

„Zománcozható öntöttvas”(öntöttvas beoltása) zománcozói szemszögből

Mark Moriarty, Escol, Technical Seminar IVE, 2007.
(The Vitreous Enameller, 2007.58.2)

(Fordította: Barta Emil)

1. Bevezetés

Igazán könnyű a zománcszakembereknek elfogadni, hogy a zománcozásra szánt öntvényeknek a legjobb eredmény elérése miatt bizonyos követelményeknek kell, megfeleljenek. Logikus feltételezni, hogy az öntvényeknek megfelelő érdességgel kell rendelkezni a kötés lehetőségének biztosítására, felületi és felület alatti hibáktól, - mint pl. zárványok, szennyeződések és pórusok, - mentesnek kell lenni.

Azonban a zománcszakembereknek szintén méltányolniuk kell, hogy az öntöttvas néha kiábrándító eredményt produkál még akkor is, ha az öntvények nyilvánvaló hibáktól mentesnek látszanak is. Nyilvánvaló, hogy a megfigyelt problémák egy része a mikroszkopikus és nano-méretű reze jelenlétével kapcsolatos. Ezért szintén üdvözlendő, hogy a zománcszakembereknek legalább alapfokú metallurgiai és gyártási ismeretekkel kellene, hogy rendelkezzenek a vas mikrostruktúrájának ellenőrzése céljából.

Igazságtalan lenne a kohászokkal szemben, ha az lenne a benyomásuk, hogy ez a cikk az öntvény metallurgia átfogó áttekintése lenne. Sőt, sok szempontot egyszerűsítettünk, néha figyelmen kívül hagytunk, annak érdekében, hogy a zománcszakembereknek bemutassuk a témát. Nem szándéka ennek a cikknek elidegeníteni a kohászatot, vagy rontani a köztük és a zománcszakemberek között fennálló, sokszor feszült viszonyt.

Nagyon fontos kihangsúlyozni, hogy bizonyos zománcok képesebbek megbirkózni az öntvényből felszabaduló gázokkal, mint mások, és ez azt jelzi, hogy a zománcok gondos kiválasztása szükséges a megfelelő eredmény elérése végett.

Ez szintén jelzi, hogy a további fejlesztések terén van még tennivaló a zománcgyártók oldaláról.

Az IVE (Institute of Vitreous Enamellers) felismerte annak szükségét, hogy nagyobb együttműködésre van szükség a kohászok, a zománcszakemberek és a zománcgyártók között. Ezért létre hozta az Öntvény Munkacsoportot. Reméljük, hogy ez az előadás lehetőséget ad a zománcszakembereknek betekinteni a kohászok munkájába, és segít a kommunikációban.

Az öntöttvas beoltása egy fontos folyamat, mely képessé teszi a kohászt biztosítani azt, hogy az öntöttvas mikroszerkezete a zománcozás számára legmegfelelőbb legyen.

A beoltás megértése öntöttvas metallurgiai, kristálytani alapismereteket igényel, és ezért nagyon sok fontos szempontot összegez, melyekkel a zománcszakembereknek tisztában kellene lenniük.

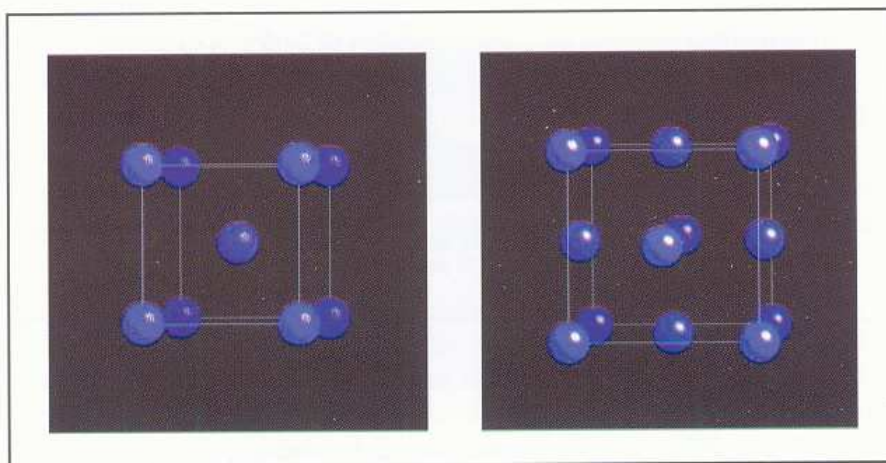
2. Vas és szén

A fémes anyagok általában a természetben kristályosak, mely alatt azt értjük, hogy atomjaik hajlamosak egymással rendezett ismétlődő formában rendeződni, szilárd halmazállapotban. A tiszta vas „allotróp” anyag, és a hőmérséklettől függően két különböző formában képes megjelenni.

Ennek a fogalomnak a megértése szükséges, mert ez befolyásolja az öntöttvasban levő szén útját, az olvadék öntésétől a végső megszilárdulásig. Az öntöttvas, teljesen leegyszerűsítve, a több mint 2% szenet tartalmazó vas.

Ferrit a neve annak a vasnak, melynek atomjai térben centrált köbös rácsot (tck) alkotnak. A tck formában, egy-egy atom helyezkedik el egy képzeletbeli kocka nyolc sarkán és egy a középpontban. Ezt a vasat úgy is hívják, hogy (α) alfa-vas. A tiszta vas kristályszerkezete szobahőmérsékleten térben centrált köbös rács, és ez a szerkezet (tiszta vasnál) stabil 908 °C-ig.

Auszenit a neve annak a vasnak, melynek atomjai lapon centrált köbös (lck) rácsot alkotnak. Ezt a vasat (γ) gamma-vasnak nevezzük. Ebben az elrendezésben egy képzeletbeli kocka nyolc csúcsán helyezkedik el egy-egy atom, és egy-egy a kocka minden lapjának középpontjában. A vas kristályszerkezetének átalakulása tck-ből lck-ba 908 °C fölött történik.

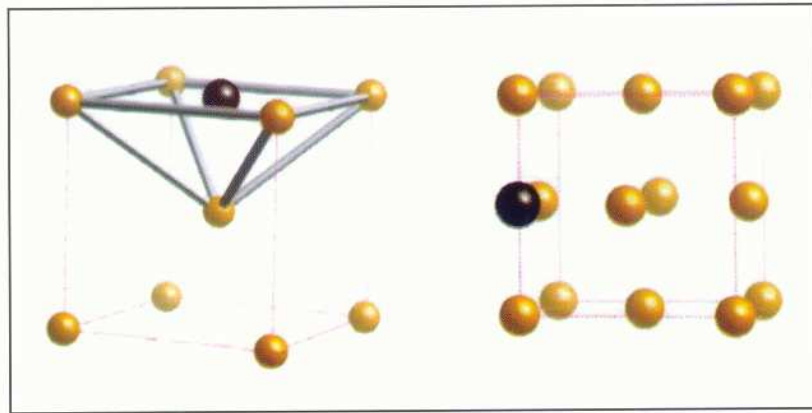


1.ábra:
Ferrites és ausztenites vas szerkezetének ábrázolása

A szén atom mérete kb. 0,57 szerese a vas atoménak, és a vas kristályszerkezetben inkább intersticiális (térközi) helyeken, mint szubsztitúciós (helyettesítő) helyeken található. Más szavakkal, a szén atomok nem foglalják el a vas atomok kristálybeli helyét, inkább a kristályközi térben helyezkednek el. Az ausztenites szerkezetben több intersticiális hely van a szén számára, mint a ferrites szerkezetben.

Az ausztenites szerkezet esetében az intersticiális helyek átmérője a vas atom átmérőjének 0,41 szerese, míg a ferrites szerkezet esetében ez 0,15 szörös. Mivel az intersticiális helyek mérete kisebb, mint a szén atom atomi átmérője, azok jelenléte feszültséget okoz mindkét szerkezet esetében.

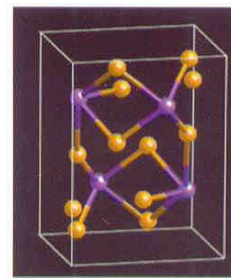
Az előbbiekből nyilvánvalóan következik, hogy az ausztenit nagyobb „tárolókapacitással” vagy oldhatósággal rendelkezik a szén számára, mint a ferrit. A szén maximális oldhatósága az α -ferritben 0,22% 723 °C-on, míg a γ -ausztenitben 2,06% 1147 °C-on.



2.ábra:

A szén atomok intersticiális elhelyezkedése a ferrites és ausztenites szerkezetben

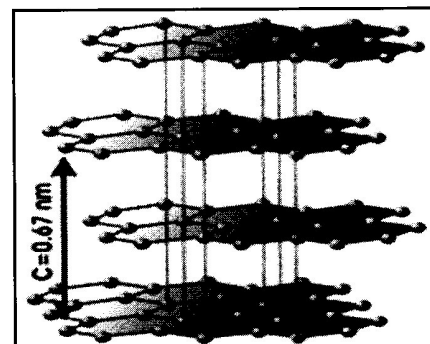
Cementit a neve annak a vas-karbidnak, mely a vas és a szén atomok kémiai kapcsolódásakor keletkezhet. Ez nem tévesztendő össze a szén ausztenites ill. ferrites kristályszerkezetben történő oldódásával. Kémiai képlete Fe_3C , és sokkal bonyolultabb atomos szerkezettel rendelkezik, mint a ferrit, vagy az ausztenit. A cementit nagyon kemény, rideg anyag.



3.ábra:

A Fe_3C szerkezete, a Fe atomok sárgák

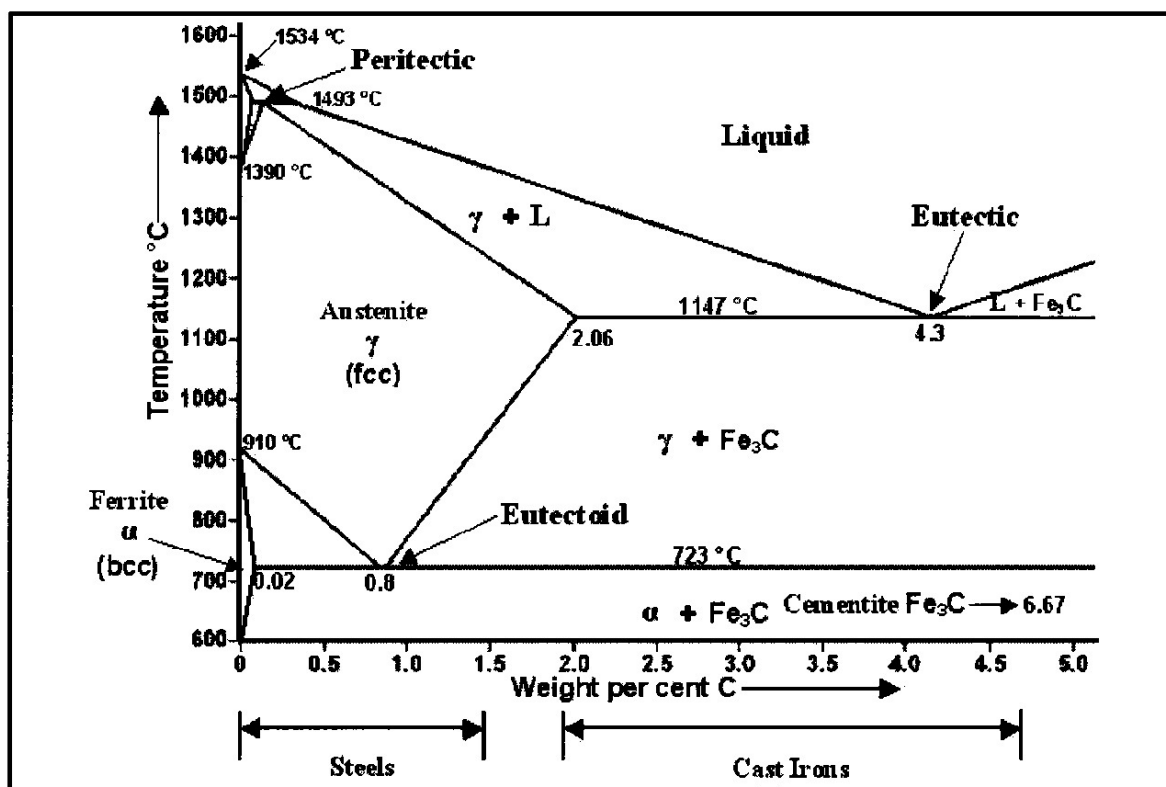
A **Grafit** a szén egyik allotróp módosulata (a másik a gyémánt), és az egyik legstabilabb formája a szénnek. A tiszta grafitban a szén atomok hexagonálisan kötődő atomok rétegződéséből épülnek föl. Bár a rétegek közti kémiai kötés viszonylag gyenge (*van der Waals erő*), engedve azokat egymáshoz képest elmozdulni, a hexagonálisan elhelyezkedő atomok közötti kötés igen erős (*kovalens kötés*). A rétegek elmozdulása magyarázza a grafit puhaságát.



4.ábra:

A grafit szerkezete

A „vas-szén állapotdiagram” ismerete szükséges az öntöttvas mikro-szerkezet megszilárdulás közbeni kialakulásának megértéséhez. A diagram tartalmazza a jelen levő „fázisokat”, azaz a magas hőmérsékletű olvadék fázist, a ferrit, ausztenit vagy cementit fázist, a vas széntartalmának százalékos függvényében és a hőmérséklet függvényében.



5.ábra: Vas-szén fázisdiagram

Rá kell mutatnunk arra, hogy a diagram sokkal részletesebben tartalmazza a vas cementit alakú metastabil fázisát, és nem igaz a grafit egyensúlyi fázisa a vasban. Ez az elméletben azt jelenti, a cementit nem lehetne jelen, ha elegendő idő lenne a szilárdulás alatt az atomoknak a számukra legstabilabb formációba való rendeződéshez. Azonban a gyakorlatban, grafit nem szívesen alakul ki a kizárólag szénnel adalékolt acélban vagy öntöttvasban. Erre a tényre fontos, hogy emlékezzünk a zománcozható öntöttvas **beoltásánál**.

A diagramról látható, hogy 1534 °C (a tiszta vas olvadáspontja) fölött csak folyékony fázis van jelen. Fontos megjegyezni, hogy a szén hozzáadása csökkenti a tiszta vas olvadáspontját. Ennek az a gyakorlati előnye, hogy az öntés a tiszta vas olvadáspontja alatt lehetővé válik.

A diagram nagyon sok érdekességet tartalmaz, de minket most a 2,06 C% feletti és a 4,3 C% alatti rész érdekel.

A 3,7 C% -nál húzott vonal mutatja a 3,7 % szén tartalmazó vas fázisátalakulásait a hűlés során. A 4,3 % széntartalomnál levő 'eutektikus' pont kivételével a vas-szén ötvözetek e hőmérséklet fölött szilárdulnak meg.

Az első transzformációs fázishatár, melyet a képzeletbeli vonalunk átszel, a γ-auszenit + olvadék (L) fázis. Ez a kezdete a kristályosodási folyamatnak, 'elsődleges' auszenit kristályok kezdenek kialakulni, az olvadékban. Emlékeztetőül, az auszenit 1147 °C-on 2,06% szén old szilárd fázisban, a maradék ömledék az olvadékban szénben dúsul, miközben az auszenit kristályosodása folytatódik. A széntöbbség ami már nem tud a kristályos auszenit fázisban oldódni, cementit (Fe₃C)

formájában kristályosodik ki, amint a hőmérséklet 1147 °C alá süllyed. Az olvadék kristályosodása ebben a pontban befejeződik és az így kialakult vas mikroszerkezete cementitet tartalmaz az elsődleges ausztenit szemcsés mátrixban.

Azonban egy újabb fázisátalakulás következik, amint a hőmérséklet eléri a 723 °C-os 'eutektikus' pontot. Az elsődleges ausztenit már nem stabil ezen hőmérséklet alatt, és α -ferritté alakul. Mivel a ferrit csak 0,02% szenet képes tartalmazni 723 °C-on, a szén további cementitet alkotva kiválik. A kiválási folyamat, melyben az ausztenit ferritté alakul 723 °C-on, réteges vagy lamellált szerkezetet, un. **perlitet** eredményez. A perlit ferrit és cementit rétegeket tartalmaz felváltva. Így a vas végső szerkezete szobahőmérsékleten cementit lesz perlites mátrixban.

3. A fehér nyersvas, a szürke-öntvény és a tűzzománcozás

Az előbbieken láthattuk, hogy ötvöző elemek, mint a szén adagolása nélkül, valós hűlési feltételek mellett, csak perlitet és cementitet tartalmazó öntöttvas állítható elő. A szenet főleg cementit formájában tartalmazó öntöttvas a **fehér nyersvas**, mivel a frissen tört felülete fényes és ezüstös színű.

A fehér nyersvas nagyon kemény, és törékeny a cementitnek köszönhetően. Nehezen megmunkálható, és további hőkezelésre sem változik meg a mikroszerkezete, melynek számos gyakorlati előnye van.

Mivel előadásom alapvetően a zománcozható öntöttvasról szól, érdektelen, hogy a cementitet emlegetjük, mint zománcozható öntöttvasat. A fehér, vagy hirtelen lehűtött részeket tartalmazó öntvények kevés sikerrel zománcozhatók a felforrásra való hajlamuk miatt.

Az előbbieken láthattuk, ha lehetséges, a szén inkább grafit formájában van jelen az öntöttvasban. Mint korábban mondtuk, a grafit atomos kötéseinek következtében sokkal lágyabb anyag, így az öntvények kevésbé törékenyek, és könnyebben megmunkálhatóak lesznek. A grafit kialakulása szintén segít semlegesíteni az öntvény kristályosodása alatt fellépő zsugorodást és vetemedést köszönhetően lágyságának és a kialakulását követő térfogat növekedésnek (a grafit kisebb sűrűségű, mint a vas). Szintén csökkenti az öntvény valóságos porozitását, mely a zománchibák kialakulásának esélyét valószínűleg csökkenti. Továbbá, a zománcozás szemszögéből nézve, a grafit jelenléte nem okoz kiforrási hibát, mint a cementit tartalmú vasnál.

Szürke-öntvény a neve a szenet grafit formában tartalmazó öntöttvasnak. Mint a név is utal rá, az elnevezés a töret felületének tompa szürke megjelenéséből ered. Mivel a vas-szén fázis diagram előre megmondja, hogy a cementit képződés vas-szén ötvözetekben inkább végbemegy, a vasat harmadik elemmel szükséges ötvözni, mely elősegíti a sokkal stabilabb grafit képződését a gyakorlati hűlési sebességek mellett.

Több elem ismert, melyek elősegítik a grafit kialakulását a vas-szén rendszerekben, de leginkább a szürkeöntvénygyártásban a **szilíciumot** használják. Következésképpen a szürke öntvényeket háromalkotós vagy 'terner' vas-szén-szilícium ötvözeteként kezeljük. Azonban a szürke öntvények kristályosodási mechanizmusa még a vas-szén fázisdiagramon alapul.

Az előadás célja szerint elegendő elfogadni, hogy az 1147 °C-os eutektikus ponton való hűtésnél, a szilíciummal adalékolt öntvényeknél a cementit képződés helyett

inkább a grafitképződés megy végbe. Így a megszilárdulást követően az eutektikum alatt kialakult mikroszerkezet grafitot tartalmaz elsődleges ausztenites mátrixban. *Ez az a mikroszerkezet, mely akkor alakulna ki, ha elegendő idő van a valóságos egyensúly kialakulására a vas-szén rendszerben.*

A 723 °C-os eutektikus hőmérsékleten túli hűtés során az ausztenit szétbomlik ferritre, perlitet eredményezve. Elérkeztünk a végső mikroszerkezethez, mely grafitot tartalmaz perlites mátrixban (szürke-öntvény).

A gyakorlatban a hűlési sebességet több tényező befolyásolja, pl. az öntvény falvastagsága, mely nyilvánvalóan helyenként változhat egyazon munkadarabon belül. Még szilícium hozzáadása mellett is, ha túlhűtés következik be, azaz nincs elegendő idő az egyensúlyi feltételek kialakulására, a keletkező mikroszerkezet tartalmazhat részletekben cementitet. Ez magyarázza a cementit kialakulását, vagy az éleken történő kérgesedést vékony öntvényeknél, amikor a hirtelen hűlés megakadályozza a stabil grafit kialakulását, és kedvez a metastabil cementit kialakulásának.

Szürke-öntvény esetében, a hűlési sebesség kellőképpen alacsony lehet, ahhoz, hogy, az ausztenit-ferrit átalakulás során perlites szerkezetben kialakuló szén a jelenlevő grafiton kiválhasson. A gyakorlatban így a hűlési sebesség függvényében, melyet a szakaszok vastagsága határoz meg, a zománcozásra szánt öntvény mikroszerkezete tartalmazhat ferritet, perlitet, cementitet és grafitot.

4. Az öntöttvas beoltása

A beoltás témáját a '**gócképződés**' kifejezés bemutatásával kell kezdenünk. Gócképződésnek nevezzük a fázisátalakulás kezdetét. Ilyen, pl. a kristályképződés olvadék állapotban a kristályosodás korai szakaszában (azaz elsődleges ausztenit kialakulása az olvadt vasban). Elégsége azt állítani, hogy a szilárd fázis gócképződése az olvadékból egy korábban létező szerkezet jelenlétét igényli az olvadékban, melyekhez a kialakuló szilárd részecskék kötődhetnek. A korábban létező szerkezetek, melyek elősegítik a magképződést, lehetnek az olvadék fázis szennyeződései, vagy, mint a beoltásnál, szándékos zárványok. Az elmélet bemutatására nézzük meg a nagy tisztaságú víz „túlhűtését”. A víz általában ismert fagyáspontja 0 °C. Azonban kimutatható, hogy szennyeződések nélkül jégkristályok csak jóval 0 °C alatt keletkeznek. Ez a gócképződési helyek hiányával magyarázható.

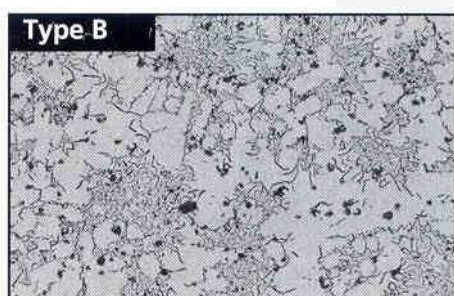
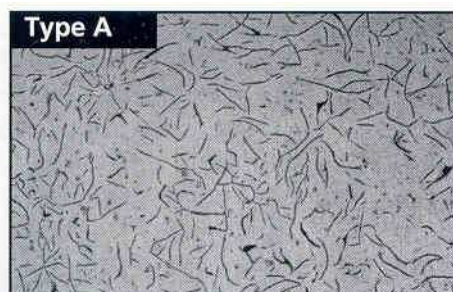
Az öntöttvas beoltása egy előkezelés közvetlenül az öntés előtt, egy olyan anyaggal, mely elősegíti gócképződési helyek kialakulását az olvadékban. Nem szükséges beoltani az öntöttvasat annak érdekében, hogy elinduljon az elsődleges ausztenit kristályosodásának folyamata, mivel a gyakorlatban az öntvény mindig tartalmaz valamilyen szennyeződést. Azonban láthattuk, hogy elegendő időt kell adni az öntvénynek a szilárdulás alatt a stabil grafit metastabil cementittel szembeni kialakulásához.

A hűlés sebessége a kristályosodás alatt kialakuló grafit formáját és méretét is befolyásolja. Az olvadék enyhe túlhűtése rendezetlen lemezes grafitot, un. 'A-típusú', eredményez egységesen eloszolva a vas mátrixban. A túlhűtés növelésével, a grafit kettéválik, és abnormális formát ölt, "B-típusú ill. D-típusú" grafit keletkezik. További sebességnövelés végül elnyomja a grafit kialakulását, és kemény vas-karbid, cementit keletkezését okozza.

Meg kell érteniük a zománcszakembereknek, hogy az oltóanyag adagolása nem garantálja a hibamentes zománcozást. Láthattuk, hogy a túl gyors hűtés okozhatja a cementit kialakulását a beoltott vasban, és bizonyos, vékony keresztmetszettel ren-

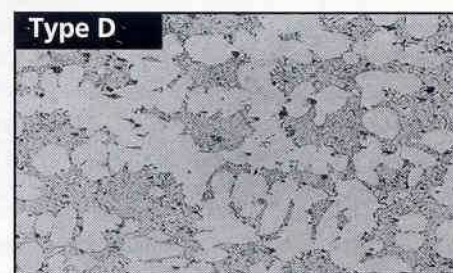
delkező öntvényeknél, ez elkerülhetetlen. A beoltás belső térfogatcsökkenés okozta hibához vezethet az öntvényben, mivel a kristályosodás korai szakaszában nagy mennyiségű kis sűrűségű grafit keletkezik. Ez a kokilla falának elmozdulását okozza, megnövelve a kokilla méretét a vas mennyiségéhez képest, zsugorodás okozta hibát idézve elő az öntvényben.

6.ábra: „A-típusú” grafit, (lemezes), az enyhe túlűtés eredménye



7.ábra: „B-típusú” grafit, (tárcsás), a mérsékelt túlűtés eredménye

8.ábra: „D-típusú” grafit, nagyfokú túlűtés eredménye



5. Oltóanyagok

Hagyományosan az oltóanyagok alapja grafit, ferroszilícium vagy kalcium-szilicid. Napjainkban a legnépszerűbb oltóanyag a kis mennyiségben különféle elemeket, mint alumíniumot, báriumot, kalciumot, stronciumot és cirkóniumot tartalmazó ferroszilícium.

A legtöbb oltóanyag „hordozó” anyagot tartalmaz, mely magába foglalja az aktuális oltóanyag kis mennyiségét, melyet „gócképző”-nek nevezünk. A hordozó úgy van kialakítva, hogy elősegítse a gócképző homogén és gyors eloszlását az olvadékban. A tiszta ferroszilíciummal végzett kísérletek azt mutatták, hogy a grafit számára nincs gócképző hatása, akárhogy legyen is. Az előbbieken felsorolt gócképző elemek ellenőrzött, kis mennyiségű (0,6-2%) adalékolása szükséges a hatásos számú góchely kialakulásához. Gócképzőnek korlátozott oldékonysággal kell, hogy rendelkezzen az öntöttvasban, és stabil vegyületet kell, hogy képezzen más elemekkel, miközben gócképző részecskéket alkot (kén, oxigén).

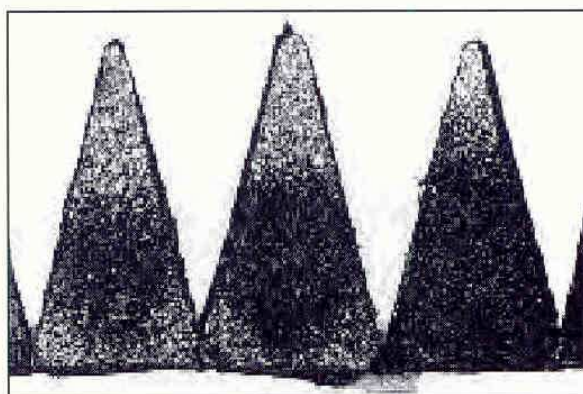
6. A beoltás gyakorlati következményei

A beoltás hatását hűlési görbék, öntőforma szeletek használatával és a mikroszerkezet tanulmányozásával mérhetjük és megfigyelhetjük.

A hűlési görbék a hőmérsékletesés sebességét mutatják a szilárdulás alatt. A fázis-változások, mint a kristályos szilárd anyagok kialakulása az olvadékban, hő-fejlődéssel járó folyamatok. Az öntöttvas hűlési görbéje „kritikus” ponttal rendelkezik, amint a vas szilárdulása végbemegy, a kristályosodási hőnek köszönhetően. Ennek a kritikus pontnak a hőmérséklet határai használhatók arra, hogy meghatározzuk, annak valószínűségét, hogy a vas „nyers” vagy „szürke” módon szilárdul-e meg. Ez a pont az eutektikus kristályosodási hőmérséklet. A beoltás elősegíti a magasabb kritikus hőmérsékletet és elősegíti a fehér-vas kialakulásának elkerülését, mely alacsonyabb kritikus hőmérsékleten képződik. A nyers-vasat eredményező beoltatlan öntöttvas (a), és szürke-öntvényt eredményező beoltatott öntöttvas (b) kristályosodási görbéjén megfigyelhetjük, hogy a beoltatlan olvadék 1145 °C-os kritikus, vagy „inverziós” hőmérsékletet mutat, míg ez a beoltott vas esetében 1162 °C.

Hagyományos módja annak megállapításának, hogy az olvadék nyers, vagy szürke-öntvénné szilárdul-e meg, az öntés és az öntőforma szelet törése, mint azt a 10. ábra mutatja. Minél nagyobb a nyers-vas formálta zóna az éken, annál kisebb hatással van az oltás a szürke-öntvény képződésének elősegítésére. A bal oldali ék a 10. ábrán egy oltatlan öntvényé, és a két jobb oldali különféle oltóanyaggal oltott vasé. Ez mutatja, hogy különféle oltóanyagok különböző hatékonysággal rendelkeznek adott hűlési sebesség mellett a nyersvas kialakulásának csökkentése tekintetében.

Mikroszkópiás megfigyelések használhatók a beoltás hatékonyságának megállapítására. Öntöttvas mintákat vágunk, és tükörfényes felületűre polírozunk, majd megfelelő savas kezelésnek vetjük alá. A minta széntartalma kimosódik, a visszamaradó mikroszerkezet feltárul. Nem csak a nyersvasként kikristályosodott régiók azonosíthatók, de meghatározható a beoltás eredményeként kialakított, sikeres gócképződési helyek száma is. Ezt úgy nevezzük, hogy „eutektikus cellaszámlálás”.



10. ábra:
beoltatlan vas (bal), beoltott vas (közép, jobb)

7. A szürkeöntvény összetétele

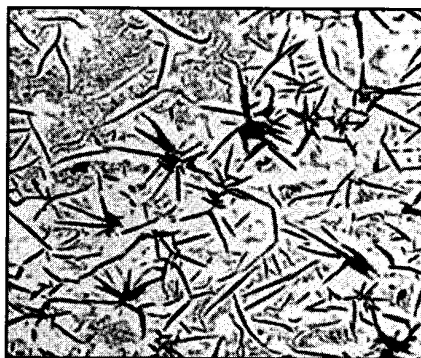
Bár az előbbieken vázoltuk a szürkeöntvény mikroszerkezetének kialakulását a vas-szén fázisdiagramban, tisztában kell lenni azzal, hogy más, szennyeződésként vagy szándékos ötvözőként adalékolt elemek is befolyásolhatják a diagram alakulását és a kialakuló mikroszerkezetet.

Például, szilícium hozzáadása csökkenti a szén oldhatóságát a vasban és csökken kevesebb az eutektikus átalakuláshoz szükséges szén mennyisége, mely általában 4,3 C% 1147 °C-on. A szilícium emeli az ausztenit – ferrit transzformációs hőmérsékletet, mely a 723 °C-os eutektikus pontban szokott lenni.

A legfontosabb ötvöző adalékok hatását a „szénegyenérték” – el (CE) vesszük figyelembe:

$$1. \text{ egyenlet: } CE = C\% + 0,3x(Si\%) + 0,33x(P\%) - 0,027x(Mn\%) + 0,4x(S\%)$$

A szürkeöntvény szénegyenértéke általában az eutektikus összetétel, 4,3%, alatt van tartva. 4,3% felett a vas-szén diagram az elsődleges ausztenit fázis kialakulása helyett szilárd Fe_3C kialakulását jelzi, mint elsődlegesen kialakuló fázist az olvadékban. Ez un. „C-típusú”, „hab” grafit, alakul ki a végső szövetszerkezetben.



11. ábra:
A hipereutektikus vas megszilárdulása során keletkező
C-típusú (habgrfit) grafit

A habgrfit az öntöttvasat nehezen megmunkálhatóvá teszi, és jelenléte nemkívánatos. A $CE=4,3$ alatti öntöttvas az un. „hipoeutektikus” vas, míg az e feletti az un. „hipereutektikus” vas.

A foszfor, mangán és kén értékének meghatározása szintén a kohászok feladata, mivel ezek jelentős hatással vannak az öntöttvas mikroszerkezetére és annak tulajdonságaira, melyek kihatnak a zománcozhatóságra.

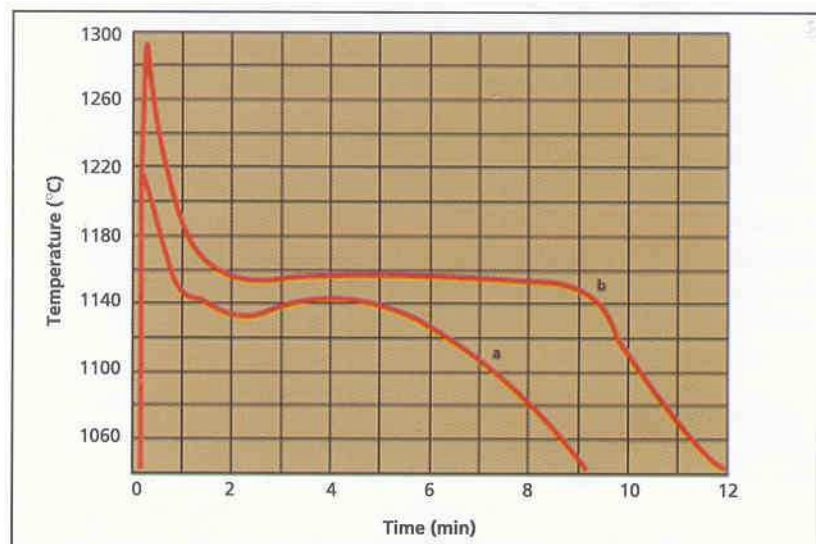
A szürkeöntvény kén tartalma általában 0,15% alatti kell, hogy legyen. Mangán hozzáadása nélkül a kén vas-szulfidot (FeS) képezhet a kristályosodás késői szakaszában, mely korlátozza a grafit kialakulását, gyakorlatilag cementit kialakuláshoz vezet. Mangán hozzáadása során a kristályosodás korai szakaszában inkább mangán-szulfid (MnS) zárványok keletkeznek a vas-szulfiddal szemben. A MnS zárványok egyenletesen oszlanak el a vasszerkezetben, és magképződési helyként szerepelnek a grafit számára. Ha a kén tartalom 0,03% alatti, a mangán-szulfid zárványok száma túl alacsony lesz a hatékony magképződéshez. Magas kén tartalom nem egyensúlyozható teljesen mangán hozzáadással. Azt is el kell fogadnunk, hogy a

mangán maga képes befolyásolni a mikroszerkezetet, mivel elősegíti a perlit kialakulását a ferrittel szemben.

Az kén kiegyensúlyozásához szükséges, olvadékhoz adagolható mangán mennyisége az alábbi szerint számítható:

$$\text{2.egyenlet: } \text{Mn}\% = 1,7x(\text{S}\%) + 0,3$$

A foszfor képes a vassal és a szénnel vegyületet alkotni háromfázisú eutektikumot képezve, 960 °C körüli olvadásponttal, következésképpen utolsó fázisként kristályosodva az olvadékban. Észrevehető mennyiségű foszfort tartalmazó szürkeöntvény mikroszerkezetében ilyen eutektikumok jelenléte mutatható ki. A foszfid eutektikum a természetben rideg, ellentétben az öntöttvas kristályosodása során kialakulttal. A foszfor szintén csökkenti a kristályosodási hőmérsékletet és módosítja a kristályosodási folyamatot, belső zsugorodás okozta hibák keletkezéséhez vezetve, az öntőforma tágulásának köszönhetően. A kristályosodási (dermedési) hőmérséklet csökkenése növeli a cementit képződésének esélyét a grafittal szemben.



9.ábra:
A beoltatlan (a) és a beoltott (b) vas kristályosodási görbéje

A zománcozható öntöttvassal kapcsolatos kutatásokban az elmúlt 60 évben a vezető szerepet az Aga-Rayburn Foundry Coalbrookdale végezte. A munkák eredményeként született tanulmány öt következtetést tartalmaz és megadja a javasolt szürkeöntvény kémiai összetételét.

- Magas széntartalom és a habgrafit elkerülendő (azaz a szénegyenérték értékét 4,65% alatt kell tartani)
- A cementit képződése kerülendő
- 0,12% kéntartalomig ennek ellensúlyozása mangánnal szükséges; $\text{Mn}\% = 1,7x(\text{S}\%) + 0,3$
- A legjobb mikroszerkezet egyenletes eloszlású, közepes finomságú lemezes grafit ferrit mátrixban, vagy ferrit és lemezes perlit
- Visszamaradó perlit a vasban nem szükséges

Elem	Min%	Max%
Összes szén	3,11	3,31
Szilícium	2,46	2,84
Kén	0,07	0,10
Foszfor	0,81	1,06
Mangán	0,49	0,77

1. táblázat:
A zománcozható öntöttvas kémiai összetétele
a rendelkezésre álló irodalom alapján

Az 1. egyenlet szerint fenti adatokból számított CE egyenérték:

$$CE_{\min} = 3,11 + 0,3(2,46) + 0,33(0,81) - 0,027(0,49) + 0,4(0,07) = \mathbf{4,13\%}$$

$$CE_{\max} = 3,11 + 0,3(2,84) + 0,33(1,06) - 0,027(0,77) + 0,4(0,1) = \mathbf{4,53\%}$$

A CE értéket általában a 4,3%-os érték alatt tartják, a habgrafit keletkezésének elkerülése végett. A foszfor helyett inkább szilíciumot használnak a kívánt CE érték biztosításához, hogy elkerüljék a magas foszforszint okozta negatív hatásokat.