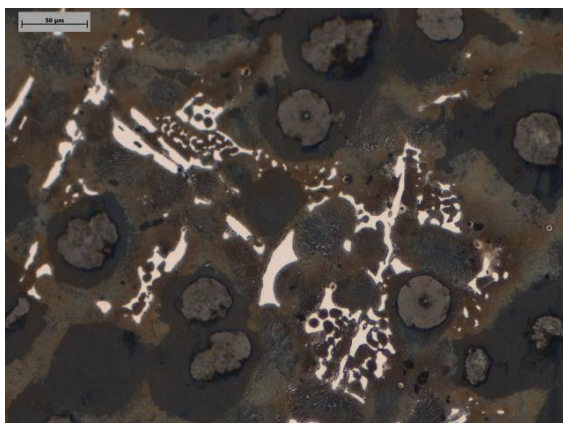


4.9. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (nátrium-metabiszulfid reagens)



4.10. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (kálium-metabiszulfid reagens)

Az utolsó maratási kísérletet 25 másodperces bemerítési idővel végeztem el, az eredmények a 4.11.-4.14. ábrán láthatók.



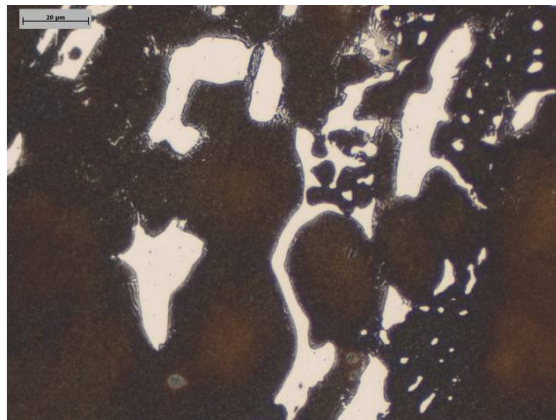
4.11. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, nátrium-metabiszulfid reagens)



4.12. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, nátrium-metabiszulfid reagens)

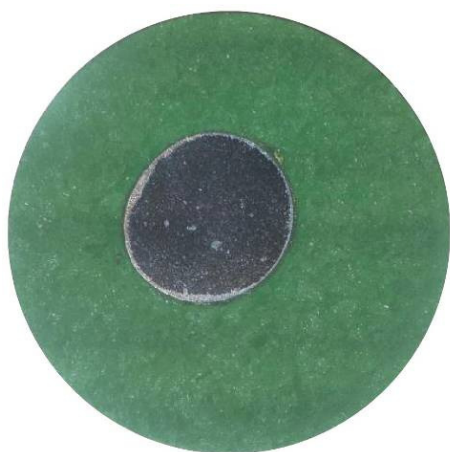


4.13. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, kálium-metabiszulfid reagens)

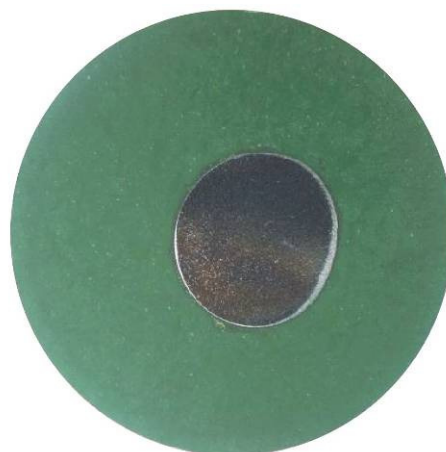


4.14. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, kálium-metabiszulfid reagens)

A minták 25 másodperces maratása után optimális eredményt kaptam: az alapmátrix barnás, a cementit pedig jól elkülöníthetően fehér színű. A nagyobb nagyítású felvételeken megfigyelhető, hogy a cementit körül található perlit cementit lemezei is fehérén látszódnak. Amennyiben a maratás után digitális képfeldolgozást alkalmazunk a cementit mennyiségének meghatározására, akkor a detektálás során zavaróak lehetnek ezek a cementit lemezek, hiszen hasonló színűk miatt ezeket is detektálnánk. A detektálás után egy egyszerű bináris képátalakítással ezek kiküszöbölhetők. A makroszkópos felvételeket (lásd 4.15.-4.16 ábra) megfigyelve egyértelműen megállapítható, hogy a 25 másodperces maratási idővel lehet elérni a legnagyobb területű csapadékfilmet a minta felületén.



4.15. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (nátrium-metabiszulfid reagens)



4.16. ábra. A 12-es jelű minta makroszkópos felvétele 25 másodperces maratás után (kálium-metabiszulfid reagens)

A mikroszkópos és a makroszkópos vizsgálat eredményeiből megállapítható, hogy mindkét reagens esetén 25 másodperccel maratás után érhető el az optimális eredmény. A 15

másodperces maratás esetén a nátrium-metabiszulfidos, általam módosított reagens kedvezőbb, mivel a minta felületén nagyobb területen alakult ki csapadék, és így nagyobb a vizsgálható felület.

A reagensek nem reagálnak érzékenyen a maratási körülmények változására (a minta felületén található szennyeződésekre), ezért robosztusnak nevezhetők. Könnyen reprodukálható maratási eljárások, amelyek bármely metallográfiai laboratóriumban alkalmazhatók.

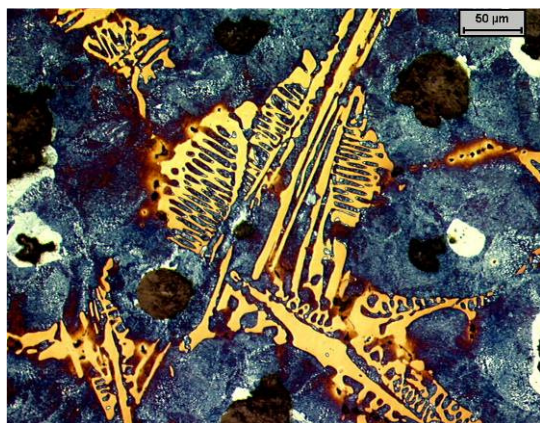
4.1.2. Beraha kadmium-klorid (Beraha CdS) reagens

A következő reagens, amellyel maratási kísérleteket végeztem, a kadmium-kloridot (CdCl_2) tartalmazó, Beraha nevéhez fűződő marószer. Az összetétele a következő:

– **Beraha CdS:** 1000ml H_2O , 240g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 20-25g CdCl_2 , 30g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$

Ismereteim és a vonatkozó szakirodalom [41] szerint a Beraha CdS reagenst csak ausztemperált öntöttvas esetében alkalmazták.

A kísérleteket szobahőmérsékleten végeztem, és ismét 3 másodperces Pikrallal (4%-os Pikrinsav) történő előmaratást alkalmaztam. A bemerítési idő az első kísérletnél 15 másodperc volt, a mikroszkópos felvételek a 4.17.- 4.18. ábrán láthatók.



4.17. ábra. A 15-ös jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Beraha CdS reagens)



4.18. ábra. A 15-ös jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Beraha CdS reagens)

A felvételeken megfigyelhető, hogy a ferrit fehér, a perlit kék, és a cementiti narancssárgás színű. A fázisok jól elkülöníthetők, és így digitális képfeldolgozás segítségével bármely fázis mennyisége jól meghatározható. Ez a maratási idő optimálisnak látszik, ennek ellenére elvégeztem még egy kísérletet 20 másodperces bemerítési idővel. A felvételek a 4.19.-4.20. ábrán láthatók.

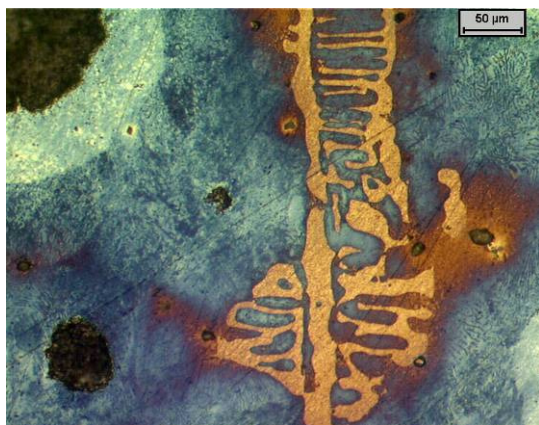


4.19. ábra. A 15-ös jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után
(Eredeti nagyítás: 200x, Beraha CdS reagens)



4.20. ábra. A 15-ös jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után
(Eredeti nagyítás: 500x, Beraha CdS reagens)

A 4.19. és a 4.20. ábrákon hasonló elszíneződés tapasztalható, de a színek nem annyira kontrasztosak, mint a 15 másodperces maratásnál. A fázisok elkülöníthetők így is, de a ferrit



4.21. ábra. A 14-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után
(Eredeti nagyítás: 500x, Beraha CdS reagens)

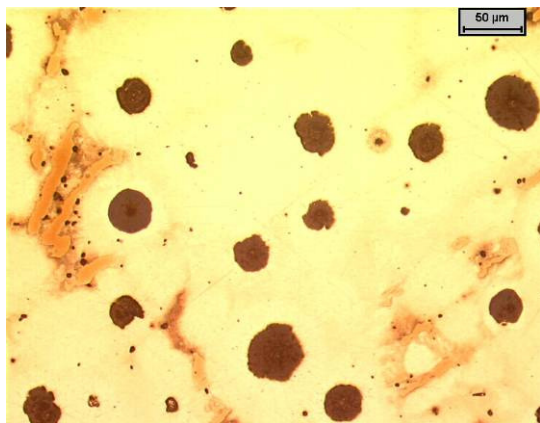
hasonlóan világoskék színű részleteket tartalmaz mint a perlit, és így a digitális képfeldolgozással a fázisok elkülönítése nem megoldható. Több minta esetén is elvégeztem a 20 másodperces bemelegítési idejű kísérletet, és hasonló elszíneződést tapasztaltam (lásd 4.21. ábra). Kísérletek alapján megállapítható, hogy az optimális maratási idő 15 másodperc. A reagens rendkívül érzékeny a maratás során fellépő zavaró körülményekre (minta felületén található szennyeződésekre). A maratási eljárás nehezen reprodukálható.

4.1.3. Beraha nátrium molibdát (Beraha Na-Mo) reagens

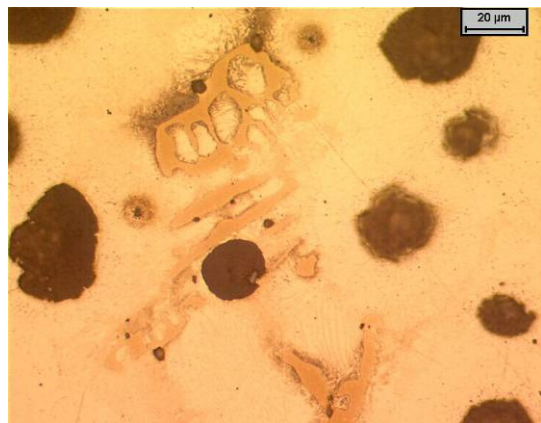
A következő maratási kísérletemben alkalmazott reagens szintén Beraha névéhez fűződik, amely a következő komponensekből áll:

- **Beraha Na-Mo I.:** 100ml H_2O , 1g $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, pH. 2,5-3,0, az általam végzett maratási kísérletekben a reagens pH értéke 3,
- **Beraha Na-Mo II.:** 100ml H_2O , 1g $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, 0,1g-0,5g NH_4FHF , pH. 2,5-3,5, az általam végzett maratási kísérletekben a reagens pH értéke 3 és 0,3g NH_4FHF használtam.

Az első maratási kísérletben a Beraha Na-Mo I. alkalmaztam. Az oldat pH-ját 1:2 arányban hígított salétromsavval 3 pH-ra állítottam be, majd 10 másodperces bemerítési időt alkalmaztam. A mintáról készült mikroszkópos felvételek a 4.22. és a 4.23. ábrán láthatók.

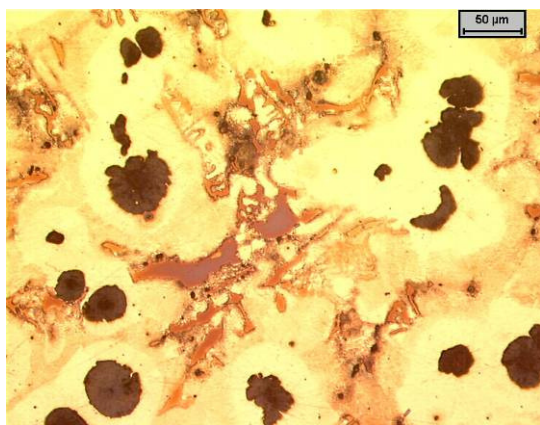


4.22. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 10 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Beraha Na-Mo I. reagens)



4.23. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 10 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Beraha Na-Mo I. reagens)

A reagens hatására a cementit narancssárga színűnek látszik. A halvány elszíneződés ellenére a fázis jól látható, de digitális képfeldolgozással a fázis mennyisége nem meghatározható. A perlit cementit lemezei kis mértékben szintén elszíneződtek. A bemerítés időt 10 másodpercre növeltem, és rövid idejű (3 másodperc) előmaratást alkalmaztam 2%-os Nitallal. A következő eredményt kaptam (lásd 4.24.-4.25. ábra).



4.24. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Beraha Na-Mo I. reagens)



4.25. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 20 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Beraha Na-Mo I. reagens)

A maratási idő növelésével erősebb elszíneződés tapasztalható, a cementit sötétebb narancssárga, és a perlit cementit lemezei is jobban láthatóvá váltak.

A Beraha Na-Mo II. reagensbe 0,3g NH_4FHF -t adtam, és az oldat pH-ját 1:2 arányban hígított salétromsavval 3 pH-ra állítottam be, majd 2%-os Nitallal történő rövid

idejű előmaratás után (3 másodperc) 30 másodpercig marattam. Az eredmény a 4.26.-4.27. ábrán látható.



4.26. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 30 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Beraha Na-Mo II. reagens)



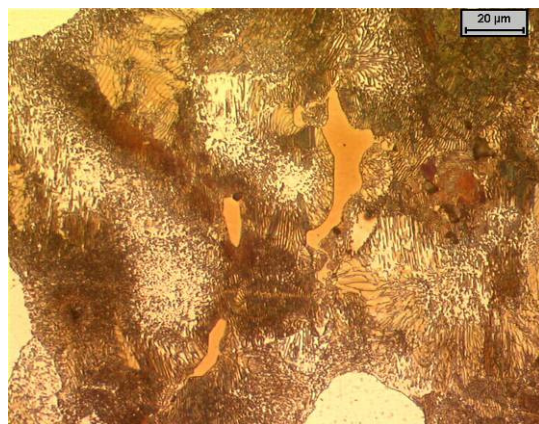
4.27. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 30 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Beraha Na-Mo II. reagens)

Mindkét reagens hatása azonos, csak a megjelenő színben van különbség. A Beraha Na-Mo I. reagens esetén narancssárga, a Beraha Na-Mo II. reagensnél pedig kékes színű a cementit. A maratási idő növekedésével pedig egyre erőteljesebben válnak láthatóvá a mintában lévő perlit cementit lemezei: 10 másodperces maratásnál csak az önálló fázisként szereplő karbid látható, és csak halványan a cementit lemezek, 20 és 30 másodpercnél pedig egyre erősebben láthatók a cementit lemezek is. A marószerek nem reagálnak érzékenyen a maratási körülmények változására.

A következő kísérletben a mintát maratás előtt 2%-os Nitallal olyan mértékben marattam, hogy a szövetszerkezet jól láthatóvá váljon, majd rövidebb idejű 15 másodperces bemerítés után vizsgáltam a minta szövetszerkezetét (lásd 4.28.-4.29. ábra).



4.28. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Nital, Beraha Na-Mo I. reagens)



4.29. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele 15 másodperces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Nital, Beraha Na-Mo I. reagens)

Az erős korróziós maratás hatására jól láthatóvá vált a szövetszerkezet, és a maratás után az öntöttvas szövetszerkezetére jellemző, jellegzetes megjelenési formát, szint láthatjuk (perlit barna,



4.30. ábra. Öntöttvas minta fénymikroszkópos felvétele korróziós maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Nital)

a grafit körüli ferrit fehér színű). A korrózós maratás után fehér színűnek látszó cementit (lásd 4.30. ábra) a színesmaratás hatására narancssárga lett, és így jól megkülönböztethető a ferrittől.

Megállapítható, hogy a Beraha Na-Mo I. és a Beraha Na-Mo II. reagens segítségével jól láthatóvá lehet tenni a karbidot és a perlit cementit lemezeit. Az azonos színű megjelenés miatt digitális képfeldolgozás segítségével nem meghatározható egyikük mennyisége sem. Mindamellet kitűnően és megbízhatóan alkalmazható, és erős korróziós maratás mellett is hatékony.

4.1.4. Beraha által módosított Klemm I reagens

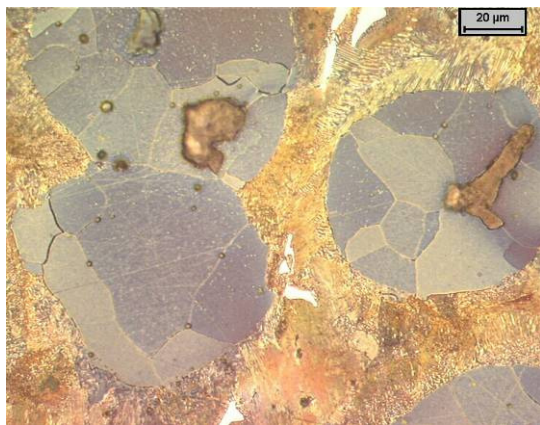
A következő maratási kísérletemben olyan marószert alkalmaztam, amely Beraha fejlesztett tovább Klemm I reagenséből. A Klemm I reagens a következő komponensekből áll:

- **Klemm I:** 50ml $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_2$ túltelített oldat, 1g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$.

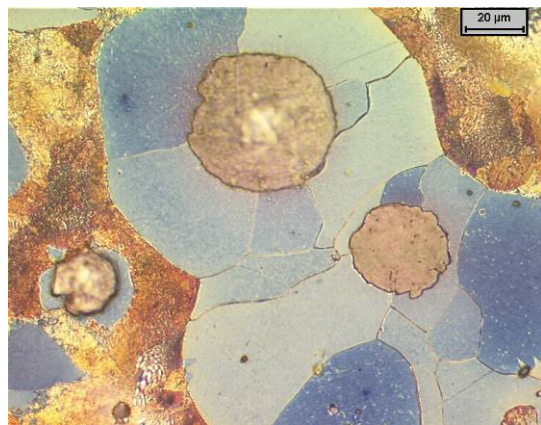
Beraha ezt a következőképpen módosította:

- **Klemm I-Beraha 10/3 reagens:** 100ml H_2O , 10g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_2$, 3g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$.

A bemerítés előtt a mintákat a korábbi kísérleteknél hosszabb ideig, másfél percreg Pikrallal előmarattam. A bemerítési időt az alapján állapítottam meg (hasonlóan a többi reagenshez), hogy a minta felületén mennyi idő múlva jelenik meg a makroszkópos elszíneződés. Ennél marószernél a kékes-bordó elszíneződés négy perc után vált láthatóvá. A maratás eredménye a 4.31.-4.32. ábrán látható.

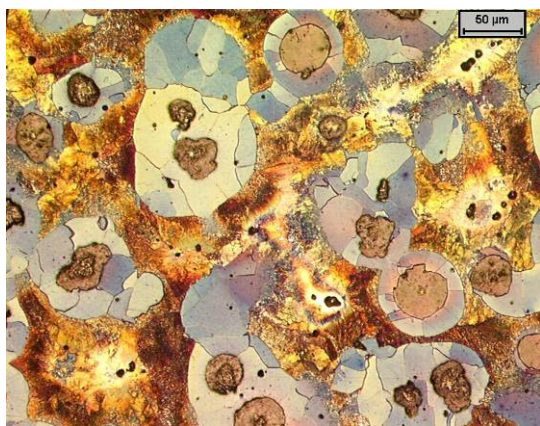


4.31. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele négy perces maratás után (Eredeti nagyítás: 500 $\times$, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

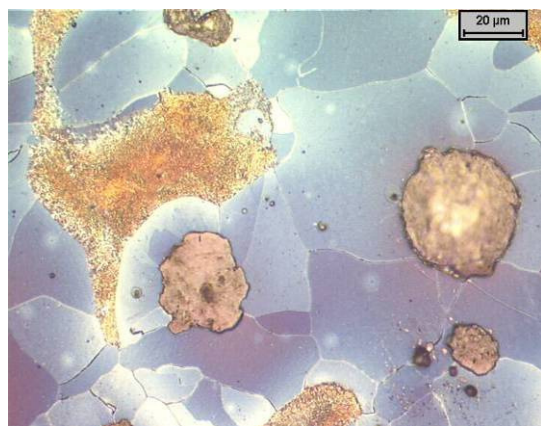


4.32. ábra. A 12-es jelű minta fénymikroszkópos felvétele négy perces maratás után (Eredeti nagyítás: 500 $\times$, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

A reagens hatására a cementit fehér, a perlit barnás-sárga, a ferrit pedig a kék szín különböző árnyalataiban látható. Azok a színes reagensek, melyek az anódos fázist színezik el, érzékenyek a fázisok orientáció különbségére, ezért figyelhető meg az, hogy a ferrit szemcsék eltérő kék színekben jelennek meg. A következő kísérletben megnőveltem a bemerítési időt 30 másodperccel. A kísérletben most olyan mintát vizsgáltam, amelyben nincs cementit, mivel most csak a ferrit elszíneződését figyeltem meg (lásd 4.33.-4.34. ábra).



4.33. ábra. A 16-os jelű minta fénymikroszkópos felvétele négy és fél perces maratás után (Eredeti nagyítás: 200 $\times$, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)



4.34. ábra. A 16-os jelű minta fénymikroszkópos felvétele négy és fél perces maratás után (Eredeti nagyítás: 500 $\times$, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

A bemerítési idő növelésével kis mértékben javult a ferrit szemcsék elszíneződése, a mintán több helyen láthatók egyértelműen különböző kék színárnyalattal rendelkező ferrit szemcsék.

A Klemm I-Beraha 10/3 reagens hatására hasonlóan a többi reagenshez jól megkülönböztethető a cementit, de digitális képfeldolgozással ebben az esetben sem határozható meg a mennyisége, a ferrit elszíneződése miatt. Több helyen is megfigyelhető, hogy a ferrit

szemcse halványkék színű, ami zavarhatja a detektálást. Mindamellet a ferrit szemcsék különböző orientációja jól látható, amelyet a 4.2. fejezetben vizsgálók meg EBSD segítségével.

Összegezve megállapítható, hogy az általam kipróbált színes reagensek különböző módon, de minden esetben jól elkülönítették a cementitet az alpmátrixtól. Kísérleteim során megállapítottam, hogy melyek a legmegfelelőbb maratási paraméterek (előmaratási idő, bemerítési idő), amelyekkel az optimális eredmény érhető el. A kialakult színek alapján a cementit mennyiségének meghatározására legalkalmasabbnak a nátrium-metabiszulfid (Beraba 0, általam módosított) és a kálium-metabiszulfid (Beraba 0) reagens bizonyult. Ennél a két reagensnél különíthető el legjobban a fázis, és így lehetséges a mennyiségének meghatározása digitális képfeldolgozással. A Klemm I-Beraba 10/3 reagens esetén is elkülöníthető a cementit, mindamellet a ferrit orientáció különbségből adódó elszíneződése is jól megfigyelhető.

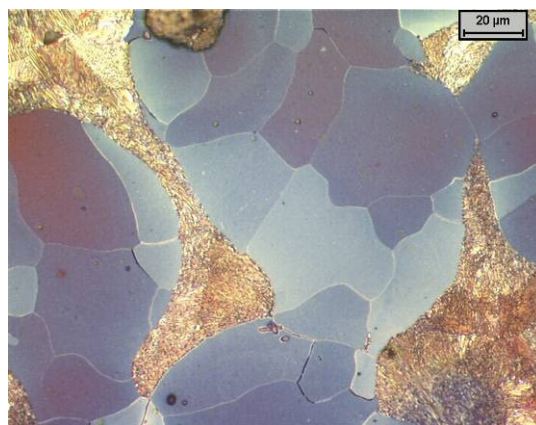
4.2. Öntöttvas ferrit orientációjának meghatározása visszaszórtelektron diffrakcióval (EBSD)

Az anódos fázist elszínező színes reagensek érzékenyek a fázis orientációjára, és ezért a megjelenő színben különbségek érzékelhetők az orientáció függvényében. A 4.1.4. fejezetben ismertetett maratási kísérletem során a Klemm I-Beraha 10/3 reagenst alkalmaztam és az eredmények alapján megállapítható, hogy a ferrit szemcsék orientációs eltérése látható vált a reagens hatására. Ennek bizonyítására EBSD-s kísérleteket végeztem a BME Anyagtudományi és Technológiai Tanszéken.

A színesmaratást a Klemm I-Beraha 10/3 reagensnél megállapított optimális paraméterekkel végeztem el, ami másfél perces Pikralos előmaratást, négy és fél perces bemerítési időt jelent. A maratást követően kiválasztottam a látóteret, amelyet egy karctű segítségével megjelöltem, hogy az EBSD-val történő vizsgálat során ismét megtaláljam a kiválasztott látóteret. A 4.35.-4.36. ábrán a vizsgált látótér mikroszkópos felvétele található.



4.35. ábra. A 16-os jelű minta vizsgált látóteréről készült fénymikroszkópos felvétel négy és fél perces maratás után (Eredeti nagyítás: 200x, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

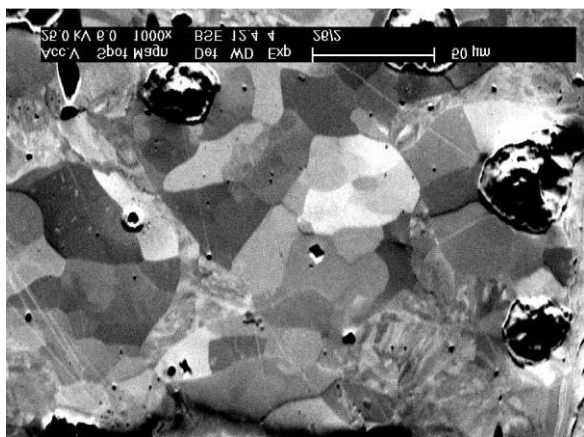


4.36. ábra. A 16-os jelű minta vizsgált látóteréről készült fénymikroszkópos felvétel négy és fél perces maratás után (Eredeti nagyítás: 500x, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

A színesmaratás után a minta felületét 30 percig szilika-géllel políroztam, hogy a színesmaratás hatására kialakult csapadékfilmet és a finom, vékony karcokat eltávolítsam. A polírozás hatására az általam bekarcolt jelölés nem tűnt el, mivel ez a végpolírozás nem távolít el vastag réteget a minta felületéről. A vizsgálatot Philips XL 30 pásztázó elektronmikroszkóppal és EDAX TSL EBSD rendszerrel végeztük el. A pásztázó elektronmikroszkóp működési paraméterei a következők voltak: 25 KV gyorsító feszültség, 12-13 mm munkatávolság. A vizsgált területről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a 4.37. ábrán látható.

A visszaszórt elektronokkal (BSE) alkotott felvételeken a szemcsék között szürkességbeli eltérés tapasztalható. Lényegében szemcseorientáció válik láthatóvá ezzel a vizsgálati eljárással,

amely során a mintát 70° -kal megdöntve vizsgáljuk. Ezt a hatást csatornahatásnak nevezzük,

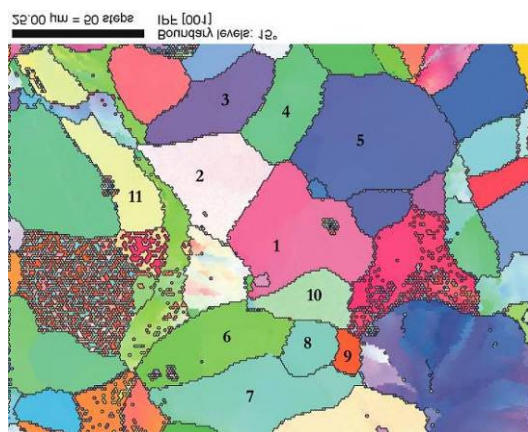


4.37. ábra. A 16-os jelű minta vizsgált látóteréről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvétel (Eredeti nagyítás: 1000x, BSE)

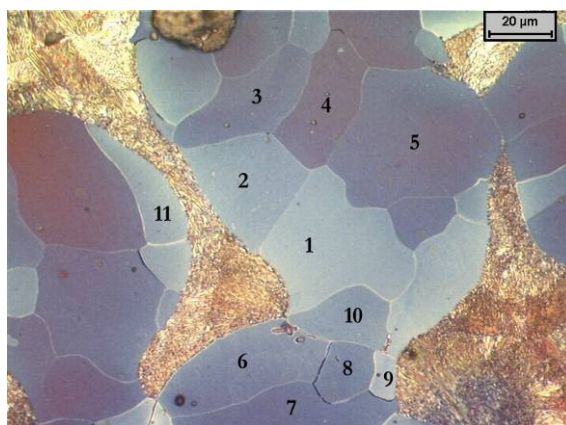
amely segítségével következtetni lehet az orientációra. A mintába csapódó elektronok az orientációtól függően más és más mélységig jutnak be az anyagba, és ennek megfelelően különböző intenzitással lépnek ki. Ezt az intenzitás különbséget figyelhetjük meg a felvételeken. Mindezekből tudunk következtetni az orientációra. Az elektronmikroszkópos és a fénymikroszkópos felvételeket összehasonlítva láthatjuk, hogy a végpolírozás valóban nem befolyásolta nagymértékben a felületet, így a két vizsgálati

módszer által kapott eredmények egyértelműen összevethetők.

Az EBSD mérések során a 4.37. ábrán látható kijelölt vizsgálati területen minden mérési pontban felvesszük a Kikuchi-vonalakat, majd ezt követően a szoftver elvégzi a vonalak indexelését és elkészíti az orientáció térképét. Az orientáció térkép, vagyis az egyes mérési pontok orientációjának megadása az inverz pólusábra egységháromszögének színekódolásával történik (lásd 3.11. ábra). Az orientációs térkép és a számozott színesmaratott szövetszerkezet fénymikroszkópos felvétele a 4.38.-4.39. ábrán található.



4.38. ábra. A 16-os jelű minta vizsgált látóteréről készült orientációs térkép



4.39. ábra. A 16-os jelű minta vizsgált látóteréről készült számozott fénymikroszkópos felvétel (Eredeti nagyítás: 500x, Klemm I-Beraha 10/3 reagens)

A felvételeken megfigyelhető színes, rendszertelenül elhelyezkedő pontok a perliten elvégzett mérés eredménye, vagy olyan szemcsék eredménye, amely valamilyen okból rosszul értékelhetők (szennyeződés, lunker stb.). Láthatók olyan ferrit szemcsék, amelyekben kis mértékben változik a

színárnyalat, ez a szemcsén belüli lokális orientációkülönbségre utal, amely a szemcsék deformációjából ered. A 4.39. ábrán beszámozott szemcsék makroszkópikus felületével párhuzamos síkok normálisának iránya a 4.1. táblázatban található.

4.1. táblázat. A vizsgált látótéren található számozott szemcsék makroszkópikus felületével párhuzamos síkok normálisainak iránya

Szemcsék azonosítói (lásd 4.38.-4.39. ábra)	16-os jelű mintán vizsgált szemcsék
	[hkl]
1	[2 -3 9]
2	[5 2 9]
3	[8 7 13]
4	[2 10 9]
5	[5 8 6]
6	[10 1 15]
7	[2 5 6]
8	[5 15 17]
9	[1 0 8]
10	[2 10 7]
11	[4 1 8]

Ezen síkok közötti szögeltérést a következő képlettel határoztam meg:

$$\cos\varphi = \frac{h_1 \cdot h_2 + k_1 \cdot k_2 + l_1 \cdot l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}$$

A szemcsék színe jól jellemezhető az RGB színrendszerben, ahol a színek a három alapszín: a vörös (R – red), zöld (G – green), kék (B – blue) összeadásával állíthatók elő, ez tulajdonképpen az additív színkeverés, tehát a három alapszín egyforma intenzitású keverése fehér, hiányuk fekete színt eredményez. Az YUV színtérben egy színt a fényerő vagy luminancia jellel (Y) és két ún. szín különbségi jel (U és V) segítségével adunk meg,

$$Y=0,299 \cdot R+0,587 \cdot G+0,114 \cdot B$$

amelyben az R, G és a B a közepes intenzitású vörös, zöld és kék komponens [44][45].

A vizsgált szemcsék közötti szögekülönbséget (φ), fényerőkülönbségeket (ΔY) és az R, G, B komponensek különbségeit megvizsgálva meghatároztam a korrelációs együttható (r) értékeit (lásd 4.2. táblázat). Az intenzitáskülönbség r értéke 0,51, a vörös komponens különbségének r értéke pedig 0,52. Ennek a két paraméternek legnagyobb a korrelációs együtthatója, amely bizonyos korreláció meglétére enged utalni.

4.2. táblázat. Korrelációs együttható értéke

Korrelációs együttható, r	Vizsgált paraméterek			
	ΔY	ΔR	ΔG	ΔB
	0,51	0,52	0,49	0,39

A 4.39. ábrán makroszkóposan is megfigyelhető, hogy a sötétebb szemcsék pl. 5 és a 6 szemcsék sötétkéék színűek, amelyben piros szín is megfigyelhető. A vizsgált szemcsék közötti szögeltérések és a szemcsék Y és R értékei az M.4. mellékletben találhatók.

Összegezve megállapítható, hogy a Klemm I-Beraba 10/3 reagenssel történő színesmaratás során a ferrit szemcsék különböző színárnyalatúra színeződtek a közöttük lévő orientáció különbségből adódóan, amelyet EBSD-vel történő mérésekkel lehetett igazolni. Ugyanis a ferrit szemcsék felületi normálisai közötti szögkülönbség összefüggésben van a kialakult színárnyalattal, s az azt számszerűsítő Y (luminancia) jellel (YUV színtér), illetve az R (vörös komponens) értékével (RGB színtér). Nagy szögkülönbségek esetén nagy a luminancia, illetve nagy a vörös komponens közötti különbség.

5. ÖNTÖTTVASAK JELLEMZÉSE AZ IPARI GYAKORLATBAN

Az öntöttvasban található grafitnak – ahogy a 2. fejezetben is olvasható – igen jelentős hatása van a tulajdonságokra, ezért nagyon fontos, hogy jellemezzük alakját, méretét és eloszlását (elhelyezkedését) az alapanyagban. Az ipari gyakorlatban a grafitot jellemző paraméterek meghatározására használt módszer a szabványos etalonképekkel történő összehasonlítás. Két szabványt használnak erre a célra: ASTM A 247-et és az MSZ EN ISO 945:2000-et. (Az MSZ EN ISO 945:2000 szabványt visszavonták, jelenleg az MSZ EN ISO 945-1:2009 szabvány van érvényben. Az érvényben lévő szabványban az alak és a méretre vonatkozó etalonfelvétel ugyan az, mint a visszavont MSZ EN ISO 945:2000 szabványban.) Jelen fejezetben az MSZ EN ISO 945:2000 szabványt és az MSZ 5716:1974 szabvány bizonyos részeit ismertetem. Az MSZ 5716:1974 egy régi szabvány, amelyet leginkább az öntöttvas szövetszerkezetében lévő fázisok jellemzésére használtak (grafit alak és méret megadására szolgáló etalonsorozatot is tartalmaz, de erre a célra az újabb szabványok a használatosak).

5.1. Az MSZ EN ISO 945:2000 és az MSZ 5716:1974 szabvány

A szabvány a grafit alakjának, méretének és az eloszlásának meghatározására egyaránt tartalmaz etalonsorozatot, melyekkel a fénymikroszkópon látható polírozott minta mikroszkópos felvételeit összehasonlítva a mintára jellemző osztályozási értékek adhatók meg.

A grafit alak meghatározására hat különböző etalonkép található a szabványban, amelyek *I-VI* római számmal vannak jelölve: *I* a lemezes eutektikus grafit, *II* a csillag vagy pókszerű képződménnyé összeállt grafit, *III* a vaskos, tompa végű átmeneti grafit (CG, kompakt), *IV* az apró, szabálytalan, a temper öntvényekben található tempergrafit, *V* a nem tökéletesen szabályos gömbgrafit és a *VI* a tökéletesen gömb alakú grafit. Az etalonképek az M.5. mellékletben láthatók. Az alakhoz hasonlóan a grafit eloszlás meghatározására is etalonképek vannak a szabványban. Az eloszlást *A-E* betűvel jelölik. Az eloszlás etalonképeit csak abban az esetben használjuk, ha a vizsgált mintában *I* típusú, azaz lemezgrafit található, mert csak ennél az alaknál értelmezhető az eloszlás meghatározása. Lemezgrafit esetén az eloszlás információt ad arról, hogy milyen összetételű a vizsgált öntöttvas, és arról, hogy milyen volt a túlhűlés dermedés közben. Az etalonképek az M.6. mellékletben láthatók. A grafit méretét szintén etalonképek segítségével lehet meghatározni. Azért, hogy ez egyszerűbb és értékelhetőbb legyen, mind a lemez (*A* típusú eloszlásra értelmezve), mind a gömbgrafitra található a szabványban egy etalonsor. Az etalonképek az M.7. és M.8. mellékletben láthatók. A szabvány tartalmaz egy táblázatot is, amely a

grafitszemcsék méretét adja meg 100x-os nagyításnál mm-ben és valódi méretben is. A táblázat az M.9. mellékletben található.

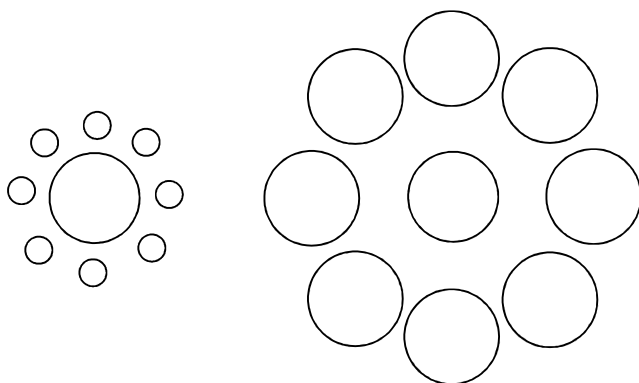
A vizsgálat összehasonlító eljárásra épül, amelynek során a 100x-os nagyítású, polírozott mintafelületen a fent ismertetett paramétereket a szabványban lévő etalonképekkel hasonlítják össze. Az alak meghatározásánál figyelembe kell venni, hogy a legtöbb esetben nem egyetlen alak típus van az öntvényben. Sok esetben a szabálytalan gömböt (V), szabályos gömböt (VI) és az átmeneti, kompakt grafitot (III) tartalmazó öntöttvasokban e három alak típus százalékos mennyiségét kell szemrevételezés után megítélni. A következőképpen történik ilyen esetben az alak megadása: 50%III+20%V+30%VI. Ahogy fent említettem az eloszlás csak a lemezgrafit esetén értelmezhető, így ha a mintánkban lemezgrafit van, akkor a következőképpen történik a meghatározás: 100% I A. Amennyiben a méret meghatározása során azt tapasztaljuk, hogy két vagy akár három méretnek megfelelő grafit található az öntvényben, akkor mind a két vagy három értéket meg kell adni. Azt az értéket, amely mértékadó, vagyis a leginkább jellemző aláhúzással ki kell emelni, pl. 2/3. Ezek alapján, amennyiben egy öntvényben átmeneti (kompakt) grafit és szabályos gömbgrafit van, amely 60% és 40%-os mennyiségben van, és mind a két típusnak a mérete ötös és hatos, de a hatos a leginkább jellemző, a következőképpen történik az értékek megadása: 60%III 5/6+40%VI 5/6.

A grafit alak meghatározását a fémes alapanyag vizsgálata követi. Az alapanyagban lévő fázisok meghatározása szintén nagy jelentőséggel bír. A metallográfiai laboratóriumokban előforduló öntvényminták szövetszerkezetében a legtöbb esetben ferrit, perlit és cementit található. Ebben az esetben fontos meghatározni a ferrit mennyiségét, és amennyiben van cementit, akkor azt is. Hasonlóan a grafit etalonképekhez a ferrit és a cementit mennyiségére az MSZ 5716:1974 szabványban etalonképek találhatók. A próbatest 2%-os Nitallal történő maratása után kell az etalonképekkel szintén 100x-os nagyításban összehasonlítani. A szabványban a következő kategóriák találhatók a ferrit mennyiségét illetően: F0= 2%-ig, F4=2–5%, F8=5–10%, F15=10–20%, F30=20–40%, F55=40–70%, F80=70–90%, F94=90–98%, F100=98% felett [47]. A cementit mennyiségét pedig a következőképpen kategorizálja a szabvány: C2=1%-ig, C4=2-5%, C10=5-15%, C25=15-40%, C40=40% felett [47]. A ferritről és a cementitről két-két etalonfelvétel látható az M.10. és az M.11. mellékletben.

Hőálló, magas molibdéntartalmú gömbgrafitos, illetve CGI öntöttvasnál, ahol a ferrit alapszövet mellett karbidok is jelen vannak, fontos azok mennyiségének meghatározása, amelyre az MSZ 5716:1974 szabványban nincs összehasonlító képsor, hiszen a cementit mennyiségét meghatározó etalonsor nem értelmezhető ilyen típusú, ilyen alakú karbidokra [11][46].

5.2. Digitális képfeldolgozás alkalmazása

Az előző fejezetben ismertettem, hogy a grafit paramétereinek és az alapanyagban lévő fázisok mennyiségének leírása az ipari gyakorlatban a legtöbbször összehasonlító eljárás alapján történik. Ez a módszer azt jelenti, hogy a mikroszkópban látható szövetszerkezetet az etalonképekkel hasonlítják össze és így jellemzik azt. Könnyen belátható, hogy ez az eljárás meglehetősen szubjektív.



5.1. ábra. Nagyságbeli csalódás körök esetén [48]

méretcsalódás, ami a grafit értékelés esetén fontos lehet, azt jelenti, hogy azonos méretű köröket látszólag különbözőnek látjuk, attól függően, hogy milyen környezetben helyezkednek el (lásd 5.1. ábra). Ennek a jelenségnek az a magyarázata, hogy a szemünk sosem mozdulatlan, hanem akkor is végez rezgéseket, mikor szándékunk szerint egy pontra nézünk. A különböző geometriai

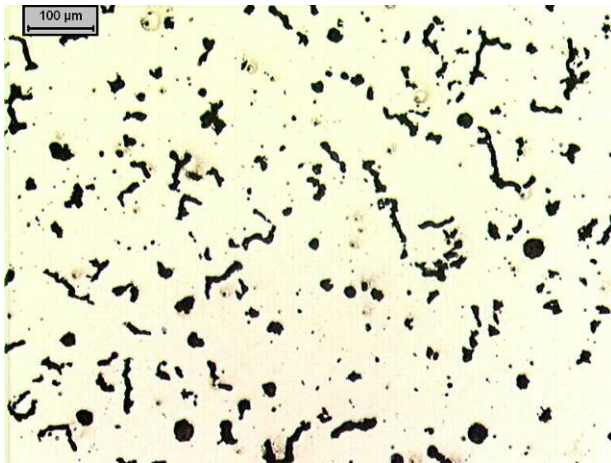


5.2. ábra. Világossági kontraszt [48]

alakzatok hatására hol a szélén, hol a középpontban látunk, és így az eredeti formák módosulnak.

A kontraszthatás azt jelenti, hogy a sötét háttérben megjelenő világos mintákat mindig nagyobbak látjuk, mint a világos alapon lévő sötét mintát. Ezt a jelenséget világossági kontrasztnak nevezzük, amelyet az 5.2. ábrán figyelhetünk meg. A középén látható négyzet mind a két esetben egyforma, mégis különböző méretűnek látjuk. A kontraszthatásnak a maratott szövetszerkezetben a fázisok mennyiségének meghatározásánál van szerepe, mivel a ferrit mennyiségének a meghatározásakor egy sötétre maródott perlites szövetben kell megítélni a világos színű ferrit mennyiségét, olykor még a cementitét is. A fázisok mennyiségének meghatározása számos metallográfiai laboratóriumban nem az összehasonlító módszerrel történik. A legtöbb esetben már rendelkezésre áll valamilyen, a fénymikroszkóppal összekötött képelemző szoftver, amely

segítségével pontosan mérhető a fázisok mennyisége. Ami a grafit alakját és méretét illeti, vannak olyan szoftverek, amelyek a képelemzést felhasználva, valamely, a gyártó cég által kifejlesztett algoritmus alapján eldöntik, hogy a mért mintában milyen alakú és méretű grafit található. Két cég által forgalmazott, a grafit szemcsék alakjának és méretének a meghatározására kidolgozott szoftvert vizsgáltam meg. Elsőként a Leica Materials Workstation program Nodule Analysis nevű alkalmazását használtam. Az alkalmazásban a kép behívása után meg kell adni a nagyítást, amellyel a kép készült, majd ki kell választani a szabványt, amely alapján szeretnénk megkapni az eredményt. Ezt követően detektálni kell a mérni kívánt objektumokat, ekkor lehetőség adódik arra, hogy az apróbb detektált pontokat kitöröljük úgy, hogy méretkorlátot adunk meg. Ez a munkafelület az M.12. mellékletben látható. Ezt követően a színkódolásnak köszönhetően látható, hogy a program melyik grafitot milyen alakúnak adta meg (lásd a M.13. mellékletben). A befejező munkafelületen pedig megfigyelhető, hogy a detektált grafit szemcséknek milyen a mérete (lásd a M.14. mellékletben).



5.3. ábra. Öntöttvas mintáról készült mikroszkópos felvétel (eredeti nagyítás: 100x)

A programot öntöttvas minta gyakorlati vizsgálatára alkalmazva az 5.3. ábrán látható látótérben a grafit alaktípusok eloszlására – az ISO 945:2000 szabvány szerint – a program a következő paramétereket adja: I:0%, II:21%, III:39%, IV:0%, V:30%, VI:10%. A mérés alapján ebben a mintában 21% II, azaz pókszerű grafit szemcse is van, holott a minta szemrevételezése egyértelműen mutatja, hogy a mintában pókszerű grafit szemcse egyáltalán nem

fordul elő, így ez a mérési eredmény nem tekinthető megfelelőnek.

A második általam alkalmazott szoftvert a Zeiss készítette, amelyben három különböző alkalmazás található. Az elsővel a lemezgrafitos, a másodikkal a kompakt, szabálytalan gömb és a szabályos gömbgrafitot a harmadikkal pedig a szabálytalan gömb és a szabályos gömbgrafitot tartalmazó öntvények vizsgálhatók. A vizsgáló személynek kell eldöntenie, hogy a három alkalmazás közül melyik felel meg az általa vizsgált mintában található grafit jellemzésére. Az első és a harmadik esetben a lemezgrafit és a gömbgrafit méretét lehet meghatározni. A második esetben pedig egy alakparaméter segítségével történik a gömbösödés mértékének megadása.

Összegezve: a grafit paramétereinek és a szövetszerkezetben lévő fázisok mennyiségének meghatározása összehasonlító eljárással meglehetősen szubjektív vizsgálati módszer. A fázisok mennyiségi meghatározásánál a legtöbb esetben már nem használnak etalonképeket. Sok laboratóriumban rendelkezésre áll valamilyen, a

fénymikroszkóppal összekötött képelemző szoftver, amely segítségével pontosan megmérhető a fázisok mennyisége. A grafit alakjának és méretének meghatározására a forgalmazók által kidolgozott, a digitális képfeldolgozáson alapuló szoftverek nem bizonyultak megbízhatónak, használatuk kevésbé elterjedt. Az alak minősítésére az ipari gyakorlatban még ma is az etalonképekkel való összehasonlítást használják.

6. MÓDSZER GRAFITSZEMCSÉK ALAK ÉS MÉRET SZERINTI OSZTÁLYOZÁSÁRA

A grafitszemcsék alak és méret szerinti jellemzése az ipari gyakorlatban ma is etalonképekkel történő összehasonlítással történik. Éppen ezért a hagyományos eljárással kapott eredmények megbízhatóságát vizsgáltam, majd pedig az MSZ EN ISO 945:2000 (Az MSZ EN ISO 945:2000 szabványt visszavonták, jelenleg az MSZ EN ISO 945-1:2009 szabvány van érvényben. Az érvényben lévő szabványban az alak és a méretre vonatkozó etalonfelvétel ugyan az, mint a visszavont MSZ EN ISO 945:2000 szabványban.) szabvány etalonképein végeztem el a digitális képfeldolgozáson alapuló vizsgálatokat, és a kapott eredmények alapján kialakítottam egy osztályozási rendszert a grafitszemcsé alakjára és méretére vonatkozóan, majd ezzel a módszerrel végeztem el a méréseket. Végül összehasonlítottam a hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló eljárás eredményeit.

6.1. A grafitszemcsék alakjának és méretének jellemzése hagyományos eljárással

Az összehasonlító vizsgálatok során igen nagy szerepet játszik a szubjektivitás, melynek jellemzésére a következő mérési sorozatot készítettem elő. A vizsgálat során a grafitszemcsé alakot és méretet az MSZ EN ISO 945:2000 szabvány szerint, összehasonlító eljárással három különböző (1. mérés, 2. mérés, 3. mérés), metallográfiai vizsgálatokat napi rendszerességgel végző szakember állapította meg. A vizsgálatokat 14 darab gömbgrafitos öntöttvas mintán végezték el.

A vizsgálat során meghatározták a mintában lévő grafitszemcsék méretét és alakját az M.5. és az M.7. mellékletben található etalonképek alapján. Amennyiben a mintában nem csak egy méretnek megfelelő szemcsé van, akkor lehetséges két vagy akár több méretfokozat megadása is. A vizsgált mintáknál minden esetben két fokozatszámot adtak meg a vizsgáló személyek. Az eredmények minimum és maximum értékei az M.15. és az M.16. mellékletben láthatók. Ami grafit alak meghatározását illeti, mindhárom mérés sorozatnál minden próbatest esetén azt az eredményt kaptam, hogy a próbatestekben V és VI alakú grafitszemcsék vannak, az eltérés ezek %-os mennyiségi megítélésében van. Az eredmények az M.17. és az M.18. mellékletben láthatók. A 6.1. táblázatban az eredmények összefoglalása látható. A grafit minimum méret

meghatározása során a három mérési sorozat között 50%-os, a grafit méret maximum megadása során pedig 57%-os a teljes egyezőség. A grafit alak esetén mindkét alak típustól 50%-os teljes egyezőség állapítható meg. A grafit méret értékelésénél nem volt olyan mérési sorozat, ahol az összes mérés eltérő eredményt adott volna. Az alak értékelés esetén mindkét típusnál 1-1 mérés esetén mind a három mérési eredmény különbözik.

6.1. táblázat. Hagyományos grafitzemcse alak és méret meghatározás eredményei

Grafitzemcse paraméterek		Etalonképekkel való összehasonlítás eredményei (azonosságok száma, 14 vizsgált minta esetén)		
		Mind a három mérés azonos	Két mérés azonos	Minden mérés eltérő
Grafitzemcse méret	Méret minimum	7 esetben	7 esetben	0 esetben
	Mérete maximum	8 esetben	6 esetben	0 esetben
Grafitzemcse alak	V alak	7 esetben	6 esetben	1 esetben
	VI alak	7 esetben	6 esetben	1 esetben

Az eredmények alapján jól látható, hogy mind az alak, mind a méret meghatározásánál a szubjektivitás nagy eltéréseket okoz. Mindezek azt erősítik meg, hogy szükséges egy objektívebb és megbízhatóbb mérési rendszer kidolgozása.

6.2. A grafitzemcsék méret és alak szerinti osztályozása

Annak érdekében, hogy a próbatesteken mért grafitzemcséket be tudjuk sorolni egy-egy méret vagy alak kategóriába, az MSZ EN ISO 945:2000-es szabványban található etalonfelvételeken képelemző segítségével méréseket végeztem. Méréseim célja az, hogy olyan paramétereket találjak, amelyek segítségével leírhatók az egyes grafit alak típusok, és egyértelműen meghatározható a grafitzemcsék mérete.

6.2.1. Grafitzemcsék méret szerinti osztályozása a digitális képfeldolgozás segítségével

Hagyományos eljárás során a grafit alak és méret meghatározását gömbgrafitos öntöttvas mintákon végeztük el, így a képelemzős méréseket az M.7. mellékletben látható gömbgrafit méret etalonképeken készítettem el. Az etalonképeken mértem a grafit hosszúságát (amely a Feret-átmérők közül a legnagyobb, Feret-átmérő: az objektumok maximális mérete valamilyen meghatározott irányban mérve) és az ekvivalens körátmérő értékeit (mely az objektummal azonos területű kör átmérője, amely a következő módon számolható, $d^{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$, ahol az A a részecske területe) [48]. A mérések előtt minden esetben szürkekép-átalakítási műveleteket végeztem el,

amelyeket a 6.3. fejezetben ismertetek. Az M.19. mellékletben található a méret etalonképeken látható grafitzemcsék hosszúságának és ekvivalens körátmérő értékeinek hisztogramjai. A 6.2. táblázatban az értékek összefoglalása látható. A hosszúság és ekvivalens körátmérő paraméterek közel azonos tartományba esnek, és az egyes méretkategóriák minimum és maximum értékei között átfedés is tapasztalható. Mivel a mért értékek közel megegyeznek a szabványban megadott és a fokozatszám alapján besorolt grafitzemcse valódi méreteivel (lásd M.9. melléklet), így módon a méret kategorizálást a szabványban megadott értékek alapján végeztem el. Így a méret meghatározása teljesen megegyezik a szabványban definiált méretekkal.

6.2. táblázat. Etalonképeken mért grafitzemcsék hosszúság és ekvivalens körátmérő értékei

Méret etalonképek fokozatszáma	Hosszúság (mm)	Ekvivalens körátmérő (mm)
3	0,2 felett	0,2 felett
4	0,05–0,16	0,05–0,16
5	0,02–0,09	0,02–0,09
6	0,01–0,05	0,01–0,05
7	0,01–0,03	0,009–0,03
8	0,004–0,03	0,003–0,02

6.2.2. A grafitzemcsék alakjának jellemzése a digitális képfeldolgozás segítségével

Ahhoz, hogy a próbatesteken mért grafitzemcséket be tudjam sorolni egy-egy alak kategóriába, a szabványban található alaktípusok értékelésére alkalmazott etalonképeken is méréseket végeztem. Hasonlóan a méret etalonképekhez ebben az esetben is szürkekép-átalakításokat végeztem az etalonképeken, amelyeket a 6.3. fejezetben ismertetek.

Először minden grafit alaktípuson a körszerűség (R^4) értéket határoztam meg. Ez az a legegyszerűbb paraméter, amellyel az objektumok alakja számszerű értékkel jellemezhető. A körszerűség a körtől való eltérést mutatja. Értéke kör esetén 1. Amint a mért objektumnak nagyobb a kerülete, mint egy ugyanolyan területű körnek, a körszerűség értéke egyre nagyobb lesz.

Értelmezése a következő: $R = \frac{P^2}{4\pi A}$, ahol a P a részecske kerülete, A pedig a területe [48].

Az M.20. mellékletben az alak etalonképeken látható grafitzemcsék körszerűség hisztogramjai láthatók. A 6.3. táblázatban a körszerűség értékek átlaga és szórása figyelhető meg.

⁴ R: roundness = kerekdedség, gömbölydedség

6.3. táblázat. Alak etalonképeken mért grafit szemcsék körszerűség értékeinek átlaga és szórása

Grafit alaktípusok	Körszerűség	
	Átlag	Szórás
I	9,7	4,52
II	10,01	6,9
III	3,25	1,52
IV	3,2	1,55
V	1,78	0,51
VI	1,13	0,06

A körszerűség átlagértékeik alapján három kategória alakítható ki:

- ha a körszerűség értéke 1,0-2,0 közé esik, akkor a grafit szemcse az *V* vagy a *VI* alaknak felel meg. A hisztogramon jól látható (lásd M.20. melléklet), hogy szabályos gömb alak (*VI*) esetén a körszerűség értékei nem haladják meg az 1,4-t, és minden szemcse a megadott tartományban van, a szabálytalan gömb esetén pedig a grafit szemcsék 79%-a esik ebbe a tartományba,
- amennyiben a körszerűség értékek a 2-5 tartományban vannak, akkor a grafit szemcse *III* vagy *IV* alakú, a *III* alak esetén a grafit szemcsék 98%-a, a *IV*-nél pedig 100%-a esik ebbe a tartományba,
- ha az értékek az 5-10,0 tartományban találhatók, akkor a grafit az *I* vagy a *II* alaknak felel meg, a grafit szemcsék a *II* alaknál 68%-ban, az *I* alaknál pedig 85%-ban találhatók a megadott tartományban.

Annak érdekében, hogy a gömb alakú (*VI*) és a szabálytalan gömb alakú (*V*) grafitot el tudjam különíteni, újabb paramétert kellett bevezetnem. A két típus közötti alak eltérés olyan paraméterrel különíthető el, amely az objektum kerületét is figyelembe veszi, hiszen a két alak között a különbség azok kerületéből adódik. A kitöltöttség (*FR*)⁵, hasonlóan a körszerűséghez az objektum alakját írja le úgy, hogy a konvex kerület és a kerület értékeit használja fel, vagyis a kitöltöttség a konvex kerület és a kerület hányadosa. A meghatározása a következő módon történik: $FR = \frac{P^C}{P}$, ahol P^C a konvex kerület P pedig a kerület. A kerület az objektumot körülvevő határvonal hosszúsága képpontban kifejezve (lásd 6.1. ábra). A részecske belsejében lévő lyukak ún. belső határfelülete, pontosabban annak kerülete szintén a paraméter része. A konvex kerület meghatározása akkor hasznos, ha az objektumon konkáv beszögélések vannak, ahogy a szabálytalan grafit gömb esetén is. A paraméter mérése során az objektumot konvex burokkal vesszük körbe, és ennek a konvex buroknak, mint határvonalnak a hosszúsága a konvex kerület (lásd 6.2. ábra) [48].

⁵ FR: fullness ratio = kitöltöttség, teltség



6.1. ábra. Az objektumok egyedi kerülete [48]



6.2. ábra. Az objektumok egyedi konvex kerülete [48]

Az M.21. mellékletben az V és VI alak kitöltöttség hisztogramjai láthatók. A 6.4. táblázatban a gömb alak (VI) és a szabálytalan gömb alak (V) kitöltöttség értékeinek átlaga és szórása található.

6.4. táblázat. Az V és a VI alak etalonképeken mért grafitzemcsék kitöltöttség értékeinek átlaga és szórása

Grafit alaktípusok	Kitöltöttség (%)	
	Átlag	Szórás
V	84	8,37
VI	93	1,23

A táblázatban szereplő értékek alapján megállapítható, hogy ha a kitöltöttség átlagértékek 100-93% tartományba esnek, akkor a grafitzemcsé szabályos gömb alaknak tekinthető. Amennyiben a kitöltöttség értékek 93%-nál kisebbek, akkor a grafit szabálytalan gömb alakú. Ezzel a paraméterrel sikerült a gömb alakot és a szabálytalan gömb alakot egymástól elkülönítenem. A fennmaradt két kategóriában szereplő alaktípusok elkülönítése során az első lépésben a már meghatározott körszerűség értéket használtam. Ezt követően olyan mutatószámot vezettem be, amely figyelembe veszi a grafitzemcsék megnyúlt, a körtől nagymértékben eltérő alakját. Ezért a nyújtottság (AR^6) értékeket határoztam meg, amely a hosszúság és a szélesség viszonyossága: $AR = \frac{L}{W}$, ahol az L a hosszúság W a szélesség [48]. Az M.22. mellékletben a VI, a III, a II és az I jelű grafitzemcsék nyújtottság hisztogramjai láthatók. A 6.5. táblázat nyújtottság értékeinek átlaga és szórása található.

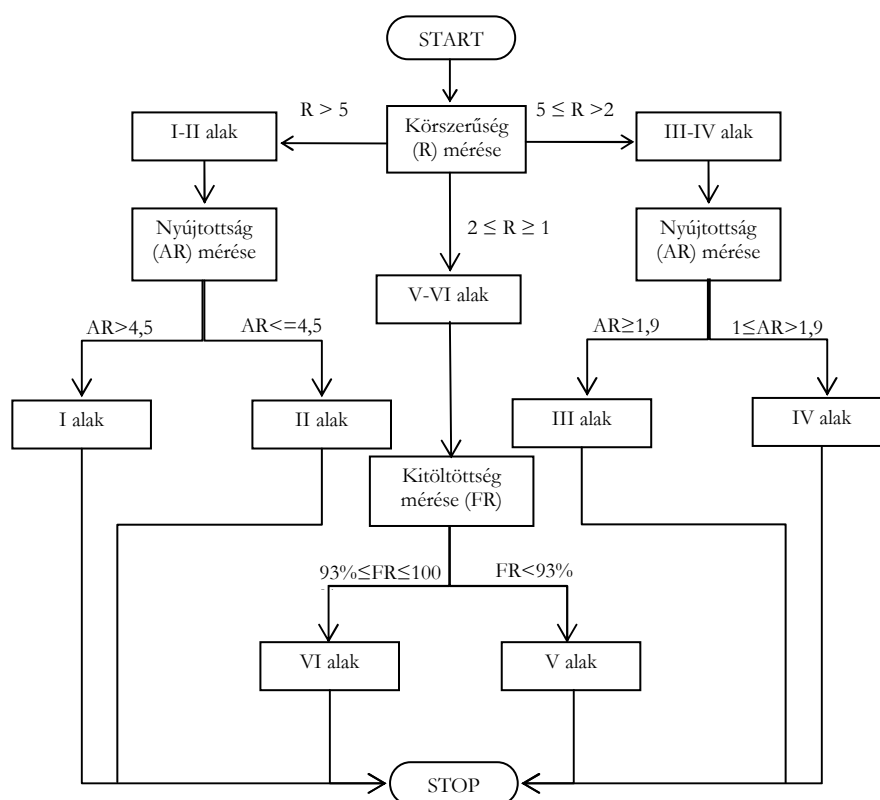
6.5. táblázat. Az I, II, III és a IV alak etalonképeken mért grafitzemcsék nyújtottság értékeinek átlaga és szórása

Grafit alaktípusok	Nyújtottság	
	Átlag	Szórás
I	8,15	3,61
II	2,37	0,88
III	2,66	0,76
IV	1,4	0,15

⁶ AR: aspect ratio = karcsúság

A nyújtottság értékek alapján a fent látható négy grafit alak között is különbség tehető. Amennyiben a körszerűség érték szerint a grafitzsemcsé a *III* és a *IV* alak kategóriába sorolható, de a nyújtottság értéke 1,0–1,9 között van, akkor a grafitzsemcsé *IV* alaknak felel meg, ha nyújtottság értéke ennél nagyobb, akkor *III* alaknak felel meg. Ha körszerűség értékek alapján a grafitzsemcsé az *I* és a *II* alak kategóriába tartozik, de a nyújtottság értékek 4,5-nél nagyobbak, akkor a grafit az *I* alak kategóriába sorolható, ha 4,5-nél kisebb a nyújtottság, a *II* kategóriának felel meg a grafitzsemcsé.

A három paraméter alapján kialakított algoritmus folyamatábrája 6.3. ábrán látható.



6.3. ábra. A grafitzsemcsé alakjának osztályozására kialakított algoritmus folyamatábrája

A folyamatábrán megfigyelhetjük az algoritmusban szereplő paramétereket és azok értéktartományait. Első lépés a körszerűség értékének meghatározása, amely alapján három csoport hozható létre. Amennyiben a körszerűség értéke 1-2 között van akkor *V* és *VI* alakú a mért grafitzsemcsé, e kettő között a kitöltöttség értékek meghatározásával lehet különbséget tenni, 100-93% kitöltöttség esetén *VI* alakú, 93%-nál kisebb értékek esetén pedig *V* alaknak felel meg a grafitzsemcsé. Abban az esetben, ha a kitöltöttség 2-5 között van, *II* és *III* alakú, ha 5-nél nagyobb, akkor *I* és *II* alakú grafitzsemcsé. A két csoportban szereplő alak típusok között a nyújtottság paraméterrel lehet különbséget tenni. Az 1-1,9 értéktartomány között *IV* alakú,

1,9-nél nagyobb értékeknél pedig a *III* alak típusba sorolható a grafit szemcse. Ha a nyújtottság 4,5-nél kisebb, akkor *II*, ha 4,5-nél nagyobb, akkor *I* alakú a mért grafit szemcse.

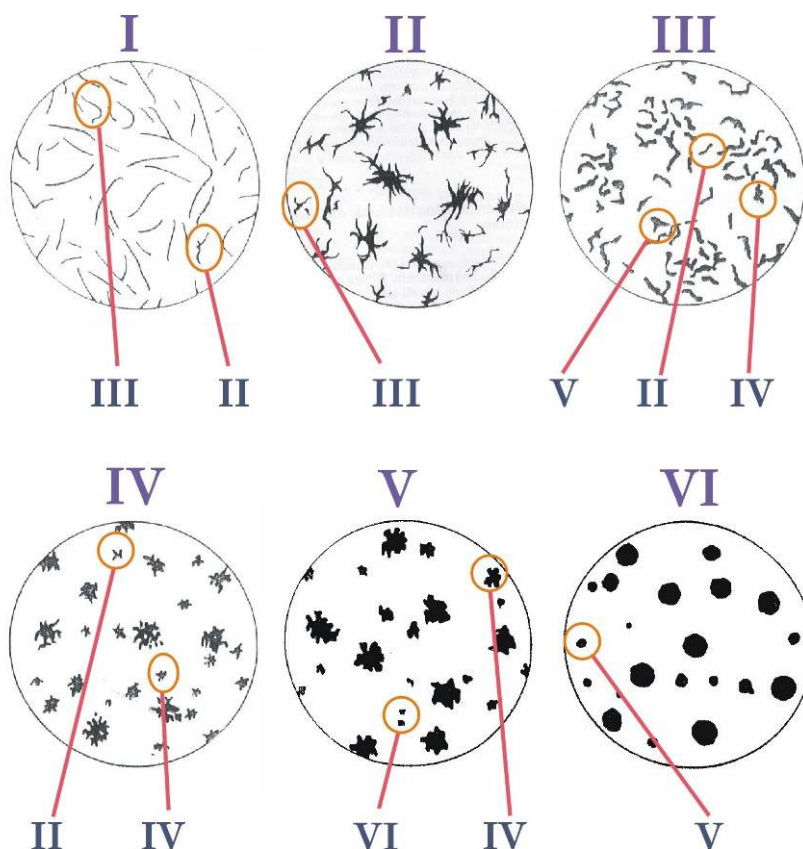
A grafit szemcsék alakjának és méretének meghatározása során - még az algoritmust megelőzően - a fent ismertetett paramétereket tartalmazó fájl beolvasásra kerül egy excel fájlba, majd a szükséges átalakítások után az algoritmus megadja a próbatesten mért grafit szemcsék alakját külön-külön, és az egész próbatestenre tekintve százalékosan is. A 6.2. táblázatban szereplő hosszúság kategóriák alapján pedig megtörténik a grafit szemcsék méretbe sorolása is. A kialakított osztályozás ellenőrzése érdekében a szabványban lévő alak etalonképeken is elvégeztem méréseket az általam kialakított rendszer szerint, az eredmények a 6.6. táblázatban láthatók.

6.6. táblázat. Alak etalonképeken a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal elvégzett mérések eredményei

Algoritmus értékei alak típusonként	Σ Grafit szemcse szám az etalonképeken					
	42	19	42	27	19	21
	Grafit alak etalonképek					
	I	II	III	IV	V	VI
I	73,81 % (31 darab)	-	-	-	-	-
II	14,29% (6 darab)	78,95% (15 darab)	10% (5 darab)	7,41% (2 darab)	-	-
III	11,90% (5 darab)	21,05% (4 darab)	60% (30 darab)	-	-	-
IV	-	-	10% (5 darab)	59,26% (16 darab)	21,05% (4 darab)	-
V	-	-	4% (2 darab)	33,33% (9 darab)	68,42% (13 darab)	9,52% (2 darab)
VI	-	-	-	-	10,53% (2 darab)	90,48% (19 darab)

Az eredményeket nagymértékben befolyásolja, hogy az etalonképeken nagyon kevés grafit szemcse látható. Így akár egy darab nem az alakjának megfelelő kategóriába sorolt szemcse is erős hatást gyakorol az eredményekre. A mért grafit szemcsék az *I* alak esetén 74%-ban, a *II* alaknál 79%, a *III* alaknál 60%-ban, a *IV* alaknál 59%-ban, az *V* alaknál 68%-ban, a *VI* alaknál pedig 90%-ban a megfelelő alak típusba kerültek besorolásra. Az etalonképek részletes megfigyelése során könnyen észrevehető az a grafit szemcsék melyek kissé eltérő alakkal rendelkeznek az etalonkép által definiált grafit alakokhoz képest. A *II* alak típus etalonfelvételén mértem olyan szemcséket, amelyek a többi szemcséhez képest sokkal kisebbek, vékonyabbak és kevésbé „csillagszerűek”. Ehhez hasonló szemcsék a *III*-as és a *VI*-es etalonképen is láthatók, így az algoritmus ezeket *II* alakúnak definiálta. A *III* alak típus etalonképen számos olyan szemcse található, melyek hasonlóan az előző esethez vékonyabbak és rövidebbek a többi

grafitszemcséhez képest. Az *I* és a *II* etalonképen is mértem ilyen alakú szemcséket. A *IV* alak felvételén megfigyelhetők kicsi és tömör alakzatok, melyek hasonló paraméterekkel rendelkeznek, mint a *VI* alaknál megfigyelhető kis méretű szemcsék. Ilyenfajta szemcsék még a *III* felvételen is találhatók. Az *VI* alak etalonképén a kisebb méretű szemcsék hasonló paraméterekkel rendelkeznek, mint a *V* alak kisméretű objektumai. Ezeknek a szemcsék nem rendelkeznek olyan mértékű konkáv beszögelésekkel, mint a felvételen látható nagyobb szemcsék. A 6.4. ábrán az etalonfelvételek láthatók, amelyeken megjelöltem a mérési eltéréseket okozó grafit szemcsékből néhányat.



6.4. ábra. Az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban található grafit alakra vonatkozó etalonfelvételek

A legtöbb téves mérés a *III* alaktípusnál volt. Ez az etalonfelvétel az úgynevezett kompakt grafitos öntöttvas típust szemlélteti.

6.2.3. A digitális képfeldolgozás és a hagyományos módszer összehasonlítása

A hagyományos eljárással megvizsgált 14 darab gömbgrafitos öntöttvas próbatestet az előző fejezetben ismertetett képelemzős algoritmus segítségével is kiértékeltem. A mérések előtt a 6.3. fejezetben ismertetett képátalakításokat alkalmaztam. Az eredmények az M.23. mellékletben találhatók. Látható, hogy az algoritmus minden mérés esetén – eltérően a hagyományos

mérésektől – kettőnél több szemcseméretet határozott meg. Az M.24. és az M.25. mellékletben látható diagramon a legnagyobb %-os mennyiségű grafit méretet ábrázoltam, a 11% és az annál kisebb értékeket nem tüntettem fel. A 6.7. táblázatban a digitális képfeldolgozással és a hagyományos módszerrel elvégzett mérések eredményei láthatók.

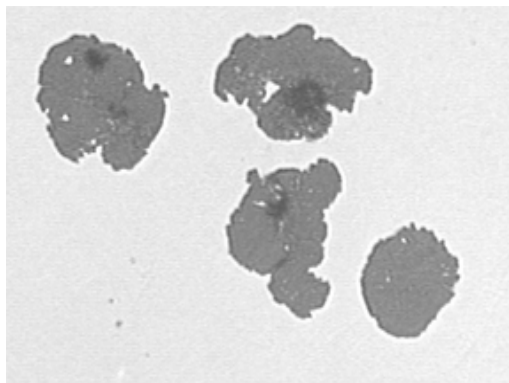
6.7. táblázat. Hagományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmus segítségével meghatározott grafit szemcse alak és méret eredményei

Grafit szemcse paraméterek		Etalonképekkel való összehasonlítás hagyományos módon és digitális képfeldolgozással (azonosságok száma, 14 minta esetén)			
		Mind a négy mérés azonos	Három mérés azonos	Két mérés azonos	Minden mérés eltérő
Grafit szemcse méret	Grafit méret minimum	5 esetben	7 esetben	2 esetben	0 esetben
	Grafit méret maximum	4 esetben	8 esetben	2 esetben	0 esetben
Grafit szemcse alak	V alak	0 esetben	7 esetben	6 esetben	1 esetben
	VI alak	0 esetben	7 esetben	6 esetben	1 esetben

A táblázatban és a mellékletben megfigyelhetjük, hogy a grafit szemcse minimum méret meghatározása során a hagyományos és a képelemzős algoritmus eredményei között 35%-os a teljes egyezés, míg a grafit méret maximum megadása során 28%-os az egyezés. Ami a grafit alak meghatározását illeti, hasonlóan a grafit méretéhez, itt is több grafit alak típust adott meg a digitális képfeldolgozáson alapuló módszer. Ezek többnyire néhány százalékos értékek, melyeket az ábrázolás során nem vettem figyelembe. Az M.26. és az M. 27. mellékletben és a 6.7. táblázatban az alak meghatározás összehasonlítása található. Az eredmények nehezen összehasonlíthatók, teljes egyezés egyetlen esetben sem tapasztalható. A digitális képfeldolgozó algoritmus minden esetben eltérő eredményt adott a hagyományos mérésnél meghatározott százalékos mennyiséget illetően, de az alaktípusok azonosak voltak.

6.3. A digitális képfeldolgozás során alkalmazott képátalakítások

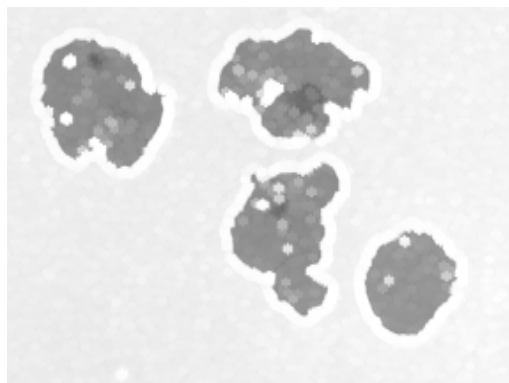
Az algoritmus kidolgozása során először a szabványban található etalonképeken végeztem méréseket, majd pedig a próbatesteken. Ahhoz, hogy a mérések során a lényeges információkat külön tudjam választani, különböző képfeldolgozási műveleteket hajtottam végre a Leica QWin Pro szoftver segítségével. Az ilyen átalakítások során lehet eltávolítani a képeken jelentkező hibákat, amelyek a próbatest előkészítésekor keletkezett karcokból, az öntvényen található



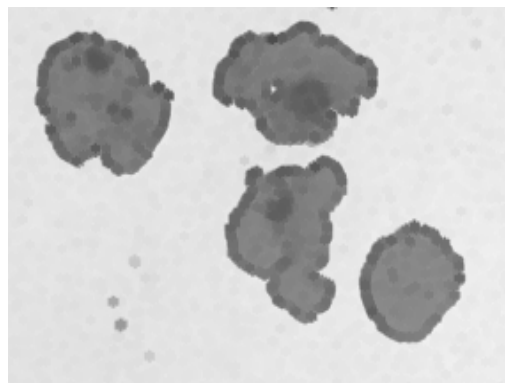
6.5. ábra. Öntöttvas mintáról készített eredeti szürkekép (Eredeti nagyítás: 100x)

pórusokból vagy az esetleges szennyeződésekben adódhatnak. Ugyanakkor a digitális képfeldolgozás alkalmával a képek számszerű adatokkal történő jellemzése történik. A képfeldolgozó rendszer a mérés során az M.28. mellékletben olvasható főbb lépéseket hajtja végre. A képfeldolgozásnak és a képelemzésnek számos módszere ismeretes, a következőkben csak az általam alkalmazott módszerekre és mérésekre fogok kitérni. A

képek beolvasása és rögzítése után a képelemzés második lépése a képfeldolgozás, a szürkekép átalakítások. A szürkekép elnevezés arra utal, hogy a képpont mátrix értékeit a fekete–fehér intervallumon belül különböző szürkeségi szintek alkotják. A szürkeképen elvégzett morfológiai transzformáció során az egyes képpontok szürkeségi szintjét a szomszédai értékeitől függően változtatjuk meg. A leggyakoribb morfológiai transzformáció az erózió és a dilatació. Az erózió nem más, mint egy-egy pixel értékének helyettesítése az önmaga és nyolc szomszédja által alkotott csoport szürkeségi értékeinek minimumával. A dilatació során a maximum érték helyettesítése történik [48]. A 6.5. ábrán az eredeti szürkekép a 6.6. és a 6.7. ábrán az erózió és a dilatació figyelhető meg.



6.6. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett kétszeres erózióval módosított kép

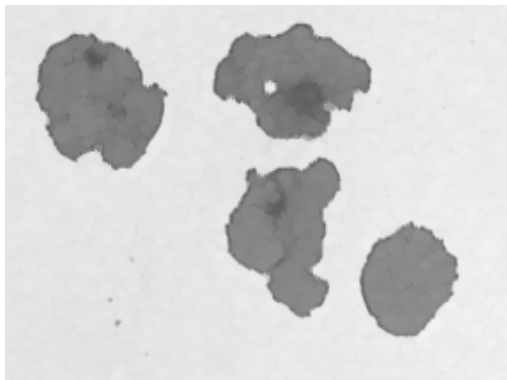


6.7. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett kétszeres dilatacióval módosított kép

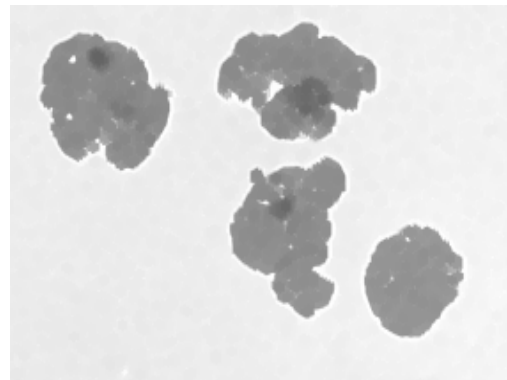
A nyitás⁷ és a zárás⁷ műveletek az erózióból és a dilatacióból származtatható műveletek. A nyitás, erózió és az ekvivalens dilatació, a zárás pedig dilatació és az ekvivalens erózió egymást követő végrehajtásából tevődik össze. Az ekvivalens kifejezés arra utal, hogy ezeknek a műveleteknek az elvégzése nem feltétlenül egy alkalommal történik. Tekintettel arra, hogy az

⁷ Angol kifejezés: opening: nyitás, closing: zárás.

erózió és a dilatáció irreverzibilis műveletek, a nyitással az apró világos objektumok, míg a zárással a sötétebb jellegzetességek távolíthatók el a képről [48]. A 6.8. és a 6.9. ábrán a műveletek eredményei figyelhetők meg.



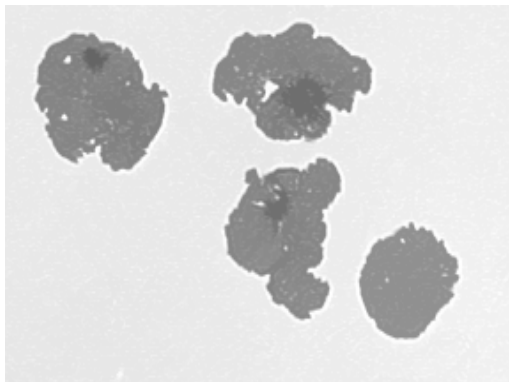
6.8. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképén elvégzett nyitással módosított kép



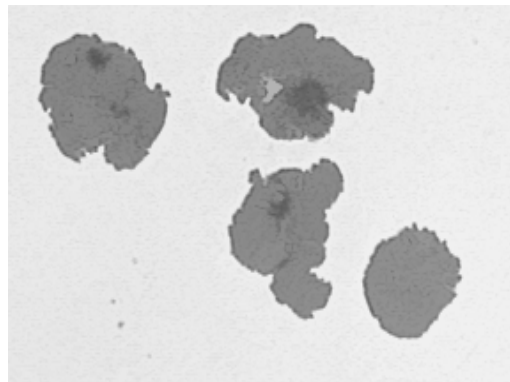
6.9. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképén elvégzett zárással módosított kép

A geodézikus transzformáció elnevezés egy művelet két típusát jelöli: a számítógépes grafikában gyakran alkalmazott maszkolási technika - egyik esetben bináris, a másikban szürkemaszkkal. A rekonstrukciós szűrő elnevezés az eróziót vagy dilatációt követő geodézikus transzformációkat jelöli. A fill műveletek (fill white⁸, fill black⁸) a nyitás vagy zárás transzformációk második lépéseként a megfelelő geodézikus transzformációt hajtják végre. A sötét részletek kitöltése művelet esetén dilatáció, geodézikus erózió lépéssorozattal egyenértékű. Így a sötétebb lyukakat tölti ki a környezetük szürkeségi szintjével. Ezzel ellentétes a világos részletek kitöltése művelet, amely a világosabb lyukakat tölti ki a környezet szürkeségi szintjével [48]. A mérések során ezt a két szürkekép átalakítást végeztem el, mert ezek az átalakítások módosítják a legkevésbé a grafitszemcse alakját. A 6.10.-6.12. ábrán a két művelet eredménye és együttes hatása látható.

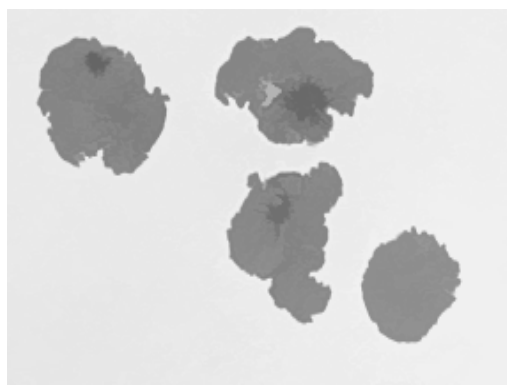
⁸ Angol kifejezés: fill white: fehér részletek kitöltése, fill black: sötét részletek kitöltése



6.10. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett sötét részek kitöltésével módosított kép

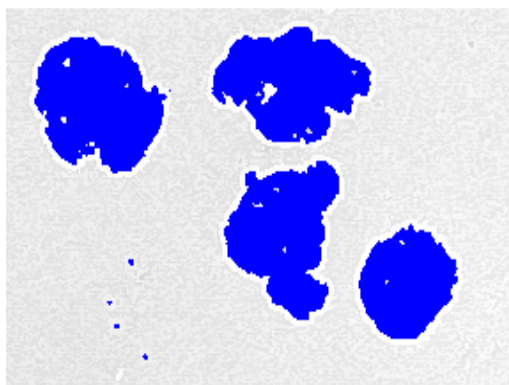


6.11. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett világos részek kitöltésével módosított kép



6.12. ábra. A 6.5. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett a sötét és világos részek kitöltésével módosított kép

A szürkeképen történő átalakítások után következik a detektálás, amely során a vizsgálandó

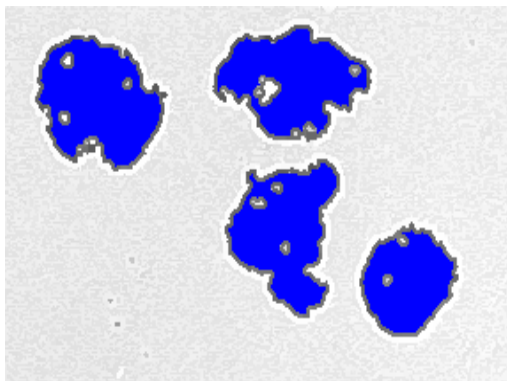


6.13. ábra. Öntöttvas mintáról készített eredeti szürkekép

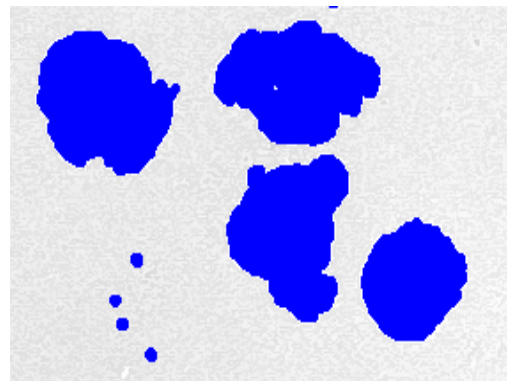
objektumokat megkülönböztetjük és elválasztjuk a háttértől. Az így létrehozott bináris kép az a kép, amelyben csak két érték szerepel 1 vagy 0. A 6.13. ábrán az eredeti szürkekép látható detektálás után, ahol a detektált objektumot a szoftver kékre színezi. A detektálás gyakran nem eredményez olyan pontosságú megjelölést, hogy azon a valóságot tükröző méréseket tudjunk elvégezni. Ezért a bináris képen történő átalakításokkal tovább

javíthatjuk a detektálás eredményét. A bináris erózióval és dilatációval képpontokat távolítunk el, illetve adunk hozzá az objektum határához. A nyitás és a zárás műveletek, ahogy a szürkeképen történő átalakítások során, itt is az egymást követő eróziók és ekvivalens dilatációk, illetőleg

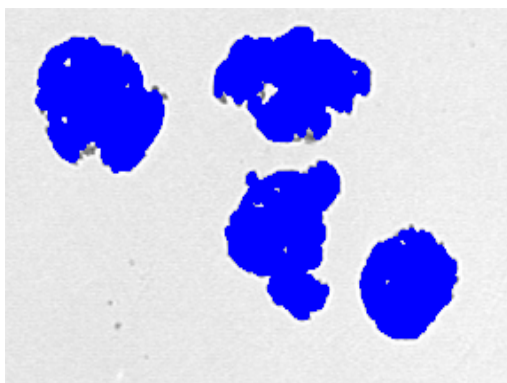
dilatációk és ekvivalens eróziók elvégzést jelentik [48]. A 6.14-6.17. ábrán az átalakítások figyelhető meg.



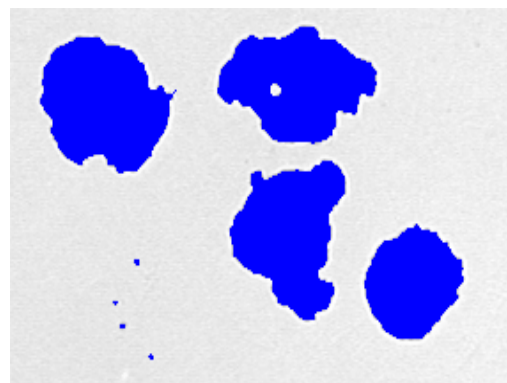
6.14. ábra. A 6.13. ábrán látható detektált képen kétszeres bináris erózióval módosított kép



6.15. ábra. A 6.13. ábrán látható detektált képen kétszeres bináris dilatációval módosított kép



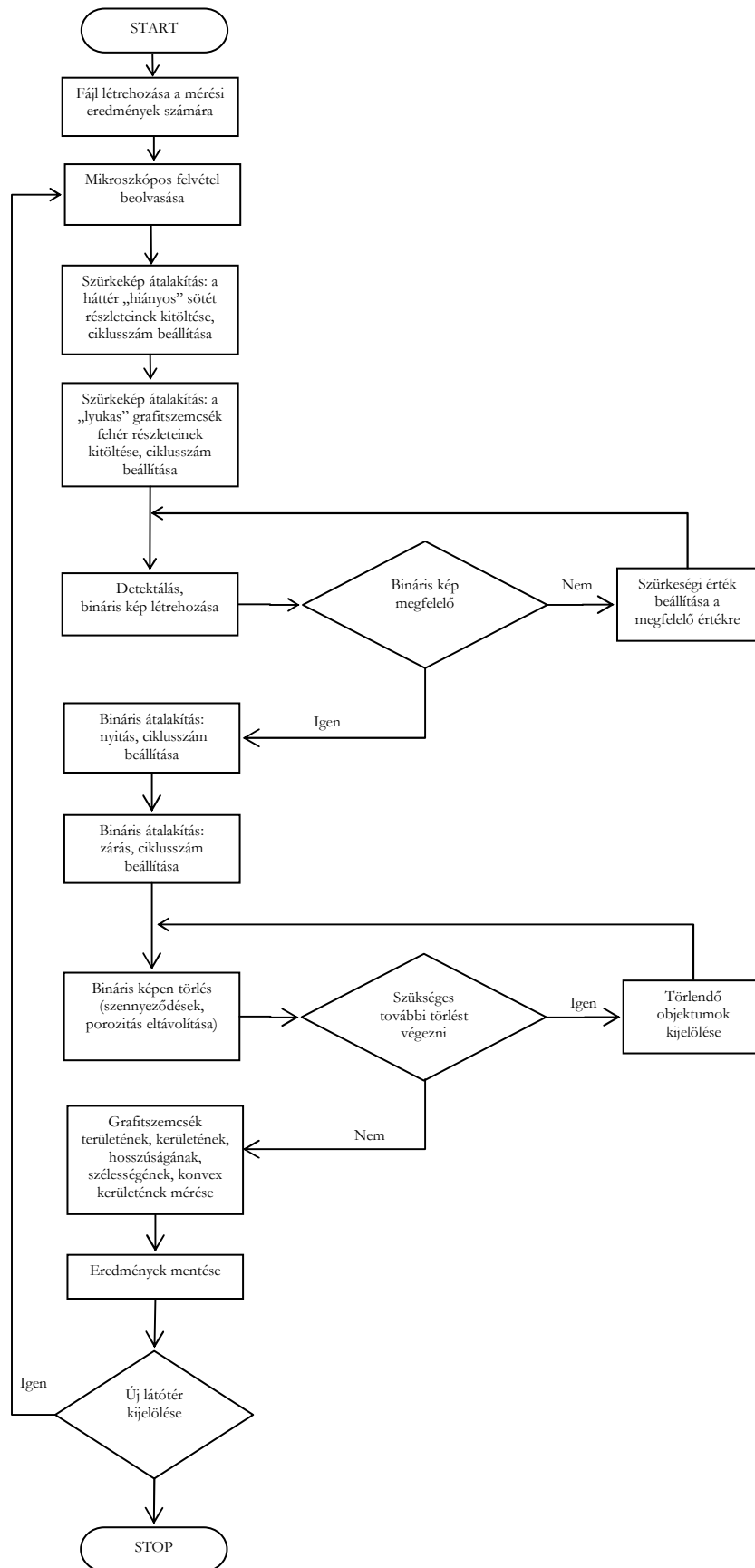
6.16. ábra. A 6.13. ábrán látható detektált képen kétszeres bináris nyitással módosított kép



6.17. ábra. A 6.13. ábrán látható detektált képen kétszeres bináris zárással módosított kép

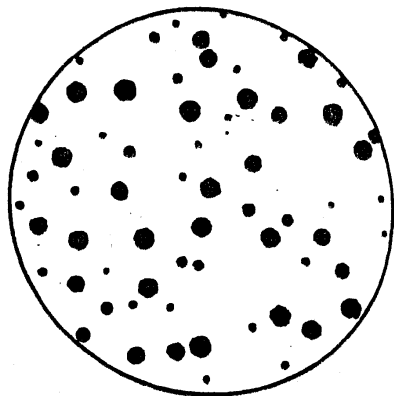
A bináris átalakításokon belül el tudunk végezni különböző logikai műveleteket, amelyekkel bináris képet adunk össze és vonunk ki egymásból, esetleg különböző képeket másolunk egymásra. Lehetőség van különböző manuális műveletekre is pl. azoknak a detektált objektumoknak az eltávolítására, amelyeket a későbbiekben nem szeretnénk mérni, viszont más átalakításokkal nem tudunk eltávolítani, vagy az egynek detektált, de a valóságban két különböző objektum elválasztására [48]. A fent ismertetett átalakítási műveletek alkalmazása után végeztem el a méréseket. Az átalakítási műveletek gyors egymás utáni elvégzésének céljából makroprogramot készítettem. A program elindítása előtt megfelelő számú látótérrel 100x-os nagyítású felvételeket készítettem. A program elindításával a képfeldolgozási műveleteket tartalmazó menüpontokat egymás után nyitja meg a program. A műveletek előtt lehetőségem van a paraméterek változtatására, pl. detektálási küszöbérték, vagy a szürkekép átalakításnál a ciklusszámok módosítására. Ezt követően a korábban megadott paraméterek mérése automatikusan megtörténik, majd azok eredményét egy fájlba menti el a program.

A makropogram folyamatábrája a 6.18. ábrán látható.

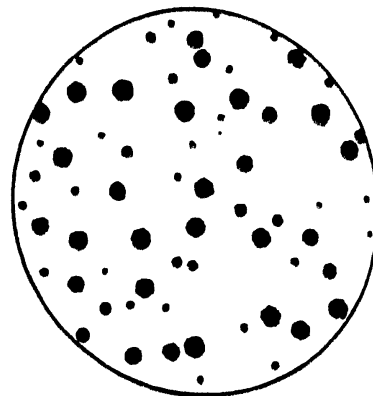


6.18. ábra. Makroprogram a digitális képfeldolgozási műveletekre

A mérési eredményeket tartalmazó fájlt olvassa be végül az excel alkalmazás, amelyben a kialakított kategorizálási rendszer található. Az osztályozási rendszer megalkotásakor az etalonképeken is végeztem méréseket, természetesen megfelelő képfeldolgozási műveletek után.



6.19. ábra. A 6-os gömbgrafit méret eredeti szürkeképe [46]



6.20. ábra. A 6.19. ábrán látható eredeti szürkeképen elvégzett világos és sötét részletek kitöltésével módosított kép

A 6.19. ábrán a 6-os méretű gömbgrafitra vonatkozó etalonfelvétel eredeti szürkeképe látható. A 6.20. ábrán figyelhető meg, hogy a sötét és világos részletek kitöltésével eltüntettem a felvételen látható apró szennyeződések. Ezt követően detektáltam a grafit szemcséket és meghatároztam a kívánt paramétereiket.

Összegezve a grafit szemcsék alakjának és méretének meghatározása hagyományos összehasonlító eljárással szubjektív módszernek tekinthető. Mindezt alátámasztja az általunk elvégzett három párhuzamos mérési sorozat, amelynél a grafit méret és a grafit alak meghatározásánál átlagban 52%-os volt a teljes egyezés. A grafit szemcsék paramétereinek reprodukálható meghatározása érdekében első lépésben a szabványban található etalonképeket számszerű adatokkal jellemeztem, hogy később a mintákban található grafit szemcséket ezek alapján identifikálni tudjam. A digitális képfeldolgozáson alapuló vizsgálat során az etalonképeket jellemző, három adatból álló paraméter együttes bevezetésével kialakítottam egy módszert, amellyel a szabványban található grafit alak típusok jól elkülöníthetők. A mérések megbízhatóságának és reprodukálhatóságának érdekében kidolgoztam a szükséges képtranszformációkat tartalmazó algoritmust és programot.

7. DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALKALMAZÁSA AZ IPARI GYAKORLATBAN

A grafit alak pontos meghatározása olyan fontos követelmény, amely nagymértékben befolyásolja a félkész termék további életciklusát. Amennyiben nem megfelelő a gyártott adagban lévő grafit szemcsék alakja, nem készülhet belőle késztermék, mivel a grafit szemcsék alakja a továbbiakban már nem módosítható. Az autóiipari alkalmazásokra készülő termékekkel (pl. kipufogócsonk, turbínaház) szemben támasztott szigorú követelmények miatt nagy fontossággal bír ennek a paraméternek a pontos meghatározása.

7.1. A grafit szemcse alakjának gyártásközi ellenőrzése, ipari körülmények között (hagyományos eljárás)

Az ipari üzemekben történő gyártásközi ellenőrzések mindig nagy fontosságú és különleges megoldásokat követelő műveletek. A legtöbb esetben a legfőbb korlát az idő, mivel rendszerint kevés idő áll rendelkezésre. Az ellenőrző műveletek nem tarthatják fel a gyártást, tehát annak gördülékeny módon kell beépülnie a folyamatokba.

Az öntöttvas öntvényeket gyártó autóiipari beszállító üzemekben a grafit szemcsék alakjának gyártásközi ellenőrzésére már kialakult metodika van, amely a következő lépésekből áll: a rendelkezésre álló rövid idő (kb. nyolc perc) alatt a vizsgáló személynek mintát kell vennie a folyékony adagból, a mintát le kell hűtenie, majd pedig a mintát a metallográfiai vizsgálatra alkalmassá kell tennie. Ez magába foglalja a csiszolás és a polírozás műveletét, ami a rövid idő miatt semmiképp sem elegendő egy szép karcmentes felület létrehozásához. Tovább nehezíti a körülményeket, hogy a minta beágyazásra nincs idő, így gyakran a minta felülete nincs síkban. Végül ezen a mintán, 100x-os nagyításban, három látótér megtekintésével kell eldönteni, hogy az adag megfelel-e a minőségi követelményeknek, ami a grafit szemcse alakját illeti. A döntés során a vizsgáló személy az EN ISO 945:1994 szabványt használja alapul. Lényegében a már korábban ismertetett (5.1. fejezet) összehasonlítási eljárással történik a grafit szemcse alak és az alak típusok százalékos eloszlásának meghatározása. Az eljárás szubjektív és meglehetősen függ a vizsgáló személy tapasztalatától. Mindezen tényezők kiküszöbölése egy digitális képfeldolgozási algoritmus alkalmazásával lenne lehetséges.

7.2. A vermikuláris és a gömb alakú grafit elkülönítése digitális képfeldolgozással az ipari gyakorlatban

Az algoritmus kialakítása során a korábban már ismertetett (6.2. fejezetben) osztályozási rendszert használtam. A szabályos és a szabálytalan grafit szemcsét az eddigi három paraméter (körszerűség, nyújtottság, kitöltöttség) alkalmazásával jól megkülönböztethetők voltak. A továbbiakban a paraméterek pontosítására volt szükség a vermikuláris (CG) grafit, a szabályos és a szabálytalan gömb alakú grafit szemcsék megbízható elkülönítésére.

A vizsgálatok során a további három alaktípussal, a lemezgrafittal (*I*), csillag vagy pókszerű grafittal (*II*) és apró szabálytalan, a temper öntvényekben található tempergrafittal (*IV*) nem kellett foglalkoznom. A gyártásközi ellenőrzés során a vizsgáló személynek ugyanis az az első feladata, hogy eldöntse, milyen típusú grafit alak található a mintában. Amennyiben *I*, *II* vagy *IV* alakú grafit szemcsék láthatók, akkor a minta további vizsgálata nem szükséges. Az ilyen típusú grafit alakok egyértelműen rosszul kezelt adagból származnak, melyek a továbbiakban selejtként jelennek meg a rendszerben. Így szükségtelen a grafit szemcse alakjának a jellemzése. Tulajdonképpen a vizsgáló személy első döntése során szükségtelen képelemző algoritmus alkalmazása, így a továbbiakban csak a *III*, *V* és a *VI* alaktípus kategorizálása a feladat.

A korábban kidolgozott paraméterek pontosítására, az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban lévő etalonképek, vagyis a bennük lévő kevés számú grafit szemcsék miatt, nem voltak elegendők. Következésképpen az osztályozás folyamán, olyan öntvénymintákon végeztem el méréseket, amelyekben mind a három fajta grafit alaktípus megtalálható és ezek alapján módosítottam egy-egy paramétert.

Az elsőként kidolgozott kategorizálási rendszerben a következő három paramétert alkalmaztam: nyújtottság (AR, lásd 6.2.2. fejezet), körszerűség (R, lásd 6.2.2. fejezet), kitöltöttség

($FR = \frac{P^C}{P}$). A kitöltöttséget ebben az esetben a grafit szemcse kitöltetlenségének kifejezése

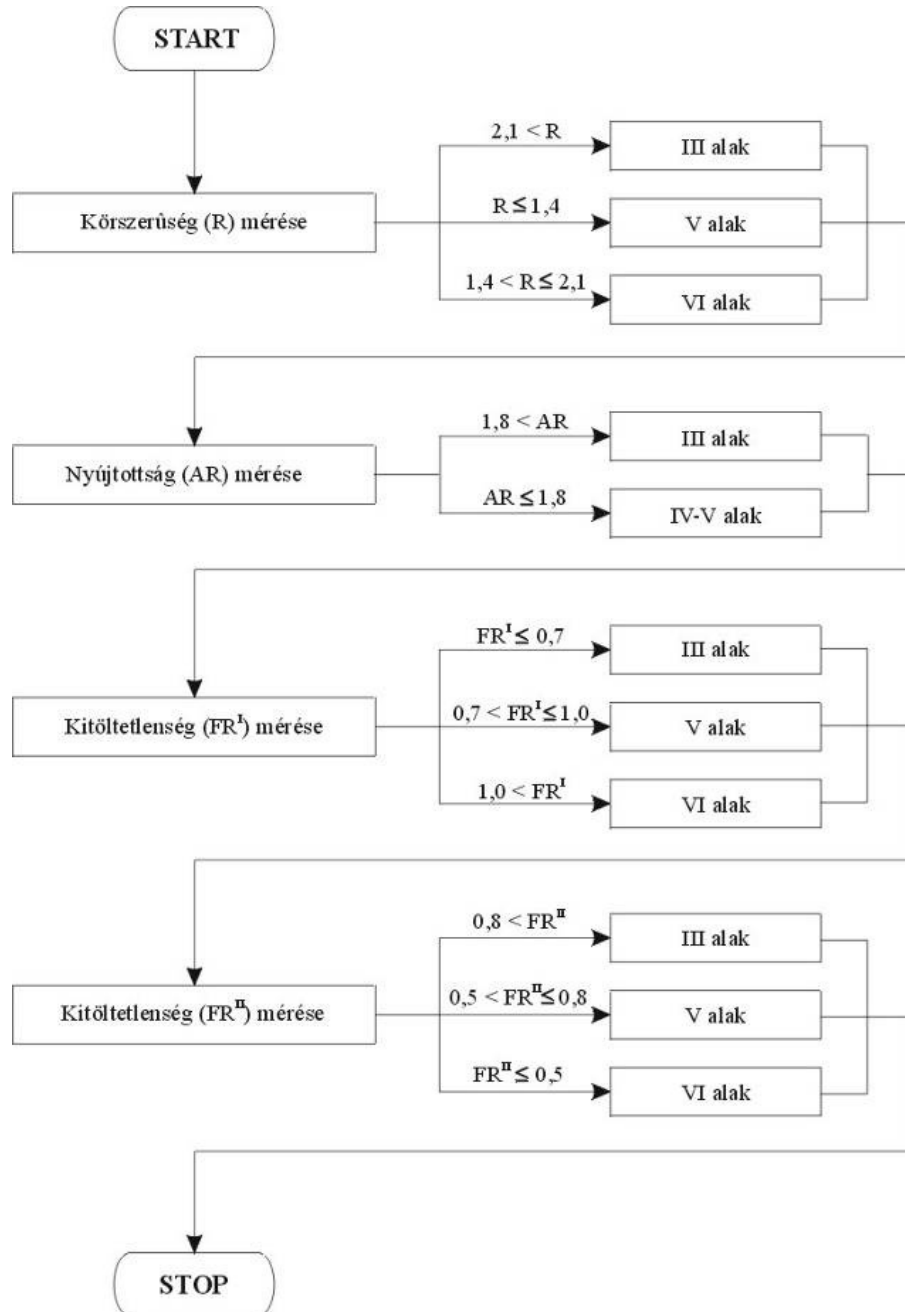
érdekében módosítottam. A kitöltetlenség leírható a kerület és a konvex kerület összefüggésével

(lásd 6.2.2. fejezet) a következő módon, $FR' = \frac{P}{P^C}$, a terület és a konvex terület összefüggésével

pedig így számolható, $FR'' = \frac{A}{A^C}$. A terület (A) a detektált objektum által elfoglalt terület

nagysága képpontban. Azokat a képpontokat vesszük számba, amelyek az objektum belsejében találhatóak. A konvex terület (A^C) meghatározása során a mérendő objektumot konvex burokkal vesszük körbe, s ennek a területét határozzuk meg. Amennyiben az objektum belsejében nincsenek lyukak, illetve a határfelületén kevés konkáv beszögelés található, a terület és konvex

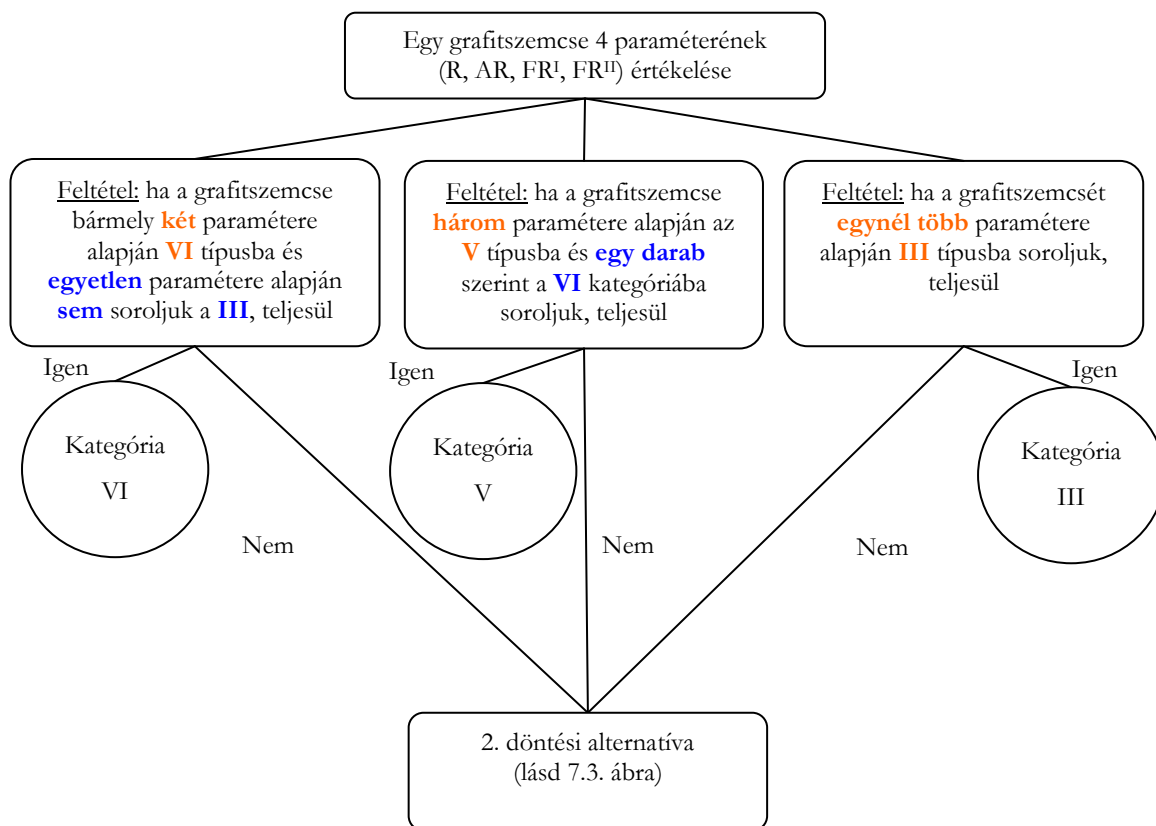
terület egymáshoz közel van. Ellenben ha az objektum határvonala konkáv, illetőleg a belsejében lyukak vannak, a konvex terület és a terület jelentősen eltér [48]. Mindezek alapján a fenti négy paraméterrel kialakítottam az osztályozási algoritmust, melynek a folyamatábrája a 7.1. ábrán látható.



7.1. ábra. Az ipari igényre kialakított grafit alak algoritmus folyamatábrája

Az algoritmus elvégzése után a grafit szemcse mind a négy paraméter meghatározásával valamely grafit alak osztályba került besorolásra. Több esetben előfordult, hogy egy grafit szemcse a négy paraméter által nem ugyanabba az alak típusba került. Az eseteket megvizsgálva további

döntéseket kellett alkalmaznom, hogy a grafit szemcsék alakja pontosan meghatározható legyen. A 7.2. ábrán látható fastruktúrába rendezett döntési alternatívákat használtam.

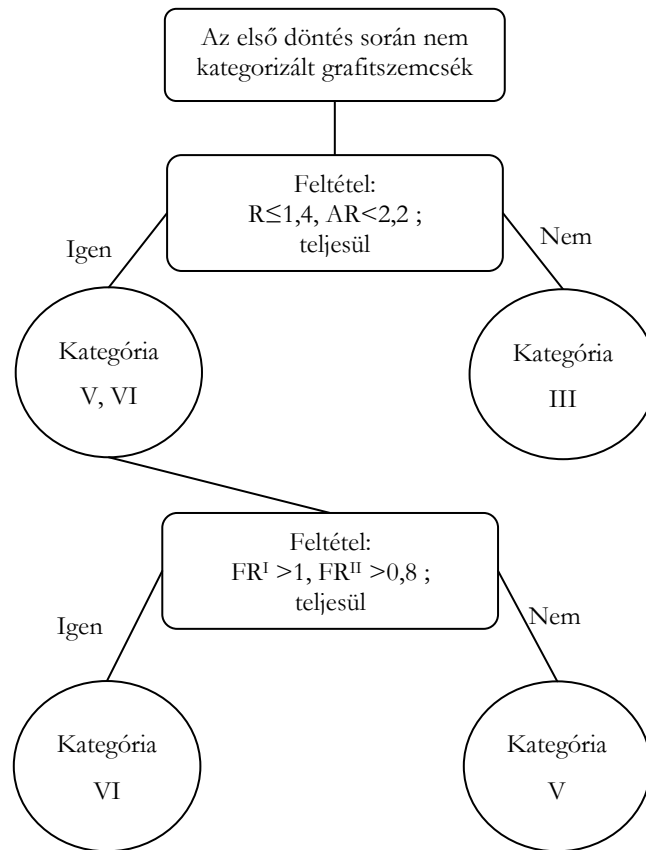


7.2. ábra. Az első döntés során használt fastruktúrába rendezett döntési alternatívák

A 7.2. ábrán látható, hogy az a grafit szemcse, amelynek kettőnél több paramétere *VI* alaknak és egyetlen esetben sem *III* alaknak minősült, az *VI* alakú. Ha három paramétere *V* és egy esetben *VI* alakú, az esetben az *V* alak típusba sorolható a grafit. Amennyiben egynél több esetben *III* alakú akkor az a szemcse *III* alakú.

Mindezen döntések után még mindig volt olyan szemcse, amelynek nem volt egyértelmű a kategorizálása. Ezért a 7.3. ábrán látható döntési alternatívákat alkalmaztam, amelyben a 7.1. ábrán feltüntetett paramétereket mértem, de ezek értéktartományait kis mértékben megváltoztattam. A mérés végén minden szemcse egyértelműen egy alak kategóriába került.

Az új paraméterek bevezetésével és a két lépcsős döntési alternatívákkal a *III*, *V* és a *VI* alakú grafit szemcsék elkülöníthetők és így azok mennyisége is jól meghatározható. Meg kell jegyezni, hogy azok az objektumok melyek mérete öt képpontnyi vagy az alatt van, nem szerepelnek sem az alak, sem a méret kiértékelésnél. Méretükből adódóan ezek alakja nem pontosan definiálható és ezek inkább kis méretű pórusok, mint grafit szemcsék. A grafit méretének meghatározására a szabványban az egyes méretkategóriákhoz megadott értékeket használtam.



7.3. ábra. A második döntés során alkalmazott fastruktúrába rendezett döntési alternatívák

Az algoritmus alapján a Miskolci Egyetem Fémtani és Képlékenyalakítástani Tanszékén történt a CProb (Cluster Probability) program fejlesztése. A szoftver kezelőfelületének kialakítása során fontos szempont volt, hogy könnyen kezelhető és az üzemi követelményekhez jól adaptálható legyen. Kíváncs volt szem előtt tartani, hogy ezt az eljárást az üzemi műszaktól függetlenül számos vizsgáló személy végzi, így mindenki számára jól érthetőnek és világosnak kell lennie.

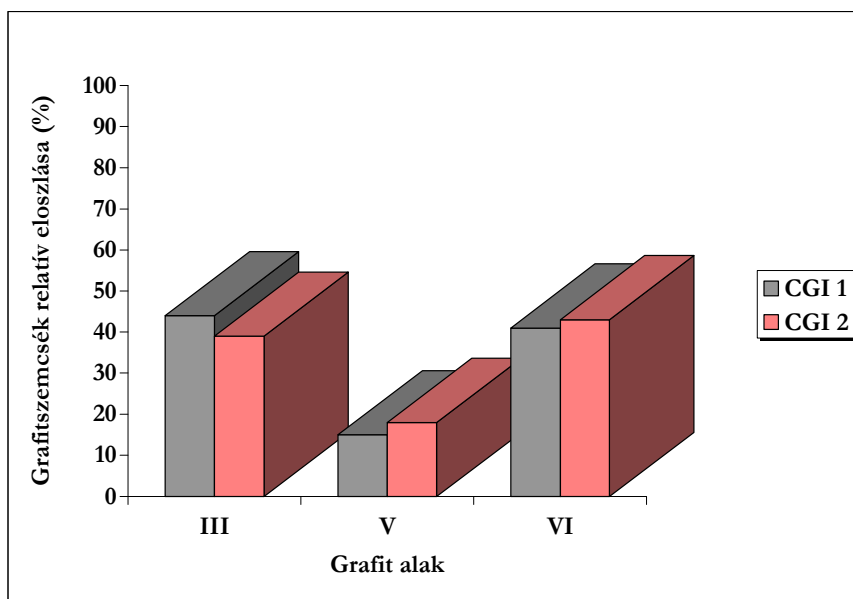
A mérés a következő lépésekből áll:

- a vizsgáló személy elkészíti az öntvény mintáról a fénymikroszkópos felvételt,
- majd a képernyő figyelésével megadja azt a küszöbértéket, amellyel a grafit szemcséket elkülöníti a háttértől, vagyis megtörténik a detektálás,
- ezt követően lehetőség van arra, hogy az 1-2 képpont méretű detektált objektumokat kitörölje,
- majd a mérés gomb megnyomásával megtörténik a kiértékelés,
- a mérési eredményeket először txt fájl formátumban kell elmenteni (minderre azért van szükség, hogy az eredmények dokumentálva legyenek, amennyiben előbb jelenne meg a képernyőn, megtörténhet, hogy a vizsgáló személy elfeledkezik az

adat rögzítéséről), majd ezt követően megjelenik a képernyőn az eredmény, a III, V, VI alakú grafit szemcsék mérete és százalékos mennyisége, és az V és VI együttes mennyisége is. A felsorolt lépések azok, amelyeket a vizsgáló személy végez el, az algoritmus paramétereibe és az alkalmazott képtárolási műveletekbe nem tud beavatkozni.

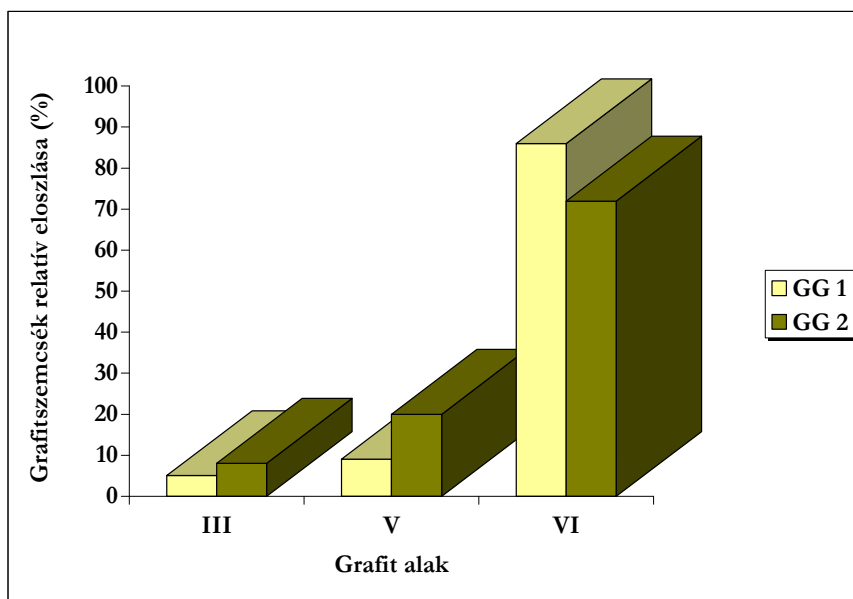
7.3. Az algoritmussal elvégzett mérések

Az algoritmus segítségével számos öntvényt vizsgáltam, a következőkben két darab CGI⁹ öntvény és két darab gömbgrafitos (GG) öntvény mérési eredményei láthatók. A CGI öntvényre vonatkozó előírás szerint három grafit alaktípus lehet jelen az alaplátrixban, a III, az V és a VI, míg a gömbgrafitos öntvényekben csak kettő az V és a VI. A továbbiakban 100x-os nagyításban vizsgált három látótér részletes eredménye az M.29. mellékletben található. A 7.4.-7.6. ábrán az alak mennyiségi eredményeit ábrázoló diagramok láthatók.

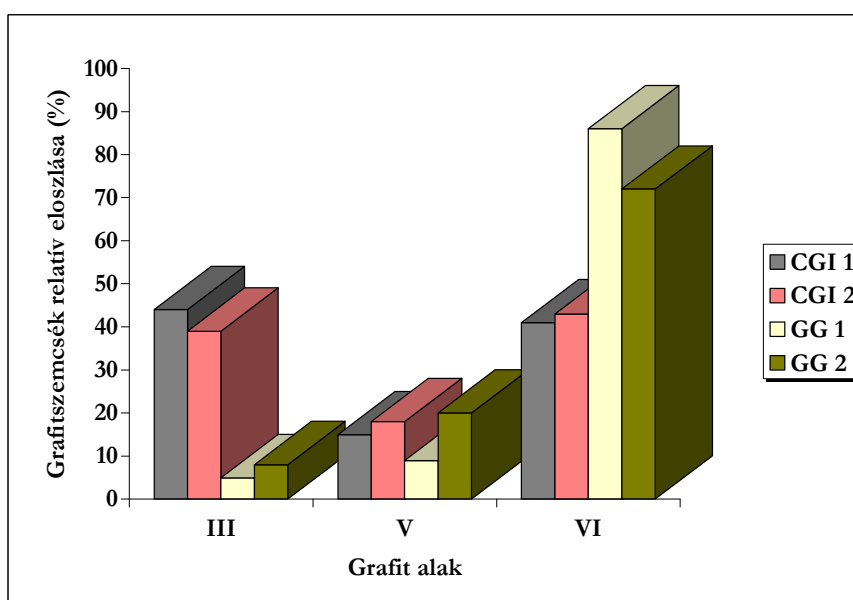


7.4. ábra. CGI 1 és a CGI 2 öntvénymintában található grafit alaktípusok százalékos mennyisége

⁹ CGI: Compacted Graphite Iron



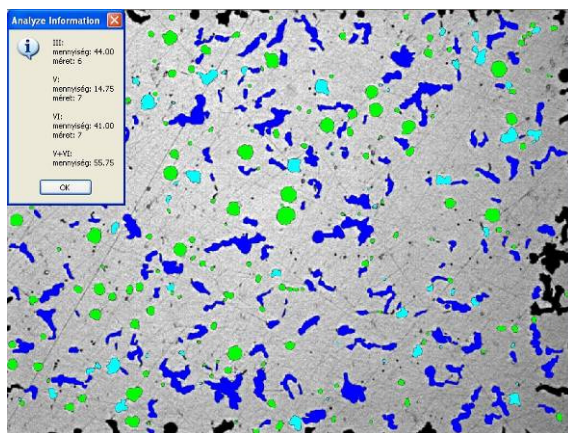
7.5. ábra. GG 1 és a GG 2 öntvénymintában található grafit alak típusok százalékos mennyisége



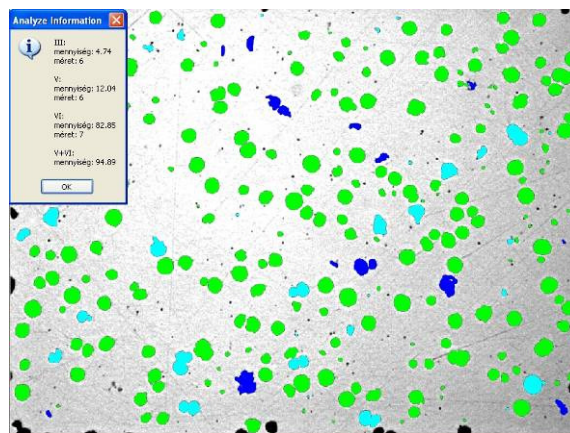
7.6. ábra. A gömbgrafitos (GG1, GG2) és a CGI öntvényekben (CGI 1, CGI 2) található grafit alak típusok százalékos mennyisége

Az M.29. mellékletben látható, hogy a mintánkénti három látótér között jelentős eltérés nincs. Az ábrázolás során a három látótér eredményeit átlagoltam. A CGI öntvényekben természetesen jelentős mennyiségű, 40% körüli III és V alakú típusú grafit szemcse található. Ezzel szemben a minőségi elvárásoknak megfelelően a GG mintákban 80% és 15% körüli VI és V grafit szemcse van. A 7.7. ábrán a CGI 1-es jelű minta, a 7.8. ábrán pedig a GG1-es jelű minta első vizsgált látóterének eredményei láthatók. A szoftver a III alakú grafit szemcséket kékre, az V alakú szemcséket világoskékre, a VI alakúakat pedig zöldre színezi. A gömbgrafitos minták eredményeit megvizsgálva észrevehető, hogy mind a két mintában van III alakú grafit szemcse.

Az algoritmus azokat a gömbgrafit szemcséket értékeli vermikuláris grafitnak, amelyek alakja valóban hasonló annak alakjához. Mindez akkor fordul elő, hogy ha két grafit szemcse túl közel van egymáshoz, vagy a gömbgrafit széttöredezett.



7.7. ábra. A CGI1-es jelű minta első vizsgált látóterének eredményei
(Eredeti nagyítás: 100x)



7.8. ábra. A CGI1-es jelű minta első vizsgált látóterének eredményei
(Eredeti nagyítás: 100x)

Két külön algoritmus alkalmazásával ezek a zavaró tényezők elkerülhetők lennének, ekkor az egyik algoritmus segítségével az V és a VI alakú grafit szemcséket tartalmazó öntvényt osztályoznánk, a másikkal pedig a CGI típusú öntvényeket. Mindehhez arra lenne szükség, hogy a vizsgáló személy nagy biztonsággal és rövid idő alatt el tudja dönteni, hogy milyen öntvénymintát vizsgált. Az ipari felhasználás során erre nincs lehetőség, ezért egyetlen algoritmusban kell mind a három grafit alak elkülönítését kialakítani. Így a fent ismertetett deformációk kis mértékben befolyásolhatják az eredményt a gömbgrafitos mintáknál.

Összegezve: az autóiipari alkalmazásra gyártott öntöttvas öntvényeknek szigorú elvárásoknak kell megfelelnie. Ezek a követelmények kiterjednek az alapmátrixban lévő grafit alakra is. A gyártás során ezért ez egy kiemelt fontossággal kezelendő ellenőrzési művelet. A hagyományos szabványos összehasonlítási művelet szubjektivitását egy olyan képfeldolgozási algoritmussal kell kiváltani, amely a három grafit alakotípust (III, V, VI) nagy biztonsággal el tudja különíteni. A korábban kidolgozott algoritmust kibővítése során négy paramétert és két döntési alternatívát alkalmaztam. A kidolgozott algoritmus - egy CProb programba beépítve - megfelelő pontossággal egyszerre elkülöníti a három grafit alakotípust.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az öntöttvas felhasználási területe nagyon széles, köszönhető ez annak, hogy igen változatos szövetszerkezettel és grafit morfológiával rendelkező minőségeket állítanak elő, melyek jelentős változatosságot eredményeznek a várható tulajdonságok tekintetében. Az öntöttvas öntvényeket nagy számban használják autóiipari alkatrészek, mezőgazdasági gépek, csövek, szerelvények, láncszemek és kéziszerszámok, vagy akár speciális kopásálló hengerek és görgők alapanyagaként.

A grafit szemcsének, mint az öntöttvas szövetszerkezetben jelenlévő rideg fázisnak döntő jelentősége van az öntvény mechanikai tulajdonságai szempontjából. A grafit befolyásoló hatása pedig leginkább annak morfológiájától függ. Ezért a gyártás során kiemelt jelentőséget kap a grafit szemcsék alakjának meghatározása.

Legelterjedtebb vizsgálati módszer a hagyományos összehasonlítási eljárás alapján alapuló módszer, amely során a nemzetközi szabványban lévő etalonképekkel kell a mintában lévő grafit szemcsét összehasonlítani és megadni a grafit méretét, alakját és eloszlását. Az eljárás meglehetősen szubjektív, melyet a dolgozatban ismertetett három párhuzamos mérési sorozat eredményei is szemléltetnek. A grafit méret és alak meghatározás eredményei között 52%-os teljes egyezés tapasztalható. A szubjektivitást olyan képfeldolgozási algoritmus kialakításával lehet kiküszöbölni, amely a grafit szemcse alakját megbízható módon elkülöníti. A nemzetközi szabványban található grafit alak etalonképeken elvégzett mérések során olyan paramétereket kerestem, amelyekkel a grafit szemcsék jól identifikálhatók. A mérések eredményeként három paraméter együttes (körszerűség, nyújtottság, kitöltöttség) alkalmazásával kialakítottam egy algoritmust, amely a szabványban található hat grafit alaktípust elkülöníti, majd az algoritlussal elvégzett mérések megbízhatósága érdekében kidolgoztam egy képtranzformációs eljárást, amellyel kiküszöbölhetők a mérést zavaró tényezők, pl. karcok, szennyeződések.

Az öntöttvas gyártása során elvégzett gyártásközi ellenőrzéskor szintén kiemelt jelentősége van a grafit alak meghatározásnak, mivel a félkész termék további életciklusát nagymértékben befolyásolja az, hogy milyen típusú grafit szemcse milyen részarányban található. Az ellenőrzés művelete során szintén a hagyományos összehasonlítási eljárás használatos, melynek eredményei meglehetősen függenek a vizsgáló személy rutinjától. A grafit alak és így az egyes típusok részarányának megbízható és reprodukálható meghatározására az általam kidolgozott algoritmust alakítottam tovább úgy, hogy az autóiipari alkalmazásra gyártott gömbgrafitos és CGI öntvényeket vizsgáltam. Az ilyen típusú öntvényekben három grafit alaktípus található: vermikuláris (CG) grafit szemcse (III), szabálytalan gömbgrafit szemcse (V), szabályos gömbgrafit szemcse (VI). Az osztályozás során négy paramétert és két döntési

alternatívát használtam. Az így kidolgozott képfeldolgozási algoritmus CProb programba beépítve megbízható módon elkülöníti a három grafit alaktípust és a gyártásközi ellenőrzés műveletébe integrálható.

A grafit mellett hangsúlyos szerepe van az öntöttvas szövetszerkezetének, amely ugyanolyan morfológiájú grafit szemcse mellett lényeges különbségeket okozhat a mechanikai tulajdonságokban. A szövetszerkezetben jelenlévő fázisok előhívására különböző maratási eljárásokat alkalmaznak. A leggyakrabban alkalmazott oldódási (korróziós) maratás mellett egyre nagyobb teret nyernek a színesmaratási technikák, amelyek segítségével olyan részletek is láthatóvá válhatnak, melyek hagyományos oldódási maratással csak igen nehezen különíthetők el. Színesmaratás során a reagensek a minta felületén egy stabil általában 0,04–0,5 μm vastagságú filmet képeznek, melyek az interferencia hatásnak köszönhetően különbözőképpen színeződnek. A létrehozott színkülönbségnek köszönhetően pedig a fázisok jól elkülöníthetővé válnak, és így különböző kvantitatív értékelések is elvégezhetők. Az öntöttvas szövetszerkezetében számos fázis lehet jelen, a minőség és a hőkezelési eljárások függvényében. A színesmaratás lehetőséget nyújt arra, hogy pontosan mérhetővé és azonosíthatóvá váljanak a különböző fázisok, pl. a karbidok. A szövetszerkezetben jelenlévő vas-karbid (cementit) vagy más típusú karbidok nagy hatással vannak az öntvény tulajdonságaira, így annak mennyiségére szigorú előírások vannak, főleg az autóipari öntvények esetén. A színesmaratási kísérleteim során igazoltam, hogy a karbid kimutatható, és egyes reagensek használata során annak mennyisége digitális képfeldolgozással meghatározható. A maratási paramétereket kísérletekkel kidolgoztam, így azok alkalmasak reprodukív módon a karbid jellemzésére.

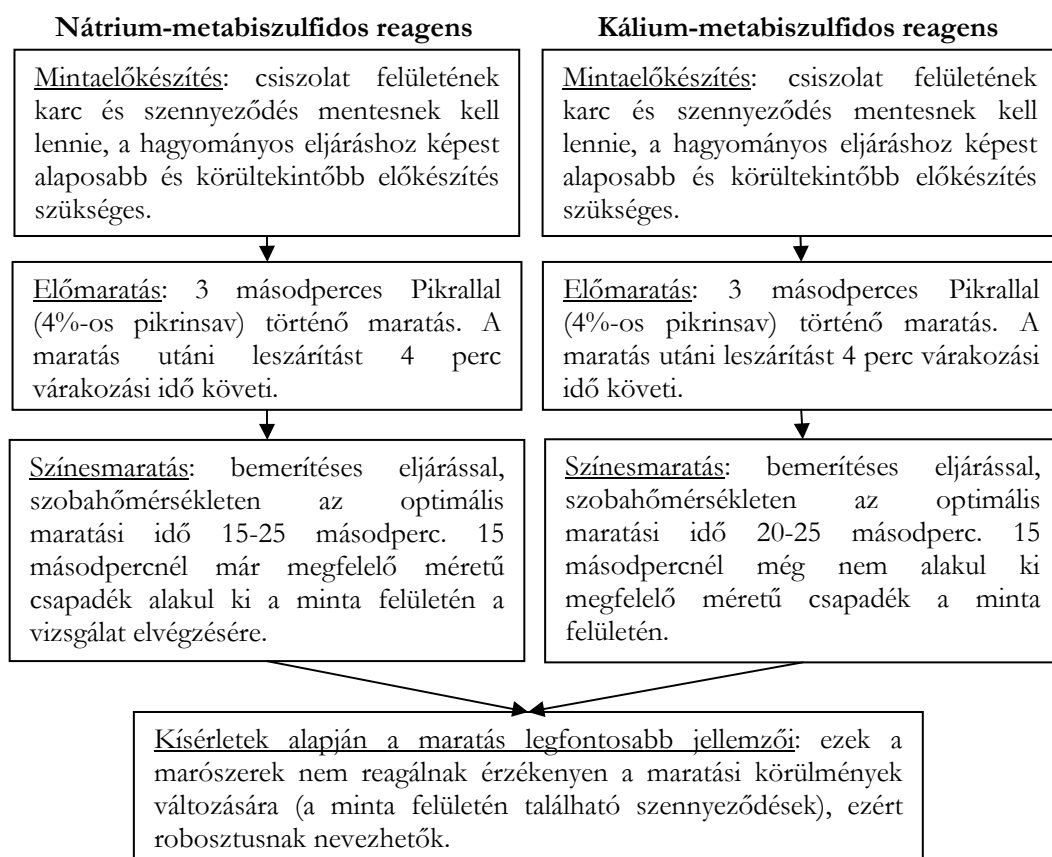
A színesmaratási reagensek segítségével más szövetszerkezeti jellemzők is láthatóvá válhatnak. A vizsgálatok során azt tapasztaltam, hogy egyes ferrit szemcsék különböző színárnyalatúra maródnak. Mindez valószínűleg kapcsolatban van a szemcsék orientációjával, mivel a különböző orientációval rendelkező anódos fázisokon más az interferenciafilm vastagsága, ezért különböző színárnyalatokban színeződnek el. Az általam alkalmazott Klemm I-Beraha 10/3 reagenssel az öntöttvas szövetszerkezetében található ferrit szemcsék különböző színárnyalatokban váltak láthatóvá. Az orientációs különbségek bizonyítására EBSD-vel (Electron Back Scattering Diffraction) méréseket végeztem, amellyel meghatározható a ferrit szemcsék normálisának iránya és így a szemcsék közötti szögműködés. Az eredményekből megállapítottam, hogy a ferrit szemcsék közötti szögműködés összefüggésben van a kialakult színárnyalattal az Y (luminancia) illetve az R (vörös komponens) értékével (RGB szintér).

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Kísérletekkel igazoltam, hogy a színesmaratás alkalmas az öntöttvas szövetszerkezetében található karbidok kimutatására. A metallográfiai gyakorlatban alkalmazott színesmaratási eljárások paramétereit optimalizáltam és új típusú maratási eljárást dolgoztam ki.

1.1. Nátrium-metabiszulfidos ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) (Beraha 0, általam módosított) és a kálium-metabiszulfidos ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) (Beraha 0) reagenssel történő maratással bizonyítottam, hogy a karbid kimutatható, és a mennyisége digitális képfeldolgozással meghatározható. Az általam optimalizált paraméterekkel és a kialakított receptúrával könnyen reprodukálható maratási eljárást dolgoztam ki, amely bármely metallográfiai laboratóriumban alkalmazható.

1.2. Nátrium-metabiszulfidos (Beraha 0, általam módosított) és a kálium-metabiszulfid (Beraha 0) reagens optimális maratási paramétere:



1.3. A Beraha kadmium-kloridos (CdCl_2) reagenssel a karbid és a ferrit elkülöníthető az öntöttvas szövetszerkezetében, így külön-külön mindkét fázis mennyisége meghatározható digitális képfeldolgozással.

1.4. A Beraha kadmium-kloridos reagensre kidolgozott optimális maratási paraméterek:

Beraha kadmium-kloridos reagens

Mintaelőkészítés: csiszolat felületének karc és szennyeződés mentesnek kell lennie, a hagyományos eljáráshoz képest alaposabb és körültekintőbb előkészítés szükséges.



Előmaratás: 3 másodperces Pikrallal (4%-os pikrinsav) történő maratás. A maratás utáni leszárítást 4 perc várakozási idő követi.



Színesmaratás: bemerítéses eljárással, szobahőmérsékleten az optimális maratási idő 15 másodperc.



Kísérletek alapján a maratás legfontosabb jellemzői: a reagens rendkívül érzékeny a maratás során fellépő zavaró körülményekre (minta felületén található szennyeződések). A maratási eljárás nehezen reprodukálható, így alkalmazása nagy türelmet és gyakorlatot igényel.

1.5. A Beraha nátrium molibdát I és II reagensekkel bizonyítottan elkülöníthetők az öntöttvas szövetszerkezetében található karbidok. A reagens a perlit cementit lemezeit is elszínezi, így digitális képfeldolgozással nem határozható meg a karbid mennyisége.

1.6. A Beraha nátrium molibdát I és II reagensre kidolgozott optimális maratási paraméterek:

Beraha nátrium molibdát I és II reagens

Mintaelőkészítés: csiszolat felületének karc és szennyeződés mentesnek kell lennie, a hagyományos eljáráshoz képest alaposabb és körültekintőbb előkészítés szükséges.



Előmaratás: 3 másodperces 2%-os Nitallal történő maratás. A maratás utáni leszárítást 4 perc várakozási idő követi.



Színesmaratás: bemerítéses eljárással, szobahőmérsékleten az optimális maratási idő 10-30 másodperc.

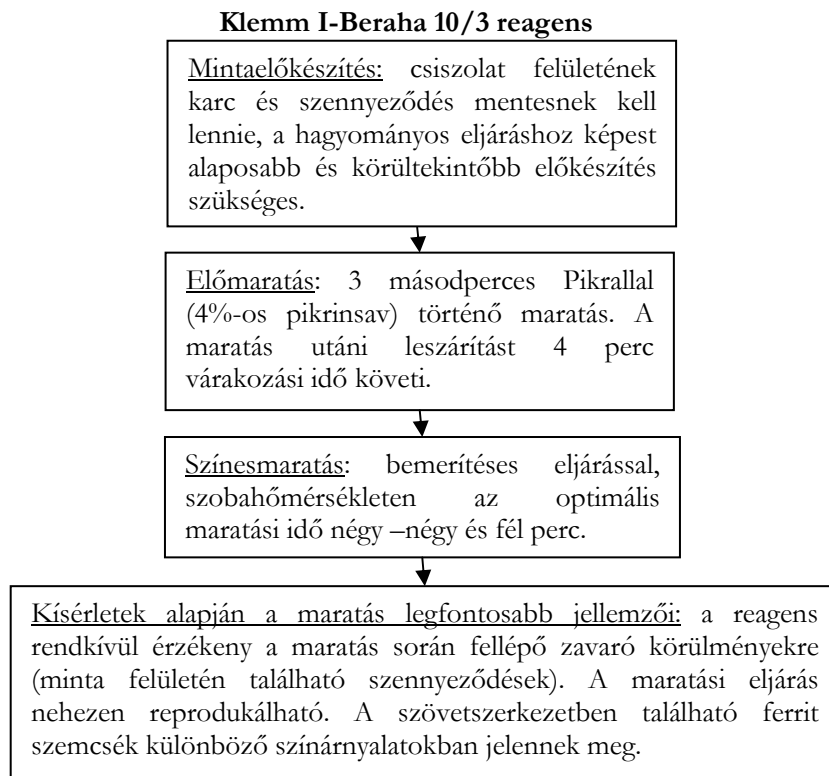


Kísérletek alapján a maratás legfontosabb jellemzői: a maratási idő növekedésével egyre erőteljesebben válnak láthatóvá a mintában lévő perlit cementit lemezei: 10 másodperces maratásnál csak az önálló fázisként szereplő karbid látható, és csak halványan a cementit lemezek, 20 és 30 másodpercnél pedig már hasonlóan láthatók a cementit lemezek is. A két reagens között a keletkező színárnyalatban van különbség. A marószerek nem reagálnak érzékenyen a maratási körülmények változására (a minta felületén található szennyeződések), ezért robosztusnak nevezhetők.

2. Bizonyítottam, hogy a Klemm I-Beraha 10/3 reagenssel történő színesmaratás során a ferrit szemcsék különböző színárnyalatúra színeződtek a közöttük lévő orientáció különbségből adódóan.

2.1. A Klemm I-Beraha 10/3 reagens maratási paramétereinek optimalizálásával az öntöttvas szövetszerkezetében található ferrit szemcsék különböző színárnyalatokban jelennek meg.

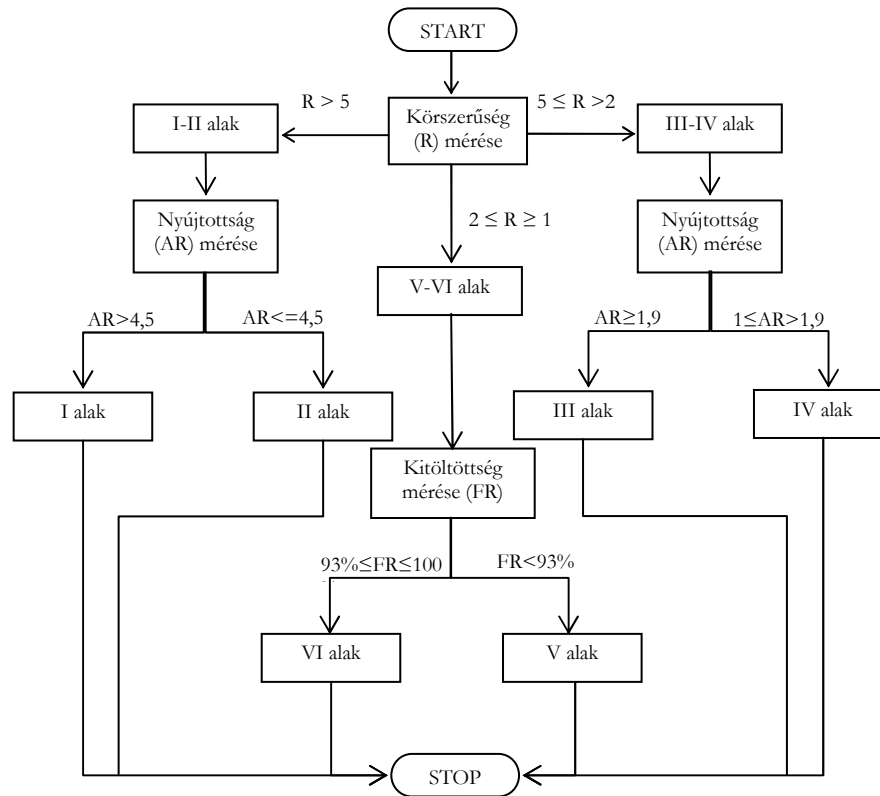
2.2. A Klemm I-Beraha 10/3 reagensre kidolgozott optimális maratási paraméterek:



2.3. Az orientációs különbséget EBSD-vel történő mérésekkel igazoltam. A ferrit szemcsék felületi normálisai közötti szögműködés összefüggésben van a kialakult színárnyalattal, s az azt számszerűsítő Y (luminancia) jellel (YUV színtér), illetve az R (vörös komponens) értékével (RGB színtér). Nagy szögműködések esetén nagy a luminancia, illetve nagy a vörös komponens közötti különbség.

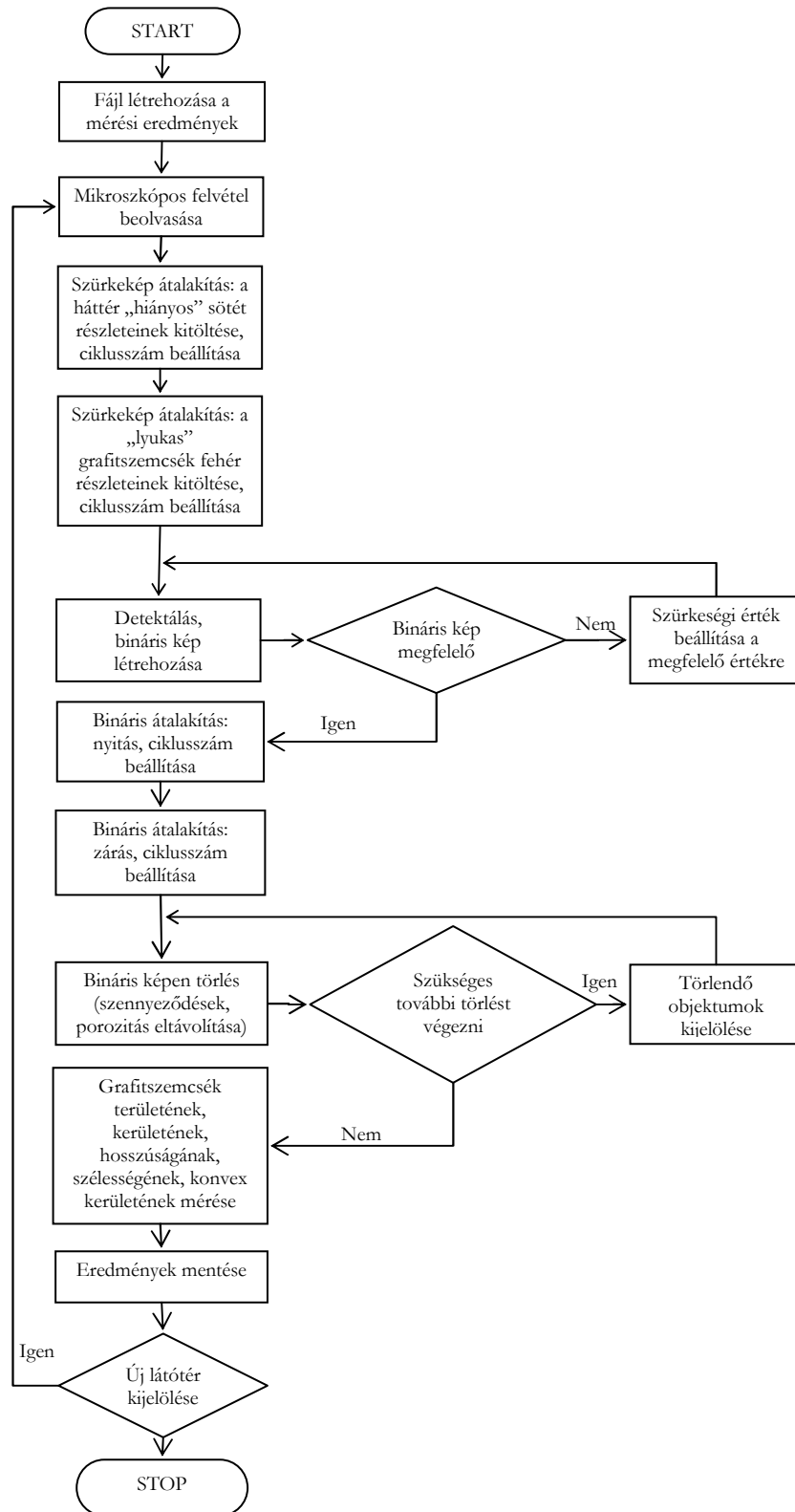
3. Gyakorlati mérésekkel bizonyítottam, hogy az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban feltüntetett hat fajta grafit alaktípus digitális képfeldolgozási műveletekkel szétválasztható és kialakítható olyan algoritmus, amely egyszerű, reprodukálható és a gyakorlati metallográfiában is könnyen értelmezhető paramétereket tartalmaz.

3.1. Három morfológiai paraméter szükséges a grafit szemcsék kategorizáláshoz: körszerűség (R), kitöltöttség (FR), nyújtottság (AR) (1. ábra).



1. ábra. Az MSZ EN ISO 945:2000 szabvány alapján a grafit szemcse alakjának osztályozására kialakított algoritmus folyamatábrája

4. Annak érdekében, hogy a grafit alakjának jellemzésére alkalmazott algoritmus reprodukálható legyen, kialakítottam egy képtranzformáció eljárást, amely hozzájárul a megbízható eredmények szolgáltatáshoz. A képtranzformációkat tartalmazó makroprogram az alábbiakban látható (2. ábra).



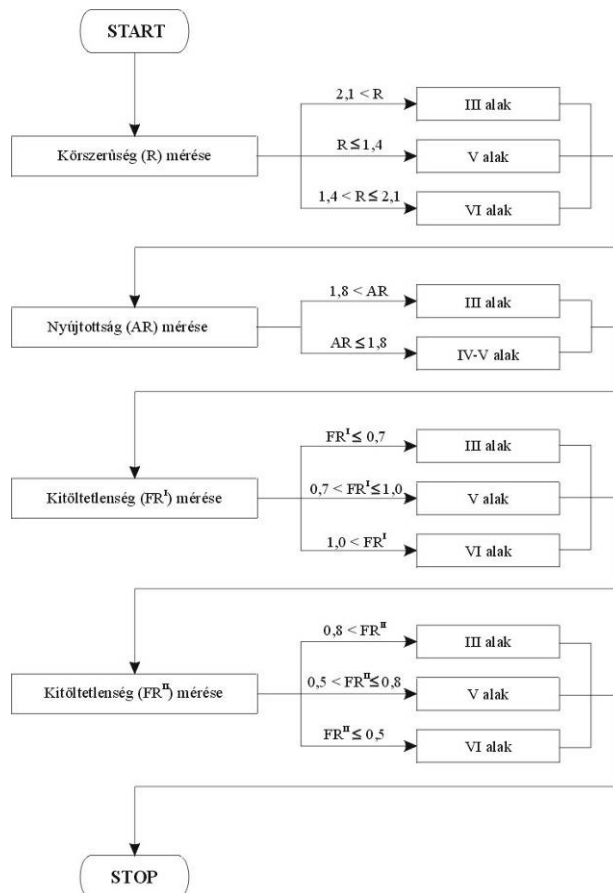
2. ábra. Makroprogram a digitális képfeldolgozási műveletekre

Műveletek definiálása:

- a, Szürkekép átalakítások: a fill white és a fill black, amely eróziót vagy dilataciót követő geodézikus transzformációkat jelöli. Az előbbi esetben a fehér részletek kitöltése, az utóbbinál pedig a sötét részletek kitöltése történik meg a környezetük szürkeségi szintjével.
- b, Bináris átalakítások: a bináris erózióval és dilatacióval képpontokat távolítunk el, illetve adunk hozzá az objektum határához. A nyitás és a zárás műveletek, ahogy a szürkeképen történő átalakítások során, itt is az egymást követő eróziók és ekvivalens dilataciók, illetőleg dilataciók és ekvivalens eróziók elvégzését jelentik.

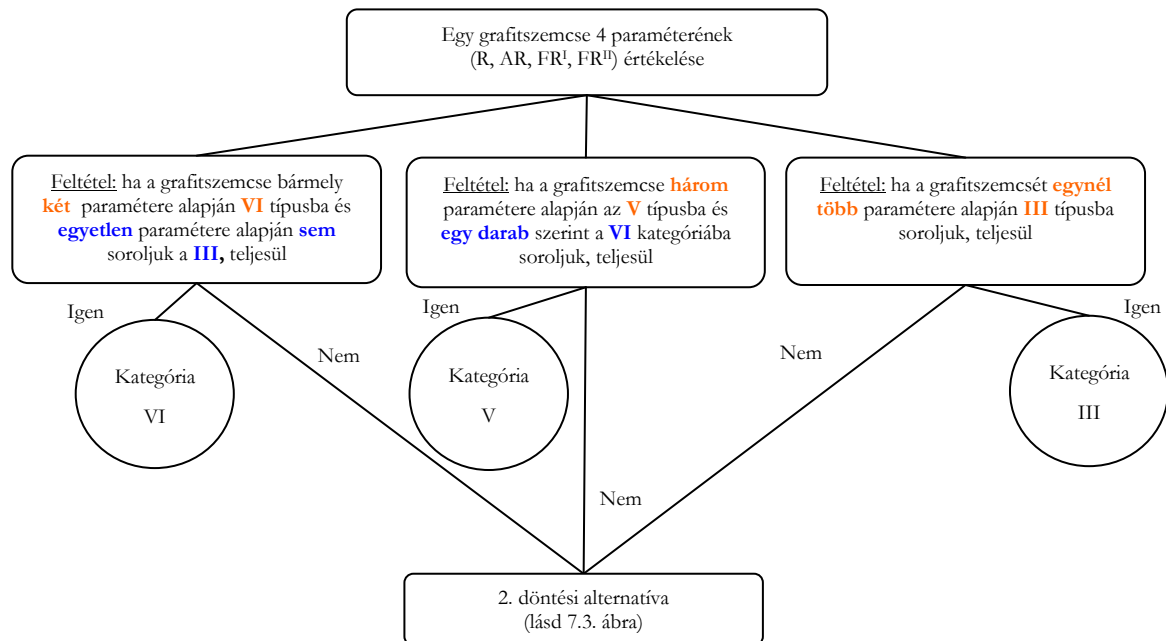
5. Az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban feltüntetett grafit alaktípusokra kidolgozott algoritmust az autóiipari alkalmazásokra gyártott öntvényekre adaptálva, kidolgoztam az ipari gyakorlatban használható digitális képfeldolgozási algoritmust a vermikuláris, a szabálytalan gömbgrafit és a szabályos gömbgrafit elkülönítésére. Az algoritmus lényege, hogy fastruktúrába rendezett döntési alternatívák segítségével történik a kategorizálás.

5.1. A három grafit alak osztályozására négy paraméter szükséges: körszerűség (R), nyújtottság (AR), kitöltetlenség (FR^I), kitöltetlenség (FR^{II}) (3. ábra).



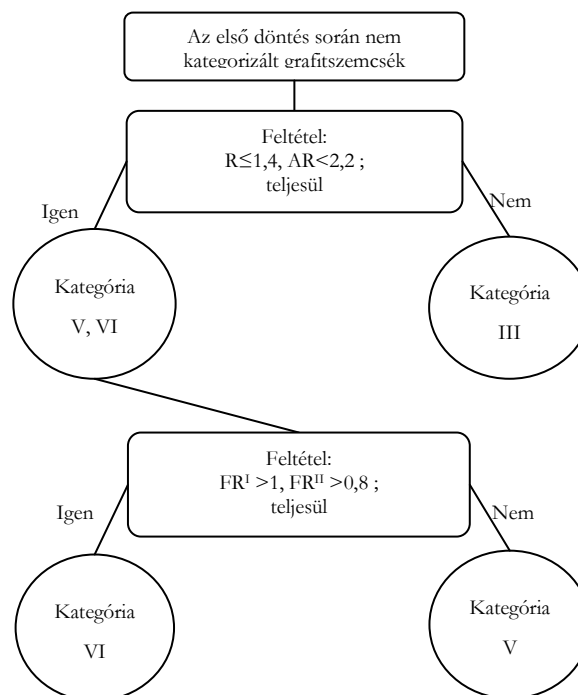
3. ábra. Az ipari igényre kialakított grafit alak algoritmus folyamatábrája

5.2. Az osztályozás után minden grafitszemcse mind a négy paraméter alapján besorolható valamely alak kategóriába. Amennyiben a grafitszemcse nem minden esetben ugyanabba a csoportba kerül, a további értékelés alapja a fastruktúrába rendezett első döntési alternatíva (4. ábra).



4. ábra. Az első döntés során használt fastruktúrába rendezett döntési alternatívák

5.3. Az első döntés során be nem kategorizált grafitszemcsék a második döntés során egyértelműen egy alak kategóriába kerülnek (5. ábra).



5. ábra. A második döntés során alkalmazott fastruktúrába rendezett döntési alternatívák

AZ ÚJ EREDMÉNYEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA

A disszertációmban kidolgozott digitális képfeldolgozási algoritmus segítségével az öntöttvas öntvényekben található grafitzemcsék alakja az MSZ EN ISO 945:2000 szabványban szereplő alaktípusokba sorolhatók. Az algoritmus továbbfejlesztett változatával pedig az autóiipari célokra gyártott CGI öntvényekben található három különböző alakú grafitzemcse (III, V, VI) megbízható és reprodukálható módon elkülöníthető, valamint azok aránya is pontosan megállapítható. Az ipari gyakorlatban különösen fontos szerepe van a grafitzemcse alakjának meghatározásának, hiszen a késztermék mechanikai tulajdonságát, így annak felhasználhatóságát nagymértékben befolyásolja. A termelés korai szakaszában gyártásközi ellenőrzés során hagyományos összehasonlítási eljárás alapján történik a grafitzemcsék értékelése. Ez a módszer szubjektív és lényegesen függ a vizsgáló személy gyakorlottságától. Az algoritmus gyártásközi ellenőrzés folyamatába integrálható, így a grafit alak megbízható módon meghatározható.

A színesmaratási kísérleteim során olyan reagensekkel foglalkoztam, amelyekkel az öntöttvas szövetszerkezetében található karbid kimutatható, és a mennyisége digitális képfeldolgozással meghatározható. A maratási paraméterek optimalizálásával az eljárások eredményei reprodukálhatók.

SUMMARY

The cast iron is used in many different fields owing to the fact that a product having a quality of great variety of structures and graphite morphology can be made therefore the expectable properties of cast iron products are very variable. The cast iron products are mainly used as basic materials for making car-parts for the motor-car industry, agricultural machines, pipes, fittings, chain links and hand-tools as well as special wear-resisting cylinders and rollers.

The graphite grain – as a brittle phase in the cast iron structure – has a significant importance from the point of view of the mechanical properties of cast product. Moreover the effect of graphite depends on its morphology. Therefore the determination of the shape of graphite grains has an extraordinary significance during the production.

The method based on the traditional process of comparison is the most widespread method of investigation; in the course of this method, the graphite grains in the sample shall be compared with the images of international standard and the size, shape and distribution of graphite shall be indicated. This method is quite subjective; it is demonstrated by the results of the three simultaneous measurement series described in the paper. 52% of the results obtained during the determination of size and shape of graphite equal with the results of standard. The subjectivity can be eliminated by developing an image-processing algorithm that separates reliably the shape of graphite grains. During the measurements made by using of the images of graphite shapes indicated in the international standard, I tried to find such parameters by which the graphite grains can well be identified. As a result of the measurement, an algorithm was developed by the simultaneous using of three parameters (circularity, elongated shape and stuffing) that separates the six basic types of graphite found in the standard then an image-transformation method was developed by means of which the factors disturbing the measurement (e.g. flaws, contaminations) can be eliminated in order to ensure the reliability of measurements made by means of the algorithm.

It is also very important to determine the shape of graphite during checking the cast iron in the course of its production as the life cycle of semi-finished product in the future is greatly influenced the proportion of the different kinds of graphite grains. The traditional method of comparison is used during checking and therefore the obtained results depend significantly on the routine of the person who performs the checking. In order to determine the shape of graphite and the proportion of the different types reliably and in a reproducible way, I developed further the algorithm worked out by me such a way that I investigated the nodular and CGI cast products made for using in the motor-car industry. Three types of graphite shapes can be found in the aforementioned cast products: vermicular (CG) graphite grain (*III*), irregular nodular

graphite grain (*V*) and regular nodular graphite grain (*VI*). Four parameters and two alternatives of decision were used during the classification. The algorithm developed such a way for processing the images was included in the CProb program and can reliably separate the three different types of graphite shapes in addition it can be integrated in the process of checking during production.

Besides the graphite, the structure of cast iron has a great significance as well because it can cause serious differences in the mechanical properties in case of graphite grains of the same morphology. Different etching methods are used for visualizing the phases existing in the structure. Besides the dissolution (corrosion) etching used most frequently, the methods of colour etching become more and more widespread by means of which the parts that can be separated by using the traditional dissolution etching with difficulty become visible. In the course of the colour etching, the reagents develop a stabile film having a thickness of 0.04-0.5 μm on the surface of sample which colours in different ways owing to the effect of interference. The phases can well be separated due to the developed differences of colour so difference quantitative evaluations can also be performed. A lot of phases can be present in the structure of cast iron depending on the quality and the heat treatment processes. By using the colour etching, the different phases – e.g. the carbides – can exactly be measured and identified. The carbide of iron (cementite) or other types of carbides existing in the structure have a significant influence on the properties of cast product therefore strict prescriptions regulate their quantity mainly in case of making cast products for the motor-car industry. In the course of my experiments performed by using the colour etching, I proved that the carbide can be detected and its quantity can be determined by using the digital image processing method by means of the different reagents. The parameters of etching were developed by means of the experiments so they are suitable for characterizing the carbide in a reproductive way.

Other different characteristics of the structure can become visible by means of the reagents used during the colour etching. During the investigations, it was experienced that some of the ferrite grains are etched in different colour. They are probably connected to the orientation of grains as the thickness of interference-film is different on the anode phases having different orientation and therefore they colour in different tones. The ferrite grains existing in the structure of cast iron became visible in different tones by means of the Klemm I-Beraha 10/3 reagent used by me. In order to prove the orientation differences, I performed some measurements by using EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) by which the direction of normal line of ferrite grains and as a consequence the angle-differences between the grains can be determined. It was stated from the obtained results that the angle-differences between the ferrite grains are in relationship with the developed tone, with the values of Y (luminance) and the R (red component) (RGB colour field).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, aki a disszertáció elkészítése során folyamatosan segítségemre volt és mindvégig biztatott és támogatott.

Köszönet illeti Dr. Szabó Péter Jánost és Dr. Barkóczy Pétert a magas színvonalú szakmai segítségért, a Wescast Hungary Autóipari Zrt.-t a szakmai támogatásért, Vaskó Szilárdot az ábrák megrajzolásában nyújtott segítségért és Abaffy Lászlót az informatikai megoldásokért.

Köszönetemet szeretném kifejezni továbbá az ISD DUNAFERR Zrt.-nek doktori tanulmányaim finanszírozásáért, és az ISD DUNAFERR Zrt. Innovációs Igazgatóságának a feladatok megvalósításához szükséges technikai háttér biztosításáért.

Köszönet illeti természetesen családomat, barátaimat a támogatásért és megértésért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Do ru M. Stefanescu**, University of Alabama, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Cast Iron, Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 2005., pp. 17-33.
- [2] **Do ru M. Stefanescu**, University of Alabama, Casting, Classification of Ferrous Casting Alloys, Vol 15, ASM Handbook, ASM International, 1988., pp. 1362-1621.
- [3] **John Gloag, Derek Bridgwater**, A History of Cast Iron in Architecture, Allen and Unwin, London, 1948.
- [4] **Peter R Lewis**, Beautiful Railway Bridge of the Silvery Tay: Reinvestigating the Tay Bridge Disaster of 1879, Tempus 2004.
- [5] **Peter R Lewis**, Disaster on the Dee: Robert Stephenson's Nemesis of 1847, Tempus 2007.
- [6] **George Laird**, Richard Gundlach and Klaus Röhrig, Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook, ASM International 2000.
- [7] **Revised by Charles V. White**, GMI Engineering and Management Institute, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Cast Iron, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 2005., pp. 34.-64
- [8] **David P. Kanicki**, American Foundrymen's Society, Casting, Casting Advantages, Applications, and Market Size, Vol 15, ASM Handbook, ASM International, 1988., pp. 65-66.
- [9] Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Cast Iron, Malleable Iron, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 2005., pp. 130-149.
- [10] **W.L. Bradley**, Fracture Toughness Studies of Gray, Malleable and Ductile Cast Iron, Trans. AFS, Vol 89, 1981., pp. 837–848.
- [11] **Dr. Verő József, Dr. Káldor Mihály**, Vasötvözetek fémtana, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971., pp. 288-323.
- [12] **Dr. Faragó Elza**, Nagyszilárdságú öntöttvasak, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 19785, pp. 17-259.
- [13] **M. Radzikowska**, Metallography and Microstructures of Cast Iron, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2004, pp. 1282-1283.
- [14] **Dr. Gácsi Zoltán, Dr Mertinger Valéria**, Fémtan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [15] **Varga László**, Lemezgrafitos öntöttvas olvadék csíráállapota és a mechanikai tulajdonságok közötti összefüggések vizsgálata, Ph.D. értekezés, Miskolc 2003. pp. 7-11.
- [16] **Cees van de Velde**, The solidification of gray cast iron, January 15, 2004.

- [17] **D.M. Stefanescu**, University of Alabama, Casting, Solidification of Eutectic Alloys: Cast Iron, Vol 15, ASM Handbook, ASM International, 1988., pp. 370-405.
- [18] **J.C. Mercier**, Inclusions in Graphite Spheroids, Fonderia, No. 277, 1969., pp.191.
- [19] **M.M. Jacobs, T.J. Law, D.A. Melford, M.J. Stowell**, Basic Processes Controlling the Nucleation of Graphite Nodules in Chill Cast Iron, Metals Technology, Vol 1, Part II, No. 1974. pp. 490.
- [20] **B. Lux, F. Mollard, I. Minkoff**, On the formation of Envelopes Around Graphite in Cast Iron, The Metallurgy of Cast Iron, B. Lux et al. Ed., Georgi Publishing, 1975. pp, 371.
- [21] **Svein Oddvar Olsen, Torbjørn Skaland, Cathrine Hartung**, Inoculation of Grey and Ductile Iron, Elkem ASA, Foundry Products Division, NORWAY
- [22] **T. Skaland**, Nucleation Mechanisms in Ductile Iron, Elkam ASA, Foundry Products, Kristiansand, Norway, 2005.
- [23] **Elkem ASA**, Foundry Products Division, Graphite Structures in Cast Irons, Revised September 2004.
- [24] **Cees van de Velde**, The Solidification of Ductile Iron, January 15, 2004.
- [25] **Mullins, J.D.:** Ductile Iron Data for Design Engineer, Rio Tinto Iron Titanium Inc. 1998. Section II, pp. 5-6.
- [26] **Lyle R. Jenkins, R.D. Forrest**, Ductile Iron Society, Pechiney Electrometallurgies, Division Fonderie, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Cast Iron, Ductile Iron, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 2005., pp. 65-101.
- [27] **Bruce L. Bramfitt, Arlan O. Benscoter**, Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International, 2002. pp. 16-21.
- [28] **D.M. Stefanescu**, University of Alabama, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Cast Iron, Compacted Graphite Iron, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, 2005., pp. 102-128.
- [29] **C.F. Walton**, Gray and Ductile Iron Castings Handbook, Gray and Ductile Iron Founder's Society, 1971., pp. **193**.
- [30] Fractography, Ductile Irons: Atlas of Fractographs, Vol 12, ASM Handbook, ASM International, 1987., pp. 437-450.
- [31] **Pozsgai Imre**, A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai, ELTE Kiadó, 1995.
- [32] **John J. Frel, Eddie B. Prestridge**, Princeton Gamma-Tech, Combined LEM, SEM and X-Ray Microanalysis of Tint Etched Cast Iron, Microscopy and Analysis, 2002. november, pp. 23-25.

- [33] **Szabó Péter János**, BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Lokális szemcseorientáció meghatározása pásztázó elektronmikroszkóppal, Bányászati és Kohászati Lapok Kohászat, 137. évfolyam, 2004/5, pp. 39-44.
- [34] **V. Randle**: Microtexture Determination and Its Applications; Bourne Press, Bournemouth, United Kingdom, 1992., pp. 174.
- [35] **M.F. Campos, L.C. Rolim Lopes, P. Magina, F.C Lee Tavares, C. T. Kuniishi, H. Goldenstein**, Textura and Microtexture Studies in Different Types of Cast Iron, Material Science and Engineering A 398, 2005. pp. 164-170.
- [36] **Huszár Katalin**: Színes maratás alkalmazása automatikus képelemzővel történő mérés esetén, Diplomaterv, Miskolc, 1996. május
- [37] **Kardos Ibolya**, Színes metallográfia alkalmazása a gyakorlatban, Bányászati és Kohászati Lapok, 139. évfolyam, 6. szám, pp. 5-1, 2006.
- [38] **George F. Vander Voort**, Metallography Principles and Practice, McGraw-Hill Book Company, pp. 165-190.
- [39] **JR Kilpatrick, AO Bencotter, AR Marde**, Tint Etching Improves Resolution and Contrast Microstructures, Met. Prog., Vol 100, December 1971., pp. 79-81.
- [40] **Janina Radzikowska**, Foundary Research Insitute, Color Etching in Foundry Metallography, Advanced Materials & Processes, Volume 157, 2000. pp. 29-32.
- [41] **George F. Vander Voort**, Buehler Ltd., Metallography and Microstructures, Color Metallography, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2007., pp. 1223-1382.
- [42] **George F. Vander Voort**, Buehler Ltd., Color Metallography,
- [43] **E. Beraha**, Staining Metallographic Reagent for Copper-Base Alloys, Pr. Metallogr., Vol 7, March 1970., pp. 131.
- [44] **H. D. Cheng**, Pattern Recognition 34, 2001., pp. 2259-2281.
- [45] **Szücs Tibor**, A H.264 video szabvány bemutatása, Debreceni Egyetem, Szakdolgozat, 2008.
- [46] Magyar Szabvány Testület, MSZ EN ISO 945: Öntöttvas. Az öntöttvas grafitjának mikroszerkezete és jelölési rendszere (ISO 945:1975), 2000. december
- [47] Magyar Szabványügyi Hivatal, Fémek anyagvizsgálata 2. Kötet, MSZ 5716-74 Vasöntvények szövetének minősítése, Szabványkiadó, Budapest 1982.
- [48] **Gácsi Zoltán, Sárközi Gábor, Réti Tamás, Kovács Jenő, Csepeli Zsolt, Mertinger Valéria**, Sztereológia és képelemzés, Egyetemi Tankönyv, 2001., pp. 154-232.

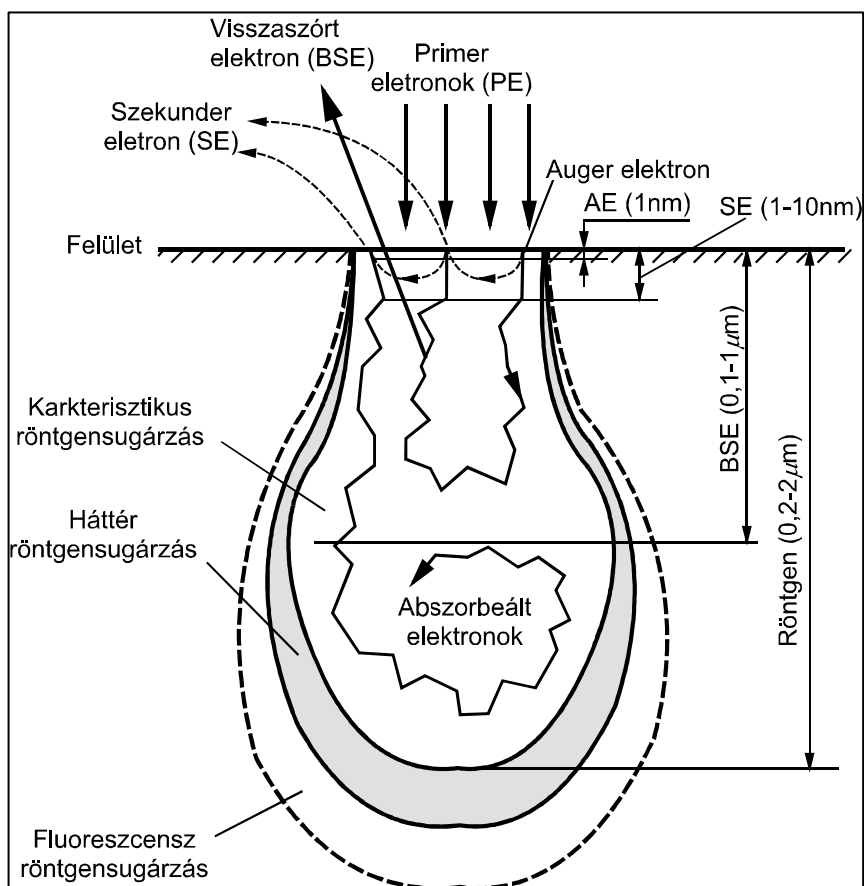
MELLÉKLET

M.1. Elektron-anyag kölcsönhatáskor lejátszódó folyamatok [31]

A beérkező elektronnyaláb a minta anyagával kölcsönhatásba lép, amelynek eredményeként a következő jelenségek játszódnak le. A gerjesztett anyagban Auger elektronok, szekunder elektronok, visszaszórt elektronok, karakterisztikus röntgensugárzás, háttér röntgensugárzás, fluoreszcensz röntgensugárzás keletkezik. A következőkben csak a pásztázó elektronmikroszkópos mérések során felhasznált jeleket ismertetem:

- Szekunder elektronok: A mintából kilépő, 50 eV-nál kisebb energiájú elektronokat szekunder elektronoknak nevezzük. Túlnyomó részük úgy keletkezik, hogy a besugárzó nyaláb leszakítja a minta atomjainak legkülső héján lévő, viszonylag lazán kötött elektronokat, amelyek aztán elhagyják a minta felszínét. Természetesen nem csak a besugárzó nyaláb hozhat létre szekunder elektronokat, hanem az anyag mélyebb rétegeiben keletkező visszaszórt elektronok is. A szekunder elektronok (kis energiájuk miatt) csak a minta legfelső 5-50 nm vastagságú rétegeiből képesek kijutni. Emiatt rendkívül érzékenyek a felszín egyenetlenségeire, ezért segítségükkel nagy felbontású képek készíthetők.
- Visszaszórt elektronok: A visszaszórt elektronok a minta felszínéből kilépő 50 eV-nál nagyobb energiájú elektronok. A belépő elektronnyaláb elektronjai rugalmasan szóródnak a minta atomjainak Coulomb-terében. A mintából kilépő visszaszórt elektronok száma - egyebek mellett - a minta atomjainak rendszámától is függ: a nagyobb rendszámú atomok nagyobb visszaszórási hányadot eredményeznek. Emiatt a visszaszórt elektronokból előállított képen a magasabb átlagos rendszámú területek világosabbnak látszanak.
- Karakterisztikus röntgensugárzás: A beeső elektronnyaláb képes a minta atomjainak valamelyik belső elektronpályájáról egy elektront kiűtni. Az így megüresedő elektronpályára egy külső héjon lévő elektron "visszaugorhat". Az így felszabaduló energia (azaz a külső és a belső elektronpálya energiáinak különbsége) röntgenfoton formájában kisugárzódik. Mivel egy adott atomfajtánál az elektronpályák energiái meghatározott értékűek, a kisugárzott röntgenfoton jellemző lesz az adott atomfajta.

A M.1.-1. ábrán a primer elektronnyaláb által létrehozott gerjesztett térfogat sematikus ábrája látható.



M.1.-1. ábra. Elektron-anyag kölcsönhatás sematikus ábrája [14]

M.2. Az 5.2. fejezetben megnevezett reagensok összetétele [39][42]

Reagens	Összetétel
Klemm I	50 ml törzsoldat: telített $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ oldat, 1g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$
Beraha BI	1000ml H_2O , 0,3-0,6g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$, 200ml HCl , 24g NH_4FHF
Beraha CdS	1000ml H_2O , 240g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 20-25g CdCl_2 , 30g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$
Beraha PbS	1000ml H_2O , 240g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 24g $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Pb}$, 30g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$
Beraha nátrium molibdát	100ml H_2O , 1g $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0,1-0,5g NH_4FHF vagy nem szükséges adagolni, pH. 2,5-3,5 vagy 2,5-3,0

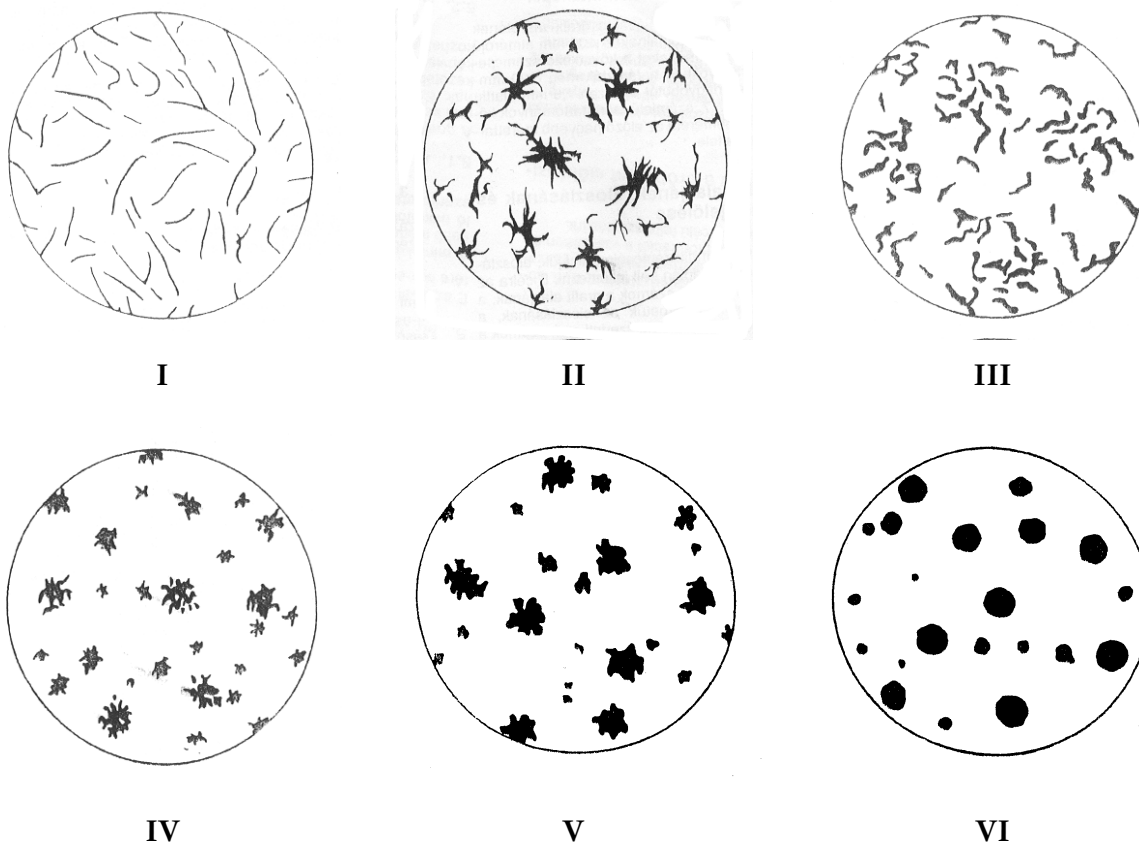
M.3. Színesmaratási eljárással vizsgált minták kémiai összetétele

Próbatest azonosító	Elemek					
	C	Si	Mn	S	P	Mg
12	3,98	2,21	0,36	0,024	0,051	0,010
14	4,12	2,09	0,33	0,014	0,049	0,083
15	3,78	2,08	0,40	0,005	0,043	0,058
16	3,59	2,43	0,36	0,012	0,046	0,063

M.4. A vizsgált szemcsék közötti szögkülönbség (φ) és a szemcsék Y és R értékei

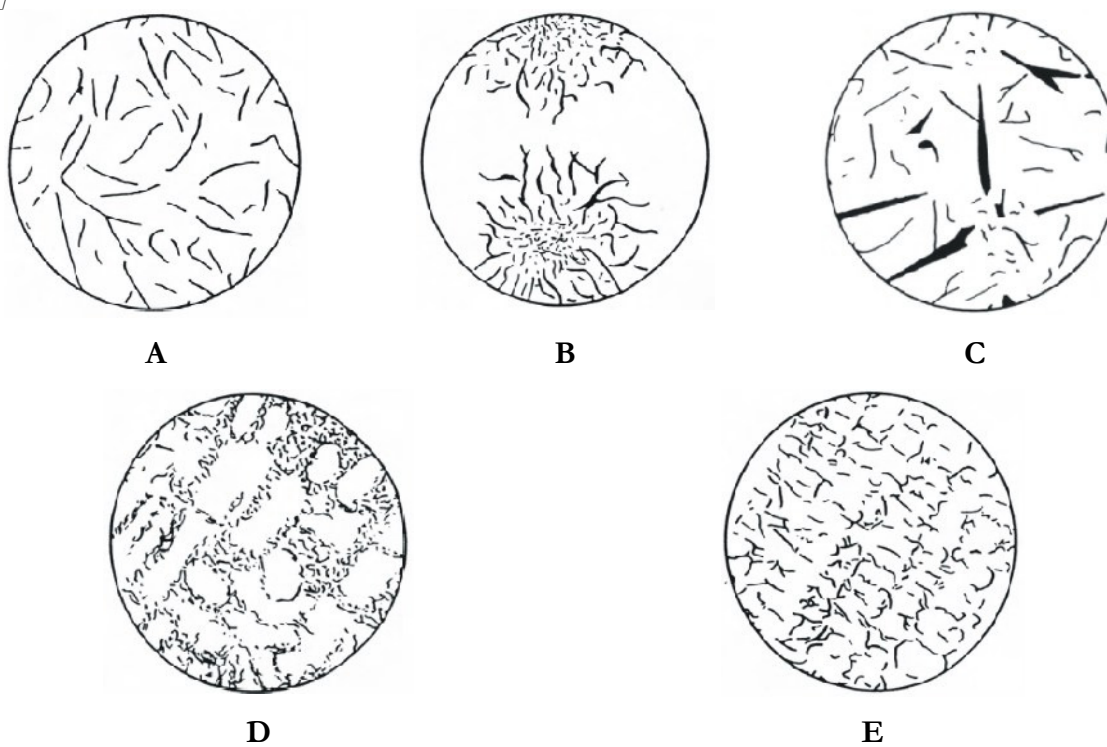
Szemcse azonosító	Szemcse azonosító										
	1 Y=183, R=173	2 Y=166, R=154	3 Y=132, R=129	4 Y=125, R=130	5 Y=127, R=123	6 Y=143, R=135	7 Y=138, R=128	8 Y=137, R=127	9 Y=189, R=184	10 Y=156, R=145	11 Y=178, R=170
1 Y=183, R=173	-	33,28	46,53	65,35	68,37	29,73	56,62	58,38	18,79	72,02	28,06
2 Y=166, R=154	33,28	-	13,85	38,91	35,88	9,06	28,93	31,32	24,40	44,20	5,22
3 Y=132, R=129	46,53	13,85	-	27,28	22,06	21,55	17,67	20,15	34,18	31,56	18,88
4 Y=125, R=130	65,35	38,91	27,28	-	18,74	47,78	9,97	7,60	47,55	6,96	42,67
5 Y=127, R=123	68,34	35,88	22,06	18,74	-	42,84	17,42	17,90	53,98	17,55	40,94
6 Y=143, R=135	29,73	9,06	21,55	47,78	42,84	-	37,81	40,23	26,74	52,80	7,78
7 Y=138, R=128	56,62	28,93	17,67	9,97	17,42	37,81	-	2,48	39,71	15,70	32,78
8 Y=137, R=127	58,38	31,32	20,15	7,60	17,90	40,23	2,48	-	77,59	13,70	35,07
9 Y=189, R=184	18,79	24,40	34,18	47,55	53,98	26,74	39,71	77,59	-	54,43	20,42
10 Y=156, R=145	72,02	44,20	31,56	6,96	33,86	15,70	13,70	13,70	54,43	-	48,33
11 Y=178, R=170	28,06	5,22	18,88	42,67	40,94	18,45	7,78	32,78	35,07	20,42	-

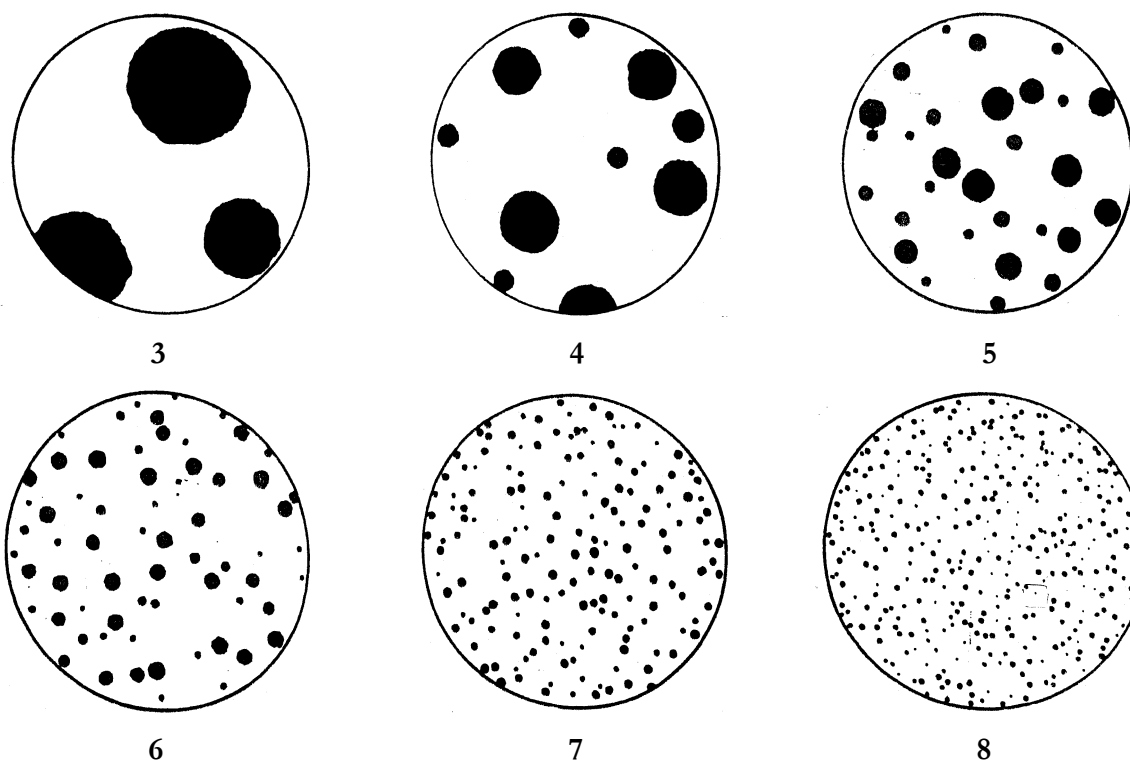
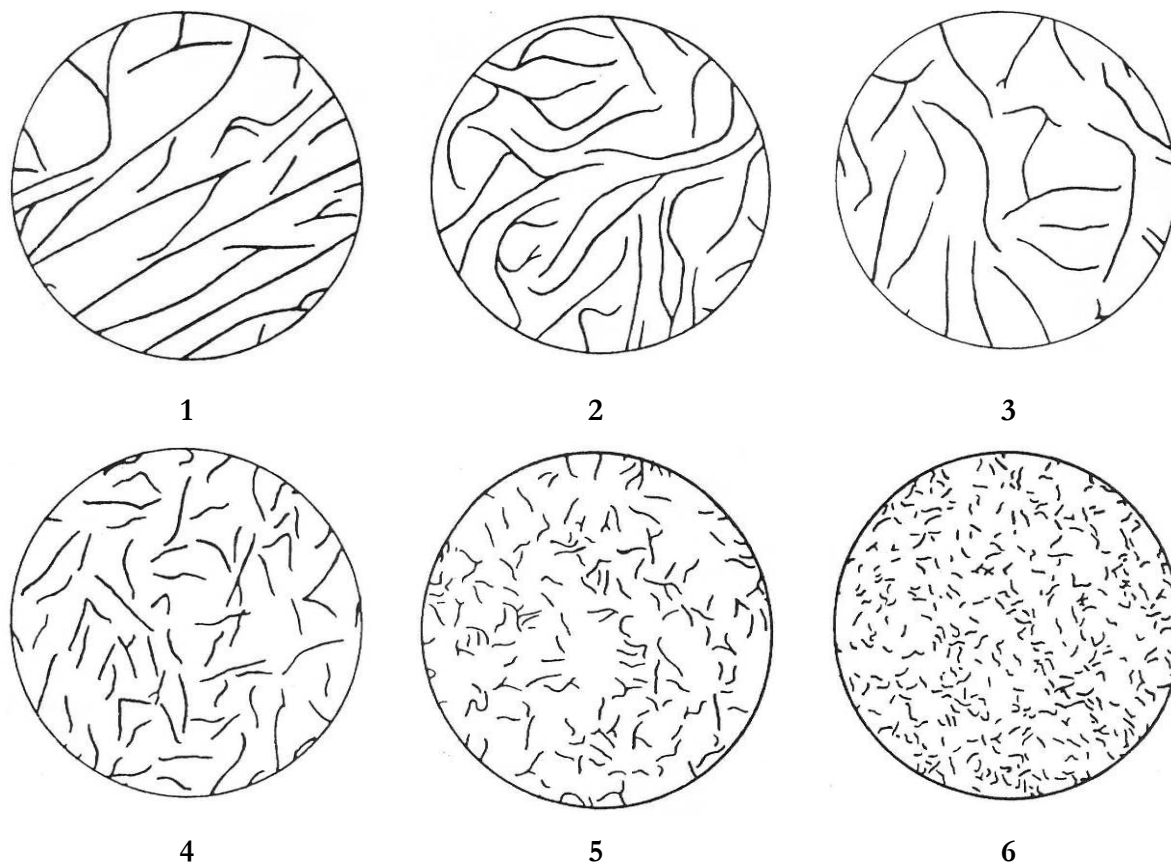
M.5. MSZ EN ISO 945:2000 szabványban található grafit alakra vonatkozó etalonfelvételek [46]

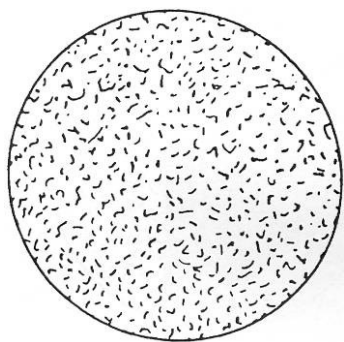


M.6. MSZ EN ISO 945:2000 szabványban található grafit eloszlásra vonatkozó etalonfelvételek

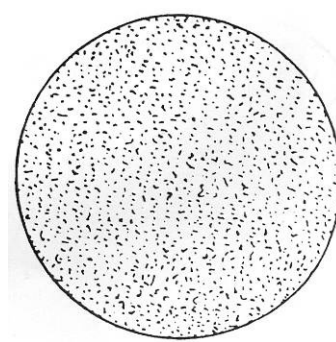
[46]



M.7. MSZ EN ISO 945:2000 szabvány gömbgrafit méretére vonatkozó etalonfelvételei [46]**M.8.** MSZ EN ISO 945:2000 szabvány lemezgrafit méretére vonatkozó etalonfelvételei [46]

M.8. folytatása

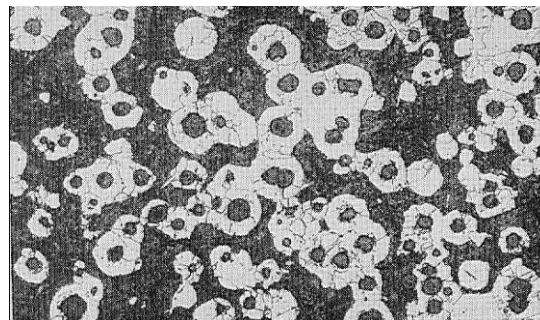
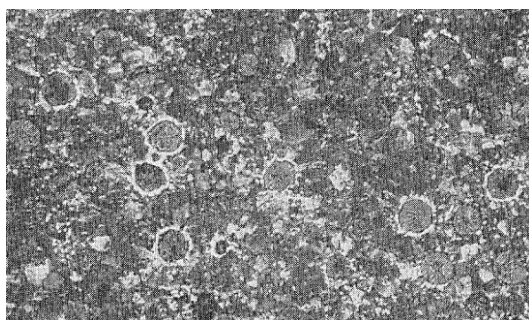
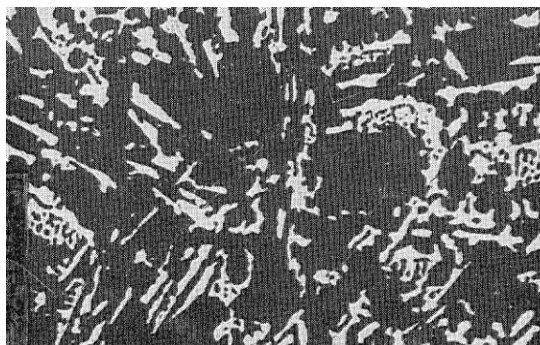
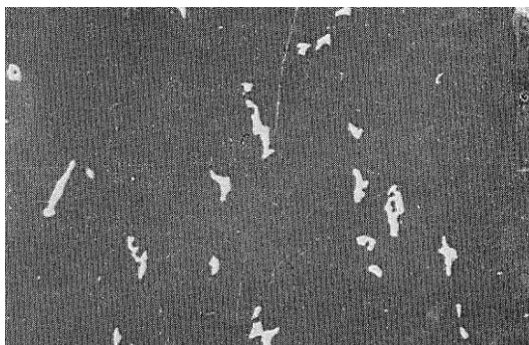
7



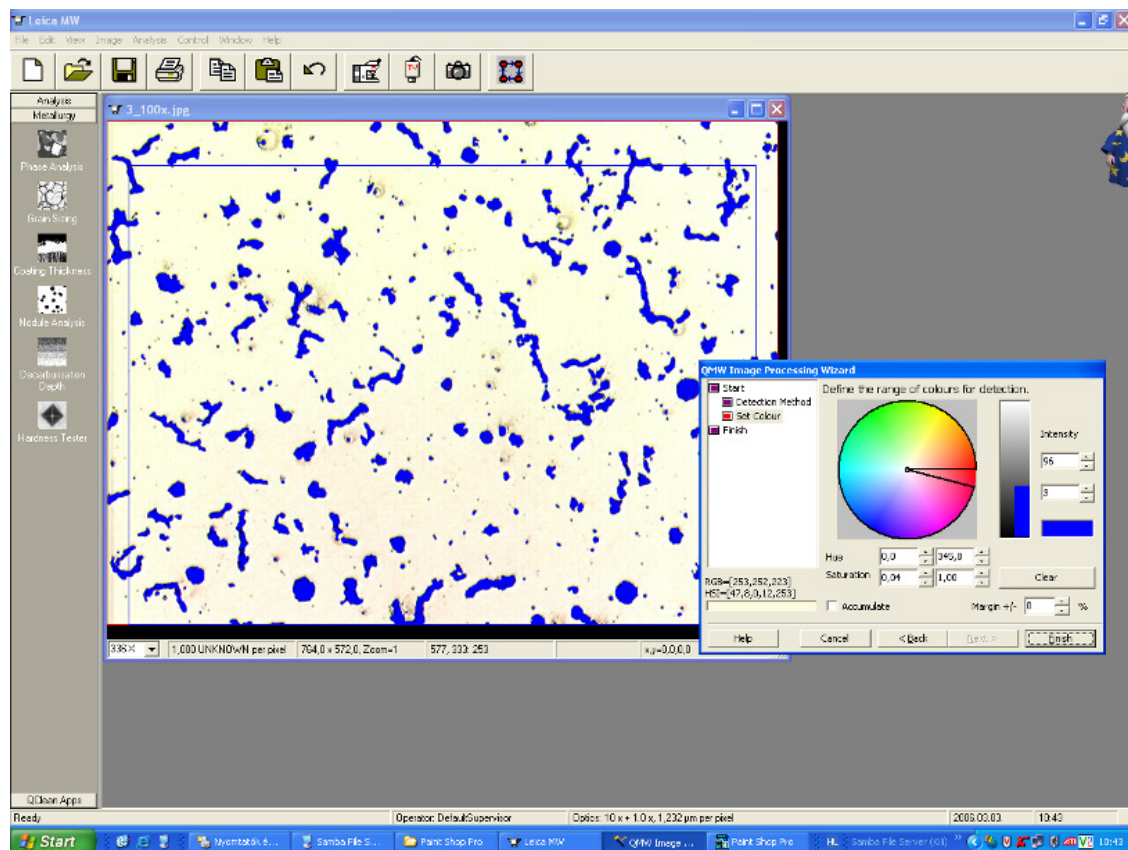
8

M.9. MSZ EN ISO 945:2000 szabvány szerint a grafit szemcsék mérete [46]

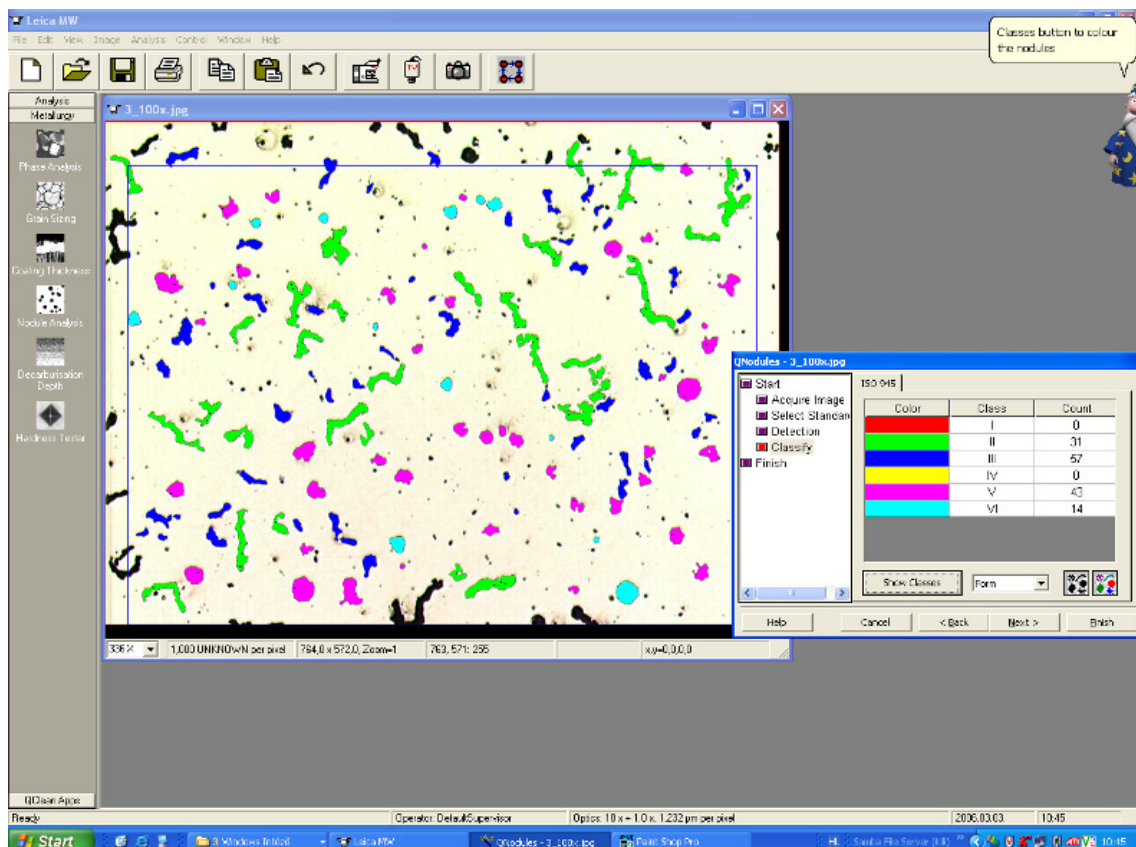
Grafit méret fokozat	Grafitméret 100x-os nagyításban (mm)	Valódi mérete (mm)
1	100 felett	1,0 felett
2	50-100	0,5-1,0
3	25-50	0,25-0,5
4	12-25	0,12-0,25
5	6-12	0,06-0,12
6	3-6	0,03-0,06
7	1,5-3	0,015-0,03
8	1,5 alatt	0,015 alatt

M.10. MSZ 5716:1974 szabvány F42 és F55 mennyiségű ferritet tartalmazó etalonképei [47]**M.11. MSZ 5716:1974 szabvány C2 és C40 mennyiségű cementitet tartalmazó etalonképei [47]**

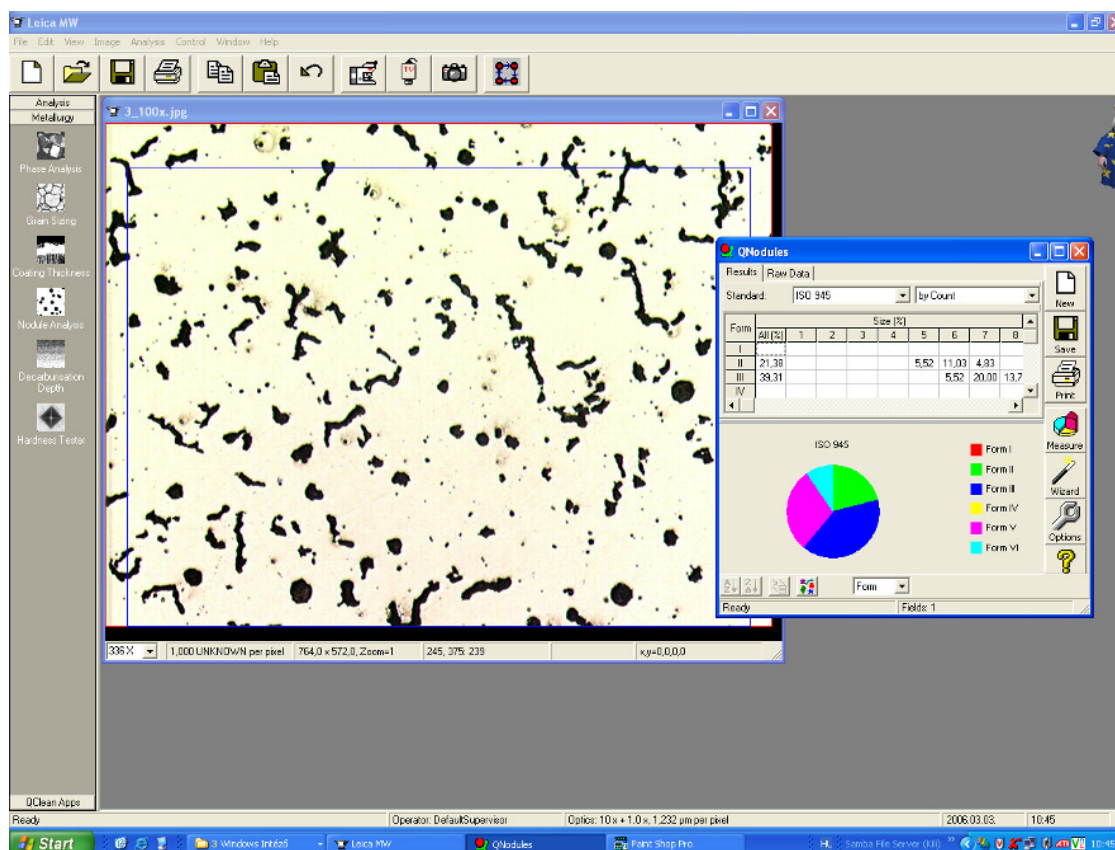
M.12. Nodule Analysis program munkafelülete a detektálás során



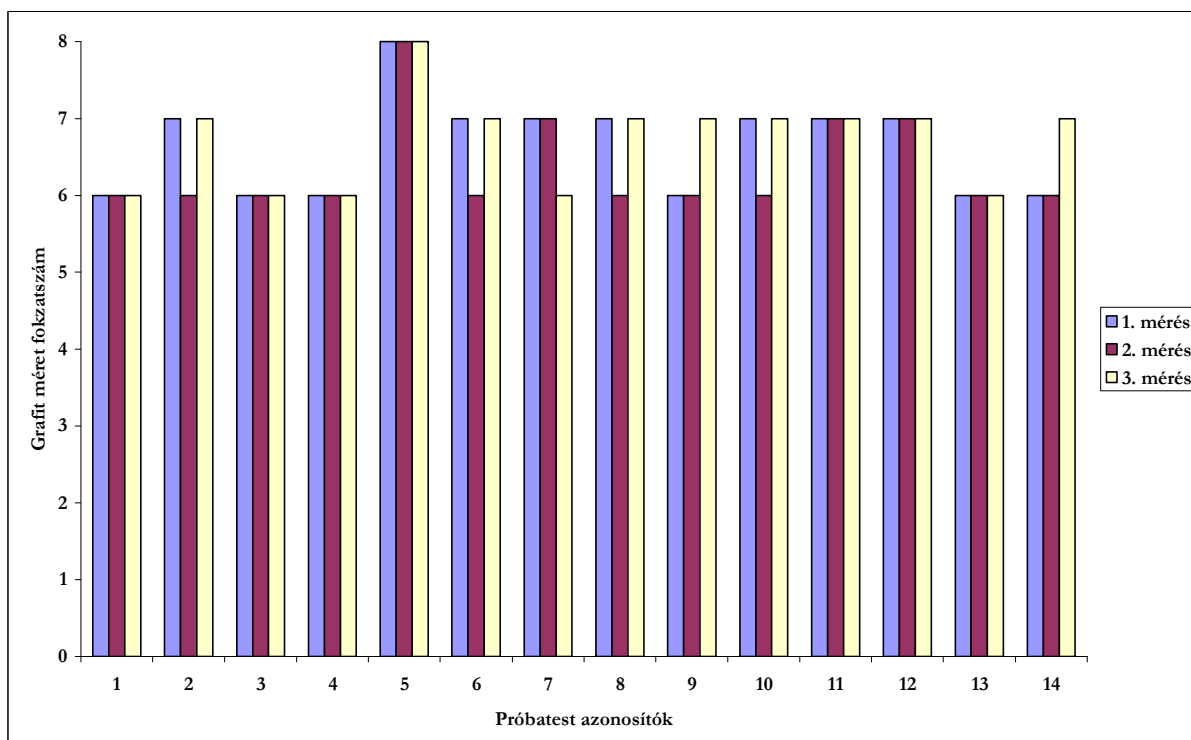
M.13. Nodule Analysis program munkafelülete kiértékeléskor

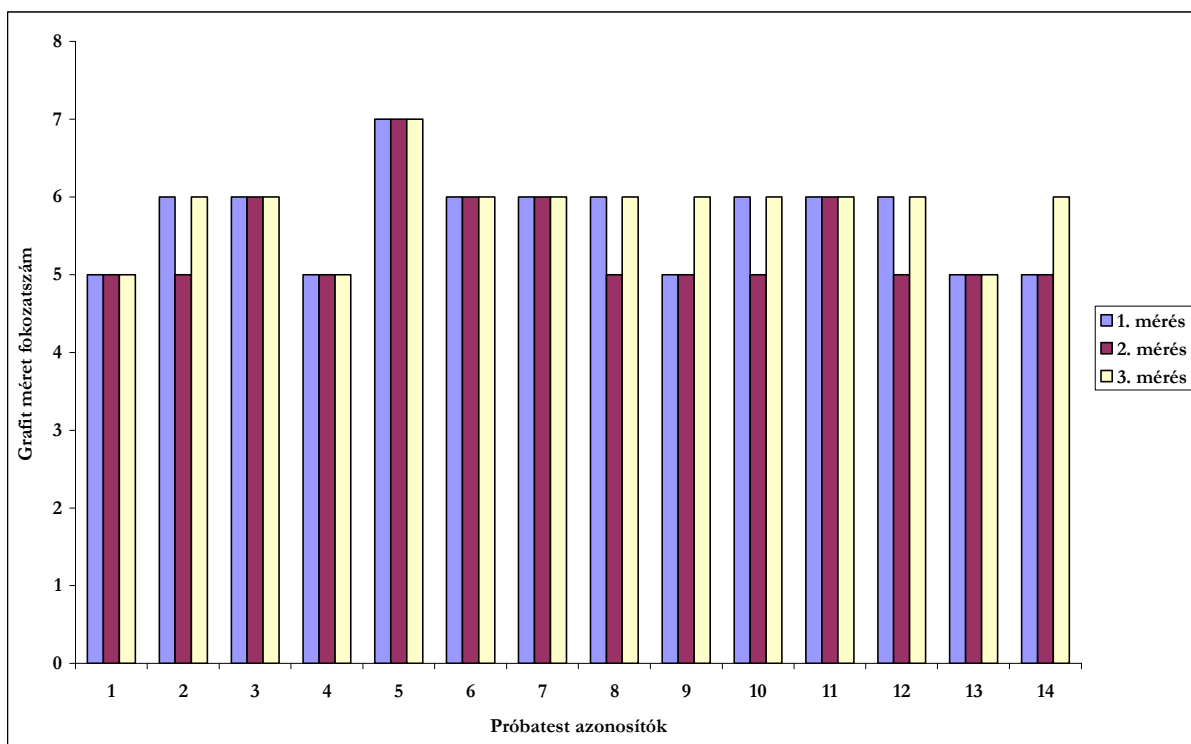
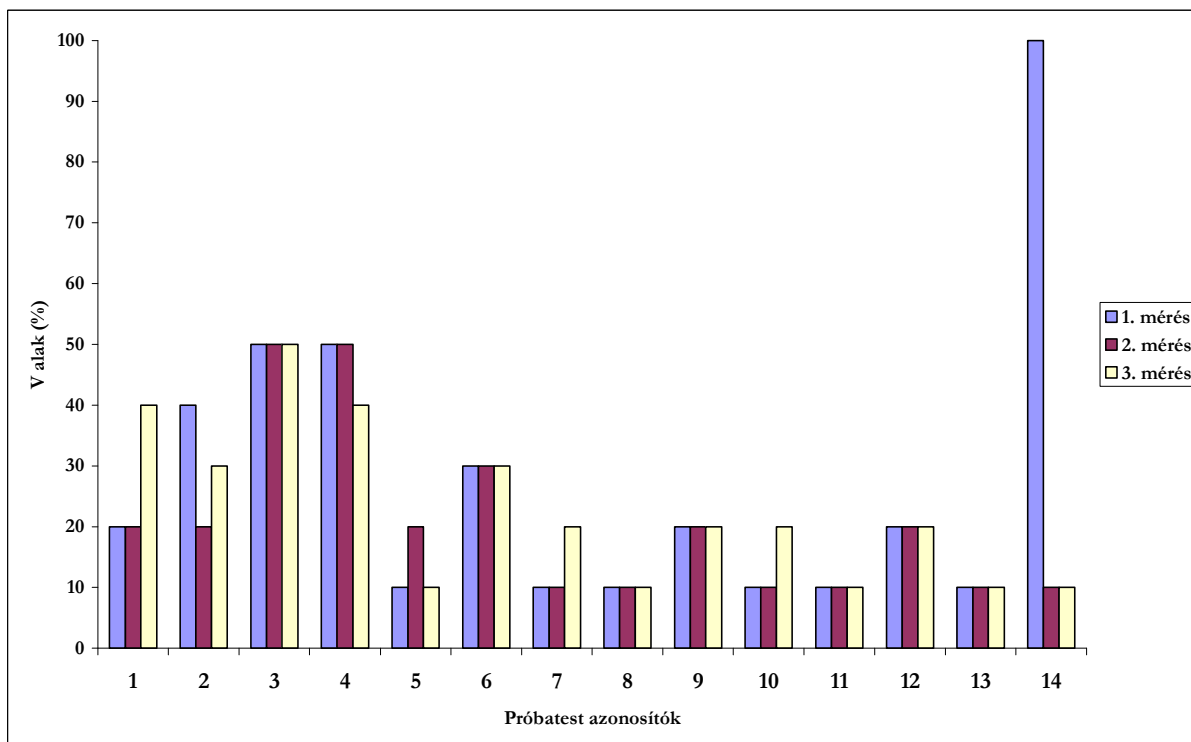


M.14. Nodule Analysis program munkafelülete a grafit méretének megadásakor

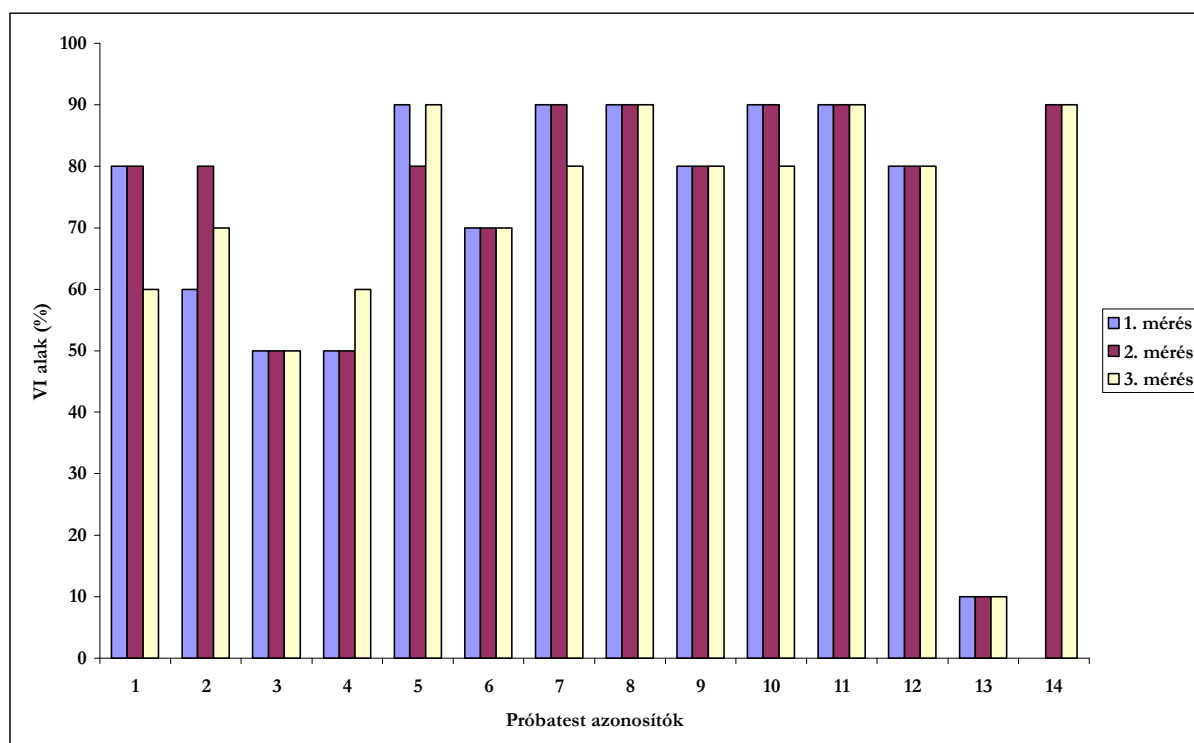


M.15. Hagymányos módszerrel történő grafit méret meghatározás, a grafit méret minimum értékei

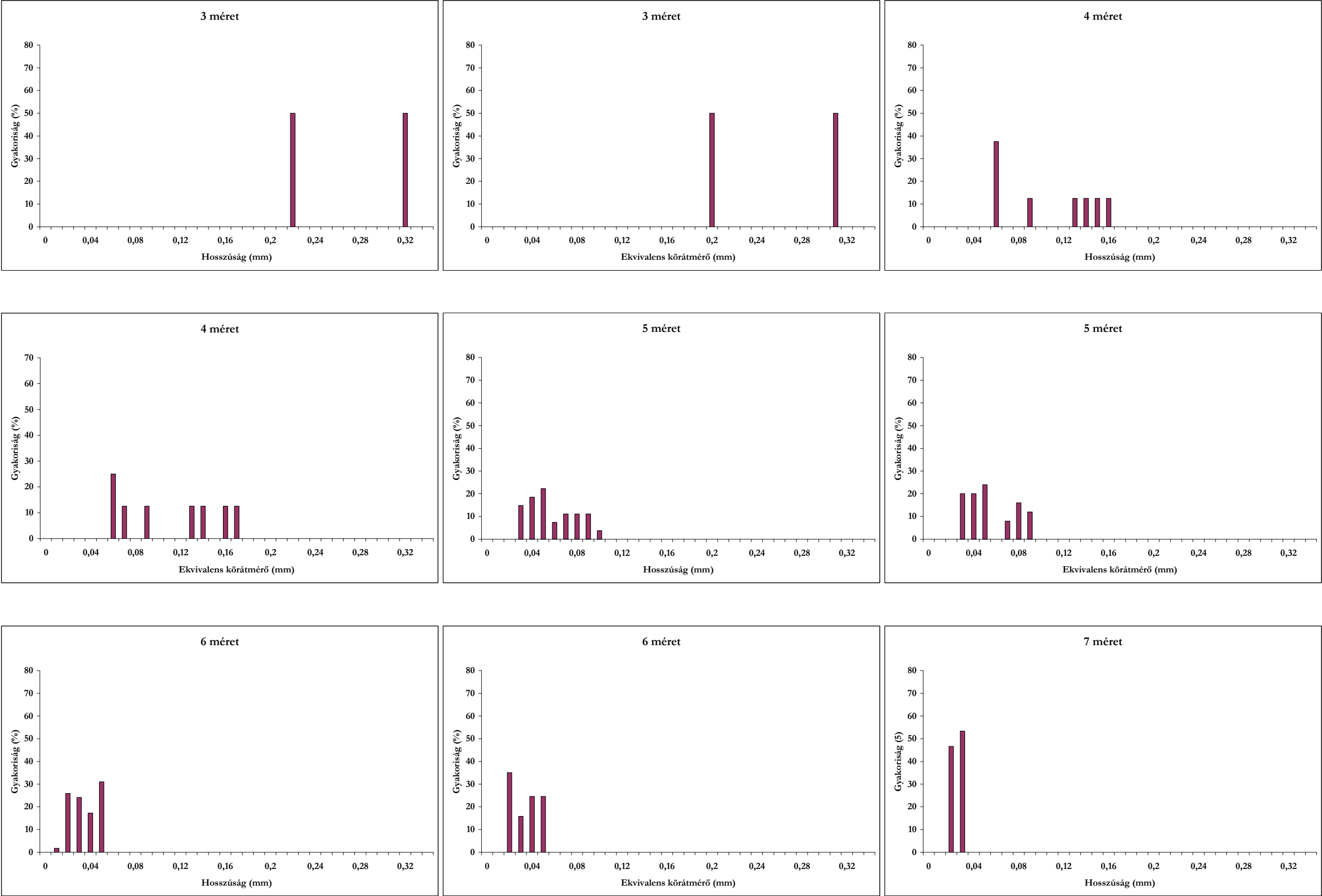


M.16. Hagyományos módszerrel történő grafit méret meghatározás, a grafit méret maximum értékei**M.17.** Hagyományos módszerrel történő grafit alak meghatározás, az V alaktípus %-os mennyiségi meghatározás eredményei

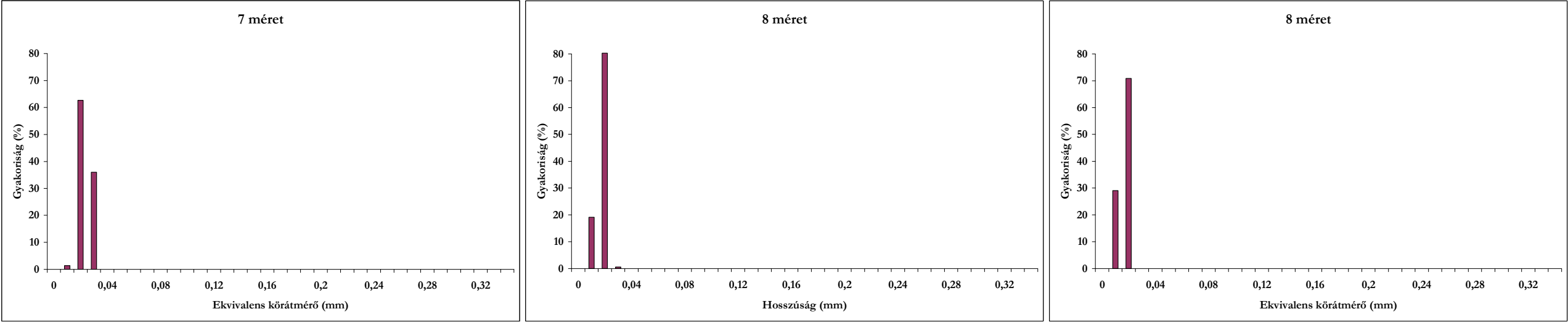
M.18. Hagyományos módszerrel történő grafit alak meghatározás, az VI alakítás %-os mennyiségi meghatározás eredményei



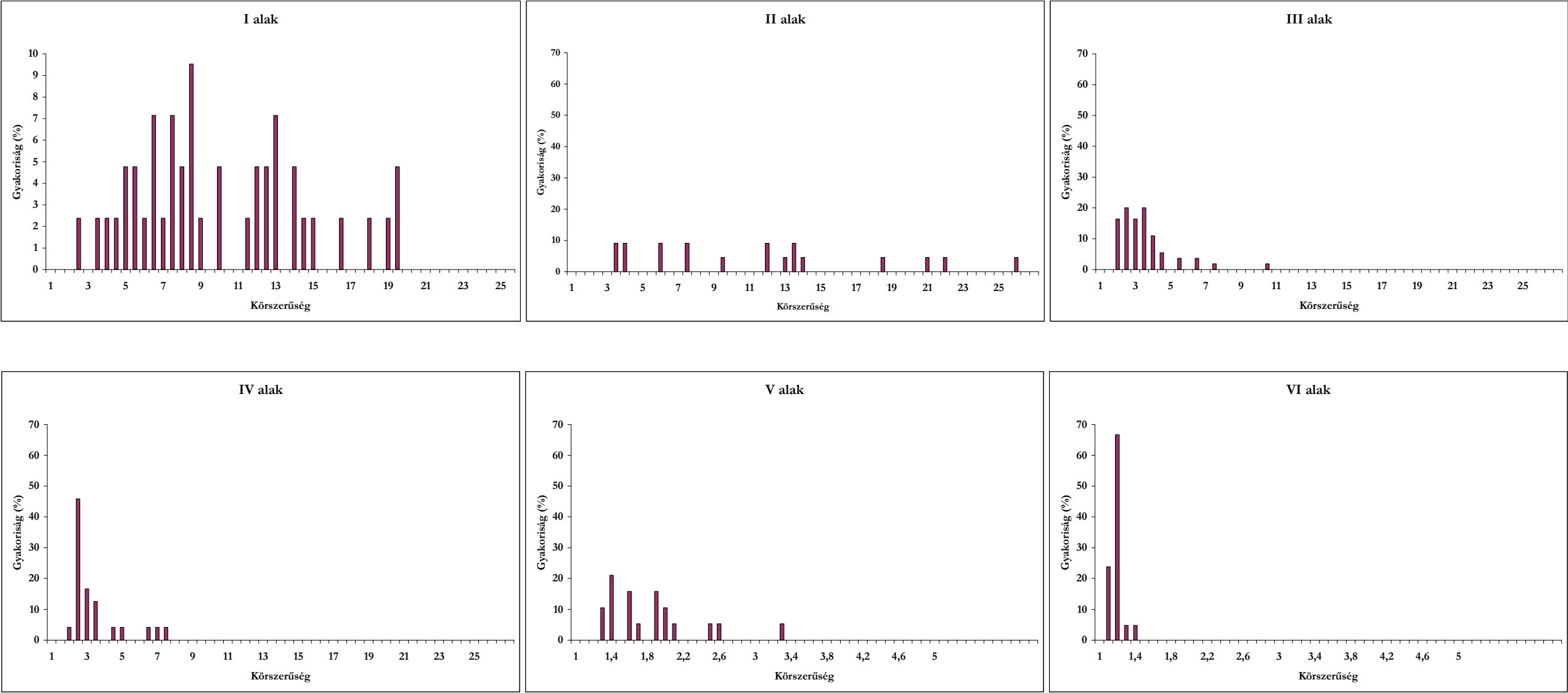
M.19. Gömbgrafit méret etalonképeken található grafitgömbök hosszúságának és ekvivalens körátmérő értékeinek a hisztogramjai



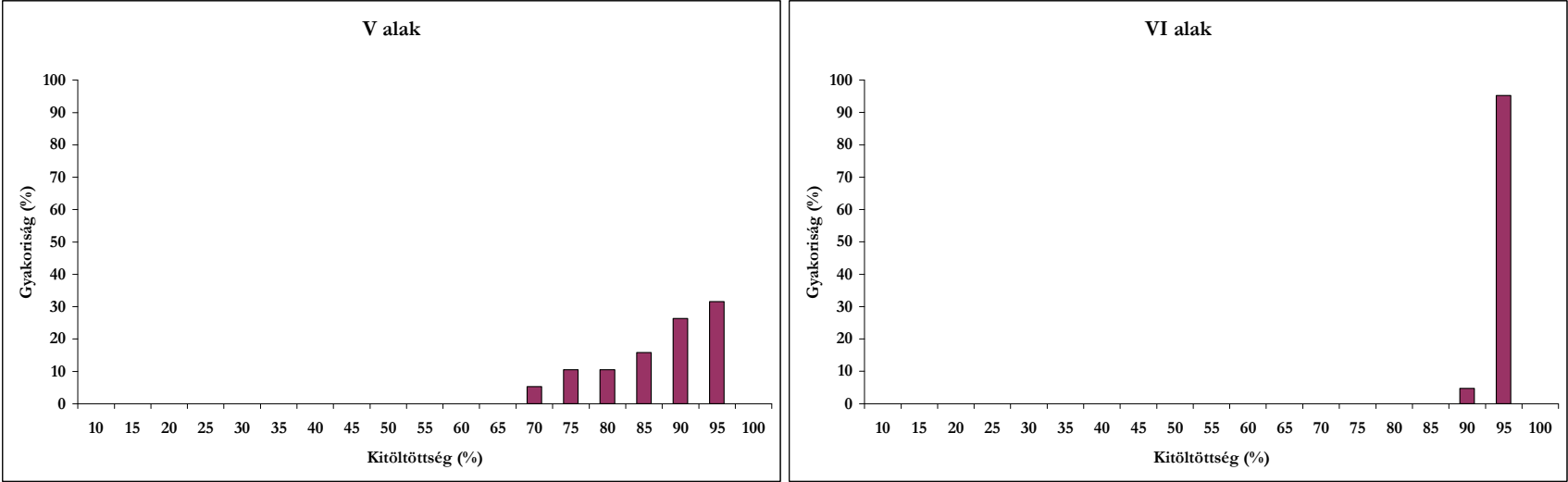
M.19. folytatása



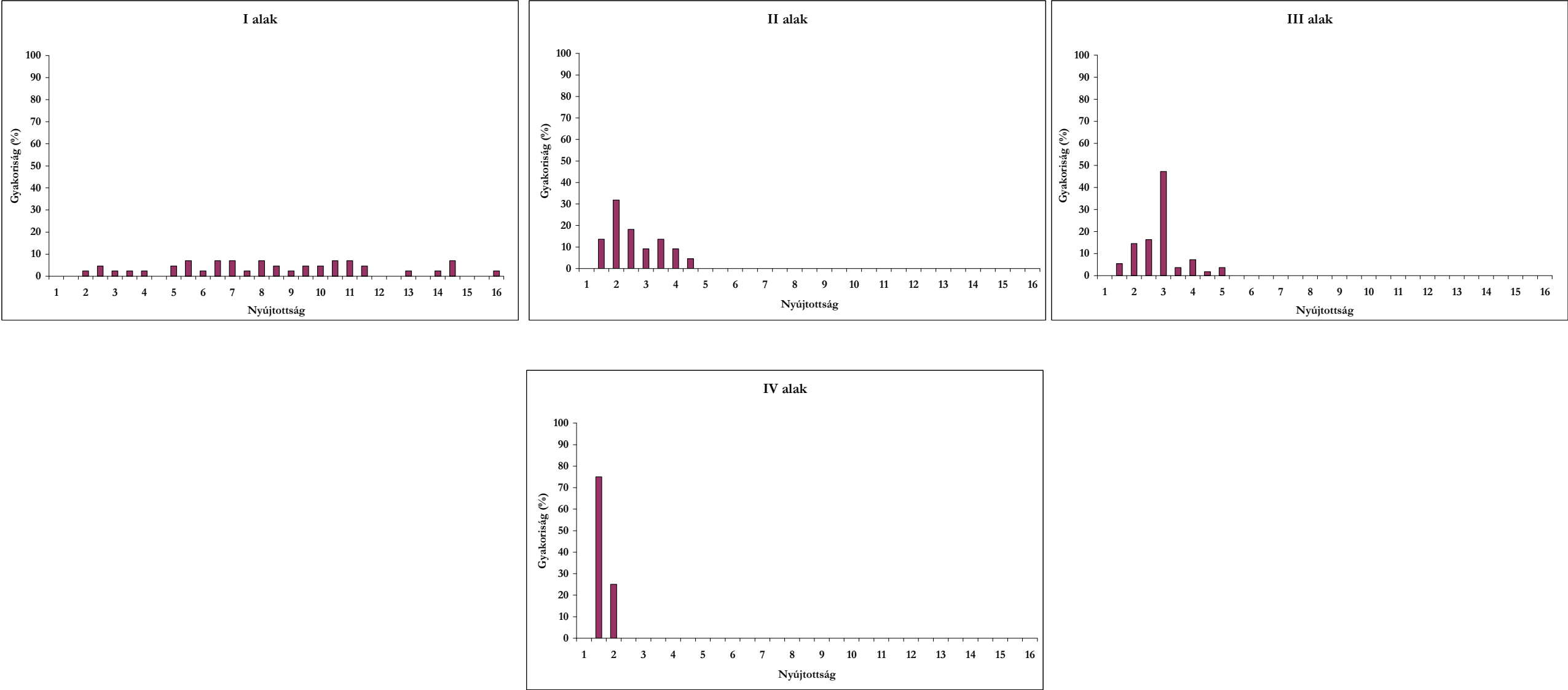
M.20. Grafit alak etalonképeken található grafit szemcsék körszerűség értékeinek hisztogramjai



M.21. V és a VI grafit alak etalonképeken található grafit szemcsék kitöltöttség értékeinek hisztogramjai



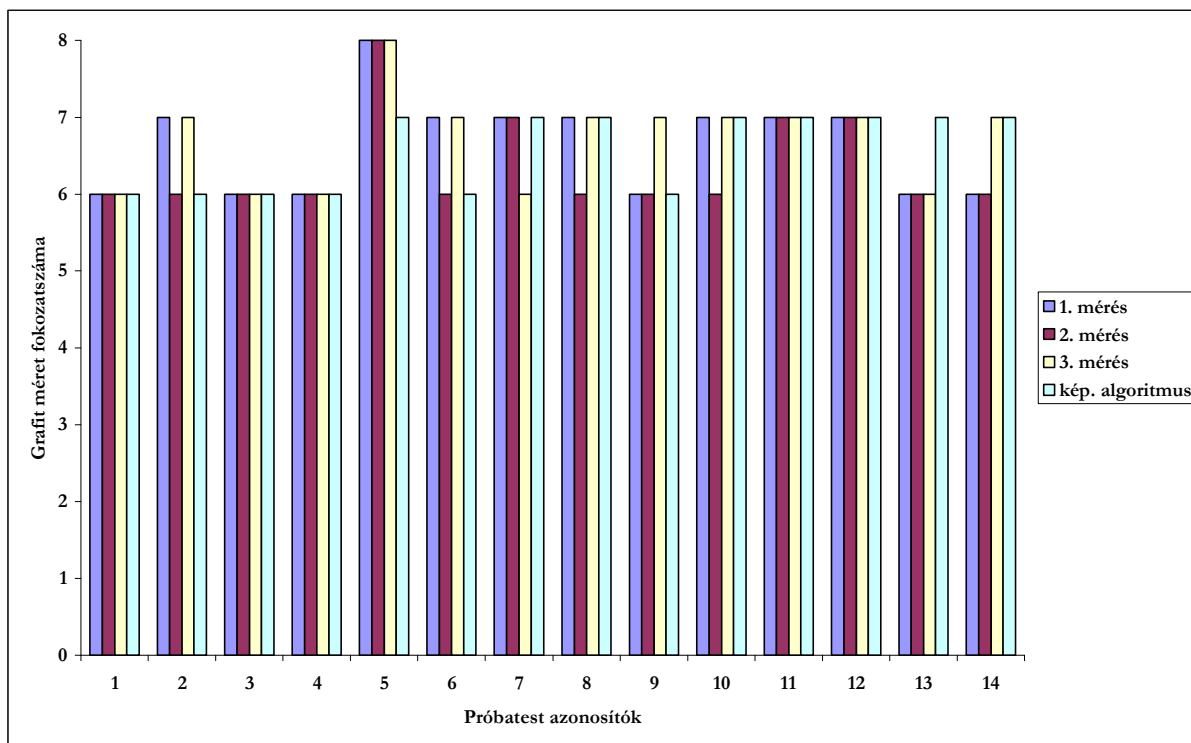
M.22. I, II, III és a IV grafit alak etalonképeken található grafit szemcsék nyújtottság értékeinek hisztogramjai



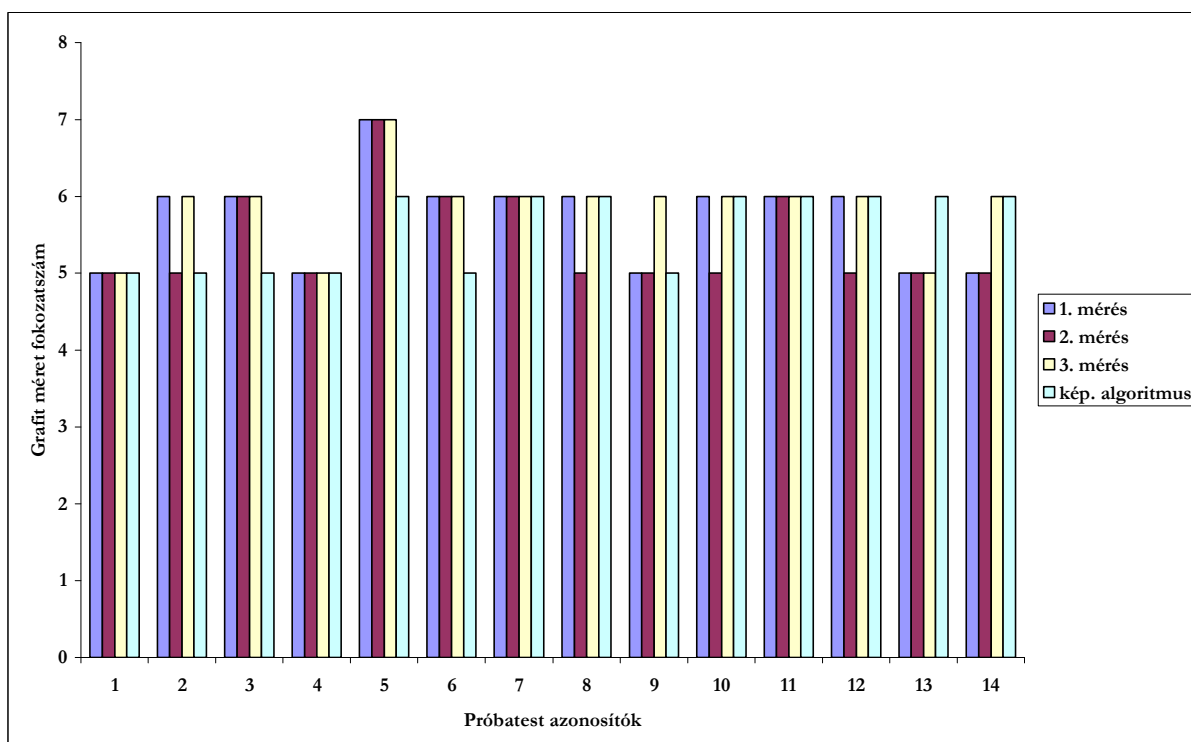
M.23. Hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal elvégzett mérések eredményei

Próbatest azonosítója	Grafit alak		Grafit mérete	
	Hagyományos meghatározás (3 mérési sorozat, grafit típusa és részaránya, %)	Képelemző algoritmus (grafit típusa és részaránya, %)	Hagyományos meghatározás (3 mérési sorozat)	Képelemző algoritmus (mennyiség %)
1	V: 20, VI: 80	III: 3, IV: 11 V: 58 VI: 28	6-5	4=3, 5=37, 6=48, 7=12
	V: 20, VI: 80		6-5	
	V: 40, VI: 60		6-5	
2	V: 40, VI: 60	III: 1 IV: 7 V: 54, VI: 38	7-6	5=30, 6=54, 7=16
	V: 20, VI: 80		6-5	
	V: 30, VI: 70		7-6	
3	V: 50, VI: 50	III: 4, IV: 8 V: 47, VI: 41	6-6	4=1, 5=44, 6=42, 7=13
	V: 50, VI: 50		6-6	
	V: 50, VI: 50		6-6	
4	V: 50, VI: 50	III: 2, IV: 4 V: 54, VI: 41	6-5	4=1, 5=35, 6=51, 7=13
	V: 50, VI: 50		6-5	
	V: 40, VI: 60		6-5	
5	V: 10, VI: 90	V: 42, VI: 58	8-7	6=23, 7=74, 8=3
	V: 20, VI: 80		8-7	
	V: 10, VI: 90		8-7	
6	V: 30, VI: 70	IV: 2, V: 53 VI: 45	7-6	5=35, 6=52, 7=13
	V: 30, VI: 70		6-6	
	V: 30, VI: 70		7-6	
7	V: 10, VI: 90	III: 0,1, IV: 0,8 V: 38, VI: 61	7-6	5=7, 6=67, 7=26
	V: 10, VI: 90		7-6	
	V: 20, VI: 80		6-6	
8	V: 10, VI: 90	V: 37, VI: 63	7-6	5=11, 6=59, 7=39
	V: 10, VI: 90		6-5	
	V: 10, VI: 90		7-6	
9	V: 20, VI: 80	IV: 1,V: 47 VI: 52	6-5	5=30, 6=47, 7=11, 8=12
	V: 20, VI: 80		6-5	
	V: 20, VI: 80		7-6	
10	V: 10, VI: 90	V: 36, VI: 64	7-6	5=1, 6=61, 7=38
	V: 10, VI: 90		6-5	
	V: 20, VI: 80		7-6	
11	V: 10, VI: 90	V: 32,VI: 68	7-6	5=2, 6=59, 7=39
	V: 10, VI: 90		7-6	
	V: 10, VI: 90		7-6	
12	V: 20, VI: 80	III: 1, IV: 1 V: 53, VI: 46	7-6	5=7, 6=63, 7=30
	V: 20, VI: 80		75	
	V: 20, VI: 80		7-6	
13	V: 10, VI: 90	V:37, VI: 63	6-5	5=15, 6=65, 7=20
	V: 20, VI: 80		6-5	
	V: 10, VI: 90		6-5	
14	V: 100	V: 34, VI: 64	6-5	5=2, 6=64, 7=34,
	V: 10, VI: 90		6-5	
	V: 10, VI: 90		7-6	

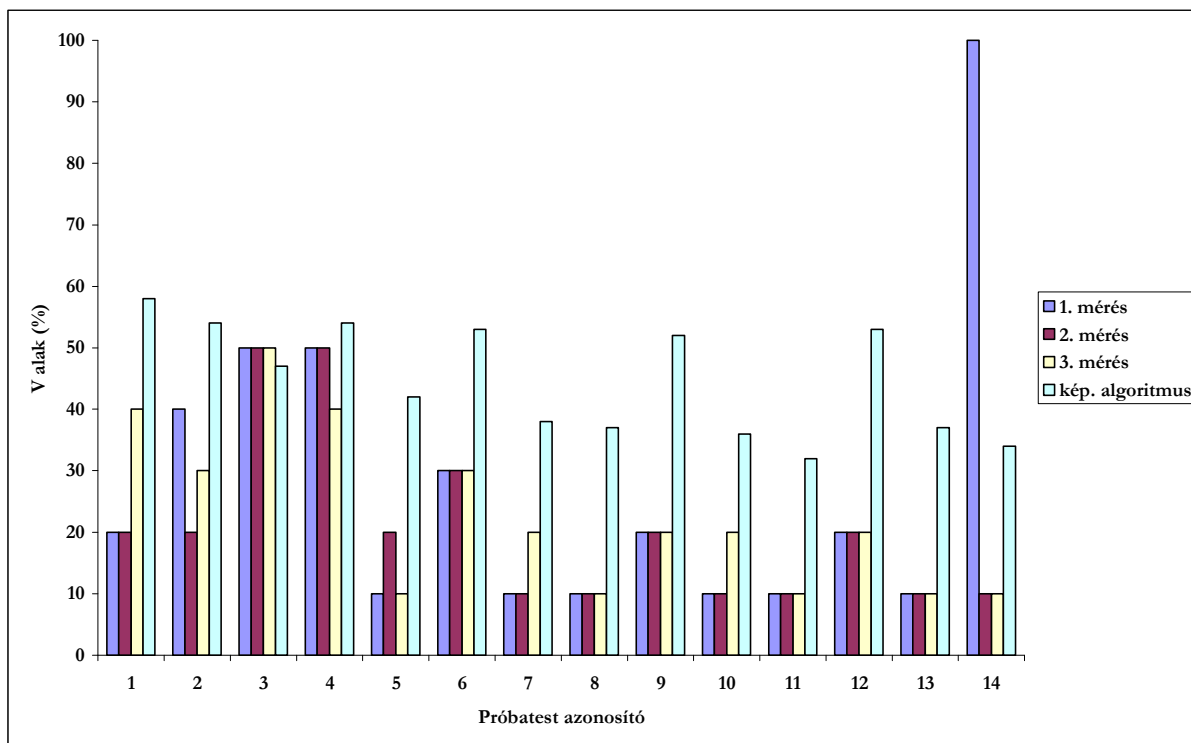
M.24. Hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal történő grafit méret meghatározás, a grafit méret minimum értékei



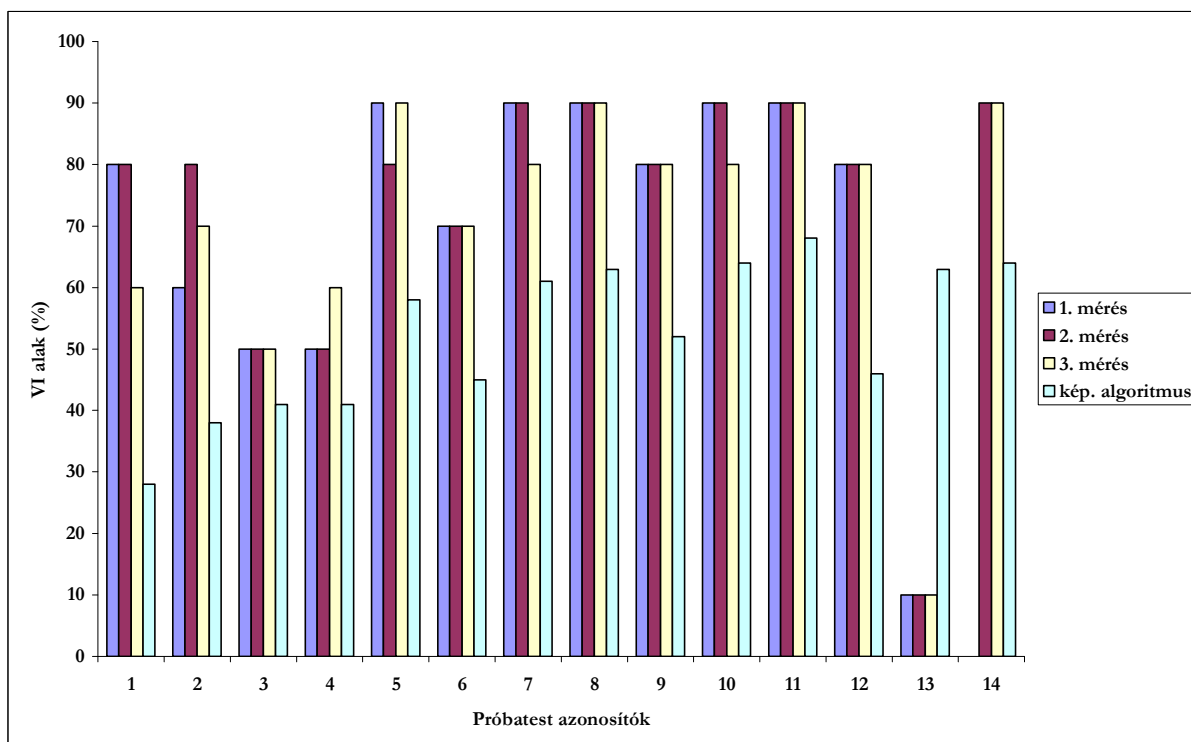
M.25. Hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal történő grafit méret meghatározás, a grafit méret maximum értékei



M.26. Hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal történő grafit alak meghatározás, az *V* alak típus %-os mennyiségi meghatározás eredményei



M.27. Hagyományos és a digitális képfeldolgozáson alapuló algoritmussal történő grafit alak meghatározás, a *VI* alak típus %-os mennyiségi meghatározás eredménye



M.28. A képelemző rendszer a mérés során a következő főbb lépéseket hajtja végre [48]

- 1) A képek érzékelése és rögzítése, vagyis a képek elektronikus formában történő előállítása.
- 2) A képek digitális feldolgozása, ami nem más, mint a lényeges információk kiemelése, s így a vizsgálni kívánt jellegzetességek vagy objektumok kihangsúlyozása.
- 3) A vizsgálni kívánt jellegzetességek vagy objektumok detektálása, a háttértől való elválasztása, s ezzel a bináris kép létrehozása.
- 4) A bináris képek átalakítása, a mérés előkészítése.
- 5) A mérés végrehajtása, a mérési eredmények előállítása.
- 6) Az eredmények értelmezése.

M.29. Az ipari igényekre kidolgozott algoritmus segítségével elvégzett mérések eredményei

Próbatest azonosító	Grafitszemcse alak és méret					
	III alak		V alak		VI alak	
	alak, %	méret	alak, %	méret	alak, %	méret
CGI 1	44	6	15	7	41	7
	45	6	13	7	42	7
	43	6	16	7	41	7
CGI 2	37	6	20	7	43	7
	37	6	17	7	46	8
	42	6	18	7	40	7
GG 1	5	6	12	6	83	7
	6	6	7	7	87	7
	3	6	8	7	89	7
GG 2	12	5	15	5	73	6
	6	5	21	5	73	6
	7	5	23	5	69	6