

**MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
KERPELY ANTAL ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA**



**TRANSPORT FOLYAMATOK A
FÉM/FORMÁZÓANYAG
HATÁRFELÜLETEN**

Doktori (Ph.D.) értekezés

Svidró József Tamás
okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:
Dr. Diószegi Attila
címzetes egyetemi tanár

Társtémavezető:
Dr. Tóth Levente
ny. egyetemi docens

Miskolc
2011.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzések.....	4
2. Fémtranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen	5
2.1. A penetrációs öntvényfelületi hibák csoportosítása	5
2.1.1. Mechanikai penetráció	6
2.1.2. Kémiai penetráció.....	7
2.1.3. Gázexplozió okozta penetráció	7
2.1.4. Expanziós (tágulási) penetráció.....	7
2.1.4.1. H.G. Levelink és F.P.M.A. Julien elmélete.....	7
2.1.4.2. Diószegi Attila és Izudin Dugic elmélete	8
2.2. A fémtranszport folyamatok fizikai megközelítése.....	9
2.2.1. Metallosztatikus nyomás.....	10
2.2.2. Dinamikus nyomás.....	10
2.2.3. Az öntöttvas duzzadás során fellépő nyomás	11
2.2.4. A kapilláris nyomás	11
2.2.5. A sűrűlódás miatt bekövetkező nyomásesés.....	12
2.2.6. A formázókeverékből az öntés során keletkező gázok nyomása	13
2.3. A fémtranszport folyamatok fizikai-kémiai megközelítése.....	13
2.3.1. Az egyensúlyi penetrációs mélység és a fém/formázóanyag határfelület peremszöge.....	13
2.3.2. A felületi feszültség	14
2.3.3. A CPES modell (Closely Packed Equal Spheres).....	16
2.4. A vasolvadék foszfortartalmának jelentősége a penetráció kialakulásának folyamatában	17
2.4.1. A vasolvadék foszfortartalmának penetrációra gyakorolt hatása lemezgrafitos öntöttvas esetén	18
2.4.1.1. Korábbi kísérletek (Levelink és Julien).....	18
2.4.1.2. Saját kísérletek.....	20
2.5. A formázókeverék kén tartalmának jelentősége a penetráció kialakulásának folyamatában	22
2.5.1. A formázókeverék kén tartalmának penetrációra gyakorolt hatása lemezgrafitos öntöttvas esetén	23
2.5.1.1. Korábbi kísérletek.....	23
2.5.1.2. Saját kísérletek.....	25
2.5.2. A formázókeverék kén tartalmának penetrációra gyakorolt hatása gömbgrafitos öntöttvas esetén	31
2.5.2.1. Korábbi kísérletek.....	31
2.5.2.2. Saját kísérletek.....	33
2.6. Összefoglalás, új tudományos eredmények.....	40
3. Hőtranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen.....	42
3.1. A hőtranszport alapvető formái a formázókeverékekben.....	42
3.1.1. Kondukción	42
3.1.2. Konvekcion.....	43
3.1.3. Radiáción.....	44
3.2. Termikus analízis az öntészetben	45
3.2.1. Newton-, és Fourier-féle termikus analízis	45
3.3. A kísérleti módszer bemutatása	47
3.4. Kísérleti körülmények bemutatása	49
3.5. A hőmérséklet mérés eredményei.....	51
3.6. A Fourier-féle termikus analízis alkalmazása	54
3.7. A termikus analízis eredményei	55
3.8. A derivatográfus mérések eredményei	60
3.9. Szimuláción	61

3.9.1. A próbatest felhevülési folyamatának matematikai modellezése.....	61
3.9.1.1. A hővezetés alapegyenletének analitikus megadása	61
3.9.1.2. A hővezetés alapegyenletének numerikus megadása	62
3.9.1.3. A termikus ellenállás és a gömb térfogatának numerikus megadása	62
3.9.2. A hővezetés alapegyenletének megoldása gömb-koordináta rendszerben, FDM-CV módszerrel.....	64
3.10. A szimuláció eredménye	69
3.11. Összefoglalás, új tudományos eredmények.....	70
4. Gáztranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen	71
4.1. Összefüggés a műgyantakötésű magokban lejátszódó bomlási folyamatok, valamint a gázhólyagos selejtek kialakulása között	71
4.2. A kötőanyagok bomlása során felszabaduló gázok mennyiségét befolyásoló tényezők vizsgálata	74
4.2.1. A kötőanyag típusa	74
4.2.2. A kötőanyag mennyisége.....	75
4.2.3. Az alaphomok granulometriai tulajdonságai	76
4.2.4. A próbamag geometriája.....	76
4.2.5. Az alkalmazott magbevonat	77
4.2.6. A mag tárolási ideje	77
4.2.7. A fémolvadék hőmérséklete.....	78
4.3. Maggáz mennyiség mérése laboratóriumi körülmények között.....	79
4.4. Maggáz mennyiség mérése valós öntési körülmények között.....	79
4.4.1. A COGAS gázmennyiség mérő készülék	80
4.4.2. A C.E. Bates-féle gázmennyiség mérő készülék.....	81
4.5. Saját tervezésű gázmennyiség mérő készülék	81
4.6. Saját kísérletek.....	82
4.7. Összefoglalás, új tudományos eredmények.....	86
5. Összefoglalás.....	87
6. Irodalomjegyzék.....	89
7. Az értekezés témakörében megjelent publikációk	91

1. Bevezetés, célkitűzések

A járműipari öntvénygyártás jelentős fejlődést mutat világszerte, úgy mennyiségi, mint minőségi szempontból. Ebben az időszakban az öntvénytermelés hosszú és mély átalakuláson ment keresztül, melyben a számítógépesítés és az automatizálás játszotta a főszerepet. Azok a termelők tudták megtartani piaci pozíciójukat, amelyek komolyan beruháztak a számítógépes forma és magtervezésbe, a gépi vezérlésű olvasztási és öntési technológiákba, valamint robotizálták a magkészítést, a formaösszerakást, az öntvényeltávolítást, a szerszámmozgatást és az öntvénytisztítást.

Az elmúlt évtizedben az öntvények geometriája egyre bonyolultabbá vált, emellett az öntvényminőségre vonatkozó vevői elvárások is folyamatosan szigorodtak. Ilyen ütemű fejlődés mellett a különböző öntvényhibák megjelenése napjainkban már-már megengedhetetlen, ezért megelőzésükre, illetve kiküszöbölésükre szolgáló vizsgálati módszereknek is hasonló tempóban kell fejlődniük.

Doktoranduszi tevékenységem fő irányát a fém/formázókeverék határfelületen lejátszódó fém-, hő-, illetve gáztranszport folyamatok vizsgálata képezi. Céлом a határfelületi viszonyok eddigénél részletesebb tanulmányozása, valamint olyan korszerű kísérleti módszerek és berendezések kifejlesztése volt, melyek segítségével új, öntészeti szempontból hasznos ismeretek szerezhetők a transzport folyamatokról.

Disszertációm első részében a fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó fémtranszport folyamatokkal foglalkozom, ezen belül ismertetem a fémpenetráció jelenségének elméleti hátterét. Kísérleteim során a fémolvadékok felületi feszültségét módosító elemek (foszfor, kén) hatását tanulmányozom. Lemezes és gömbgrafitos próbaöntvények segítségével vizsgálom az öntöttvas olvadék foszfortartalmának és az öntési hőmérsékletnek, valamint a formázókeverékek kéntartamának hatását a fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó bonyolult fizikai és fizikai-kémiai folyamatokra, melyek a penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulását eredményezik.

Disszertációm második részében a fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó hőtranszport folyamatokkal, azon belül is a homokkeverékek hőfizikai tulajdonságaival foglalkozom. Kísérleteim során a szakirodalomból ismert Fourier-féle termikus analízis felhasználásával új szempontból közelítem meg a formázókeverékek felhevülési, valamint a kötőanyagok bomlási folyamatait. A próbamagokban lejátszódó hőfizikai jelenségek matematikai megfogalmazása alapján modellezem a hő kondukció útján történő terjedését.

Disszertációm harmadik részében a fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó gáztranszport folyamatokat vizsgálom, különös tekintettel a homokkeverékben lejátszódó, gázképződéssel járó reakciókra. Ismertetem a formázóanyagok bomlási folyamatainak szerepét a gázhólyagos selejteik kialakulásában, majd korábbi szerzők eredményei alapján tárgyalom a felszabaduló gázok mennyiségét befolyásoló fontosabb tényezőket. Bemutatom saját tervezésű mérőrendszeremet, amely segítségével lehetőségem nyílik a gázfelszabadulásra jellemző tulajdonságokat a hőmérséklet, valamint a formázókeverékek hőtani tulajdonságainak függvényében is vizsgálni.

2. Fémtranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen

A fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó fémtranszport folyamatok bonyolult fizikai, mechanikai és/vagy termokémiai reakciók, vagy azok kombinációi nyomán alakulnak ki, és az ún. penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulását eredményezhetik. A penetráció Draper és Gaindar [1] definíciója szerint az a folyamat, amikor öntés során a folyékony fém kitölti a formát alkotó homokszemcsék közötti teret, és a szemcsék közé változó mélységig hatol be. A fémbehatolás során a szemcsék nem mozdulnak el, így létrejön egy, a fém által körbevett homokszemcséket, valamint a határfelületen lejátszódó kémiai reakciók termékeit tartalmazó réteg. A penetráció megjelenése elsősorban a hőcentrumokban, illetve a nagy falvastagságú öntvényrészekben jellemző.

Vékonyfalú öntvények esetén, a külső felületen megjelenő penetráció viszonylag kisebb problémát okoz, mert sörétes tisztításkor hosszabb tisztítási idővel a hiba megszüntethető. Alakos öntvények esetén azonban, amikor a penetráció a belső felületen jelenik meg, ráadásul az öntvény funkcióját is befolyásolja, akkor az esetek nagy százalékában a darab selejt lesz.

2.1. A penetrációs öntvényfelületi hibák csoportosítása

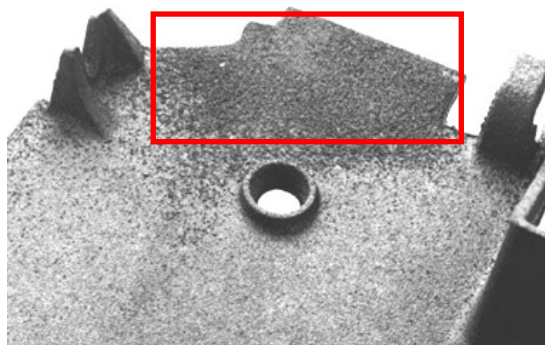
A penetrációs öntvényfelületi jelenségek alapvetően a hiba mértéke alapján csoportosíthatóak:

Durva, érdes öntvényfelület: a folyékony fém a homokszemcsék első, felületi rétegének közepéig hatol be, kémiai reakció nem játszódik le a folyékony fém és a homokszemcsék között, a szemcsék csak feltapadnak az öntvényfelületre, amelyen kis kitüremkedések láthatóak. Ezek könnyedén eltávolíthatóak egyszerűbb felülettisztítási módszerekkel.



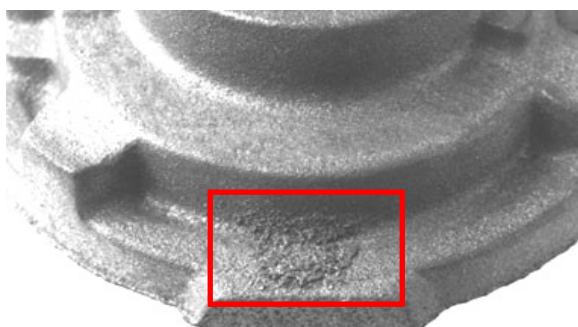
2.1. ábra - Lemezgrafitos vasöntvény durva, érdes felülete [2]

Ráégés: a folyékony fém a homokszemcsék első, felületi rétegének közepétől mélyebbre hatol be és kémiai reakcióba lép a homokszemcsékkel, fayalit típusú vegyületeket létrehozva. Az öntvényfelület szemcseszórásos öntvénytisztítással javítható.



2.2. ábra - Ráégéses felületi hiba vasöntvény felületén [2]

Fémbetörés: ez a szó szerinti értelemben vett penetráció, a folyékony fém a szemcsék első felületi rétegén is túljut, a szorosan összekapcsolódó fém és homokszemcsék keveréke erősen tapad a felülethez, ami köszörüléssel is nehezen javítható. [3]



2.3. ábra - Penetrációs hiba lemezgrafitos öntöttvas felületén [2]

Korábbi szerzők számos módon nevezték el a jelenség egyes megjelenési formáit. P. J. Thorpe [4] a forma tömörsége alapján definiál laza, valamint tömör formázókeverékekbe történő fémbehatolást, ez a csoportosítás azonban nem elég pontos, mivel nem veszi figyelembe a hiba kialakulásának mechanizmusát.

DiSylvestro [5] adta meg azt a ma is elfogadott besorolást, amely a penetráció fajtáit a kialakulás folyamata szerint az alábbi négy kategóriába csoportosítja:

- mechanikai penetráció,
- kémiai penetráció,
- gázrobbanásos (explosion) penetráció,
- tágulós (expansion) penetráció.

2.1.1. Mechanikai penetráció

Definíció szerint [4], a mechanikai penetráció során a folyékony fém a metallosztatikus nyomás hatására jut el a formát alkotó homokszemcsék közé. A jelenség kialakulását elősegítő, illetve az ellene ható főbb tulajdonságok az 2.1. táblázatban láthatóak.

2.1. táblázat - A penetráció kialakulását befolyásoló fontosabb tulajdonságok

Penetrációt elősegítő tulajdonságok	Penetráció ellen ható tulajdonságok
metallosztatikus nyomás	fémolvadék felületi feszültsége
homok szemcsemérete (permeabilitás)	fémolvadék és formázóanyag közötti nedvesítési szög
öntési hőmérséklet	formázóanyag sűrűsége

A szemcsék közötti átlagos pórusátmérő tekinthető a mechanikai penetrációt leginkább befolyásoló paraméternek, amely a homok szemcseméretéből, valamint a tömörítettség mértékéből adódik.

Így a szemcseméret csökkenésével és/vagy a tömörítettségi mutatók növelésével csökken a penetrációs hibák kialakulására való hajlam.

2.1.2. Kémiai penetráció

Kémiai penetráció akkor jön létre, amikor az olvadék felszínén lévő oxidréteg reakcióba lép a szilícium-dioxid szemcsékkel a fém/formázóanyag határfelületén. Ez az egyik legnehezebben azonosítható ilyen típusú felületi hiba, mivel a lejátszódó kémiai reakció során számos vegyület keletkezik.

Savage és Taylor [6] vizsgálataik során fayalitot (vasszilikát, Fe_2SiO_4) mutattak ki a fém/formázóanyag határfelületén, amelyet a lejátszódó bonyolult kémiai reakciók végtermékeként azonosítottak. A fayalit típusú vegyületek az olvadék levegő, vagy szén-dioxid által történő felületi oxidációja, majd az ezt követő szilícium-dioxiddal történő reakció nyomán keletkeznek.

A hiba leghatásosabban redukáló atmoszféra, valamint kevésbé reakcióképes tűzálló mátrix alkalmazásával előzhető meg. [7]

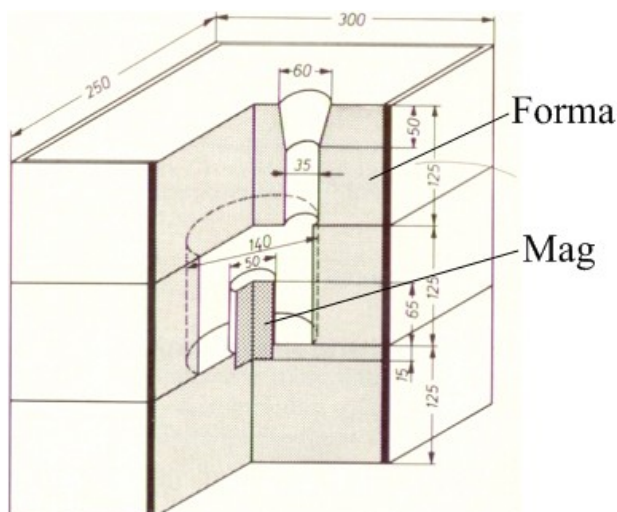
2.1.3. Gázexplozió okozta penetráció

Bentonitos keverék előkészítéskor könnyen kialakulhatnak a formázóanyag nedvességtartalmánál lényegesen magasabb nedvességtartalmú, porszerű anyagot és bentonitot tartalmazó agglomerátumok, melyek formakészítéskor véletlenszerűen a formaüreg felületére kerülhetnek. Öntéskor, amikor a folyékony fém ilyen agglomerátummal érintkezik, akkor annak környezetében a nedvességtartalom hirtelen elgőzölög. A képződő vízgőz miatt a formázóanyag pórusaiban a gáznyomás robbanásszerűen megnövekszik. A gázrobbanás miatt a kérdéses helyeken a formázóanyag tömörsége lecsökken, így az olvadék a tűzálló szemcsék között lévő nagyobb méretű pórusokba képes behatolni. Az ilyen típusú hiba javítása öntvénytisztításkor ugyan többlet költséget okoz, de emiatt a darabot nem szokták leselejtezni. Az öntvény felületén a „gázexplozió okozta penetráció” arról ismerhető fel, hogy az öntvény felület a kérdéses területeken érdes lesz. [8]

2.1.4 Expanziós (tágulási) penetráció

2.1.4.1. H.G. Levelink és F.P.M.A. Julien elmélete

Az expanziós penetráció kialakulását H. G. Levelink és F. P. M. A. Julien [9] vizsgálta. Az ilyen típusú hibák kialakulására elsősorban közepes és nagy falvastagságú öntvények esetén lehet számítani. A szerzők vizsgálataikhoz a 2.4. ábrán látható próbatestet öntötték nedves formázókeverékből készült formába. A furángyantás magkeverék összetételét változtatták.



2.4. ábra - H.G.Levelink és F.P.M.A. Julien kísérleteihez használt próbatest formametszete [9]

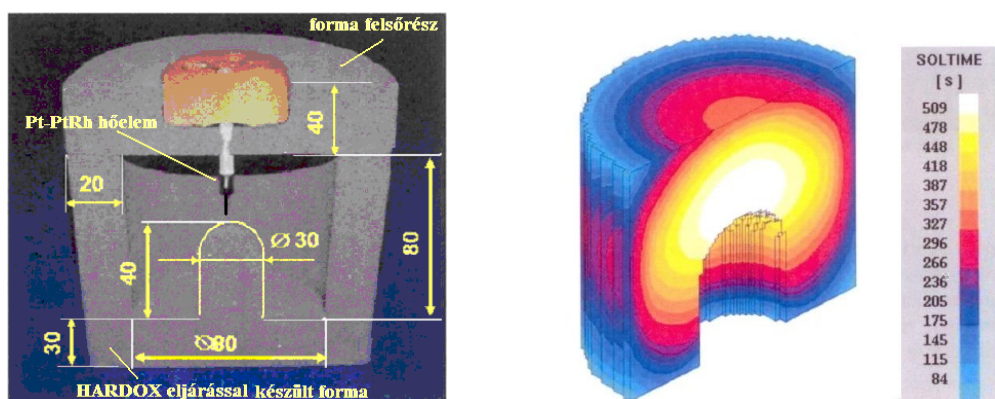
H.G. Levelink és F.P.M.A. Julien megfogalmazása szerint az expansziós penetrációt, a folyékony öntöttvas térfogat növekedése okozza, ami a grafitkiválás következménye. Ezután az olvadék behatolhat a formázóanyag szemcséi közé, ami kiterjedt penetráció megjelenését eredményezheti. Öntöttvas esetén az ausztenit-grafiteutektikum a kristályosodás során tágul, ami jelentős nyomást gyakorol a formafalra. Ha a forma nagy szilárdságú, akkor a fém visszapréselődik a tápfejbe, csökkentve a fogyási üreg kialakulását, illetve annak méretét. A kristályosodási nyomáshoz a metallosztatikus nyomás értéke is hozzáadódik, adott feltételek mellett, az erők összeadódása elősegítheti az expansziós penetráció kialakulását.

A fémbehatolás ezen fajtáját először H.G.Levelink és F.P.M.A. Julien azonosította, ők „szivárgásos” penetrációnak nevezték el. Azt tételezték fel, hogy az eutektikus kristályosodás során fellépő tágulás az eutektikus fázis beszivárgását okozhatja a forma felületi rétegébe olyan helyeken, ahol a szilárduló kéreg nem zárja el a szivárgás útját, és a penetráció által megtámadott formafelület kizárólag konvex geometriájú. Párhuzamosan vizsgálták a formázóanyag és a rendelkezésre álló fém mennyiségi változásait és azt a következtetést vonták le, hogy a penetráció és esetlegesen a zsugorodásos porozitás kialakulása is visszavezethető az elégtelen formatömorség okozta méretnövekedésre és a folyékony fémmennyiség egyenlőtlenségeire.

2.1.4.2. Diószegi Attila és Izudin Dugic elmélete

Az expansziós penetráció kialakulását Diószegi Attila és Izudin Dugic [10] szürkevas esetén tanulmányozták. Szerintük a jelenség kialakulásának részletesebb megismerése céljából még alaposabban kell megvizsgálni a formázóanyag és a kristályosodó fém kölcsönhatását, különös tekintettel a dermedés közben bekövetkező fajtérfogat változásokra és azok mennyiségi összefüggéseire, valamint további fejlesztésekre van szükség a formagyártás és a primer ausztenit öntöttvasakban tanúsított viselkedésének terén is. A skövdei Volvo öntödében a szűrketőretű öntöttvas formafaltól induló kristályosodását tanulmányozták különböző öntési kísérletekkel. A kísérletek során vizsgálták a primér (eutektikus) kristályszerkezet kialakulását, valamint azt, hogy az egyenlő szárú ausztenit kristályok növekedését mi és hogyan blokkolja. Tanulmányozták a formafaltól növekedő oszlopos ausztenit egyenlő szárú ausztenitté történő átalakulásának folyamatát és ennek hatását a penetráció kialakulására.

A kísérletekhez egy hengeres, belső maggal rendelkező próbaöntvényt terveztek (2.5. ábra), melyet úgy alakítottak ki, hogy a darab hőközpontja a fém/formázóanyag határfelületen legyen. A próbatest geometriájának optimalizálását a MAGMASoft szimulációs szoftverrel készítették el. A kísérletek során a próbatest felülről történő leöntését követően helyezték a forma felületére a felső részt, amelybe egy hőelemet is beépítettek.

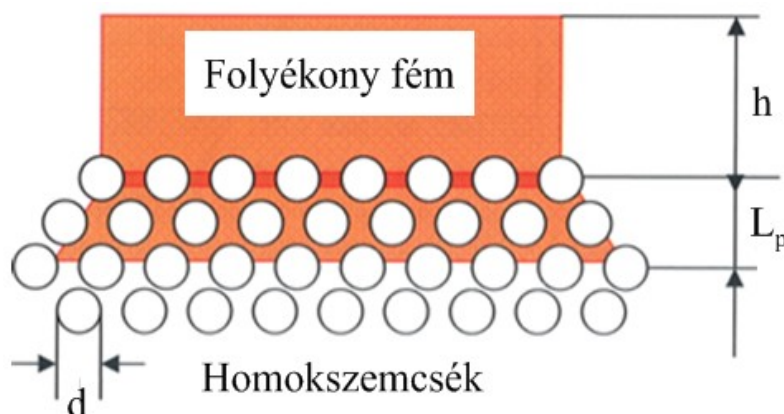


2.5. ábra - A próbaöntvény formájáról készült fénykép a jellemző méretekkel, valamint az öntvény dermedésének szimulációja [10]

A kísérleti eredmények alapján megállapították, hogy a bonyolult mechanizmusokat magában foglaló penetráció jelensége nem csak a szilárduló fázisok kiválásának köszönhető mennyiségi változásoktól és a formafelület hő okozta tágulásától függ, hanem az oszlopos ausztenit zóna deformációjától is. Bebizonyosodott, hogy a jelenség az oszloposból az egyenlő szárú ausztenit zóna történő átalakulás előtt és után is kialakulhat.

2.2. A fémtranszport folyamatok fizikai megközelítése

A penetráció kialakulása a fém/formázóanyag határfelületen megy végbe, ezért fontos tényező az itt szerepet játszó nyomásviszonyok ismerete és vizsgálata. A 2.6. ábrán látható a fém/formázóanyag határfelület elvi ábrája, valamint főbb méretei:

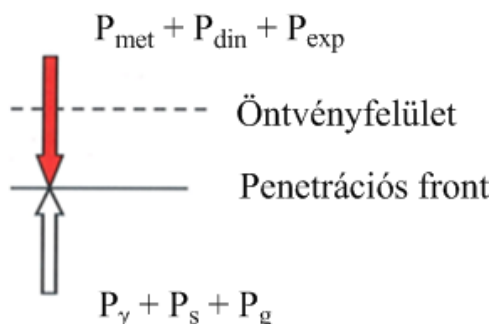


2.6. ábra - Fém/formázóanyag határfelület [3]

ahol,

- h : a penetrációs zóna feletti fémtömeg magassága, m
- L_p : a penetráció mélysége, m
- d : a homokszemcsék átmérője, m

A 2.7. ábra mutatja a fém/formázóanyag határfelületen fellépő különböző nyomásokat.



2.7. ábra - A fém/formázóanyag határfelület nyomásviszonyai [3]

A folyékony fém kifejt egy metallosztatikus nyomást, P_{met} , egy, a formatöltéskor a sebességéből adódó dinamikus nyomást, P_{din} , valamint öntöttvas esetén a fém oldalról szerepet játszhat még a duzzadás miatt fellépő nyomás P_{exp} . Ezek mind a fém bejutását segítik elő a formázókeverék pórusaiba.

A fém betörése ellen hat a kapilláris nyomás, P_γ , a fém és a formázóanyag szemcsék közti súrlódásból adódó nyomáskeresés, P_s , és a formázóanyagból az öntés során keletkező gázok nyomása, P_g . Ezek alapján felírható egy egyenlőség, amely leírja a fém/formázóanyag határfelületen ható különböző nyomások egyensúlyát:

$$P_{met} + P_{dyn} + P_{exp} = P_{\gamma} + P_s + P_g \quad (2.1)$$

Ha az egyenlet bal oldala, tehát a folyékony fém által kifejtett nyomások eredője nagyobb, mint a formaoldalról szerepet játszó nyomások eredője, akkor bekövetkezik a folyékony fémnek a forma pórusaiba történő behatolása:

$$P_{met} + P_{dyn} + P_{exp} > P_{\gamma} + P_s + P_g \quad (2.2)$$

Ha az egyenlet jobb oldala, tehát a formázóanyag oldalról szerepet játszó nyomások hatása erősebb, akkor nem jön létre fémbetörés, nem alakul ki penetrációs hiba:

$$P_{met} + P_{dyn} + P_{exp} < P_{\gamma} + P_s + P_g \quad (2.3)$$

Ha az egyenletben bármelyik tényező értéke is változik, akkor az egyensúly már nem áll fenn, ezért fontos mindegyiket külön vizsgálni, értékelni. [3]

2.2.1. Metallosztatikus nyomás

A metallosztatikus nyomás magából a formában lévő fém tömegéből adódik, ami a következő egyenlettel számítható:

$$P_{met} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

ahol,

- P_{met} : metallosztatikus nyomás, Pa
- ρ : a folyékony fém sűrűsége, kg/m^3
- g : a gravitációs gyorsulás $= 9.81 \text{ m/s}^2$
- h : a penetrációs zóna feletti fémtömeg magassága, m

A metallosztatikus nyomással a formatöltés kezdetétől számolni kell egészen addig, amíg számottevő szilárd fázis nem alakul ki. Ekkor már nincs hatással a folyamatra, mivel a formafal nem érintkezik folyékony fémmel.

2.2.2. Dinamikus nyomás

A dinamikus nyomás a folyékony fém sebességéből adódik öntés közben. Az alábbi egyenlettel számítható:

$$P_{din} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2.5)$$

ahol,

- P_{din} : dinamikus nyomás, Pa
- ρ : a folyékony fém sűrűsége, kg/m^3
- v : a sebesség, amellyel a folyékony fém a formafalnak ütközik, m/s

Nagysága függ az álló és a bekötőcsatornák méreteitől, keresztmetszet arányaitól. Nagyobb öntési sebességeknél könnyebben kialakul a penetrációs hiba, ezért fontos a megfelelő öntési sebesség beállítása, amely precízen kivitelezett beömlő rendszer méretezéssel és kialakítással megvalósítható. [11]

2.2.3. Az öntöttvas duzzadás során fellépő nyomás

Amikor az öntöttvas kristályosodik, az olvadékból oldott karbon atomok egy része átalakul ausztenit-grafit eutektikumra. Az eutektikum fajlagos térfogata nagyobb, mint az olvadéké. Ha a karbon koncentrációja magasabb, mint 3.6%, akkor a szilárd fázis nagyobb mértékben tágul, mint az olvadék.

A durvaszemcsés öntöttvas megszilárdulásakor a még olvadt állapotban lévő fém könnyen tud mozogni azokban a csatornában, amelyek a nagy eutektikus cellákat kötik össze. A tágulás hatására kialakuló nyomás következtében a fém be tud törni a forma pórusaiba [9, 12].

2.2.4. A kapilláris nyomás

Ha egy folyadék egy kapilláris csőben van, attól függően hogy nedvesíti-e a cső falát, a kapilláris nyomás eredményeképpen fog mozogni:

$$P_\gamma = -\frac{2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{d_e} \quad (2.6)$$

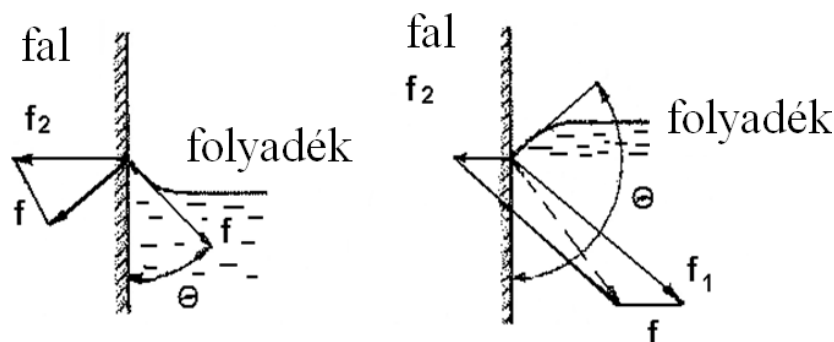
ahol,

- P_γ : kapilláris nyomás, Pa
- d_e : átlagos pórusátmérő, m
- $\gamma_{LV} \cos \theta$: folyadék/szilárd, folyadék/gőz és szilárd/folyadék határfelületek egyensúlyi felületi feszültsége, N/m
- γ_{LV} : a felületi feszültség a folyadék/gőz határfelületen, N/m

$$\gamma_{LV} = \frac{h_k \cdot r \cdot \rho \cdot g}{2 \cos \theta} \quad (2.7)$$

- θ : folyadék nedvesítési szöge
- h_k : a kapilláris cső és a folyadékszint különbsége, m
- r : a kapilláris cső sugara, amelyben a folyadék áramlik, m
- ρ : a folyadék sűrűsége, kg/m³
- g : a gravitációs gyorsulás = 9.81 m/s²

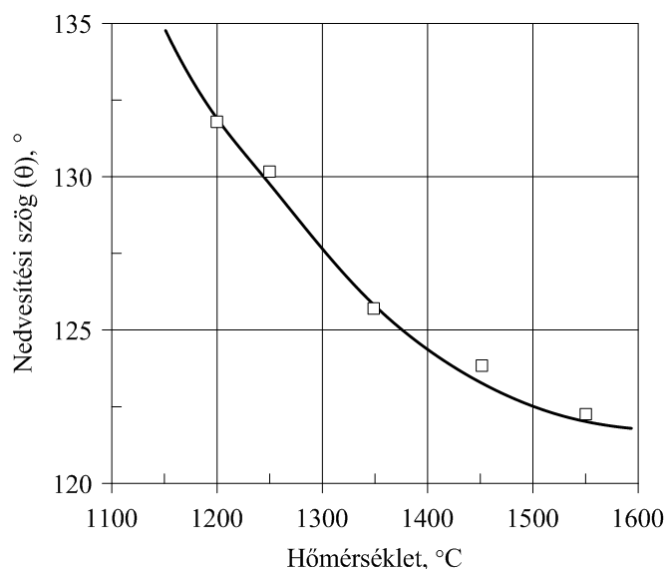
Ha a folyadék nedvesítési szöge hegyesszög, akkor nedvesíti a falat, így a kapilláris nyomás értéke negatív lesz. Ha a nedvesítési szög tompaszög, akkor a folyadék nem nedvesíti a falat, a kapilláris nyomás értéke pozitív lesz (2.8. ábra).



2.8. ábra - A kapilláris modell [13]

A fémolvadékok nedvesítési szöge jellemzően tompaszög, így nem nedvesítik a formázóanyagot. A kapilláris nyomás értéke ekkor pozitív, ezért a penetráció kialakulása ellen hat.

A nedvesítési szög nagymértékben függ az öntési hőmérséklettől (2.9. ábra), valamint a fém és a formázókeverék összetételétől is. [13]



2.9. ábra - Fe-C-Si ötvözet és kvarchomok közötti nedvesítési szög, a hőmérséklet függvényében [3]

2.2.5. A súrlódás miatt bekövetkező nyomásesés

A folyékony fém és a homokszemcsék súrlódása miatt bekövetkező nyomásesés a következő egyenlettel írható le:

$$P_s = \frac{\eta}{K} \cdot L_p \cdot v_p \quad (2.8)$$

ahol,

- P_s : súrlódás miatt bekövetkező nyomásesés, Pa
- η : a folyékony fém viszkozitása, N/m^2
- L_p : az úthossz, amin keresztül a fém átáramlik (penetráció mélység), m
- v_p : a fém sebessége a homokszemcsék között, m/s
- K : a formázókeverék permeabilitása a Blake-Kozeny összefüggés alapján:

$$K = \frac{(1-f_d)^3}{180f_d^2} \cdot d_e^2 \quad (2.9)$$

ahol,

- f_d : a formázóhomok relatív sűrűsége (tömörített térfogatsűrűség/elméleti sűrűség), kg/m^3
- d_e : átlagos pórusátmérő, m

A folyékony fém viszkozitása nagymértékben függ a hőmérsékletétől. A fémolvadékok viszkozitásának hőmérséklet függését Kaptay [14] szerint az:

$$\eta_i = A \cdot \frac{M_i^{1/2}}{V_i^{2/3}} \cdot T^{1/2} \cdot \exp\left(B \cdot \frac{T_{m,i}}{T}\right) \quad (2.10)$$

egyenlet írja le ahol,

- η_i : a folyékony fém viszkozitása, N/m^2
- M_i : az atomtömeg, kg
- V_i : a moláris térfogat, dm^3/mol
- A és B kísérletek alapján meghatározott paraméterek:
 $A = (1.80 \pm 0.39) \cdot 10^{-8} (\text{J/Kmol}^{1/3})^{1/2}$ $B = 2.34 \pm 0.20$
- $T_{m,i}$: a fém olvadáspontja, °C
- T: a fémolvadék hőmérséklete, °C

Ahogy a formázókeverék permeabilitása nő, a sűrűdési ellenállás csökken. A formázókeverék szemcsenagyságának növelése növeli a permeabilitást és a penetráció kialakulásának lehetőségét. A szemcsenagyság csökkentése csökkenti a formázóanyag permeabilitását, csökkentve ezzel a penetráció előfordulásának esélyét.

2.2.6. A formázókeverékből az öntés során keletkező gázok nyomása

Amikor a folyékony fém nedves bentonitos, vagy hidegen kötő gyantás formázókeverékből készült formába öntik, a nedvességtartalom elpárolog, gőzök és gázok keletkeznek, amelyeket a folyékony fém közvetlenül melegít fel. Ennek hatására nyomás alakul ki, amely nagyságától függően gátolhatja a fémbehatolást. [8]

2.3. A fémtranszport folyamatok fizikai-kémiai megközelítése

A penetrációs hibák kialakulásában a következő fizikai-kémiai paraméterek játszanak döntő szerepet:

- az egyensúlyi penetrációs mélység,
- a fém/formázóanyag határfelület peremszöge,
- a folyékony fém felületi feszültsége.

2.3.1. Az egyensúlyi penetrációs mélység és a fém/formázóanyag határfelület peremszöge

Az előző fejezetben ismertetett egyenleteket összegezve és megoldva a penetrációs mélységre (L_p), a következő összefüggést kapjuk:

$$L_p = \left[\frac{d^2 t_p}{180 \eta} \cdot \frac{(1-f_d)^3}{f_d^2} \cdot \left(\rho g h_k + \rho v^2 + \frac{4}{d_e} \gamma_{LV} \cos \theta \right) \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Korábbi szerzők [15,16] a peremszög és a penetrációs mélység közötti kapcsolatot vizsgálták, mivel a fém/formázóanyag határfelületen lévő peremszöget lehet a leginkább kontrollálni. Ha ez a peremszög egy bizonyos kritikus érték fölött marad, a penetráció nem következik be. Így a (2.11) egyenletet a következőképpen lehet felírni egy *kritikus peremszög* (θ_{cr}) értékre (a gáznyomás és az öntöttvas tágulásából adódó nyomás elhanyagolása esetén):

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{d_e}{4\gamma_{LV}} \cdot (\rho g h_k + \rho v^2) \right] \quad (2.12)$$

A penetrációs index fogalmát D.M. Stefanescu [17] vezette be. Számításánál az aktuális és kritikus peremszög hányadosát veszi figyelembe:

$$P = \frac{\theta_a}{\theta_{cr}} \quad (2.13)$$

ahol,

- θ_a : aktuális peremszög
- θ_{cr} : kritikus peremszög

Ha,

- $P > 1$ nincs penetráció
- $0 < P < 1$ mechanikai penetráció
- $P < 1$ kémiai penetráció.

Az *aktuális peremszög* függ az öntési hőmérséklettől, a fémolvadék és a formázókeverék összetételétől, valamint a fém/formázóanyag határfelületen kialakuló gázatmoszféra összetételétől.

A *kritikus peremszög* függ a homok átlagos pórusátmérőjétől, szemcseösszetételétől, térfogatsűrűségétől, a folyékony fém felületi feszültségétől és sűrűségétől, a metallosztatikus nyomástól, valamint a fém áramlási sebességétől a formában.

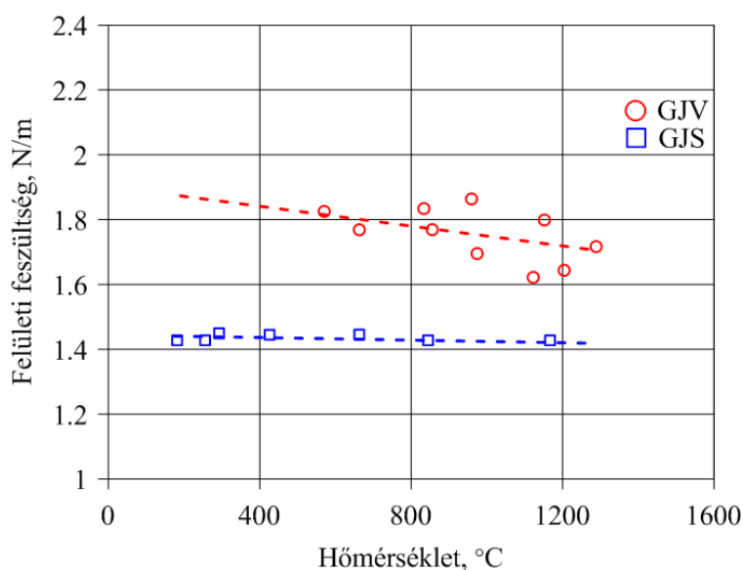
2.3.2. A felületi feszültség

A (2.6) összefüggés alapján a hiba kialakulásában a fém metallosztatikus nyomásának egyenletéből kifejezett felületi feszültség értékének is nagy szerepe van, mivel a folyékony fém felületi feszültsége jelentősen befolyásolja a peremszög értékét, ezáltal a nedvesíthetőséget.

Az öntöttvas felületi feszültségét az öntött ötvözet összetétele (2.2. táblázat), az öntési hőmérséklet (2.10. ábra), valamint különböző kémiai elemek is befolyásolják (2.11. ábra)

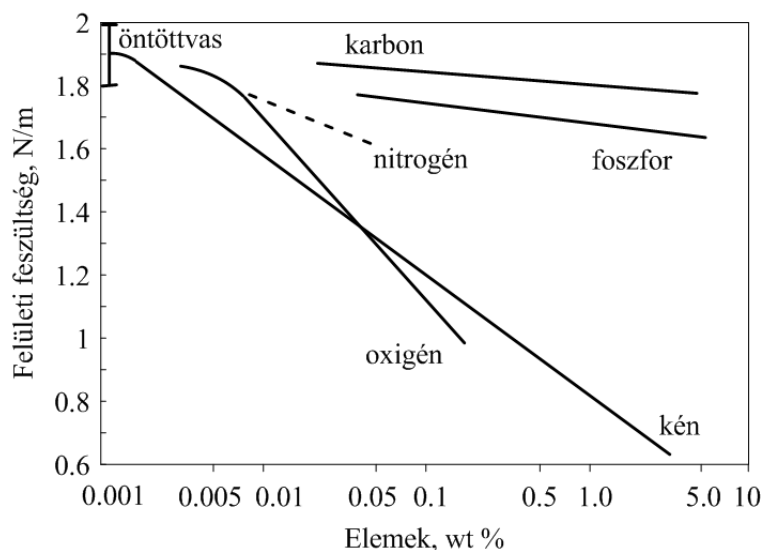
2.2. táblázat - Különböző ötvözetek felületi feszültség értékei [8]

Anyagminőség	Hőmérséklet, °C	Felületi feszültség, N/m	Szerzők
Réz	1150	1.12	Sauerwald
Öntöttvas (3.9% C)	1400	1.3	Sauerwald és munkatársai
Thomas-nyersvas	1200	1.1	Becker, Harders
Nyersvas	1250/1350	0.85/0.95	Marincek
Foszfor tartalmú nyersvas	1300	1.05	Sauerwald és munkatársai
Öntöttvas	1300	1.1	Scheil, Pohl
Lemezgrafitos öntöttvas		0.99	Patterson, Ammann
Gömbgrafitos öntöttvas		1.27	Engler
Tempervas (2.2% C)	1420	1.5	Dr. Nándori Gy.
Acél (0.3% C)	1520	1.5	Dr. Nándori Gy.



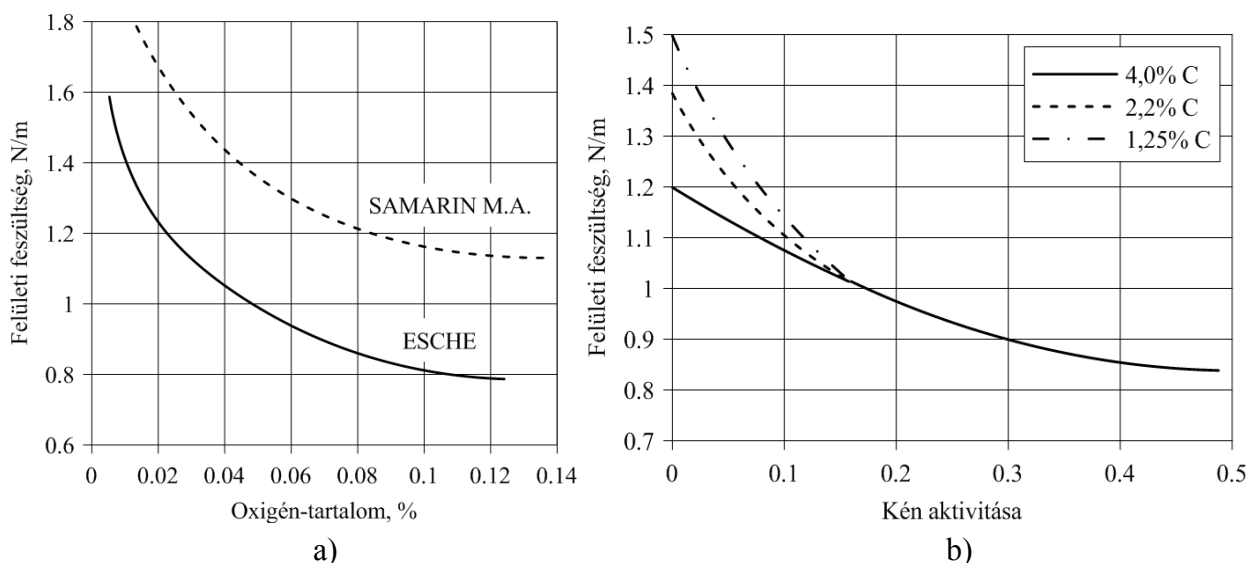
2.10. ábra - Összefüggés az átmeneti (GJV)- és gömbgrafitos (GJS) öntöttvas felületi feszültségének változása és a hőmérséklet között [18]

Az 2.2. táblázat és a 2.10. ábra adatainak összevetése alapján megállapítható, hogy a felületi feszültség adatok jelentős szórást mutatnak. Ennek oka, hogy a vizsgált adagok az öt elemen kívül (C, Si, Mn, P, S) változó mennyiségben tartalmaztak különféle szennyező elemeket is.



2.11. ábra - Különböző elemek hatása az öntöttvas olvadék felületi feszültségére 1550-1570°C között [3]

A 2.11. ábra alapján megállapítható, hogy az oxigénnek, a kénnek, a foszfornak és a nitrogénnek van jelentősebb hatása a felületi feszültségre [19, 21]. A 2.12. ábra az oxigéntartalom, és a kénaktivitás felületi feszültségre gyakorolt hatását szemlélteti.



2.12. ábra - A felületi feszültség változása az oxigéntartalom (a), illetve a kénaktivitás (b) függvényében [20]

Látható, hogy a kénaktivitás és az oxigéntartalom függvényében a felületi feszültség értéke csökken.

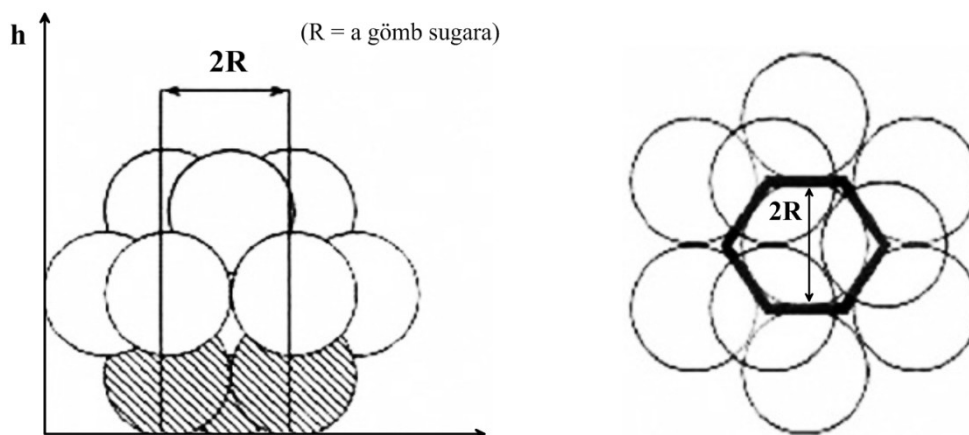
További kutatások azt mutatták ki, hogy a mangánnak, 1.5% mangántartalom felett szignifikáns hatása van a felületi feszültség csökkenésére. Ezen mennyiség alatt a hatás nem jelentős, mivel a kén jelenlétében MnS keletkezik, ami nem oldódik az öntöttvasban. [19]

A magnézium szerepe összetettebb. A magnézium reagál mind a kénnel, mind pedig az oxigénnel. Kialakul a MgO és a MgS, amelyek az öntöttvasban nem oldódnak és növelik a

felületi feszültséget, mert a felületaktív elemeket eltávolítják az olvadékból. Ez a jelenség csak 0.018% magnézium-tartalomig tart, e fölött a felületi feszültség csökken a megmaradt szabad magnézium beoldódásának köszönhetően. [21]

2.3.3. A CPES modell (Closely Packed Equal Spheres)

Ez az újfajta termodinamikai modell a hagyományos kapilláris modellnél sokkal pontosabban jellemzi a valós szemcsés anyagok szerkezetét. A modellhez tartozó geometria a 2.13. ábrán látható.



2.13. ábra - A CPES struktúra a penetráció „magasságának” (h) és a térfogategység keresztmetszetének (vastag vonal) függvényében [16]

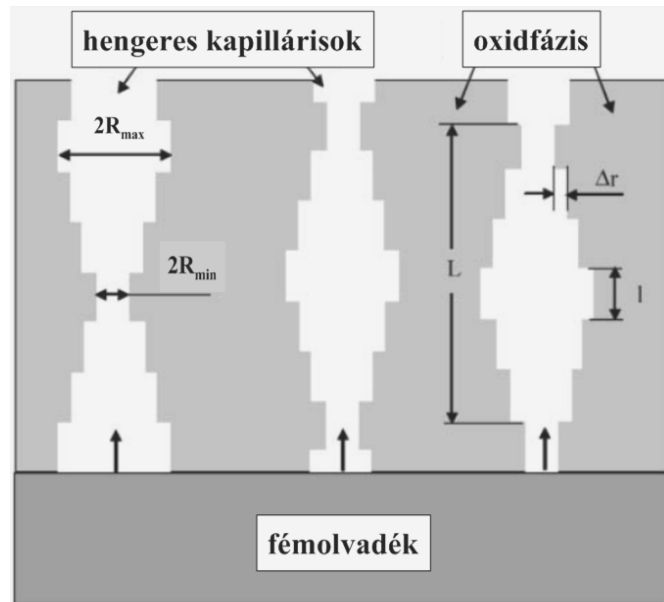
Az ideális homokforma azonos méretű, szoros illeszkedésű szemcsékből (gömbökből) áll, tetraédes elrendezésben. A modell a penetrációt az elrendezés (111) síkjára merőlegesen vizsgálja, feltételezve, hogy a folyadéksztint a gömbök között lévő pórusokban alulról felfelé halad. A modell lényege, hogy a küszöbnyomást a penetrációs mélység és a peremszög függvényeként adja meg, mely alapján az alábbiakat fogalmazza meg:

- ha $\theta=180^\circ$, akkor a folyadék bármely magasságba történő penetrációjához külső nyomásra van szükség
- ha $50.7^\circ < \theta < 180^\circ$, akkor kezdetben a penetráció spontán folyamat, majd a makroszkopikus penetrációhoz ismét külső nyomásra lesz szükség
- ha $\theta < 50.7^\circ$, a penetráció spontán lejtátszódik.

A CPES modell kritikus peremszöge így 50.7° , szemben a hagyományos kapilláris modellel, ahol ez az érték 90° .

Emellett Kaptay [16] leírta a „pre-penetráció” modelljét is, ami alatt a makroszkopikus penetrációhoz tartozó, küszöbnyomás alatti nyomáson fellépő viszonylag kismértékű penetrációt érti. Ehhez kidolgozta a „periodikusan változó sugarú kapilláris” modellt (2.14. ábra), amely esetén:

- minden pórus egy függőleges, hengeres kapilláris, melyek sugarai periodikusan változnak egy minimális (r_{min}) és egy maximális (r_{max}) érték között,
- minden kapilláris l hosszúságú, sugaruk lépcsőzetesen változik Δl lépésközzel,
- a kapillárisok ugyan egyformák, de az alsó fémolvadék/kerámia határfelülelettől eltérő sugárral indulnak.



2.14. ábra - A „periodikusan változó sugarú kapillaris” modell [18, 22]

A 2.6. összefüggés alapján értelmezhető egy, a minimális kapillaris sugarhoz tartozó maximális küszöbnyomás, valamint a maximális kapillaris sugarhoz tartozó minimális küszöbnyomás:

$$\Delta P_{0,th,min} = - \frac{2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{r_{max}} \quad (2.14)$$

$$\Delta P_{0,th,max} = - \frac{2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{r_{min}} \quad (2.15)$$

Pozitív kapillaris nyomással rendelkező, nem nedvesítő fémolvadékot feltételezve, a penetráció kialakulásának folyamata három szakaszra bontható:

- 1.szakasz: $P_0 < \Delta P_{0,th,min}$ - a külső nyomás alacsonyabb, mint a minimális küszöbnyomás, ekkor a penetráció egyáltalán nem következik be,
- 2.szakasz: $\Delta P_{0,th,min} < P_0 < \Delta P_{0,th,max}$ - a külső nyomás a minimális és a maximális küszöbnyomás értéke közé esik, ez a „pre-penetrációs” szakasz,
- 3.szakasz: $P_0 > \Delta P_{0,th,max}$ - a külső nyomás magasabb, mint a maximális küszöbnyomás, ekkor a penetráció valamennyi kapillarisban létrejön [18].

2.4. A vasolvadék foszfortartalmának jelentősége a penetráció kialakulásának folyamatában

A foszfor hatásának szakirodalmi szintű megítélése meglehetősen ellentmondásos, mert az ott megjelent közlemények és eredmények sokszor nincsenek összhangban az üzemi tapasztalatokkal. A magas foszfortartalmú öntöttvasakat kedvezőbb formakitöltő képességük miatt kis falvastagságú díszöntvények gyártásához használják. A formakitöltő képesség magában foglalja a folyékonyság fogalmát is. A jobb folyékonyság alacsonyabb felületi feszültség értékekkel jár együtt, mely alacsony értékek elvileg a penetráció kialakulását segítik elő, az üzemi tapasztalat mégis az, hogy a vékony falú cizellált díszöntvények felületi minősége annál jobb, minél magasabb a foszfortartalmuk.

2.4.1. A vasolvadék foszfortartalmának penetrációra gyakorolt hatása lemezgrafitos öntöttvas esetén

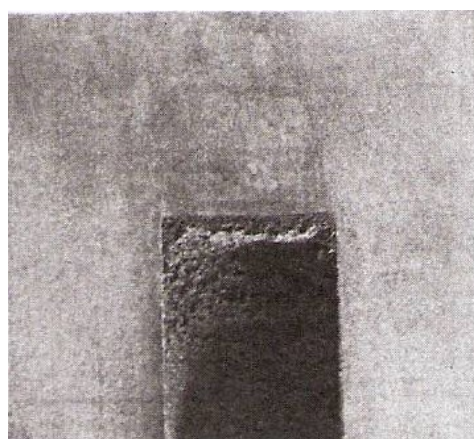
2.4.1.1. Korábbi kísérletek (Levelink és Julien)

Az öntöttvas foszfortartalmának hatását H.G.Levelink és F.P.M.A. Julien [9] vizsgálta. A szerzők kísérleteikhez a 2.15. ábrán látható próbatesteket öntötték nedves formázókeverékből készült formába.

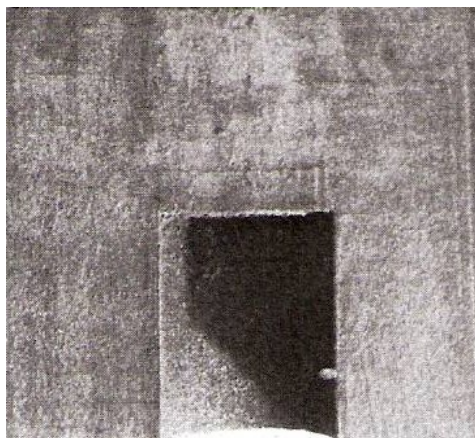
A próbaöntvényeket lemezgrafitos öntöttvasból öntötték, melyek foszfortartalmát változtatták. A fém alapösszetétele: C % 3.92, Mn % 0.04, Si % 2.10, S % 0.01, P % 0.05. A megszilárdulás után a próbákat kettévágták és vizsgálták a növekvő foszfor koncentráció hatását a penetráció kialakulására.



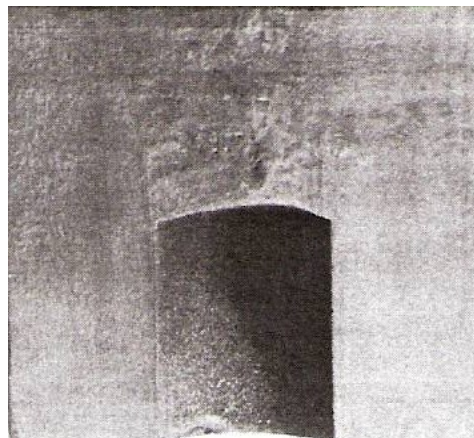
a)



b)



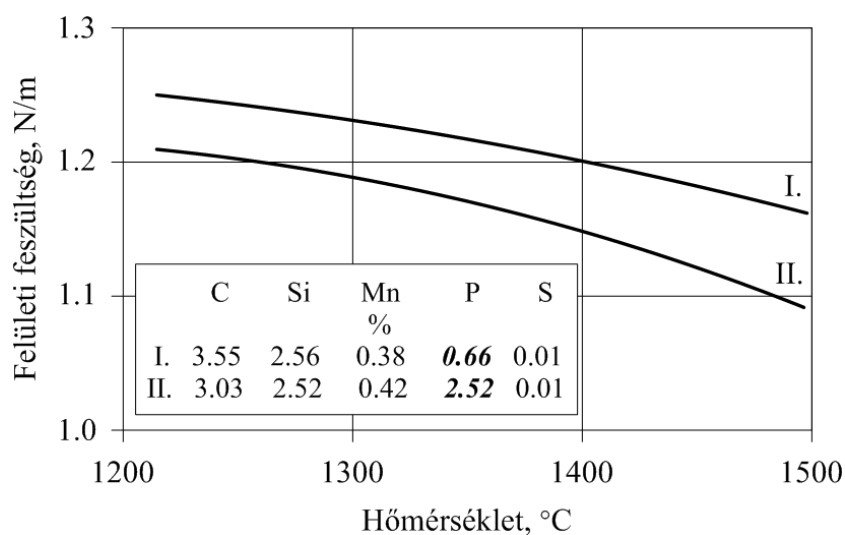
c)



d)

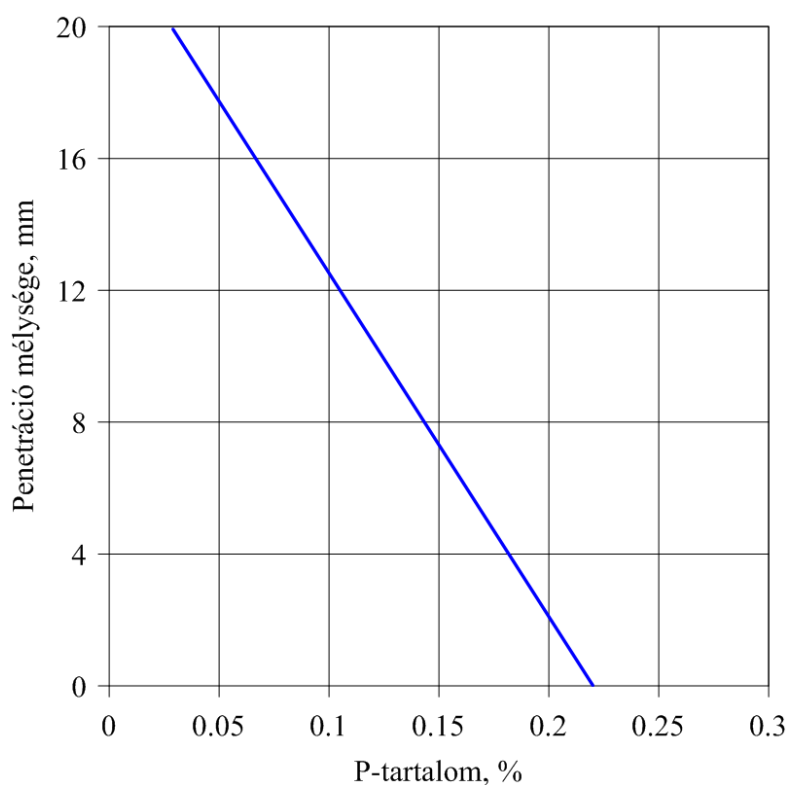
2.15. ábra - Lemezgrafitos öntöttvas próbák metszetei; P-tartalom: a) 0.05%; b) 0.15%; c) 0.22%; d) 0.3% [9]

A felvételeken jól látható, hogy a növekvő foszfortartalom hatására, ami a felületi feszültséggel arányosan változik (2.16. ábra), csökken a penetráció mértéke, majd kb. 0.2% foszfor koncentrációnál meg is szűnik a hiba.



2.16. ábra - Különböző foszfortartalmú lemezgrafitos öntöttvasak felületi feszültségének változása a hőmérséklet függvényében [18]

Az általuk mért behatolási mélység értékekből szerkesztett ábrán is jól megfigyelhető hogy minél magasabb a foszfortartalom, annál kisebb a penetráció mértéke (2.17. ábra).

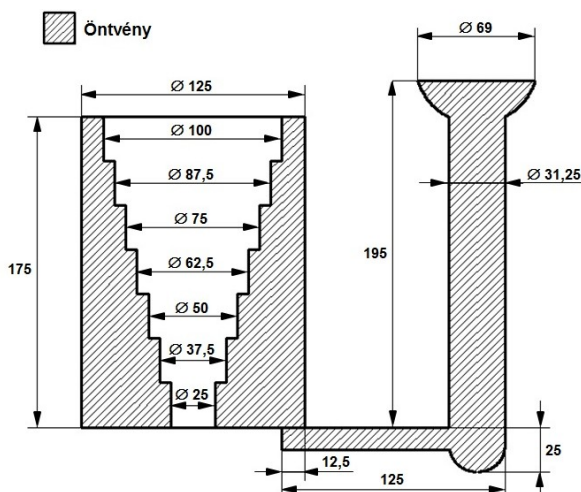


2.17. ábra - Összefüggés a lemezgrafitos öntöttvas foszfortartalma és a penetráció mélysége között [9]

Egyértelműen megfogalmazható azonban, hogy a penetráció csökkentésének nem járható útja a foszfortartalom növelése, mivel a vevők és a szabványok által meghatározott nagy szilárdságú öntvények magas foszfortartalmú öntöttvasból nem gyárthatóak.

2.4.1.2. Saját kísérletek

Az öntöttvas foszfortartalmának vizsgálata során a 2.18. ábrán látható „lépcsős-hengeres” próbatesteket öntöttem. Ezt a próbageometriát korábban Détári Anikó [23] használta, doktori tevékenysége során a felhasznált öntődei regenerátum és az öntvény felületi minősége közötti kapcsolatot vizsgálta. A próbageometria legfőképp abban tér el a Levelink és Julien által használt próbatestektől, hogy a lépcsős kialakítás miatt a formázókeverék hőterhelése, valamint a fém/formázóanyag arány vertikálisan változik, elősegítve ezzel a penetrációs folyamatok alaposabb megismerését.



2.18. ábra - A „lépcsős-hengeres” próbatest [23]

Kísérleteim során a foszfortartalom, valamint az öntési hőmérséklet hatását vizsgáltam a penetrációs hibák kialakulására. Két próbaöntvényt öntöttem le nedves bentonitos homokformába, melynek összetétele:

- 9% bentonit, amely karboadditív adalékot tartalmazott,
- 4% víz,
- 87% kvarchomok.

A lépcsős geometriát kialakító magokat műgyantakötésű formázóanyagból készítettem el, melynek összetétele:

- 98% kvarchomok - ebből 90% mechanikusan regenerált homok, 10% új homok,
- 1.5% furángyanta,
- 0.5% foszforsav katalizátor.

Az egyik „lépcsős-hengeres” próbát 1380 ± 10 °C-on, a másikat pedig 1430 ± 10 °C-on öntöttem le, kémiai összetételüket az 2.3. táblázat mutatja. Az öntvények kettéfűrészelése után összehasonlítottam azok belső felületeit egy korábbi kísérlet [23] során öntött alacsony foszfortartalmú próbaöntvény belső felületével.

2.3. táblázat - A kísérletek során öntött lépcsős próbák kémiai összetétele

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %
2.74	1.37	0.60	0.19	2.36

Megállapítottam, hogy az alacsony foszfortartalmú darab belső felületén jelentős mértékű penetrációs hiba alakult ki, míg a magas foszfortartalmú öntvénynél egyáltalán nincs fémbehatolás, csak a belső felületre ráégett homokréteg volt látható.



a)

0.03% P, T_{δ} : 1380±10 °C [23]



b)

2.36% P, T_{δ} : 1380±10 °C
(I. számú öntvény)

2.19. ábra - Azonos hőmérsékleten öntött, különböző foszfortartalmú próbatestek belső felületei

Megállapításom illeszkedik a Levelink és Julien által korábban megfogalmazottakhoz, miszerint a növekvő foszfortartalom hatására csökken a penetráció mértéke, és körülbelül 0.2% foszfortartalom felett pedig a hiba már nem jelentkezik. A 2.20. ábrán az eltérő hőmérsékleteken leöntött azonos foszfortartalmú próbatestek belső felületei láthatóak.



a)

I. számú öntvény
2.36% P, T_{δ} : 1380±10 °C



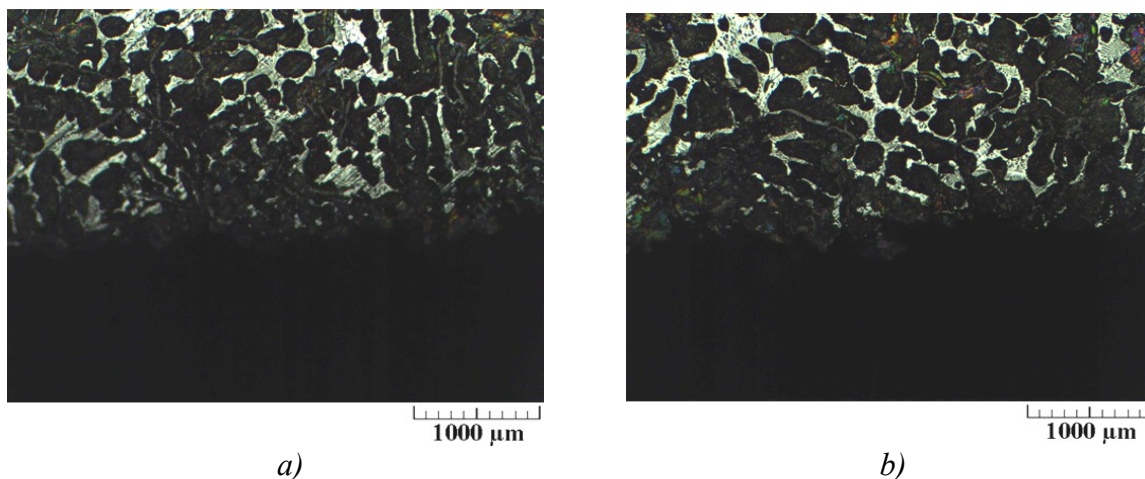
b)

II. számú öntvény
2.36% P, T_{δ} : 1430±10 °C

2.20. ábra - Különböző hőmérsékleteken öntött, azonos foszfortartalmú próbatestek belső felületei

Megállapítottam, hogy a próbák belső felületeinek morfológiája nem mutatott jelentős különbséget, egyik esetben sem volt fémbehatolás, csak a felületre ráégett homokréteg.

Ezután a próbaöntvényből csiszolatokat készítettem, melyeket 2%-os salétromsavval történő maratás után ZEISS Stemi 2000-C típusú optikai mikroszkóppal vizsgáltam meg. Összevetve az 1380±10 °C-on (2.21.a) és 1430±10 °C-on (2.21.b) öntött próbák fém/mag határfelületeiről készült felvételeket, szembetűnő különbséget nem találtam.



a) $T_{\delta}: 1380 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

b) $T_{\delta}: 1430 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.21. ábra - Különböző hőmérsékleteken öntött, azonos foszfortartalmú próbatestek fém/mag határfelületeiről optikai mikroszkóppal készített felvételek

Az öntöttvasak formakitöltő képességének (folyékonyságának) növekedését a legnagyobb mértékben az öntési hőmérséklet növelése idézi elő. Az öntési hőmérséklet csökkentésével csökken a formakitöltő képesség is (2.4. táblázat).

2.4. táblázat - Erősen oxidáló eljárással készült armko vas formakitöltő képesség értékei az öntési hőmérséklet függvényében [18]

Öntési hőmérséklet, $^{\circ}\text{C}$	1550	1575	1600	1625
	A folyékonyság spirál próbán mért értékei, mm			
armko vas (0.03% C)	80	125	170	220

2.5. A formázókeverék kéntartalmának jelentősége a penetráció kialakulásának folyamatában

A kéntartalom szerepének tárgyalásakor felvetődik az a kérdés, hogy a penetráció kialakulásában az olvadékban lévő, vagy a formázókeverékben lévő kénnek van-e nagyobb szerepe. A magyar öntődégekben anyagi és gazdasági megfontolások miatt a felhasznált műgyantakötésű formázókeverékeket általában csak mechanikusan regenerálták, ellentétben a külföldi üzemekkel, ahol a termikus regenerálás volt a jellemző.

Később, ezt az egyszer már felhasznált homokot elkezdték újrahasznosítani, úgy hogy a keverés előtt 10-15% friss, mosott osztályozott kvarchomokot adtak hozzá. Az így összeállított homokkeverék izzítási vesztesége 5-7% között változott, melyhez a keverés során 1.5-2% friss gyantát adagoltak. Az ilyen módon előállított formázókeverék izzítási vesztesége már elérte a 7-9%-ot. A megnövekedett izzítási veszteség értékekkel arányosan növekedett a keverék kéntartalma is.

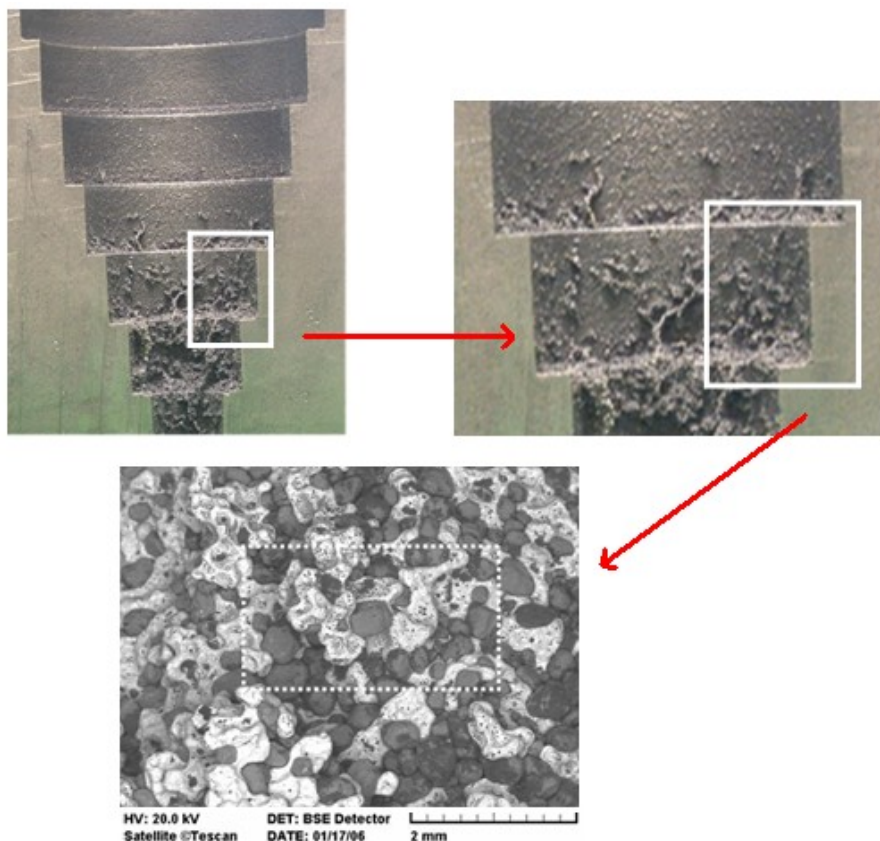
Ez a formázóanyag használatakor a kis és közepes falvastagságú öntvények gyártásakor nem jelentett nagy problémát, főleg azért nem, mert úgy a magokat, mint a formákat fekecselték. Az öntvény felületén jelentkező ráégések a tisztítási költségek csak olyan mértékű növekedését eredményezték, amelyek az üzemvezetést még nem készítették műszaki változtatásokra.

Természetesen a tagolt belső járatokkal is rendelkező termékeknél már komolyabb problémát jelentett, ezért ezekben az esetekben a magkészítéshez új homokot használtak (mellőzték a regenerátum felhasználását), ami azonban csak átmeneti megoldást jelentett.

2.5.1. A formázókeverék kéntartalmának penetrációra gyakorolt hatása lemezgrafitos öntöttvas esetén

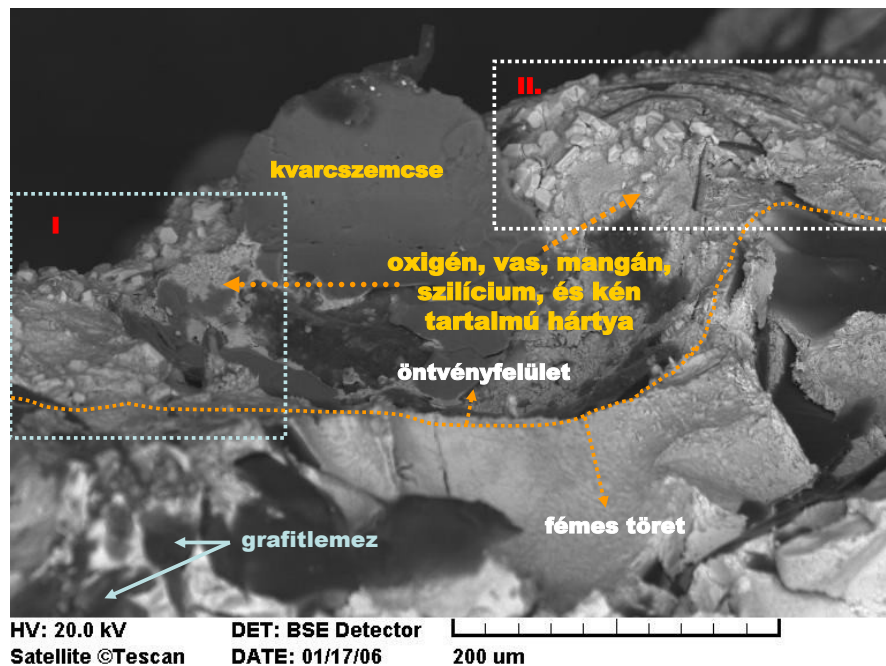
2.5.1.1. Korábbi kísérletek

A kéntartalom változásának hatása a penetrációra akkor került érdeklődésem középpontjába, amikor megvizsgáltam a tanszéken korábban végzett kísérletek során leöntött „lépcsős-hengeres” próbatestek scanning elektron mikroszkópos, illetve energia diszperzív mikroszondás felvételeit [24]. Az 2.22. ábrán a mintavétel helye, valamint a kialakult penetrációs hiba jellege látható kis nagyításban.



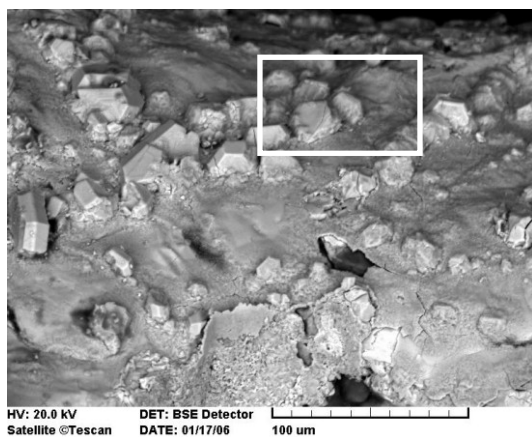
2.22. ábra - Penetrációs hiba a lemezgrafitos „lépcsős-hengeres” próbatest belső felületén [24]

A 2.23. ábrán olyan felületrészlet látható, ahol az energia diszperzív mikroszondás vizsgálatok szerint helyenként az öntvény felületén és a formázókeverék pórusaiba behatoló fém felületén is lényegesen nagyobb kéntartalmat tudtam a terület elemzéskor meghatározni, mint amilyet a fémes töret felületén mértem.

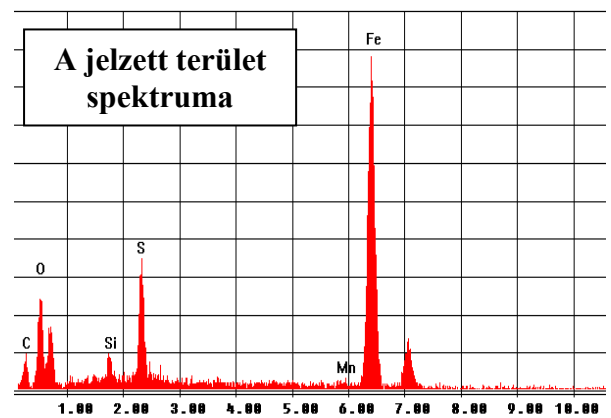


2.23. ábra - Magas kéntartalmú területek a pórusokba behatoló fémréteg felületén [24]

A 2.24. ábrán a 2.23. ábrán I-es számmal jelzett terület kinagyított részlete látható, ahol az oxigént, szilíciumot, mangánt, és vasat tartalmazó komplex salakhártyában szabályos kristályok is láthatóak. A terület spektruma szerint a szabályos kristályok pirit kristályokként azonosíthatóak.



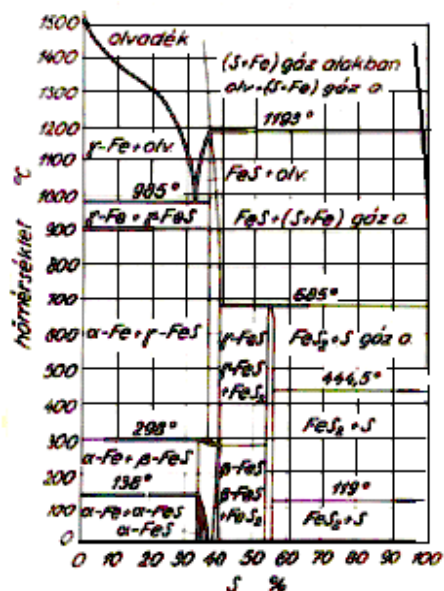
a)



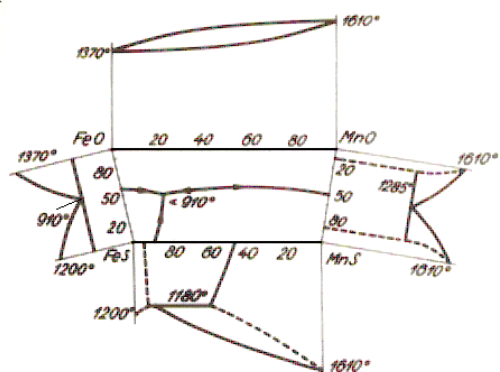
b)

2.24. ábra - A komplex salakhártyában elhelyezkedő pirit kristályok (a), valamint a jelzett terület mikroszondás spektruma (b) [24]

A fém/formázóanyag határfelületen kimutatott magas kéntartalmú vegyületeknek a penetráció kialakulásában jelentős szerepe van. Megvizsgálva a Fe-S egyensúlyi diagramot, a FeO-MnO-FeS-MnS valamint a FeS-FeO-MnO egyensúlyi diagramok likvidusz felületeit (2.25. a, b és c ábrák) látható, hogy a két-, három- és négyalkotós egyensúlyi diagramok alapján megvan annak a lehetősége, hogy a formázókeverékben képződő kénvegyület és a formázókeverék pórusaiba beszivárgó fémolvadék felületén kémiai reakció játszódjon le. E reakció terméke olyan alacsony olvadáspontú és kis felületi feszültségű hártya kialakulását eredményezi, amelyik a fémnek a póruscsatornába történő behatolásakor súrlódást csökkentő „kenőanyagként” szerepelhet.

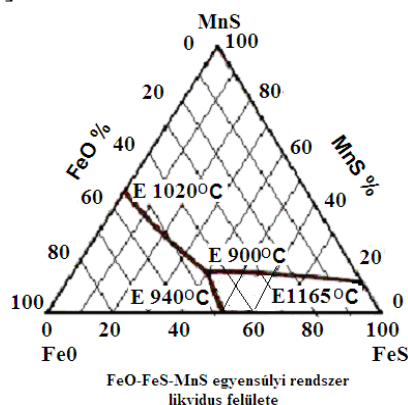


2.25. a) ábra [8]



Fe(II)-oxid - Mn(II)-oxid - Fe(II)-szulfid - Mn(II)-szulfid
egyensúlyi állapotokra likvidusz felülete
(H. Wentrup)

2.25. b) ábra [8]



2.25. c) ábra [8]

2.5.1.2. Saját kísérletek

Feldolgozva és kiértékelve az eredményeket, előtérbe helyeztem a kén szerepét a folyamat kialakulásában, saját kísérleteimet már ez alapján végeztem el. A vizsgálatokhoz használt próbatest megegyezik a foszforos kísérletek során használt próbageometriával (2.18. ábra).

A kén szerepének alaposabb feltárása érdekében a lépcsős geometriát kialakító műgyantakötésű magkeverékbe kénport kevertem. Célom a megnövelt kéntartalom hatásának tanulmányozása volt. Mivel a tervezett vizsgálat előkísérleti jellegű volt, egyetlen próbadarabot öntöttem lemezgrafitos öntöttvasból.

A formakészítés nedves bentonitos formázókeverékből történt, melynek összetétele:

- 9% bentonit, amely karboadditív adalékot tartalmazott,
- 4% víz,
- 87% kvarchomok.

A mag összetétele:

- 98% kvarchomok - ebből 90% mechanikusan regenerált homok, 10% új homok,
- 1.5% furángyanta,
- 0.5% foszforsav katalizátor,
- +2% kénpor (a mag tömegére vonatkoztatva).

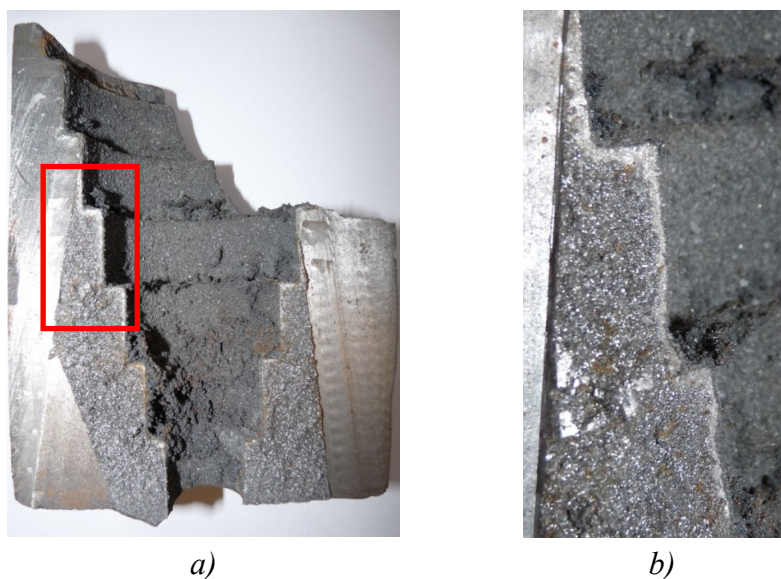
A lemezgrafitos öntöttvas összetételét a 2.5. táblázat tartalmazza.

2.5. táblázat - A lemezgrafitos öntöttvas olvadék összetétele

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %
3.45	1.80	0.62	0.06	0.08

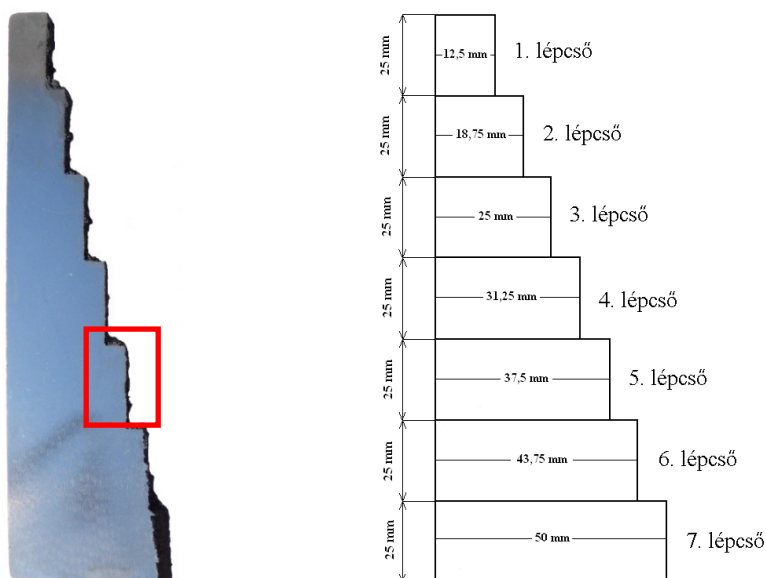
Az öntési hőmérséklet 1380 ± 10 °C volt, a megtisztított ötvényt a hossz tengelye mentén kettéfűrészeltem.

A 2.26. a) ábrán jól látható, hogy a maghomok keverék megemelt kéntartalmának hatására erős fémbehatolás alakult ki az öntvény belső felületén. Közelebbről vizsgálva a darabot felfedezhető egy fehér töretű, vas-karbidos (Fe_3C) réteg, ami a fém/mag határfelületen jelent meg (2.26. b) ábra).



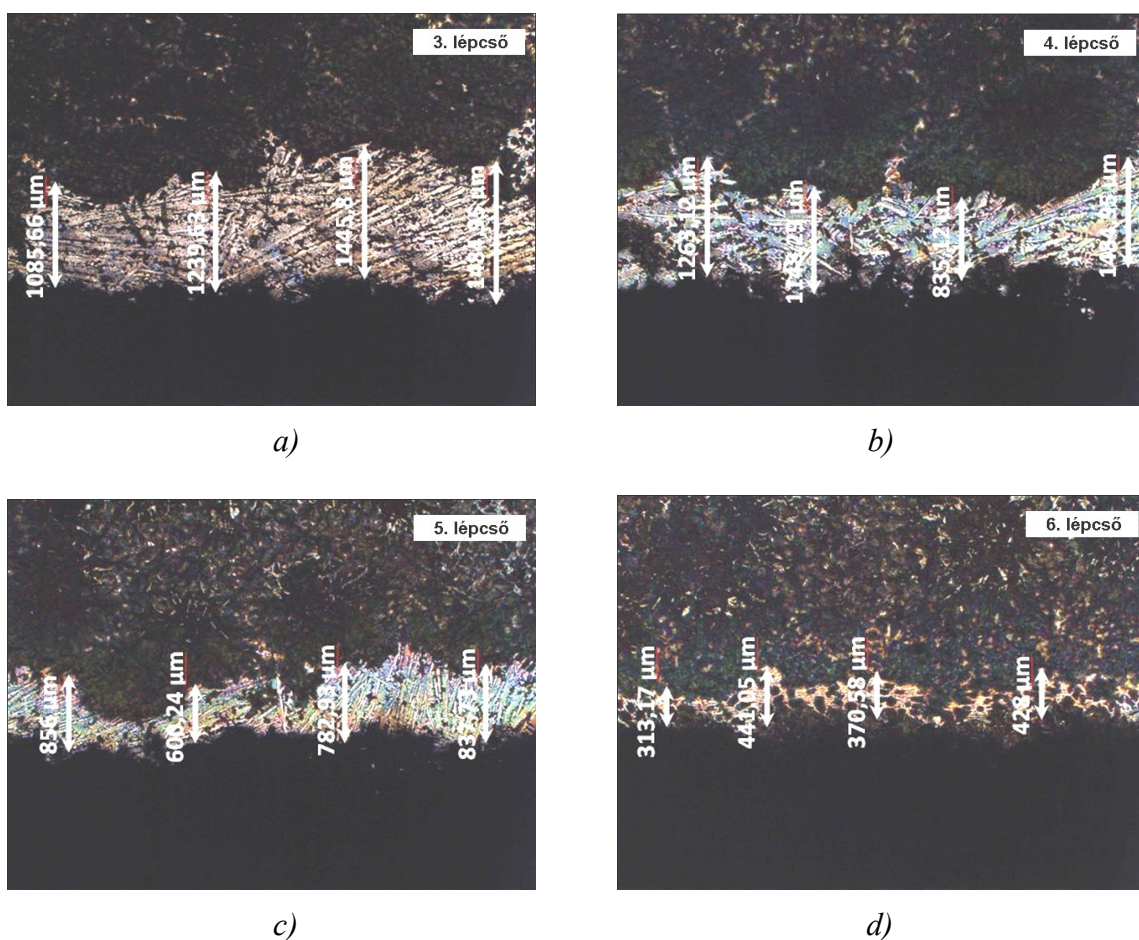
2.26. ábra - Penetrációs hiba a próbaöntvény belső felületén (a), valamint a fém/mag határfelületen kialakult fehér töretű, vas-karbidos réteg (b)

A próbaöntvényből kimunkált, 2%-os salétromsavval maratott csiszolatokat először optikai mikroszkóppal vizsgáltam meg.



2.27. ábra - A vizsgálatokhoz készített csiszolat képe és főbb méretei

A felvételeken jól látható, hogy a vas-karbidos réteg vastagsága lépcsőnként változik (2.28. ábra).

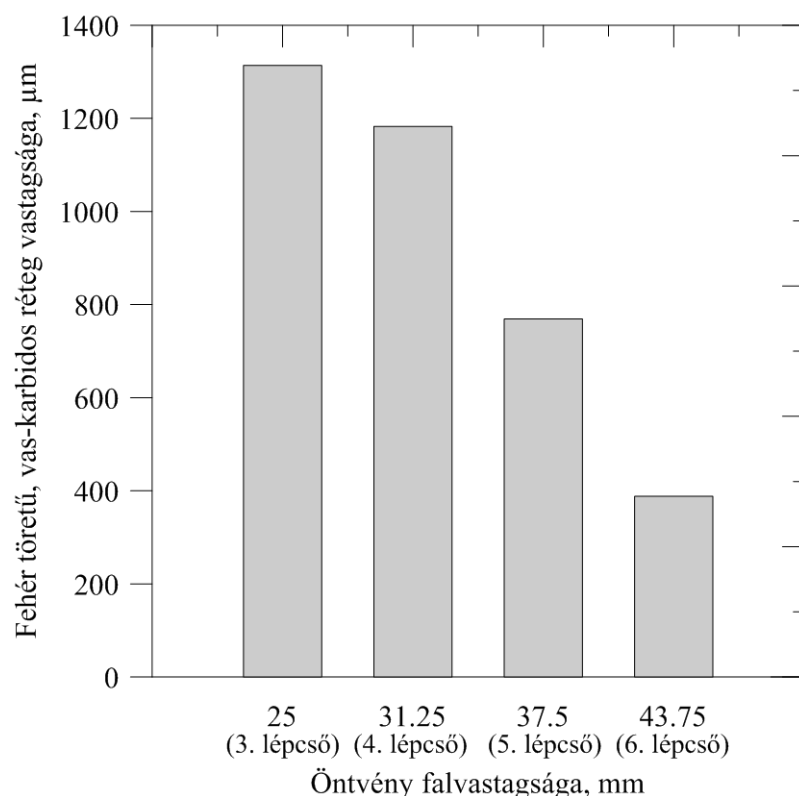


2.28. ábra - Az egyes lépcsők fém/mag határfelületéről készült optikai mikroszkópos felvételek

Képelemző szoftver segítségével megmértem az egyes lépcsők felületén kialakuló rétegek vastagságát, lépcsőnként négy mérési helyen. Az eredményeket táblázatba foglalva, átlagokat számoltam (2.6. táblázat). Ezután összehasonlítottam a fehér töret vastagságát az öntvény lépcsőnkénti falvastagságával (2.29. ábra).

2.6. táblázat - Mérési eredmények

	Vas-karbidos réteg vastagsága, μm				
	1. mérés	2. mérés	3. mérés	4. mérés	átlag
3. lépcső	1085.66	1239.63	1445.8	1484.95	1314.01
4. lépcső	1263.12	1148.29	835.12	1484.95	1182.87
5. lépcső	856	600.24	782.93	837.73	769.22
6. lépcső	313.17	441.05	370.58	428	388.2

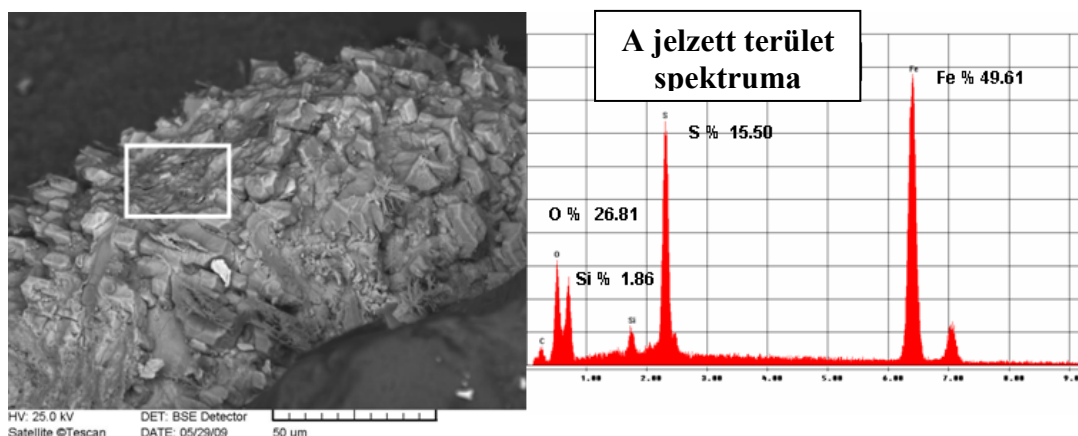


2.29. ábra - Összefüggés a fehér töretű, vas-karbidos réteg vastagsága és az öntvény falvastagsága között

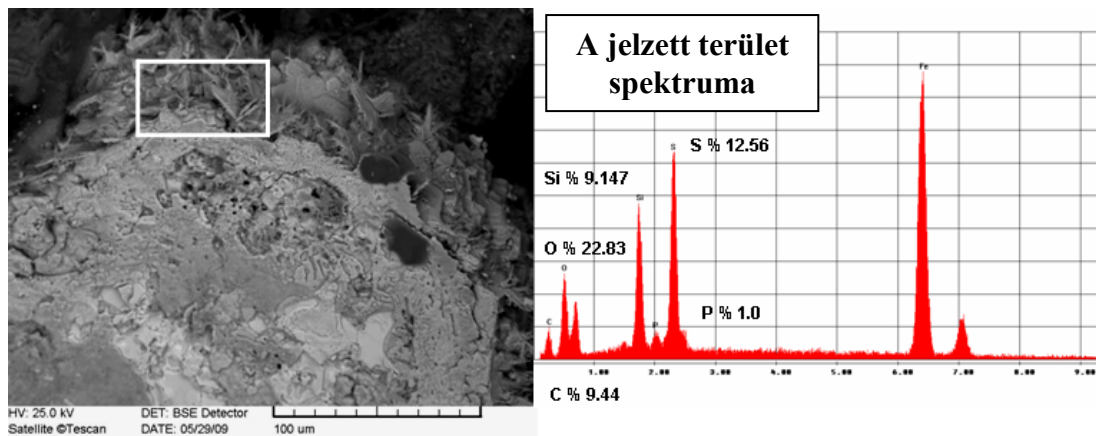
A 2.29. ábrán jól látható, hogy fehér töretű réteg vastagsága az öntvény falvastagságával fordítottan arányosan változik. A próbaöntvény vastagabb részein sokkal vékonyabb vas-karbidos réteg alakult ki a fém/mag határfelületen, mint a kisebb falvastagságú részekben.

A vizsgált csiszolatból visszapolírozás után mintát vettem a 2.27. ábrán jelölt területről, scanning elektron mikroszkópos és energia diszperzív mikroszondás vizsgálatok céljából.

A 2.30. és 2.31. ábrán szereplő töretfelvételeken a magoldal felőli határfelületi réteg látható. Hasonlóan a korábban végzett vizsgálatokhoz ebben az esetben is megtalálhatóak a pirites területek. Megjelentek olyan kiválások is, melyek oxigén tartalma jelentős. Ezek mennyisége a hőterhelés növekedésével arányosan növekedett.

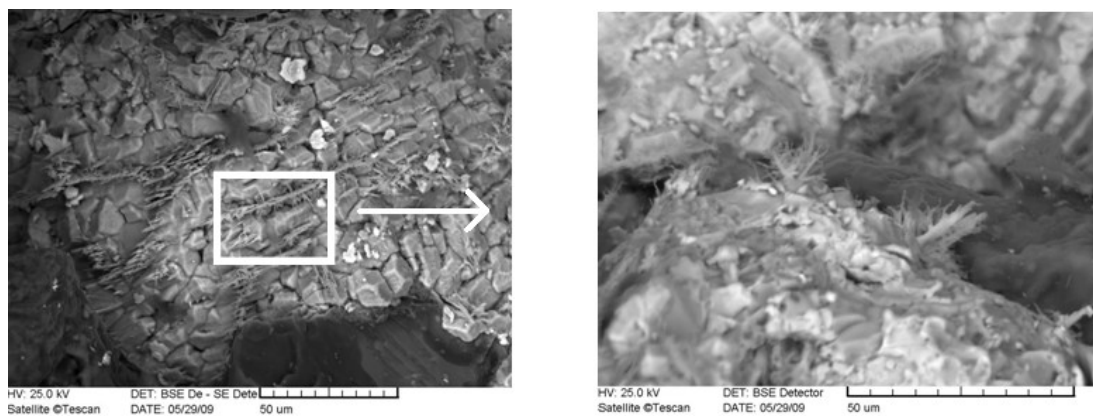


2.30. ábra - A határfelületi réteg töretéről készült scanning elektron mikroszkópos felvétel



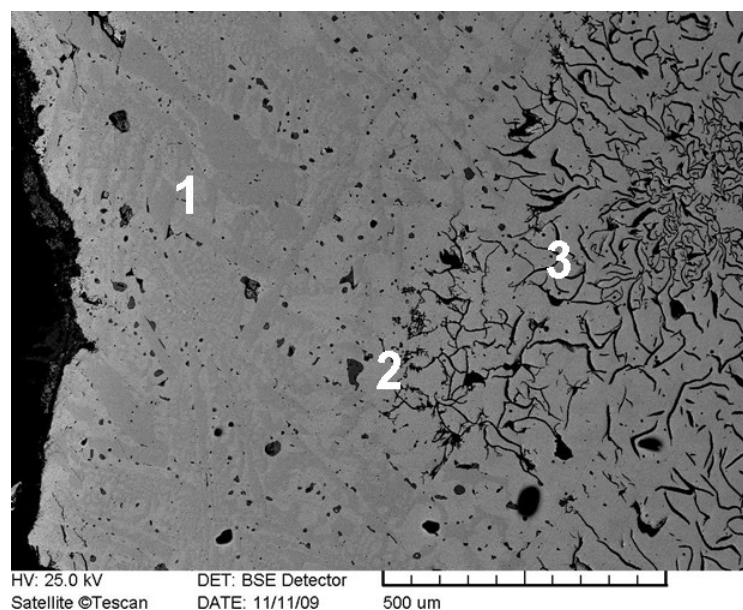
2.31. ábra - A határfelületi réteg töretéről készült scanning elektron mikroszkópos felvétel

A 2.32. ábrán a pirites területen megjelenő magas oxigén tartalmú, ág-szerű kiválások láthatóak különböző nagyításban. Jelenlétük fontos szerepet játszik a folyékony fém felületi feszültségének csökkenésében.



2.32. ábra - Magas oxigéntartalmú kiválások a piritkristályos területeken

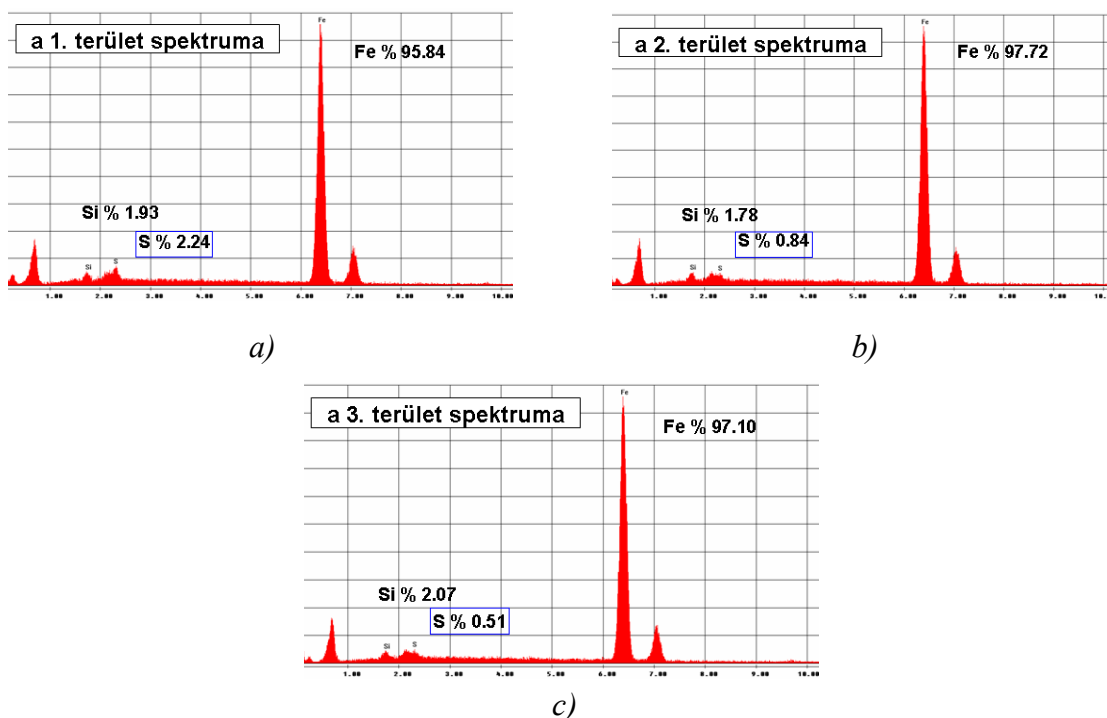
A 2.33. ábrán jól látható a kristályosodáskor a magkeverékből bekerülő kéntartalom hatására kialakuló dermedési anomália, a fém/mag határfelületi zónában.



2.33. ábra - Dermedési anomália a fém/mag határfelületi zónában

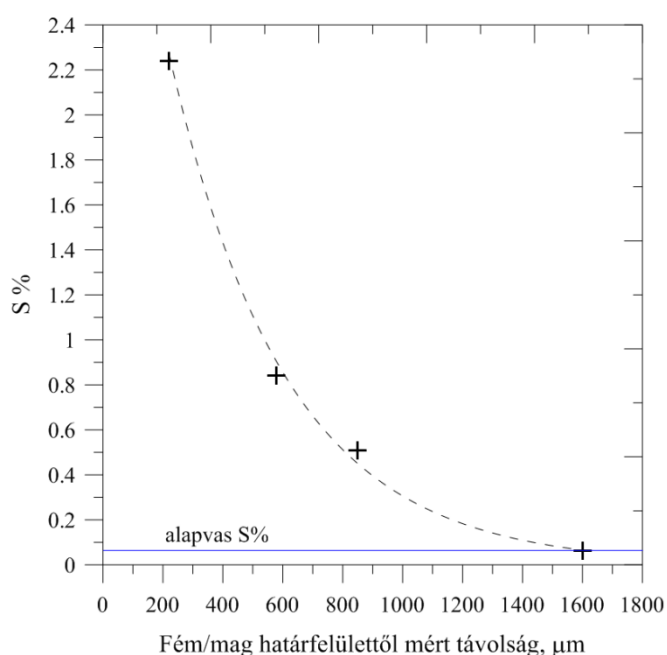
A formázókeverékkel érintkező felületen a fehér töretű, vas-karbidos réteg után (1.) egy keskeny átmeneti zóna következik, amely torzult grafitokat tartalmaz (2.), majd ezt követi a lemezgrafitos alpmátrix (3.).

A 2.34. a, b és c ábrákon a 2.33. ábrán számmal jelzett területek mikroszondás spektrumai láthatóak. A kén koncentráció az öntvényfelülethez közeli zónájában változik, a 3. számmal jelzett területen a legalacsonyabb, majd a 2. számú területen már magasabb, a fehér töretű, 1. számú részben pedig a kén koncentráció eléri a 2% körüli értéket.



2.34. ábra - A 2.33. ábrán számmal jelölt területek mikroszondás spektrumai

A mikroszondával vizsgált területek fém-mag határfelülettől mért távolságát összevetve az adott területek kén tartalmával megállapítható, hogy a kén tartalom a fém/mag határfelülettől az öntvény középvonala felé haladva exponenciálisan csökken (2.35. ábra).



2.35 ábra - Összefüggés a fém/mag határfelülettől mért távolság és a kén tartalom között

2.5.2. A formázókeverék kéntartalmának penetrációra gyakorolt hatása gömbgrafitos öntöttvas esetén

2.5.2.1. Korábbi kísérletek

A gömbgrafitos vasöntvényeknél kialakuló penetráció vizsgálatának alapjául egy korábbi általam végzett méréssorozat szolgált [25]. Akkor egy 5 darabból álló gömbgrafitos öntöttvasból készült „lépcsős-hengeres” próba sorozatot készítettem el.

A magokat és a formákat egyaránt műgyantakötésű formázókeverékből készítettem el, melynek összetétele:

- 97.75% kvarchomok - ebből 90% mechanikusan regenerált homok, 10% új homok,
- 1.5 % „Isophen 651” fenol-resol gyanta,
- 0.75% „H-760” márkanevű katalizátor.

A lépcsős geometriáját kialakító magok kéntartalmát ebben az esetben is megváltoztattam, a kenet piritpor formájában vittem be a magkeverékbe. A magok piritpor tartalma, a magonként felhasznált magkeverék tömegére vonatkoztatva a következők voltak:

- 1. számú mag: 0%
- 2. számú mag: 1%
- 3. számú mag: 3%
- 4. számú mag: 5%
- 5. számú mag: 7%



2.36. ábra - A kísérlet során felhasznált magok [25]

A próbadarabok öntése 2 tonnás üstből történt, az öntési hőmérséklet 1380 ± 10 °C volt. A gömbgrafitos öntöttvas összetételét a 2.7. táblázat tartalmazza.

2.7. táblázat - A gömbgrafitos öntöttvas olvadék összetétele

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Mg, %
3.67	2.41	0.30	0.02	0.06	0.06

A 2.37. ábrán az eltérő piritpor tartalmú magokkal gyártott öntvények belső felületei láthatóak. Megállapítottam, hogy a magasabb kéntartalmú maggal gyártott öntvény esetén sokkal erősebb penetrációs hiba alakult ki.

A gömbgrafitos próbaöntvényeken megjelenő penetrációs hibák jellege lényegesen eltér a lemezgrafitos kísérletek során kialakult hibák jellegétől. Az öntést követően a határfelületi rétegben a formázókeverék összesült és az öntvény belső felületére ráégett, fémbehatolás nem alakult ki.



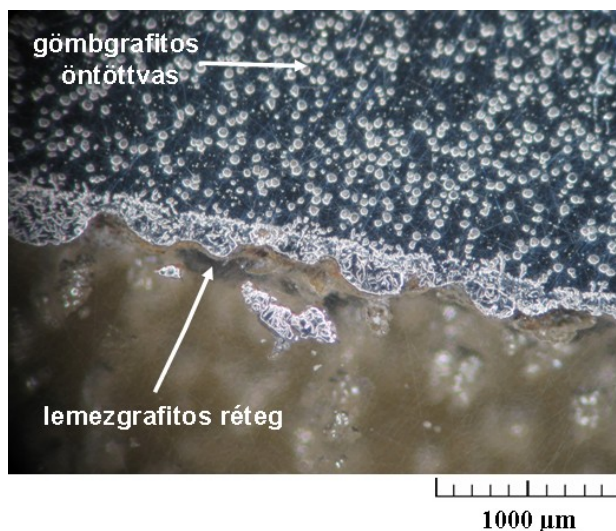
a)



b)

2.37. ábra - A próbaöntvények belső felülete: a) 1% piritpor, b) 7% piritpor [25]

Az optikai mikroszkópos vizsgálatokat a 7% piritport tartalmazó maggal gyártott öntvényből származó csiszolaton végeztem el. A felülethez közeli zónában, kristályosodáskor a grafit alakja módosult, mintegy 300-400 μm mélységig. Ezen a területen a grafit lemezes formában fordult elő, ami átmenet nélkül váltott át gömbgrafitos alakba (2.38. ábra).



2.38. ábra - A fém/mag határfelületi zónáról készített optikai mikroszkópos felvétel [25]

Irodalmi közleményekből [13] ismert, hogy öntés közben a formaüregben rövid idő alatt, a formázókeverék bomlásának eredményeképp kialakul egy N_2 , H_2 , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , SO_2 , SO_3 tartalmú gázkeverék, melynek összetevői a turbulens áramlás útján az olvadékba kerülnek és ott oldódva, valamint különböző vegyületeket alkotva öntvényfelületi hibák kialakulását eredményezik.

Esetemben, a formagáz összetétel a formázóanyag magas kéntartalma miatt nyilván módosult, mert a kéntartalmú adalék (pirit) anyagából 750 °C fölötti hőmérsékleten H_2S képződésére is sor kerülhetett. A képződő kénhidrogén gáz adott feltételek mellett reakcióba léphetett az olvadék alkotóival és a reakció terméke a salakba került. Természetesen, először mindig a stabilabb vegyületek képződnek az adott hőmérsékleten, minek következménye, hogy az öntvény felületi rétegében a magnéziumtartalom olyan szintre csökkent le, hogy gömb alakú grafit képződésére nem kerülhetett sor.[25]

2.5.2.2. Saját kísérletek

Az előző fejezetben ismertetett eredmények alapján megállapítottam, hogy a formázókeverék kéntartalmának piritporral való növelése nem volt szerencsés választás. A pirit ugyanis lecsökkentette a formázókeverék lágyuláspontját, emiatt az a határfelületi rétegben összesült és az öntvény belső felületére ráéggve, penetrációt nem tudott kialakítani.

Ezért a magok kéntartalmát a lemezgrafitos kísérletekhez hasonlóan elemi kén hozzáadásával növeltem. A négy öntvényből álló próbatest sorozat leöntése előtt a magokat műgyantakötésű formázókeverékből készítettem el, melynek összetétele:

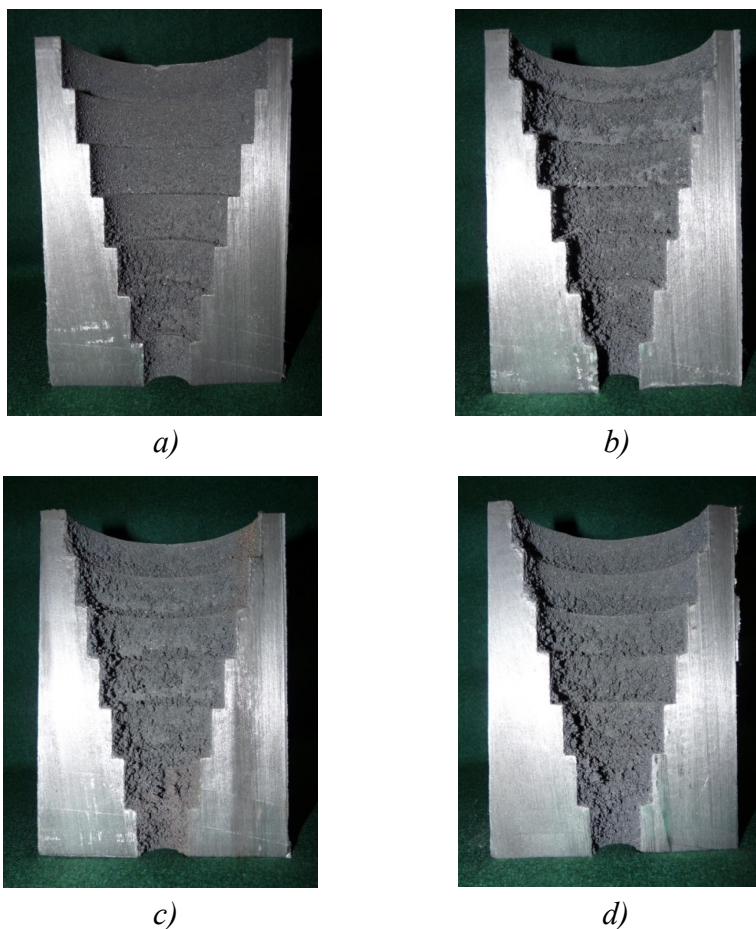
- 98% kvarchomok - ebből 90% mechanikusan regenerált homok, 10% új homok,
- 1.5% furángyanta,
- 0.5% foszforsav katalizátor,
- 0%, +1%, +1.5% és +2% kénpor a magokban (a mag tömegére vonatkoztatva).

A formákat mindig hozzáadott kénpor nélküli műgyantakötésű formázókeverékből készítettem. A próbatestek öntése ismét 2 tonnás üstből történt, az öntési hőmérséklet $1380^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ volt. A gömbgrafitos öntöttvas összetételét a 2.8. táblázat tartalmazza.

2.8. táblázat - A gömbgrafitos öntöttvas olvadék összetétele

C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Mg, %
3.59	2.51	0.32	0.01	0.03	0.06

A próbatestek lehűlését követően kettéfűrészeltlem azokat. A belső felületekről készített fényképek a 2.39. ábrán láthatóak.



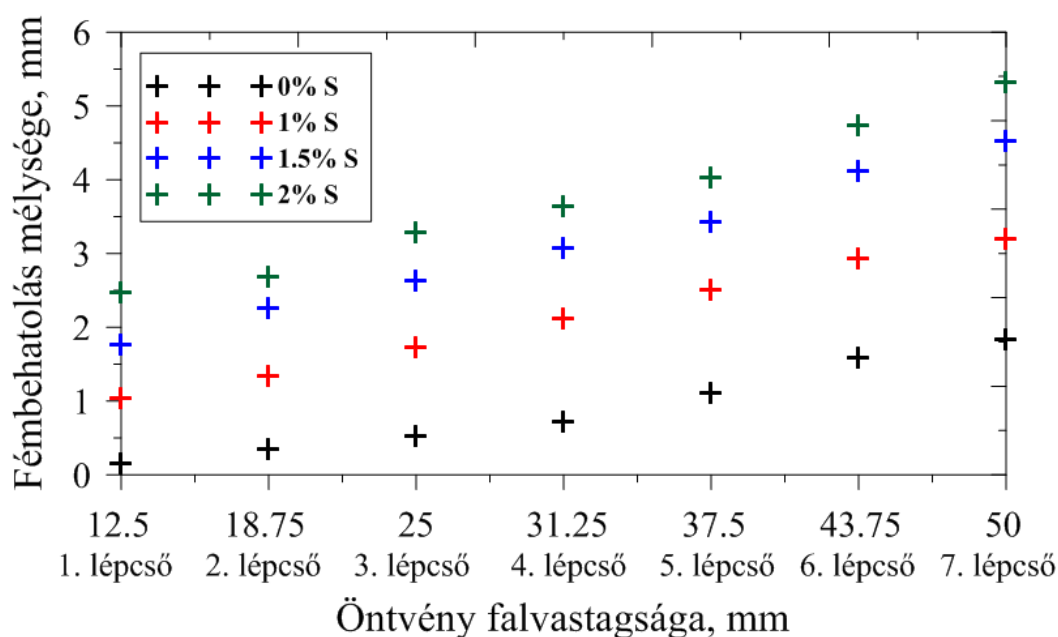
2.39. ábra - A próbaöntvények belső felülete: a) 0% S, b) 1% S, c) 1.5% S, d) 2% S

A felvételeken jól látható, hogy a magok kéntartalmának növekedésével arányosan növekedett a penetrációs hiba intenzitása, amely ebben az esetben már fémbehatolás formájában jelent meg. Ezután megmértem a fémbehatolási mélység értékeit a négy próbatest valamennyi lépcsőjén. Az eredményeket a 2.9. táblázatban tüntettem fel.

2.9. táblázat - Méréssel meghatározott fémbehatolási mélység értékek

Magok S-tartalma, %		0% S	1% S	1.5% S	2% S
Fémbehatolási mélység, mm	1. lépcső	0.15	1.03	1.77	2.47
	2. lépcső	0.35	1.33	2.26	2.68
	3. lépcső	0.53	1.73	2.63	3.28
	4. lépcső	0.72	2.12	3.07	3.63
	5. lépcső	1.1	2.5	3.42	4.02
	6. lépcső	1.58	2.93	4.12	4.73
	7. lépcső	1.83	3.2	4.53	5.32

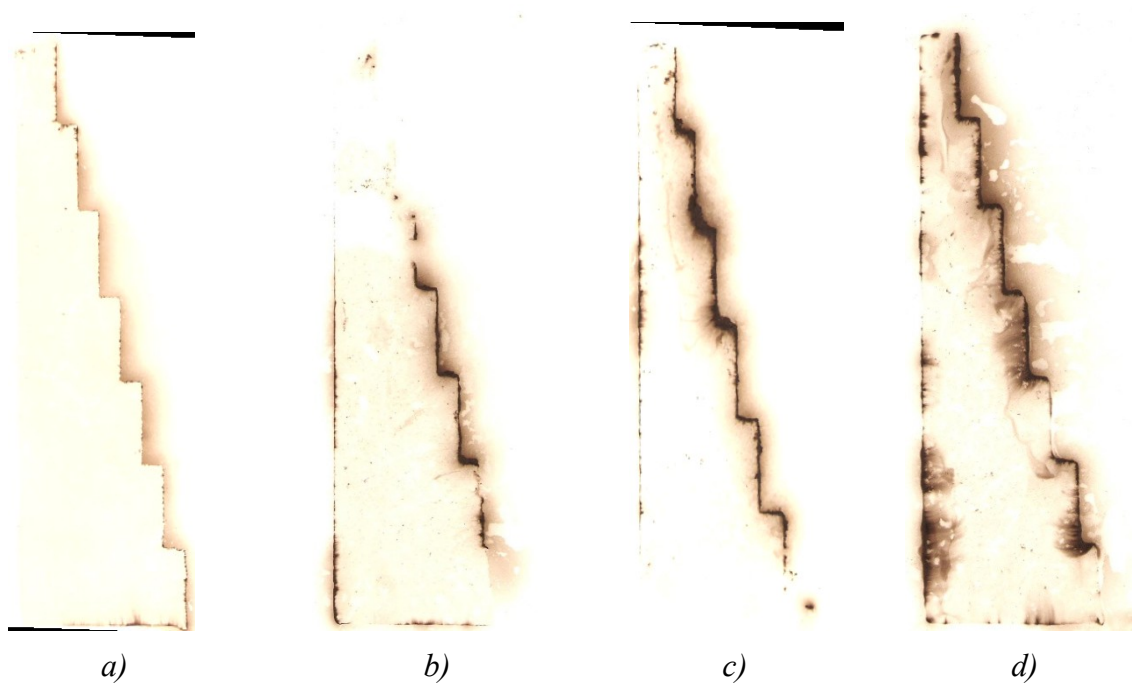
A 2.9. táblázat adatai szerint szerkesztett 2.40. ábra alapján megállapítottam, hogy a fémbehatolás mélysége a próbaöntvény falvastagságával és a felhasznált magok kéntartalmával arányosan növekedett.



2.40. ábra - Összefüggés a fémbehatolás mélysége, az öntvény falvastagsága, valamint a magok kéntartalma között

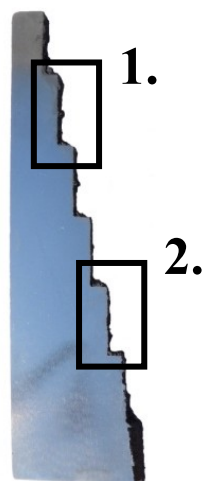
A próbaöntvényekből ezt követően csiszolatokat munkáltam ki, majd polírozás után Baumann-féle mélymarás segítségével ellenőriztem a kén eloszlását az öntvények teljes keresztmetszetében.

A Baumann-lenyomatokon jól látható (2.41. ábra), hogy a hozzáadott kén hatására a fém/mag határfelületen a kéntartalom jelentősen változik.



2.41. ábra - A vizsgált csiszolatok Baumann-lenyomatai: a) 0% S, b) 1% S, c) 1.5% S, d) 2% S

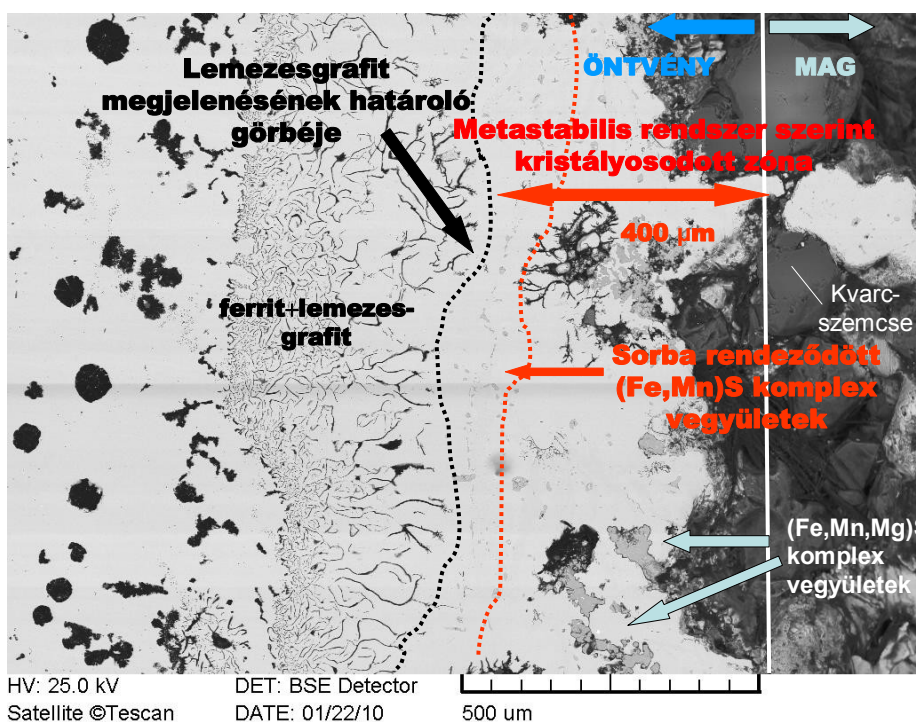
A lenyomatok elkészítése után a csiszolatokat visszapolíroztam, majd scanning elektron mikroszkópos és energia diszperzív mikroszondás vizsgálatokat végeztem el. Értekezésemben a 2% kénport tartalmazó maggal gyártott öntvényen végzett vizsgálatok eredményeit mutatom be, hogy azok érdemben összehasonlíthatóak legyenek a lemezgrafitos öntöttvassal végzett kísérletek eredményeivel. A csiszolatból két mintát vettem a 2.42. ábrán jelzett területekről.



2.42. ábra - A mintavétel helyei

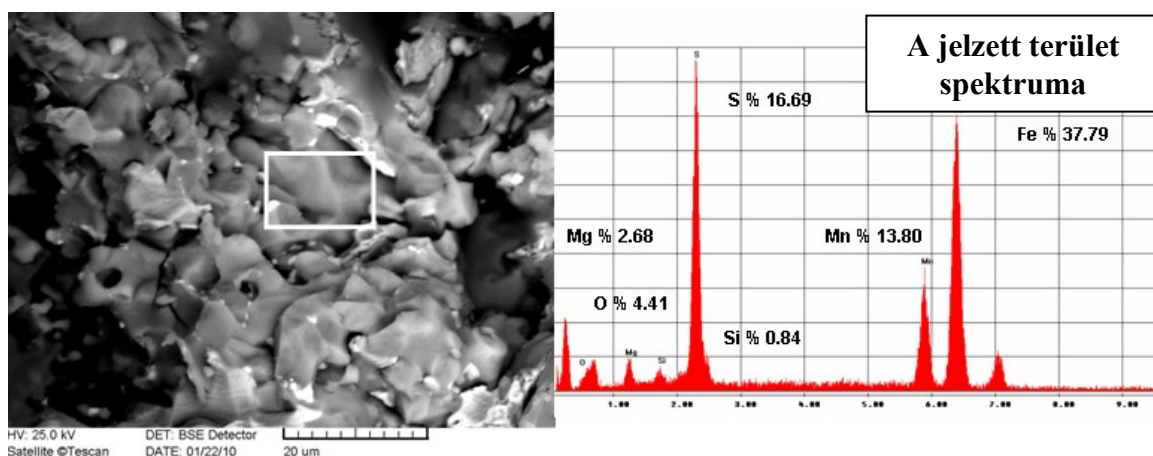
Az energia diszperzív mikroszondán a fém/mag határfelületen kialakuló szövetszerkezetet és a zárványok összetételét tanulmányoztam.

A 2.43. ábrán a 2.42. ábrán 1-es számmal jelzett területről kimunkált minta fém/mag határfelülete látható. Látható, hogy a határfelület tagolt, különböző méretű (Fe,Mn,Mg)S komplex vegyületek sora látható, amelyek a fémolvadék és a maggáz közötti gázfelszabadulással járó kémiai reakciók termékei.



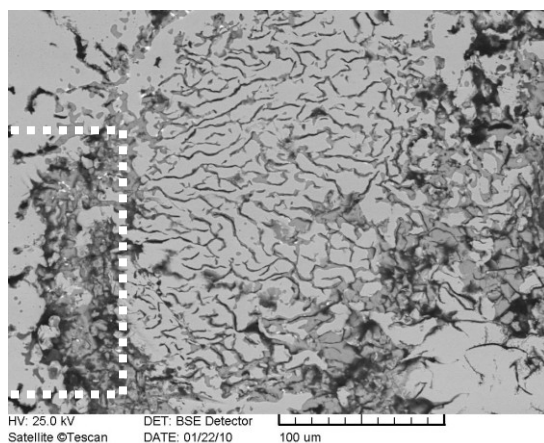
2.43. ábra - A fém/mag határfelületi morfológiája a próbaöntvény vékonyfalú részén

A maggából a fémolvadék felvette a kenet, ami kristályosodáskor dermedési anomáliát okozott. A határfelületről körülbelül 300 µm távolságra, a képen függőlegesen húzódó szulfid zárvány sor figyelhető meg. Ezt a zárvány „füzért” töretpróbán is megtaláltam, összetétele a 2.44. ábrán látható.

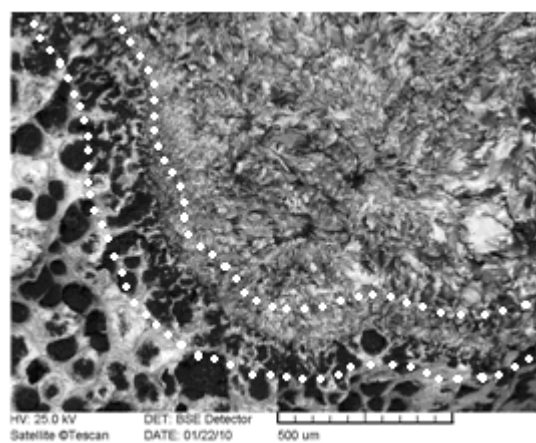


2.44. ábra - (Fe,Mn,Mg)S komplex vegyületekről készült töret felvétel, illetve a jelzett terület mikroszondás spektruma

A zárványfüzérrel párhuzamosan, attól körülbelül 100 µm távolságban a metastabilis rendszer szerinti kristályosodás átmenet nélkül billen át a stabilis rendszer szerinti kristályosodásba. A ferrites szövetszerkezetben először torzult lemezes grafit jelenik meg, ami az öntvény belseje felé haladva egyre finomabbá válik. Szintén éles határvonal mentén történik meg a lemezes grafitból az átmeneti grafit kiválása, amely lokálisan feldúsul (2.45. ábra) A továbbiakban az átmeneti grafitot fokozatosan váltja fel a gömbgráfit.



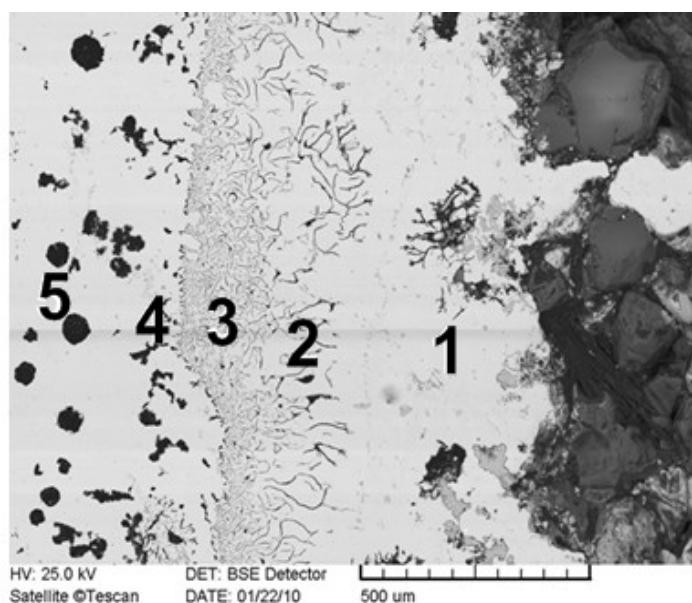
a)



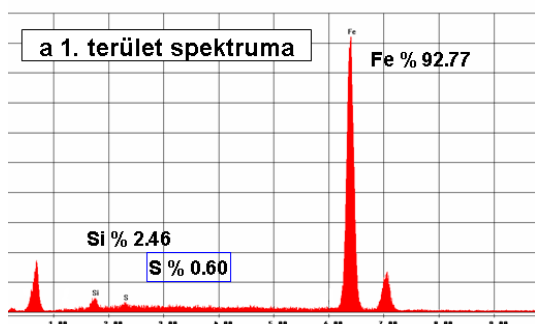
b)

2.45. ábra- Az átmeneti grafit feldúsulásáról, azonos területen készült csiszolat (a), illetve töret felvétel (b)

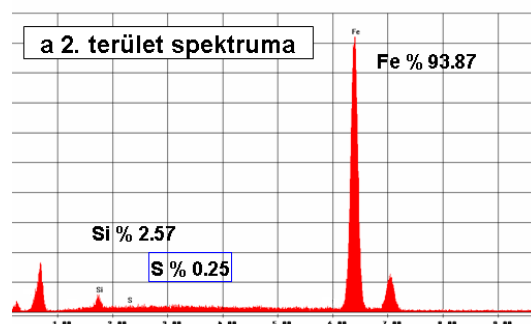
Felvettem a 2.46. ábrán számmal jelölt területek mikroszondás spektrumát is. A kéntartalom pontos meghatározását nehezítette, hogy a területen nagyszámú szulfid zárvány is jelen volt, ezért a változó kéntartalom a fémes mátrixra nem jellemző érték (2.47. ábra).



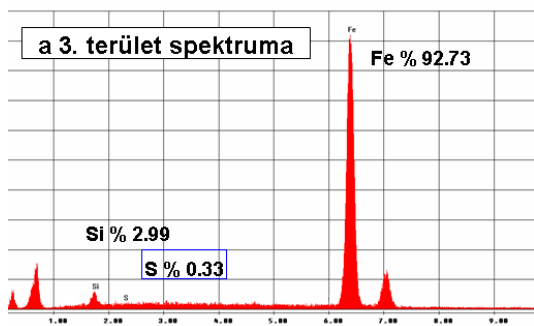
2.46. ábra - A mikroszondával vizsgált területek



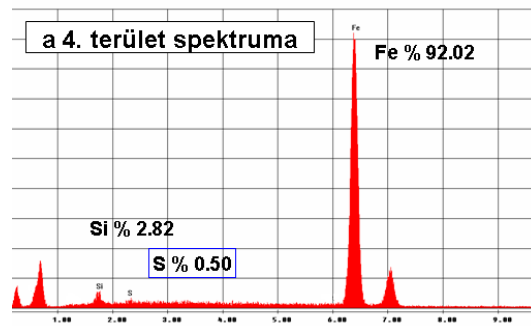
a)



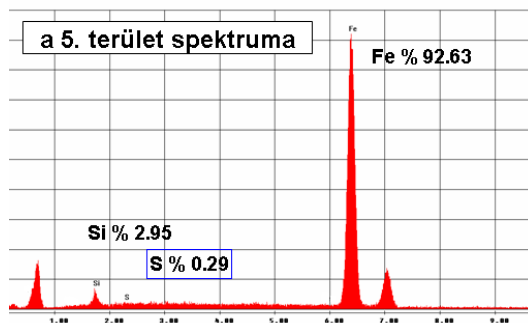
b)



c)



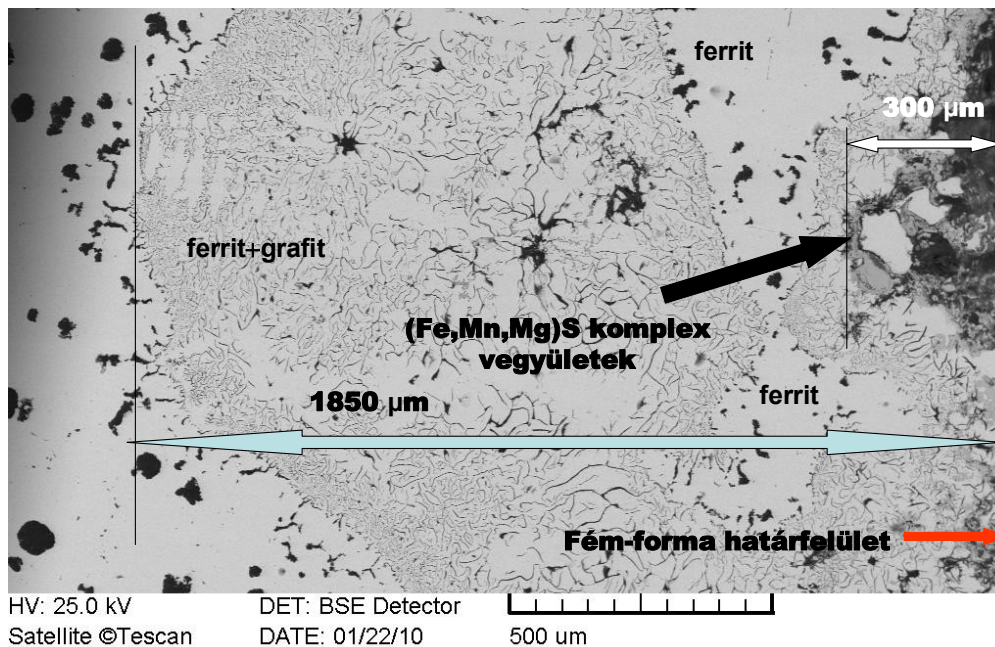
d)



e)

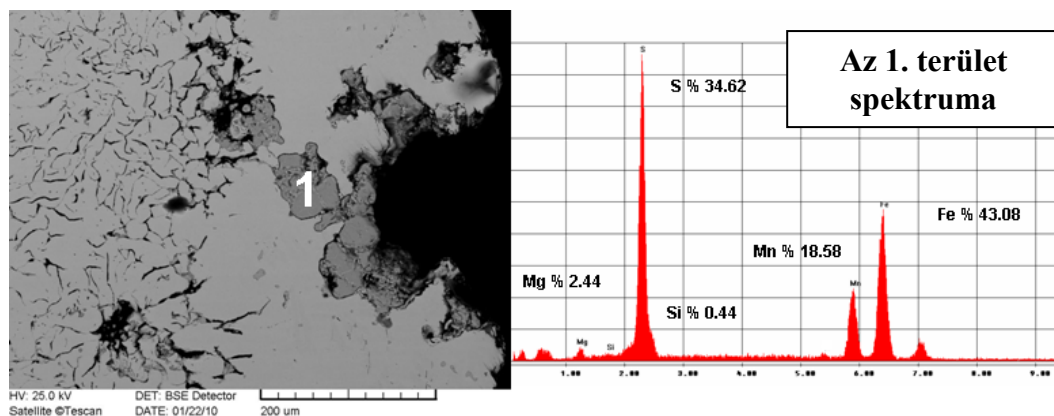
2.47. ábra - A 2.46. ábra számmal jelzett területeinek spektrumai

A 2.48. ábrán a 2.42. ábrán 2-es számmal jelzett területről származó minta fém/mag határfelületéről készült felvétel látható, amely jelentősen eltér az előzőekben látottaktól.



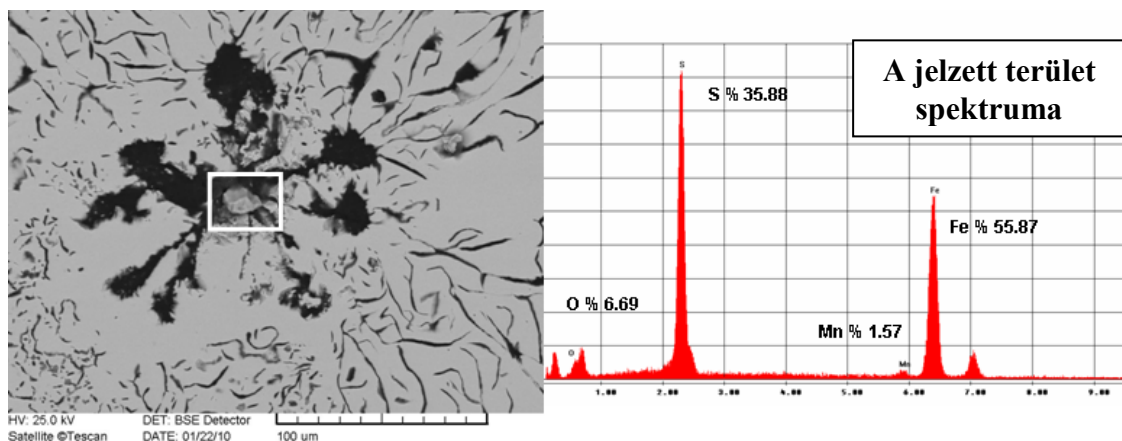
2.48. ábra - A fém/mag határfelületi morfológiája a próbaöntvény vastag falú részén

Ebben az esetben a határfelület szintén tagolt, a fémbehatolások felületén szintén (Fe,Mn,Mg)S komplex vegyület kiválások láthatóak (2.49. ábra), de az öntvény belseje felé haladva nem alakult ki a metastabilis rendszer szerint kristályosodott zóna. Helyette ferritet és lemezes grafitot tartalmazó, változó méretű sáv alakult ki.

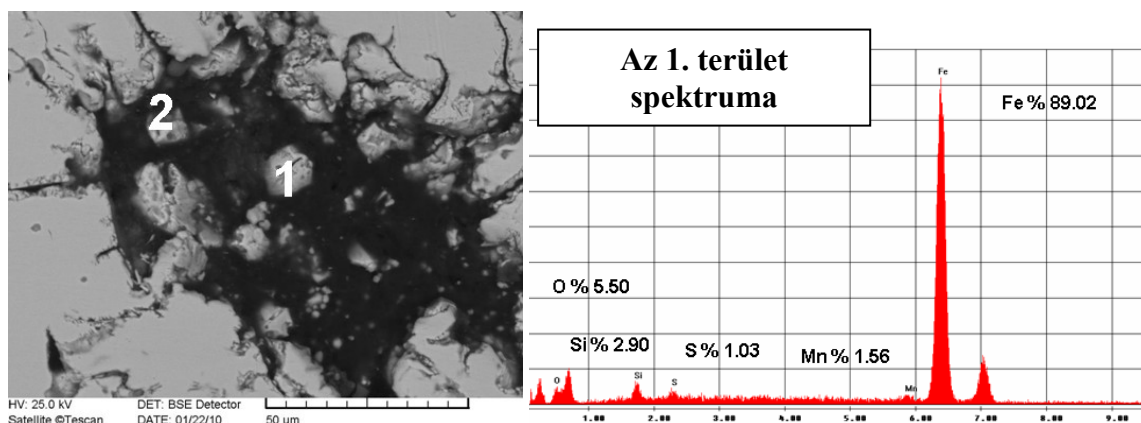


2.49. ábra - $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})\text{S}$ komplex kiválásokról készült scanning elektron mikroszkópos felvétel, illetve azok mikroszondás spektruma

A 2.50. és 2.51. ábrán a részben idegen anyaggal kitöltött anyagihiányos hibahelyek láthatóak különböző nagyításban, melyek közepén rendre megtalálhatóak a különböző összetételű kén és oxigén tartalmú zárványok. A hibahelyek kialakulását vélhetően a zárványok kialakulásakor keletkező, gázképződéssel járó kémiai reakciók eredményezték.



2.50. ábra - FeS zárvánnyal (pirit) részben kitöltött anyagihiányos hibahelyről készült scanning elektron mikroszkópos felvétel, illetve a jelzett terület mikroszondás spektruma



2.51. ábra - Oxid-szulfid zárványokkal részben kitöltött anyagihiányos hibahelyről készült scanning elektron mikroszkópos felvétel, illetve a jelzett terület mikroszondás spektruma

2.6. Összefoglalás, új tudományos eredmények

1. Kísérleti eredményeim alapján megállapítottam, hogy az öntési hőmérséklet 1380 °C és 1430 °C közötti intervallumban történő növelése, valamint a vele szorosan összefüggő formakitöltő képesség növekedés nem játszanak meghatározó szerepet a mechanikai penetráció kialakulásában.
2. Kísérleti eredményeimből az derült ki, hogy öntés során a formázókeverék megemelt kéntartalmából számottevő mennyiség oldódott be a vasba. Emiatt a vasolvadék nedvesítési szöge, valamint felületi feszültsége lecsökkent, ami egyrészt jelentős penetrációs hiba megjelenését eredményezte lemezgrafitos és gömbgrafitos öntöttvasak esetén egyaránt, másrészt a beoldódott kén hatására a próbaöntvények kristályosodásakor mindkét anyagminőségénél dermedési anomália alakult ki. A magkeverékek hozzáadott kéntartalma eltérő hatásmechanizmusok alapján fejtette ki hatását a fém/mag határfelülethez közeli rétegben lemezgrafitos és gömbgrafitos öntöttvasak esetén.
- 2.a Matematikai összefüggést dolgoztam ki, amely leírja a lemezgrafitos öntöttvas fém/mag határfelülethez közeli zónájában kialakuló kénkoncentráció eloszlást különböző öntvény falvastagságok esetén:

$$y = 4 \cdot e^{-3 \cdot 10^{-3} \cdot x} \quad (2.16)$$

ahol,

y - kénkoncentráció alakulása az öntvényfelülethez közeli rétegben, %

x - fém/mag határfelülettől mért távolság, μm

Regressziós együttható, $(R^2) = 0.99$

A (2.16) egyenlet 2% kenet tartalmazó maghomok keverékre érvényes.

- 2.b Megállapítottam, hogy gömbgrafitos öntöttvas esetén a fém/mag határfelülethez közeli zónában a kénkoncentráció eloszlása nem írható le egy homogén matematikai regressziós függvénnyel, a magas kéntartalmú, foltszerűen elhelyezkedő komplex zárványok nagyszámú jelenléte miatt.
3. A lemezgrafitos öntöttvas próbatest vizsgálata során meghatároztam a fém/mag határfelületen kialakuló vas-karbidos réteg vastagsága, valamint az öntvény falvastagsága közötti összefüggést, amely az alábbi egyenlettel írható le:

$$d_{\text{Fe}_3\text{C}} = -5.11 \cdot 10^1 \cdot d_{\text{öntvény}} + 2.67 \cdot 10^3 \quad (2.17)$$

ahol,

$d_{\text{Fe}_3\text{C}}$ - vas-karbidos réteg vastagsága, μm

$d_{\text{öntvény}}$ - öntvény falvastagsága, mm

Regressziós együttható, $(R^2) = 0.96$

A (2.17) egyenlet a következő peremfeltételek mellett érvényes:

Maghomok keverék kéntartalma = 2%

$25 \text{ mm} \leq d_{\text{öntvény}} \leq 43 \text{ mm}$

4. A gömbgrafitos öntöttvas próbatestek vizsgálata során regressziós analízis segítségével meghatároztam a fémbehatolás mélysége, a formázókeverék kéntartalma, valamint az öntvény falvastagsága közötti összefüggést, amely az alábbi egyenlettel írható le:

$$L_p = -1.16 + 1.45 \cdot S_{mag} + 6 \cdot 10^{-2} \cdot d_{öntvény} \quad (2.18)$$

ahol,

L_p - fémbehatolás mélysége, mm

S_{mag} - formázókeverék kéntartalma, %

$d_{öntvény}$ - öntvény falvastagsága, mm

Regressziós együttható, (R^2) = 0.98

A (2.18) egyenlet a következő peremfeltételek mellett érvényes:

$$0\% \leq S_{mag} \leq 2\%$$

$$25 \text{ mm} \leq d_{öntvény} \leq 50 \text{ mm}$$

3. Hőtranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen

A fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó hőtranszport folyamatok rendkívül fontos szerepet játszanak az öntvénygyártásban. Öntés során a folyékony fém közvetlenül érintkezik a formázóanyaggal, amely rövid idő alatt magas hőmérsékletre hevül fel. Az alkalmazott formák, illetve magok hőelnyelő képessége és más termofizikai tulajdonságai nagymértékben befolyásolják a dermedés folyamatát, a kialakuló szövetszerkezetet, valamint a különféle öntvényfelületi hibák megjelenését.

A hőelnyelő képességet a forma, illetve magok falvastagsága is nagymértékben befolyásolja. Az előző fejezetben közölt eredmények alapján megállapítható, hogy a formázókeverék falvastagsága lényeges szerepet játszik a penetrációs öntvényfelületi hibák keletkezésében, valamint az öntvény fém/mag határfelülethez közeli rétegében megjelenő dermedési anomáliák kialakulásában is.

A formázókeverékek termofizikai tulajdonságait a falvastagság mellett természetesen más tényezők is befolyásolják, mint például az egyes keverékek összetétele, a kötőanyag minősége, stb. A formafalban, illetve a magokban lejátszódó hőtani folyamatok tehát rendkívül bonyolultak, pontosításuk és korszerű módszerekkel történő vizsgálatuk a fém/formázóanyag határfelületen lejátszódó reakciók és viszonyok részletesebb megismeréséhez elengedhetetlen.

3.1. A hőtranszport alapvető formái a formázókeverékekben

Az öntés során lejátszódó hőtranszport folyamatok feltétele a rendszer különféle részecskéinek egymással való érintkezése. A hő alapvetően három módon terjedhet: vezetéssel (kondukció), anyagtranszporttal (konvekció), valamint sugárzással (radiáció).

A homokkeverékek diszperz rendszerek. A diszperz rendszerben kettő, vagy több fázis található, amelyek egymástól fázisközi felülettel vannak elválasztva. Kétfázisú diszperz anyag például a tiszta kvarchomok, háromfázisú diszperz anyagnak a vízüveges, illetve a műgyantakötésű formázókeverékek tekinthetők.

A formában és a magokban, az öntés során lejátszódó hőtechnikai folyamatokat rendkívül nehéz meghatározni, mivel a formázókeverékekben egyidejűleg mindhárom alapvető hőterjedési forma jelen van. Ennek oka részben a formázóanyagok többalkotós összetétele, valamint a hő hatására lejátszódó, anyagtranszporttal járó kémiai reakciók.

3.1.1. Kondukció

Ha egy szilárd testen belül hőmérséklet különbség lép fel, akkor a magasabb hőmérsékletű terület felől hőenergia áramlás alakul ki az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé (termodinamika II. főtétele) [26].

Ebben az esetben az energia kondukció útján terjed, ami a Fourier-törvénnyel írható le. A területegységre vonatkozó hőáramlás arányos lesz a hőmérséklet gradienssel, az arányossági tényező pedig a hővezetési tényező lesz, ami kis hőmérsékletközben konstansnak tekinthető.

$$q_{kond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

ahol,

q_{kond} - az „A” felületre merőleges konduktív hőáram, W

k - hővezetési tényező, W/mK

A - a felület, amin a hőáram áthalad, m²

T - hőmérséklet, °C

x - a felületre merőleges úthossz, m

A negatív előjel a termodinamika II. főtétele miatt szükséges. Állandósult állapotot feltételezve egy falban, tehát ha nincs időfüggés ($T = T(x)$), a Fourier-egyenlet az alábbi módon integrálható:

$$q_{kond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow \int_{x_1}^{x_2} \frac{q}{A} dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (3.2)$$

ahol, x_1 , x_2 és T_1 , T_2 a felületen és a falban egy-egy pont, illetve a hozzájuk tartozó hőmérséklet értékek. Feltételezve, hogy a hővezetési tényező konstans, a Fourier-egyenlet integrál alakja a következőképpen írható fel:

$$q_{kond} = - \frac{kA}{x_2 - x_1} (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

A (3.3) egyenlet átrendezésével definiálható a hővezetési ellenállás fogalma:

$$q_{kond} = - \frac{\Delta T}{R_{th}^{kond}} \rightarrow R_{th}^{kond} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (3.4)$$

ahol, R_{th}^{kond} - hővezetési ellenállás.

Ez egy új szemszögből való megközelítése a Fourier-törvénynek, amely a hőátadást egyfajta áramlásként értelmezi, az ez ellen ható ellenállást pedig a hővezető képesség, a falvastagság, valamint a felület kombinációjaként definiálja. A hőáramot jellemző fő paraméter így a hőmérséklet lesz. Így a (3.4) egyenlet a következőképpen értelmezhető:

$$q_{kond} = - \frac{\text{hőmérséklet különbség}}{\text{hővezetési ellenállás}} \quad (3.5)$$

[27]

A formákban és magokban lejátszódó hőtranszport legalapvetőbb elemeként a kondukciónak mutatkozik, amely a következő, egyidejűleg végbemenő folyamatokkal valósul meg:

- kondukciónak a formázóhomok szemcséin belül,
- kondukciónak a szemcsék közötti teret kitöltő kötőanyag hidakon keresztül.

A szemcséket összekötő kötőanyag hidakon keresztül történő hővezetés természetesen csak a gyanta lebomlása előtt játszik szerepet.

3.1.2. Konvekció

Konvekció során a szilárd testen belül anyagárammal valósul meg a hőtranszport. A melegítés révén helyi sűrűségváltozás áll be, ennek következtében lép fel az anyagáramlás. A melegebb térfogatrészek tehát áramlással szállítják a hőt a hidegebb tartományok felé. A jelenség Newton hűlési törvényével írható le:

$$q_{konv} = -hA(T_{\infty} - T_s) \quad (3.6)$$

ahol,

- h - hőátadási együttható, W/m^2K
- T_s - test felületi hőmérséklete, $^{\circ}C$
- T_{∞} - hűtő közeg hőmérséklete, $^{\circ}C$

A hőátadási tényező értéke egyszerűbb rendszereknél kiszámítható, viszont a formázókeverékekhez hasonló összetett rendszerek esetén mérésekkel szükséges meghatározni.

A konvekciónak alapvetően két típusa létezik: természetes és kényszerített konvekció. Ha például egy felmelegített test szabadon hűl szobahőmérsékleten, külső beavatkozás nélkül, akkor a konvekció a test körüli sűrűségváltozás eredménye lesz. Ellentétben azzal, ha a testet mesterségesen hűtjük, például egy ventilátorral. [27]

Formázókeverékek esetén a kötött víz, valamint a nedvességtartalom elpárolgása után a túlhevített vízgőz, valamint a szerves kötőanyagok elbomlásakor különféle gázok segítségével konvekcióval terjed a hő. A túlhevített vízgőz, valamint a különböző gyanták lebomlásakor felszabaduló gázok termofizikai tulajdonságai közel állnak a levegő tulajdonságaihoz.

Megállapítást nyert, hogy a természetes konvekció a formázókeverékekhez hasonló diszperz anyagokban csak abban az esetben alakulhat ki, ha a pórusok méretei nagyobbak, mint 10 mm és a hőmérsékletkülönbség a részecskék és a közeg között nagyobb, mint 15 °C [28].

A formákban, illetve magokban csak a szó szoros értelmében vett kényszerített konvekció játszik szerepet. Amennyiben az áramlás bekövetkezik, akkor ezt a jelenséget úgy kell tekinteni, mint az anyagátvitel közvetítésével történő energiaátvitelt. A víz elpárologtatására jelentős mennyiségű hőenergiát, párolgási hőt kell bevinni a rendszerbe. Ezt a hőmennyiséget az expanzió következtében áramló gőz viszi el és lényegesen befolyásolja a formázókeverék effektív hővezetését [28].

3.1.3. Radiáció

A hősugárzás az elektromágneses hullámok terjedésével valósul meg. Szintén hőmérséklet különbség hatására alakul ki. A sugárzásos hőátadás az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos, szemben a konduktív és konvektív hőtranszporttal, melyek csak egyenes arányosságban állnak a hőmérséklet különbséggel. Egy idealizált test (abszolút fekete test) által kisugárzott összes hőenergia a Stefan-Boltzmann törvénnyel adható meg:

$$q_{rad} = \sigma AT^4 \quad (3.7)$$

ahol,

σ - Stefan-Boltzmann állandó, $5.672 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$.

A fenti egyenlet kizárólag hősugárzásra vonatkozik. Az abszolút fekete testen kívül semmi sem bocsát ki ilyen mértékű energiát, még egy csiszolt fémfelület sem. Ezért figyelembe kell venni az adott test feketeségi fokát (ε):

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (3.8)$$

ahol,

$\varepsilon < 1$.

A (3.7) és (3.8) egyenletek csupán a fekete, vagy szürke test által kibocsátott sugárzást írják le. Két párhuzamos felület között lejátszódó hősugárzás az abszolút hőmérsékletek negyedik hatványának különbségével lesz arányos:

$$q_{rad} \propto -\sigma A(T_2^4 - T_1^4) \quad (3.9)$$

Az arányossági tényező függ a két felület átlagos feketeségi fokától ($\varepsilon_{\text{átlag}}$) és geometriájuktól is. A_1 és A_2 felületek közötti hősugárzás a következő egyenlettel adható meg:

$$q_{rad} = -A_1 \varepsilon_{\text{átlag}} \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.10)$$

Öntészeti szempontból két alapvető esetet kell figyelembe venni:

Eset 1.

$A_1 \ll A_2$ (amikor az egyik felületet teljesen körülzárja a lényegesen nagyobb másik felület), ekkor az átlagos feketeségi fok a kisebb felület feketeségi fokával lesz egyenlő:

$$\varepsilon_{\text{átlag}} = \varepsilon_1 \quad (3.11)$$

Eset 2.

A_1 és A_2 felületek közvetlenül egymás mellett helyezkednek el. Ekkor az átlagos feketeségi fok az

$$\varepsilon_{\text{átlag}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 + 1} \quad (3.12)$$

egyenlettel adható meg. [27]

Formázókeverékekben a hőszugárzás a pórusok nagyságától, valamint a hőmérséklettől függ. Sugárzással terjed a hő a homokszemcsék között, amikor már a gyanta lebomlott és a kötőanyaghidak nem kötik össze a szemcséket, valamint a dermedő fém és a mag felülete között létrejött réseken át is a radiáció dominál. Kis hőmérsékletek esetén, 900 °C-ig a radiáció részaránya elhanyagolható, a teljes hőáramnak mintegy 10-15%-át képezi. Magasabb hőmérsékleten a hőszugárzás részaránya növekszik, kis pórusméretek esetén azonban még 900 °C feletti hőmérsékleten is elhanyagolható a sugárzás útján történő hőátadás a teljes hőátadáshoz képest [28].

3.2. Termikus analízis az öntészetben

A lehülési görbék vizsgálatán alapuló eljárást üzemi szinten széleskörűen használják gyártásközi ellenőrzésként, a kémiai összetétel, valamint a mikrostruktúra vizsgálatára. Kutatási szempontból azonban a termikus analízis hasznos eszköz az olvadákból szilárd halmazállapotba történő átalakulások során lejátszódó hőtani folyamatok értelmezésében is. Kristályosodás vizsgálata esetén, a termikus analízisből kapott értékek alapján minőségileg és mennyiségileg is jellemezhetjük a kristályosodási folyamatokat [29].

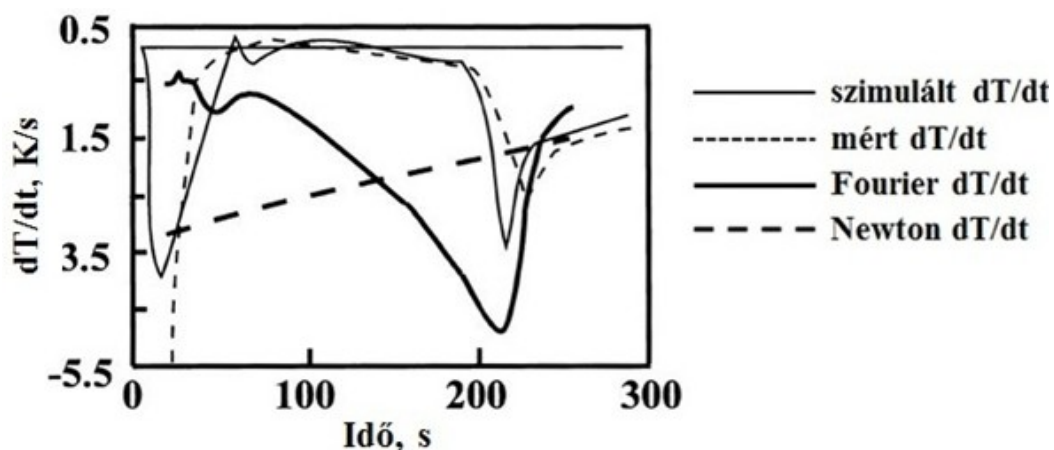
3.2.1. Newton-, és Fourier-féle termikus analízis

A lehülési görbék kiértékelése alapvetően kétféle módon történhet:

- *Newton-féle termikus analízis:* A hőmérsékletmérés egy pontban történik, a kiértékelés így egyetlen lehülési görbén alapszik. A hőmérsékletváltozás csupán az idő függvényében ismert. Mérésekkel bizonyított tény, hogy ez a módszer azért helytelen, mert nem veszi figyelembe a dermedés során, lokálisan kialakuló hőmérséklet gradienseket.
- *Fourier-féle termikus analízis:* A hőmérsékletmérés legalább két pontban történik, a számítás a hőmérséklet gradienseken alapszik. Ez a módszer a hőmérséklet értékek nemcsak időben, hanem térben történő változását is rögzíti. [29]

Korábbi szerzők [29,30] kísérleteik alapján mutattak rá a két módszer közötti különbségekre.

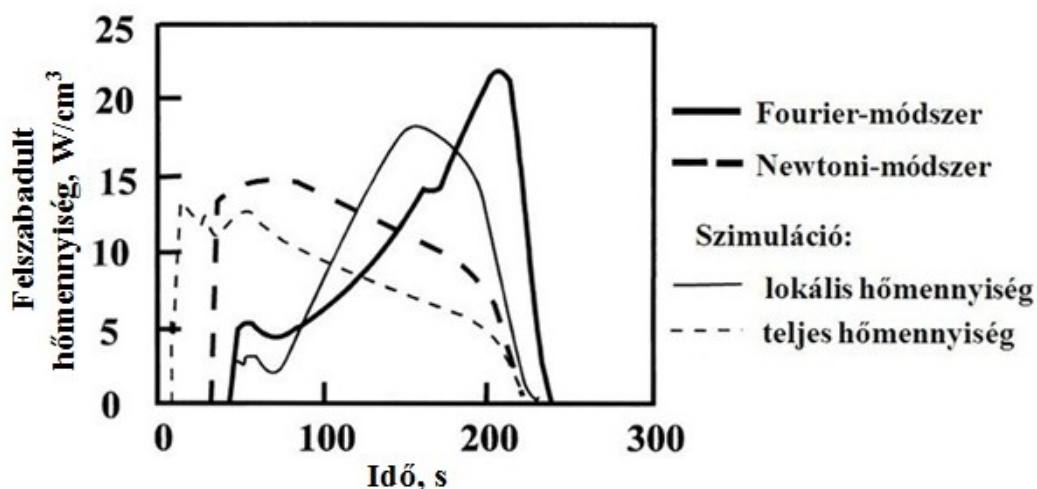
A 3.1. ábrán egy öntöttvas rúd próbatest lehülési görbéjének szimulált, mért, valamint a tárgyalt, két féle termikus analízissel meghatározott deriváltjai láthatóak. Jól kivehető a két módszer közötti különbség. Mivel a Fourier-féle termikus analízis a lokális hőmérséklet különbségek regisztrálásán alapszik, várhatóan sokkal jobban fogja közelíteni a valós értékeket, mint a Newtoni módszer [30].



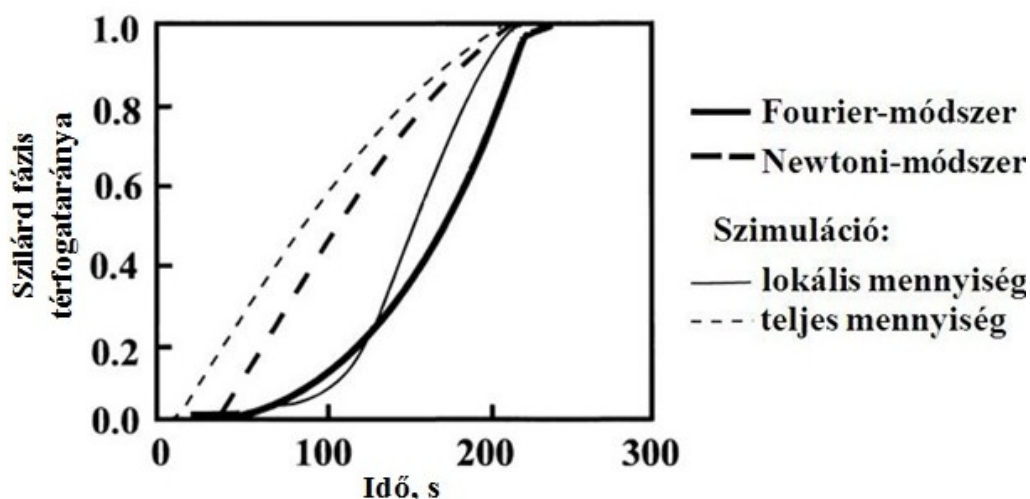
3.1. ábra - Öntöttvas próbatest lehülési görbéjének derivált értékei [30]

A 3.2. ábra a rúd próbatest dermedési folyamatainak következtében felszabaduló hőmennyiség értékeit mutatja. Látható, hogy a Newton-módszer alkalmazása esetén a dermedés kezdetét csupán egy határozott maximum jelzi a görbén, ellentétben a Fourier-féle termikus analízis során meghatározott görbével, melyen a viszonylag alacsony kezdeti maximum csúcs után egy lényegesen nagyobb maximum érték következik, amely egészen a dermedési folyamat végéig tart.

A 3.3. ábrán a kristályosodott, szilárd grafit eutektikum térfogataránya látható. A felszabaduló hőmennyiség értékeknek megfelelően, ebben az esetben is jelentősen különböznek egymástól a két különböző termikus analízissel meghatározott eredmények [30].



3.2. ábra - Öntöttvas próbatest dermedése során felszabaduló hőmennyiség értékei [30]



3.3. ábra - Öntöttvas próbatest dermedése során kialakuló szilárd fázis térfogataránya [30]

A látens hő meghatározásakor a Fourier termikus analízis sokkal megbízhatóbb, pontosabb eredményeket hoz. Ez szintén arra vezethető vissza, hogy ellentétben a Newtoni módszerrel, legalább két pontban történik a hőmérsékletmérés. Az 3.1. táblázatban korábbi szerzők [31] alumínium ötvözetre vonatkozó eredményei láthatóak. A Fourier-féle termikus analízissel számolt adatok közel megegyeznek a kalorimetriás mérések eredményeivel, amíg a Newton-féle módszerrel számolt adatok 6-11%-al alacsonyabbak.

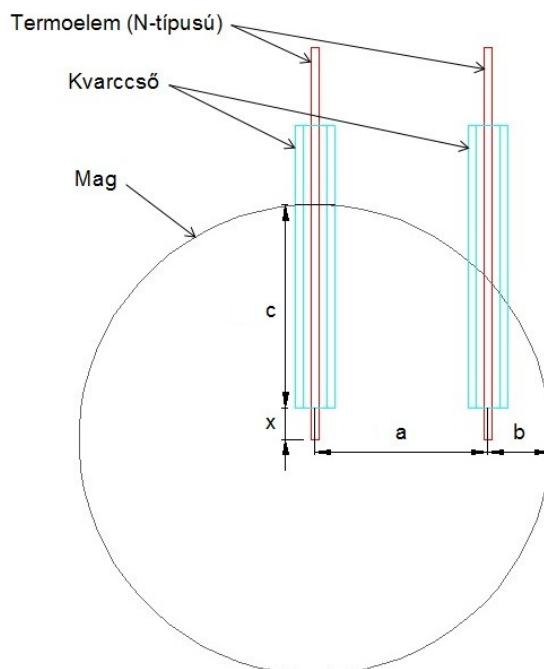
3.1. táblázat - A356 alumínium-ötvözet termikus analízissel, valamint méréssel meghatározott látens hő értékei [31]

Ötvözet	Látens hő, kJ/kg			
	Newton (polinomiális)	Newton (lineáris)	Fourier	Kalorimetria
A356 (Al-7Si%)	403	387	435	432.2

Kutatásaim során a Fourier termikus analízist a hagyományos alkalmazásától eltérő módon használtam fel. Segítségével nem lehülési folyamatot, hanem a formázókeverék olvadékkal való érintkezése során bekövetkező felhevülési folyamatot és a kötőanyagrendszer lebomlását tanulmányoztam.

3.3. A kísérleti módszer bemutatása

Kísérleteim során a műgyantakötésű formázóanyagok hőfizikai tulajdonságait és bomlási folyamatait vizsgáltam, melyhez külön erre a célra kialakított próbatesteket, valamint mérési összeállítást terveztem. A 3.4. ábrán látható a mérésekhez használt próbatest vázlata. A próbamagokat három különböző méretben készítettem el, melyek főbb méreteit a 3.2. táblázat tartalmazza.



3.4. ábra - A próbatest vázlata

3.2. táblázat - A próbamagok fő méretei

d próbatest, mm	Fő méretek, mm			
	a	b	c	x
40	10	10	15	5
50	15	10	20	5
60	20	10	25	5

A 3.5. ábrán a próbatestek elkészítésére alkalmas formaszekrény készlet látható.



3.5. ábra - A próbatestek gyártásához használt formaszekrények

A hőmérsékletmérés a próbatest két különböző pontjában történt, az egyik mérési pont a gömb középpontjában volt, a másik a próbatest szélén, a fém/mag határfelülethez közel.

A vizsgálathoz használt N-típusú hőelemeket minden esetben kvarccső védte az olvadékkal való szabad érintkezés hatásától, de a mérés szempontjából fontos végződéseik minden esetben közvetlenül érintkeztek a formázókeverékkel. A védőcső bevezetési pontját Al_2O_3 és vízüveg keverékével szigeteltem le. A próbatesteket ellenállás fűtésű kemencében hőn tartott alumínium olvadékba merítettem.

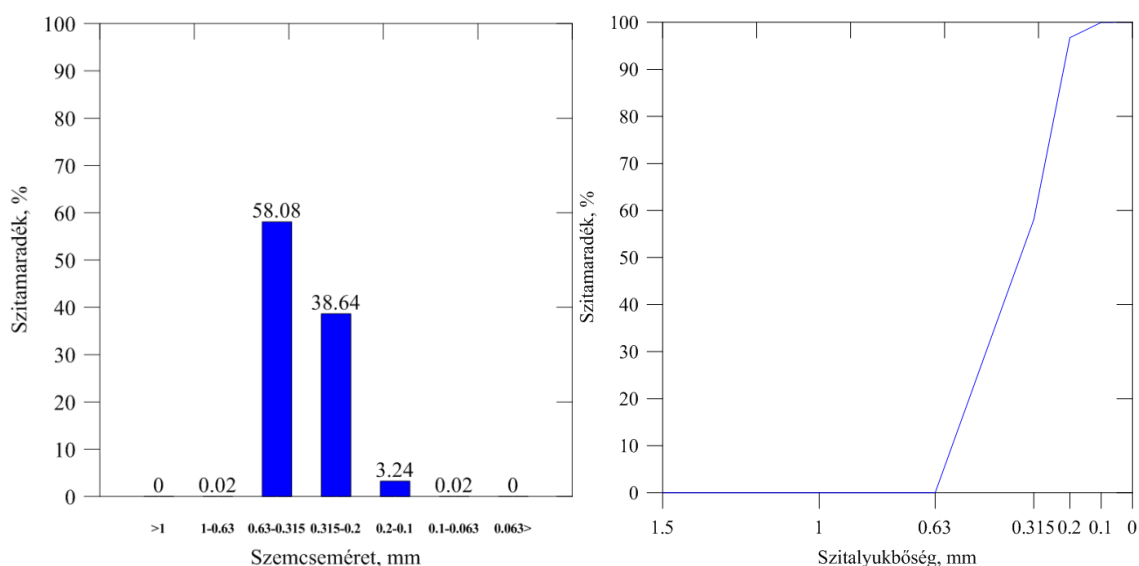
3.4. Kísérleti körülmények bemutatása

A kísérleteket az öntődékekben leggyakrabban használt műgyantakötésű formázókeverékekből készített próbatesteken végeztem el. Az egyik egy cold-box kötésű, a másik pedig egy furángyanta kötésű keverék volt, amelyeket az üzemi szinten alkalmazott összetételüknek és tulajdonságaiknak megfelelően készítettem el.

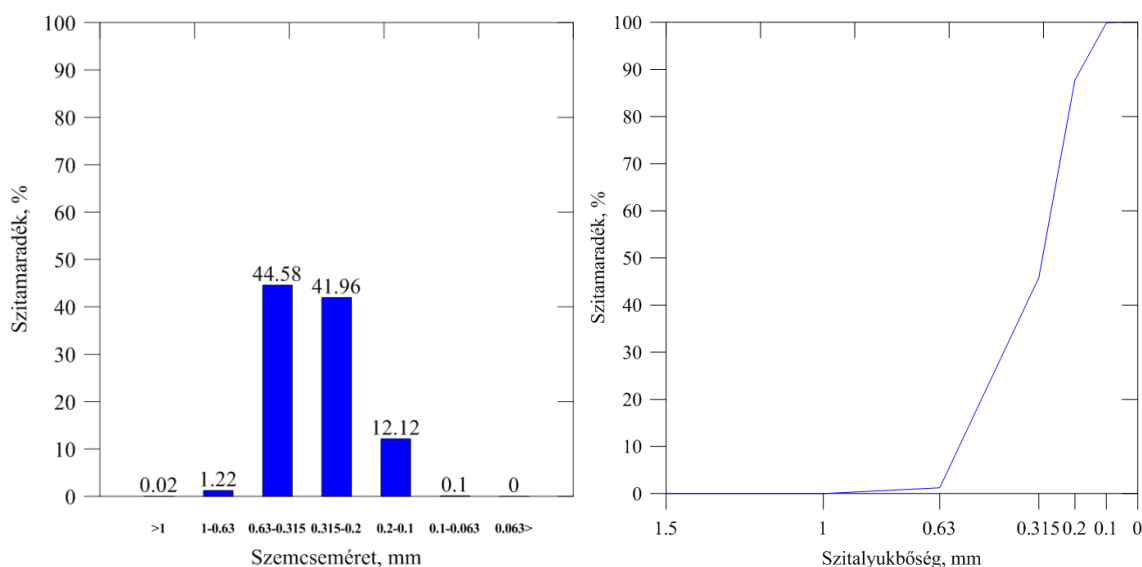
3.3. táblázat - A vizsgált keverékek összetétele

	Gyanta típus, %	Katalizátor típus, %
Cold-box	fenol 0.6 + izocianát 0.6	amingőz
Furán	furán 1.5	foszforsav, 0.375 (gyanta 25%-a)

A felhasznált homokkeverékek alaphomokját szabványos lyukbőségű szitasorozaton vizsgáltam meg. A szitákon fennmaradt mennyiségek alapján ábrázoltam oszlopdiagramon és kumulatív görbén a szemcseeloszlás-függvényt (3.6, 3.7 ábra).



3.6. ábra - Cold-box kötésű keverék alaphomokjának szemcseeloszlás függvénye és a kumulatív görbe



3.7. ábra - Furángyanta kötésű keverék alaphomokjának szemcseeloszlás függvénye és a kumulatív görbe

Az eredmények alapján látható, hogy mind a két alaphomok jellemző szemcsemérete a 0.2-0.63 mm közötti tartományba esik, azaz szabványos szemcseméretű, két jellemző frakcióból álló öntödei formázóhomokok. A kísérletek során alkalmazott homokkeverékek legfontosabb tulajdonságait a 3.4. táblázat tartalmazza.

3.4. táblázat - A vizsgált homokkeverékek tulajdonságai

	Sűrűség, g/cm ³	Szabad nedvességtartalom, %	Izzítási veszteség, %	Alaphomok fajlagos felülete, cm ² /g
Cold-box	1.45	0.1	1.31	95
Furán	1.48	0.1	1.58	100

A próbatestek elkészítésénél és tárolásánál arra törekedtem, hogy a két vizsgált formázókeverék sűrűsége és szabad nedvességtartalma megközelítően azonos legyen. Az izzítási veszteség értékek összhangban voltak az egyes keverékek kötőanyagtartalmával. A fajlagos felület meghatározása során megállapítottam, hogy az értékek megfelelnek a szitaanalízis során kapott eredményekkel.

A vizsgálat során a megfelelően előkészített próbatesteket 660±10 °C-os alumínium olvadékba mártottam.



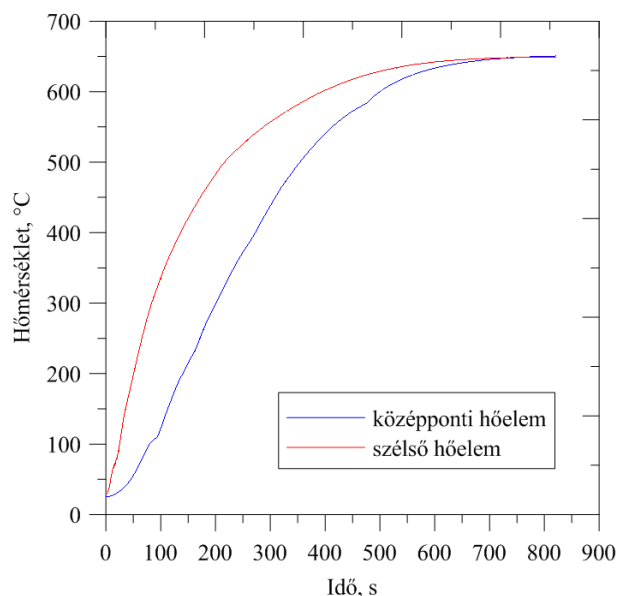
3.8. ábra - A méréshez előkészített próbatesszt



3.9. ábra - A mérés kezdete

3.5. A hőmérséklet mérés eredményei

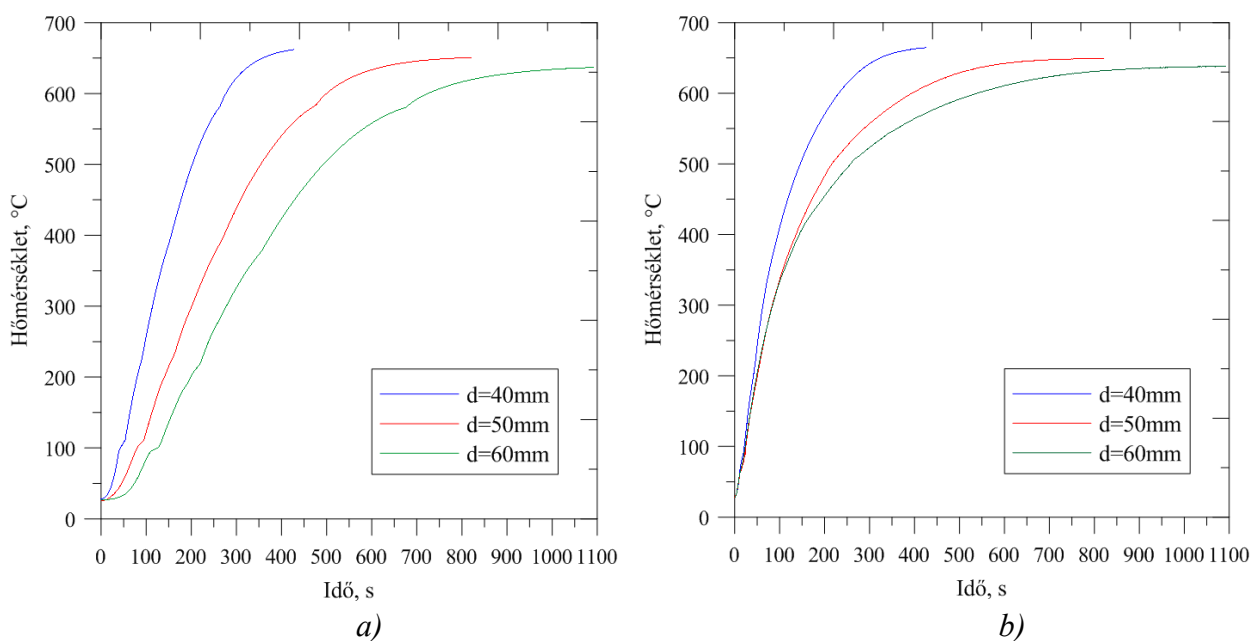
A vizsgálat közvetlen eredményei a próbatestek középpontjában és szélén elhelyezkedő termoelemek adatai alapján felvett felhevülési görbék.



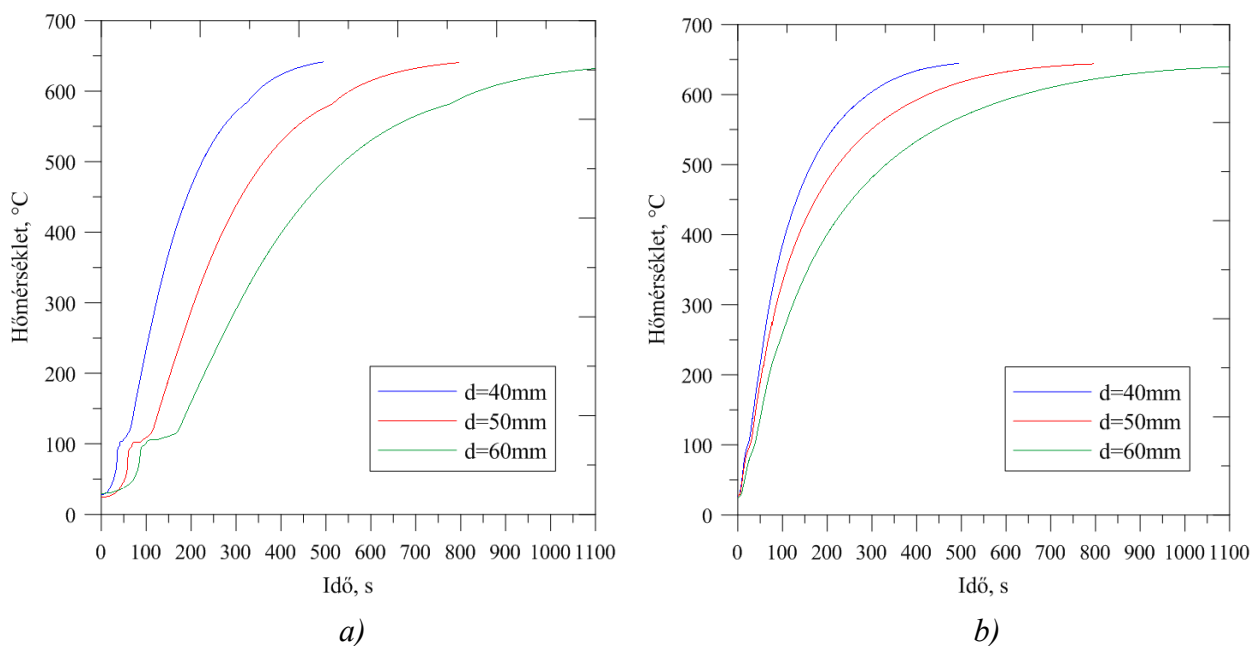
3.10. ábra - 50 mm átmérőjű, cold-box kötésű keverékből készült próbatest felhevülési diagramja

A 3.10. ábrán jól látható, hogy a próbamag középpontjában és a fém/mag határfelülethez közel eső pontban eltér a felhevülés karakterisztikája. A középpontban rögzített felhevülési görbén tisztábban látszódnak a keverékekben lejátszódó hőelnyeléssel járó folyamatok, amelyek különböző hőmérsékleteken ($\sim 100^\circ\text{C}$, $\sim 573^\circ\text{C}$) következnek be. A középponti felhevülés pontosabban jellemzi a próbatest egészét, ellentétben a szélső pont felhevülésével, amely elsősorban a fém/mag határfelület és a szélső hőelem közötti 10 mm vastagságú rétegre jellemző.

A 3.11. és 3.12. ábrákon az eltérő kötőanyaggal készített próbatestek felhevülési görbéit ábrázoltam, mindhárom átmérő esetén. A változó falvastagság (átmérő) hatására az egyes görbék eltolódnak.

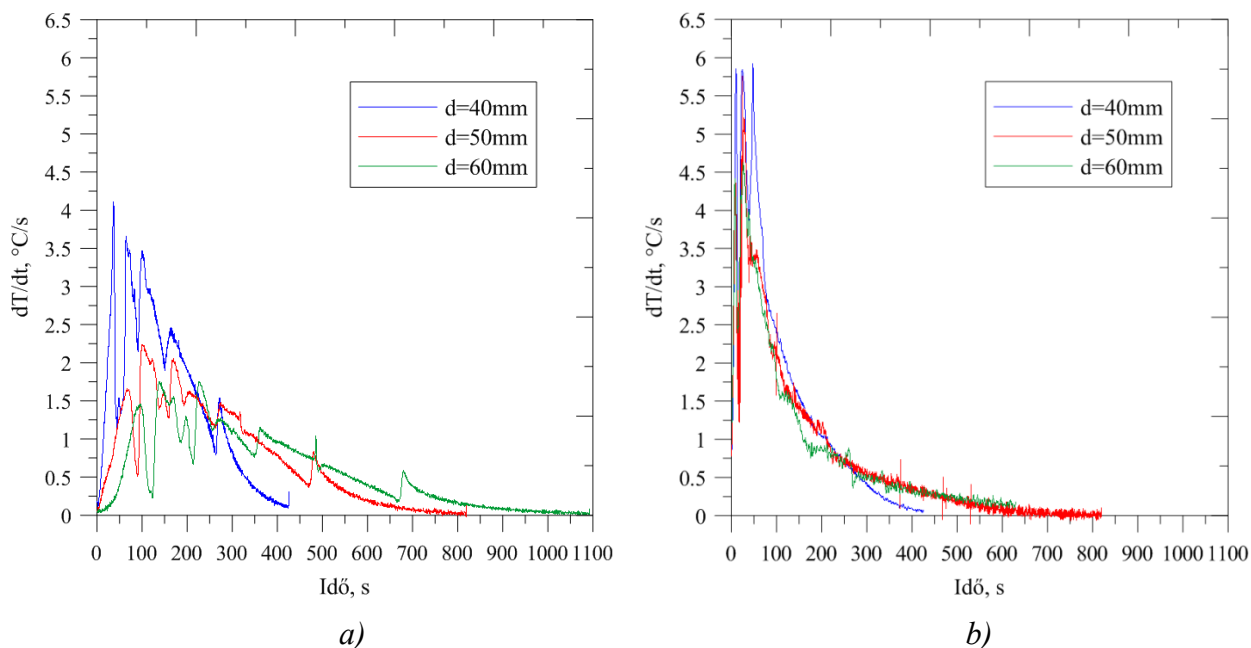


3.11. ábra - Cold-box kötésű próbatestek felhevülési karakterisztikája a középpontban (a), és a próbatest szélén (b)



3.12. ábra - Furángyanta kötésű próbatetek felhevülési karakterisztikája a középpontban (a), és a próbatest szélén (b)

A hőelnyeléssel járó folyamatok alaposabb megismerése érdekében a felhevülési görbék deriváltjait is vizsgáltam. A hőmérséklet értékek deriváltjait ábrázolva az idő függvényében ismét jól láthatóvá válik az egyes görbék elcsúszása egymáshoz képest (3.13. ábra).

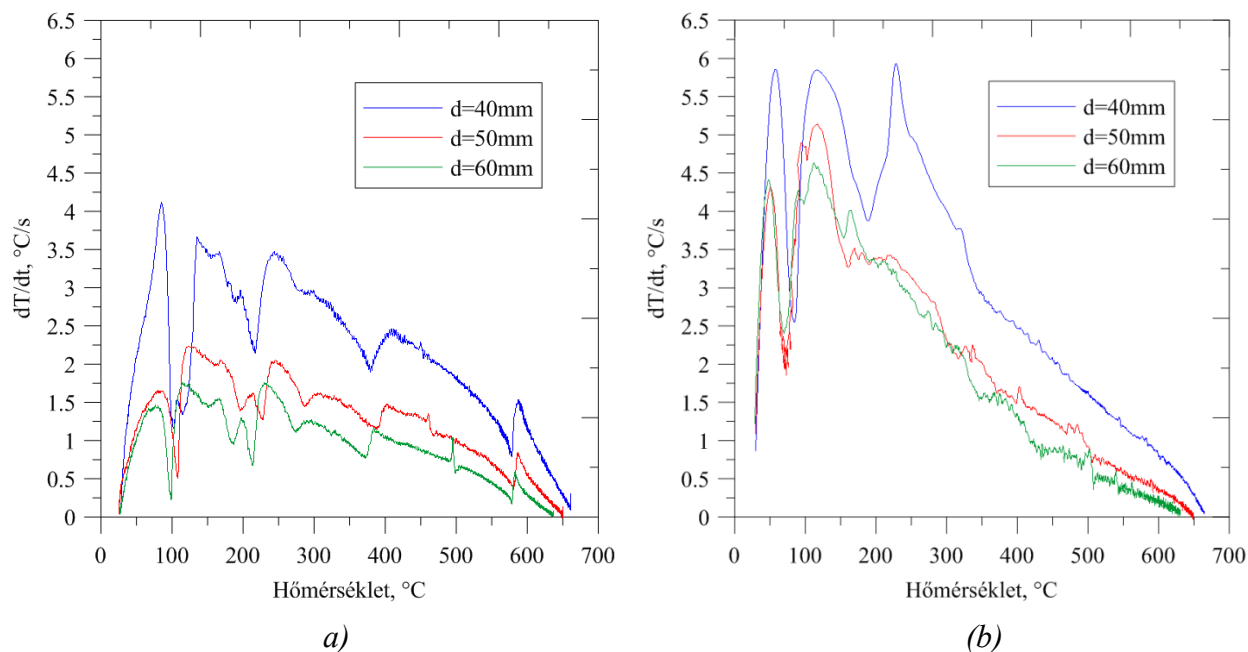


3.13. ábra - Cold-box kötésű próbatetek felhevülési sebessége a középpontban (a), és a próbatest szélén (b), az idő függvényében

A középponti termoelemek által mért eredmények deriváltjai esetén az eltérés egyenesen adódik az átmérő növekedéséből. A szélső termoelemeknél a diagram azonos időbeosztásnál teljesen összetolódik, hiszen a felület közelében a felmelegedés nagyon rövid idő alatt következik be.

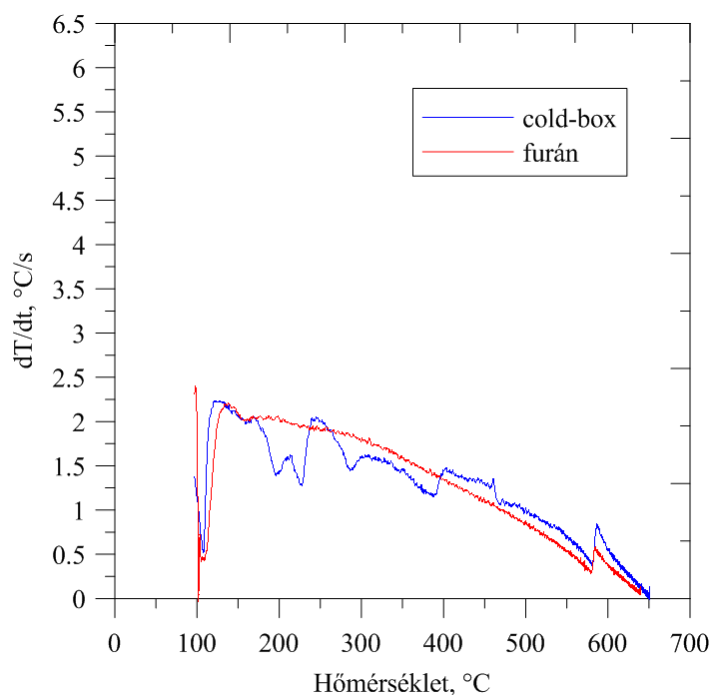
Ugyanazon keveréknél a felhevülési görbék deriváltjait ábrázolva a hőmérséklet függvényében, új információk ismerhetők meg a különböző méretű próbatestekben lezajló folyamatokról, kiküszöbölve a változó átmérők miatt fellépő időbeli eltérést.

Megfigyelhető, hogy a hőelnyeléssel járó folyamatokat jelző sebességminimumok ugyanoda esnek, tehát a mérés jól reprodukálhatónak tekinthető (3.14. ábra). Ezek a minimumok az adott keverék kötőanyagának lebomlási folyamatát is jellemzik.



3.14. ábra - Cold-box kötésű próbatestek felhevülési sebessége a középpontban (a), és a próbatest szélén (b), a hőmérséklet függvényében

A 3.15. ábrán a különböző típusú próbamagok 50 mm-es próbatesteinek felmelegedési tulajdonságait hasonlítom össze a hőmérséklet függvényében.



3.15. ábra - Különböző összetételű, 50 mm átmérőjű próbatestek felhevülési sebessége a középpontban, a hőmérséklet függvényében

A kötőanyagok bomlási folyamataira jellemző hőmérséklet tartományban (~100-450 °C), a furángyanta kötészű próbatesthez tartozó görbe lefutása sokkal egyenletesebb, mint a cold-box keverék esetén. A felhevülési görbék deriváltjai alapján tehát a furángyantás keverék kötőanyagának lebomlása egy viszonylag egyenletes folyamat, ellentétben a cold-box kötészű keverékkel, ahol a gyanta egy bonyolultabb, többlépcsős folyamatban bomlik le.

3.6. A Fourier-féle termikus analízis alkalmazása

A hőmérséklet mérés eredményeit tanulmányozva hasznos következtetéseket tudtam levonni az egyes formázókeverékek tulajdonságaira vonatkozóan. A Fourier-féle termikus analízisen alapuló módszer segítségével azonban részletesebb vizsgálatra nyílik lehetőségem, mivel kiszámolható a próbatestek által a felhevülés során elnyelt hőmennyiség pontos értéke, illetve az elnyelt hőmennyiség részaránya az egyes kötőanyagalkotókra vonatkoztatva és a hőelnyelés intenzitása is.

A felhevülési görbék kiértékelését egy olyan matematikai programmal végeztem, amely a következőkben bemutatott összefüggéseket iteratív módon alkalmazza.

A hővezetés alapegyenletei:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \dot{q} \quad \longrightarrow \quad \text{analitikus kifejezés} \quad (3.13)$$

$$\rho c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = k \nabla^2 T + \dot{q} \quad \longrightarrow \quad \text{numerikus kifejezés} \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \alpha \nabla^2 T - \dot{q} \quad \longrightarrow \quad \text{hőelnyeléssel járó folyamat esetén} \quad (3.15)$$

ahol:

ρ - sűrűség, kg/m³

c_p - fajlagos hőkapacitás, J/kgK

T - hőmérséklet, °C

t - idő, s

$\dot{q}$ - halmazállapot változás során felszabaduló vagy elnyelt hő mennyisége, J/kg

k - hővezetési tényező, W/mK

α - hődiffúziós állandó, m²/s

$\nabla^2 T$ - Laplace-operátor (a hőmérséklet második deriváltja a tér függvényében), °C/m²

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ - felhevülési sebesség, °C/s

Hődiffúziós képesség:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.16)$$

Ha $\dot{q}=0$, akkor nincs hőelnyeléssel járó folyamat, a (3.15) egyenlet alakja:

$$\alpha = \frac{dT/dt}{\nabla^2 T} \quad (3.17)$$

Ebből kiszámítható a folyamat elején (mikor még nincs hőelnyeléssel járó folyamat) és a folyamat végén (mikor már kiégett a kötőanyag) a hődiffúziós állandó. A kettő közötti α értékeket iteratív módon kapjuk.

A Laplace-operátort a különböző koordináta rendszerekben a következőképpen lehet felírni síkbeli, hengeres, valamint gömb geometriára:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.18)$$

[7]

Mivel a kísérletekben használt gömb alakú próbatestet a legpontosabban a poláris gömb-koordináta rendszerben lehet értelmezni, a számításhoz a gömb geometriára vonatkozó egyenletet használtam, ahol:

R_1 - középső hőelem mérési helye, a gömb középpontjától mért távolsága, m
 R_2 - szélső hőelem mérési helye, a gömb középpontjától mért távolsága, m
 T_1 - középső hőelem által mért hőmérséklet, °C
 T_2 - szélső hőelem által mért hőmérséklet, °C

Korábbi szerzők [32] által ismertett módszer alapján, a gömb-koordináta rendszerben értelmezett Laplace-operátor numerikus megoldása:

$$\nabla^2 T = \frac{8(T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (3.19)$$

Így a (3.15) egyenletben csak a pillanatnyi elnyelt hő marad, mint ismeretlen.

Teljes elnyelt hőmennyiség (kJ/kg):

$$L = \int_{t_b}^{t_e} q(t) dt \quad (3.20)$$

Az elnyelt hő részaránya:

$$f(t) = \frac{1}{L} \int_{t_b}^t q(t) dt \quad (3.21)$$

[4]

3.7. A termikus analízis eredményei

A Fourier-féle termikus analízis során először a különböző formázókeverékekből készült próbamagok által összesen elnyelt hőmennyiséget számoltam ki. Összesen elnyelt hőmennyiség alatt ebben az esetben a teljes érzékelhető meleget, valamint a kvarc allotróp átalakulásának, illetve a szabad nedvességtartalom és a kötött víz elpárolgásának látens hőjét értem. Az eredményeket az 3.5. táblázat tartalmazza.

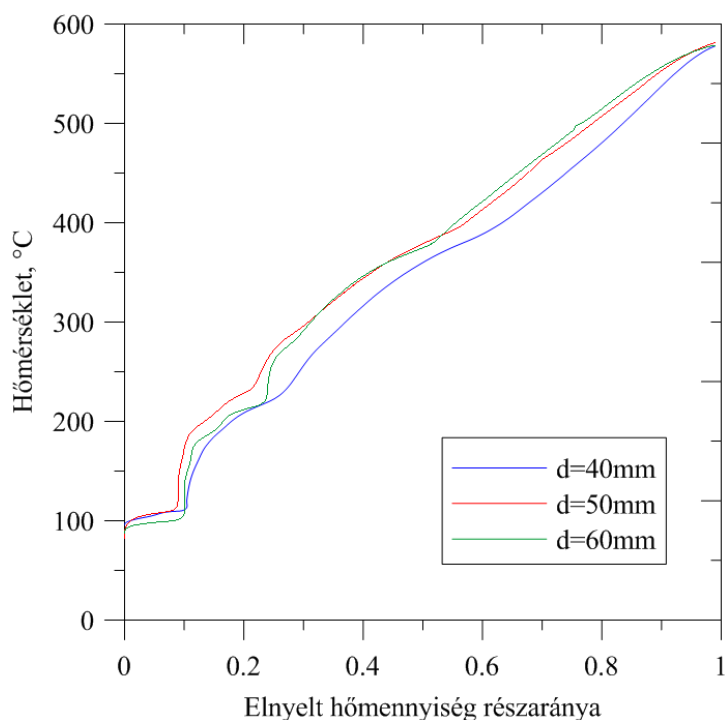
3.5. táblázat - Teljes elnyelt hőmennyiség értékei

	Teljes elnyelt hőmennyiség, kJ/kg		
	d=40 mm	d=50 mm	d=60 mm
Cold-box kötésű keverék	206	209	210
Furángyanta kötésű keverék	461	463	460

Látható, hogy a furángyanta kötésű keverék falvastagságtól függetlenül több mint kétszer annyi hőt nyel el a kísérlet során, mint a cold-box kötésű keverék. Ez a fém/mag határfelületen lejátszódó folyamatokra, valamint a kristályosodásra jelentős befolyással bír, azonban a hőelnyelést szükséges részletesebben, a kísérletre jellemző teljes hőmérséklet tartományban vizsgálni.

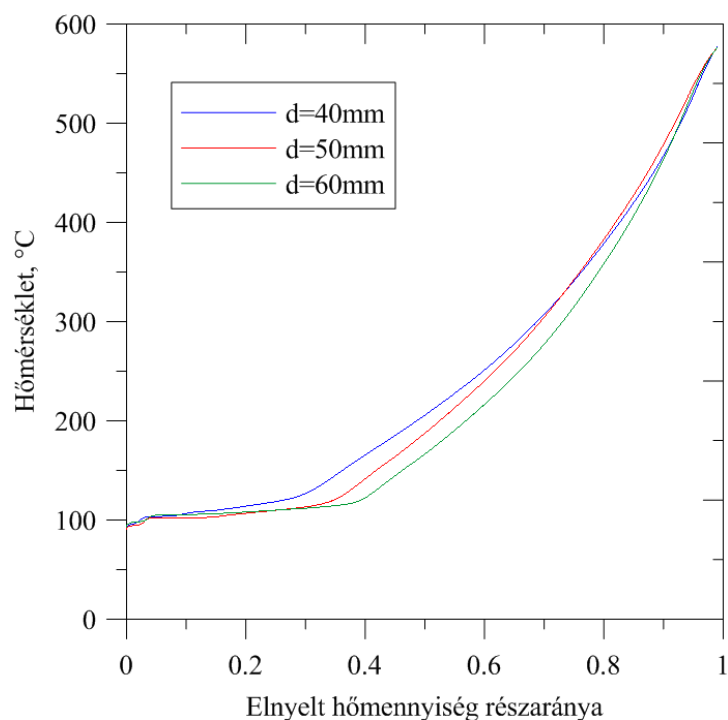
A 3.16. ábrán a cold-box kötésű próbatestek által elnyelt hőmennyiség részarányai láthatóak a hőmérséklet függvényében. A 100 °C körül jelentkező vízszintes szakaszokon az elnyelt hő aránya nő, közel állandó hőmérséklet mellett. Ekkor a formázókeverékben lévő szabad nedvességtartalom, illetve a kötött víz elpárolgása után a nagy hőmérséklet hatására túlhevített gőz jelenik meg a rendszerben.

Leolvasható, hogy cold-box kötésű próbamagoknál ez a folyamat a teljes elnyelt hőmennyiség körülbelül 10%-át teszi ki, ami ismerve a teljes elnyelt hőmennyiség értékeit, számszerűleg körülbelül 20 kJ/kg-ot jelent. A görbék 110 °C feletti része az egyes kötőanyag alkotók lebomlási folyamatait jelzi.



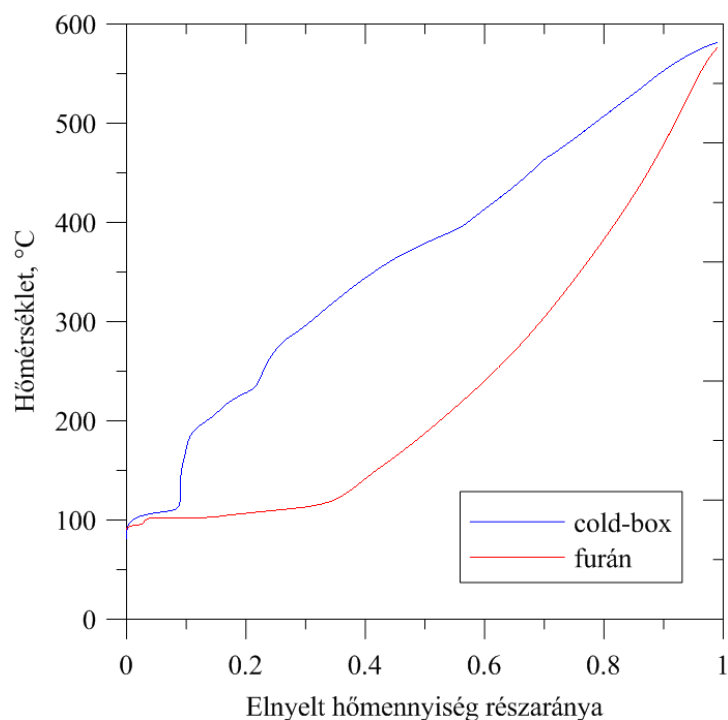
3.16. ábra - Az elnyelt hőmennyiség részarányai cold-box kötésű próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

A furángyanta kötésű próbatestekhez tartozó görbéken a 100 °C körül lévő vízszintes szakaszok lényegesen hosszabbak (3.17. ábra). A szabad nedvességtartalom valamint a kötött víz elgőzölgéséhez felhasznált hőmennyiség körülbelül 30-40%-át teszi ki a teljes elnyelt hőmennyiségnek. Ennek oka, hogy a cold-box kötésű magokkal ellentétben, ahol gőz halmazállapotú volt a katalizátor, a furángyanta keverékeknél foszforsavat használtam. Így a különböző keverékek kötött víz tartalma lényegesen eltért.



3.17. ábra - Az elnyelt hőmennyiség részarányai furángyanta kötésű próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

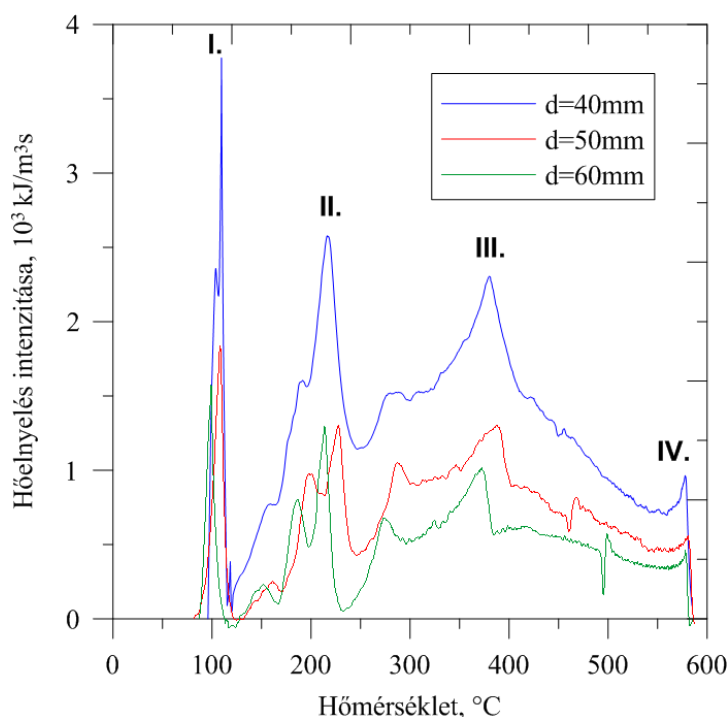
Egy diagramon ábrázolva az azonos méretű próbatestek eredményeit, jobban láthatóvá válnak az eltérő lebomlási folyamatok közötti különbségek (3.18. ábra).



3.18. ábra - Az elnyelt hőmennyiség részarányai a különböző keverékekből készült, 50 mm-es próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

A hőelnyelés intenzitását ábrázolva a hőmérséklet függvényében, pontosabb és részletesebb kép alkotható az egyes kötőanyagok lebomlási karakterisztikájáról.

Adott hőmérsékleteken kirajzolódnak az egyes komponensek elgőzölgésére, illetve lebomlására jellemző maximumok, melyek a hőelnyelés intenzitásának hirtelen megnövekedését jelzik. A hőelnyelés intenzitása a hőmérséklet függvényében, cold-box kötésű próbamagok esetén a 3.19. ábrán látható.

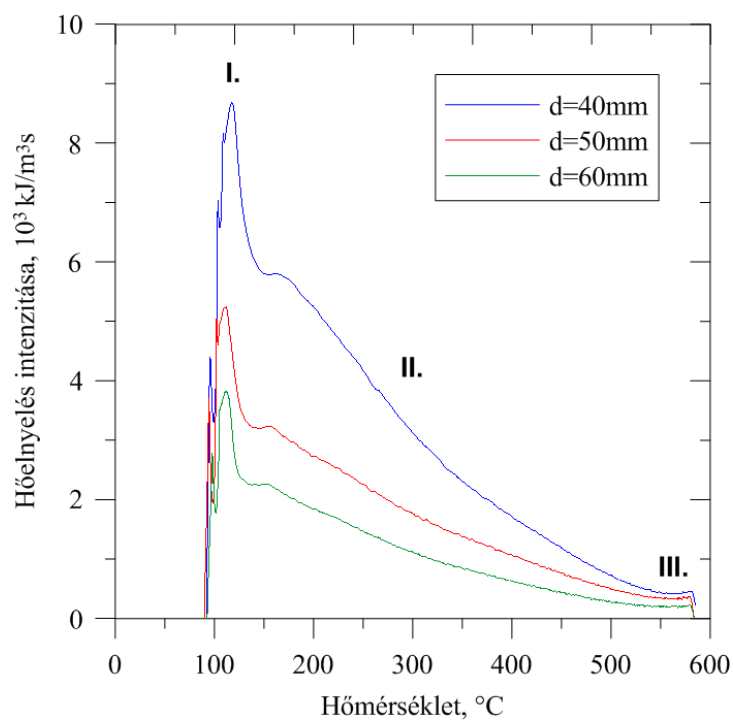


3.19. ábra - A hőelnyelés intenzitása cold-box kötésű próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

A görbéken a 100 °C körüli maximum csúcsok (I) jelzik a kötött víz, valamint a szabad nedvességtartalom elgőzölgésének folyamatát. Cold-box kötésű próbák esetén a kötőanyag alkotók lebomlása viszonylag komplex folyamat, az egyes maximumok eltérő hőtani viselkedésű komponensek jelenlétére utalnak a gyantában (II-III). Ezek többek között a gázképződés lefolyását is befolyásolják majd.

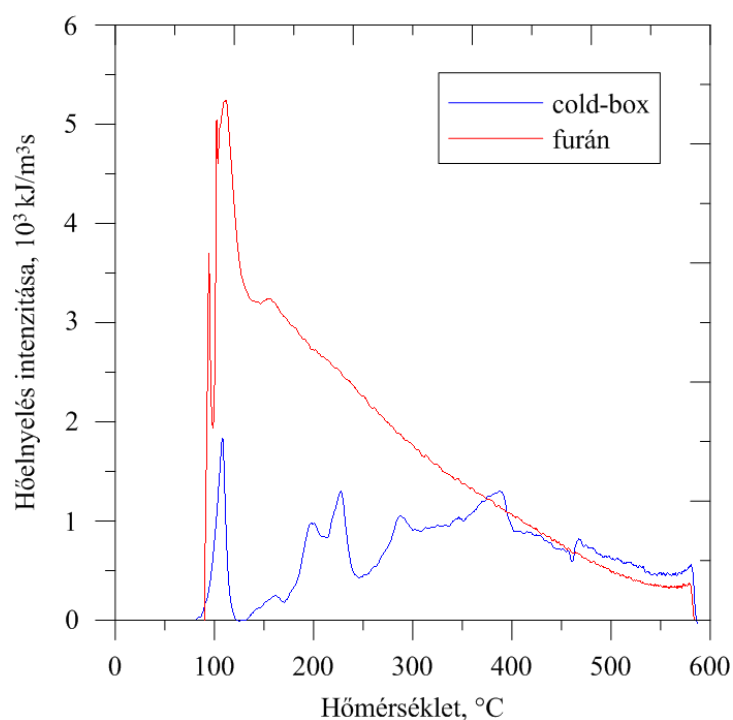
A görbék utolsó szakaszán látható intenzitásnövekedés (IV) az 573 °C-on bekövetkező β - α kvarcátalakulás folyamatát jelzi. Ez a jelenség a homokszemcsék térfogatának hirtelen növekedésével jár.

A kötőanyag komponensek lebomlásának karakterisztikája lényegesen eltér a furángyanta kötésű próbamagok esetén (3.20. ábra). A szabad nedvességtartalom és a kötött víz elpárolgása után (I) a gyanta bomlási folyamata (II) sokkal egyenletesebb ütemben zajlik. Az β - α kvarcátalakulást kísérő intenzitásnövekedés ebben az esetben is megtalálható (III).



3.20. ábra - A hőelnyelés intenzitása a furángyanta kötésű próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

A 3.21. ábrán a különböző kötőanyagrendszerek hőelnyelési intenzitása látható a hőmérséklet függvényében. Az ábrázolt 50 mm átmérőjű próbák közötti különbség egyértelmű, a görbék nemcsak a karakterisztikájukban különböznek, hanem a 100 $^\circ\text{C}$ környékén látható maximum értékekben is. A furángyanta kötésű próbák hőelnyelő képessége ez alapján a 100 $^\circ\text{C}$ körüli hőmérséklet tartományban körülbelül háromszor nagyobb, mint cold-box kötésű próbák esetén. Ez nagyon fontos technológiai paraméter, mivel ez a maghőmérséklet az öntés kezdeti időszakára jellemző.



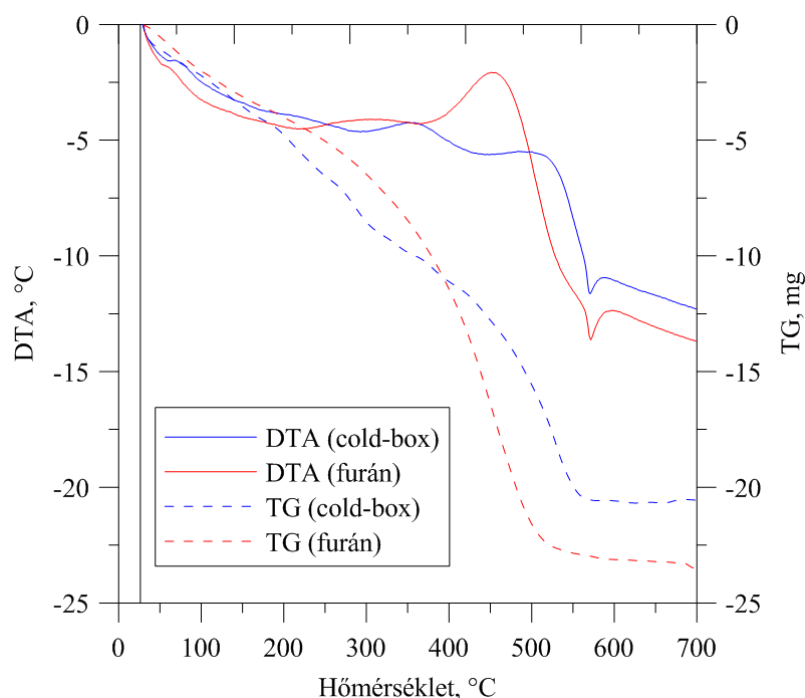
3.21. ábra - A hőelnyelés intenzitása a különböző keverékekből készült 50 mm-es próbatestek esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

Ekkor a magok vagy a formák nagyobb hőelnyelő képessége nyomán gyorsan kialakulhat a kezdeti szilárd kéreg a mag és/vagy forma körül, ami később megakadályozhatja a kötőanyag bomlása során képződő gázok behatolását a folyékony fémbe, így nem alakul ki gázporozitás, gázhólyagos selejt.

A viszonylag hamar kialakuló kezdeti kéreg a penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulását is befolyásolja. Nagyobb hőelnyelő képességgel rendelkező magok esetén a fém/mag határfelülethez közeli fémréteg dermedési ideje jelentősen lecsökken. Így a folyékony fém a rohamosan növekvő viszkozitása miatt nehezebben jut el a formázókeverék pórusai közé, így csökken a fémbehatolás mértéke.

3.8. A derivatográfus mérések eredményei

A kísérletek során felhasznált formázókeverékeket derivatográfon is megvizsgáltam, a saját fejlesztésű módszerrel történő összehasonlítás céljából. Az eredmények a 3.22. ábrán láthatóak.



3.22. ábra - A derivatográfus vizsgálatok eredményei

A derivatográfus mérés és a Fourier-féle termikus analízis eredményeit összehasonlítva megállapítottam, hogy az egyes kötőanyag komponensek lebomlását, illetve a kvarc allotróp átalakulását jelző szakaszok a DTA görbéken is megtalálhatóak mindkét homokkeverék esetén. Ezek a folyamatok azonban nem jelennek meg a görbéken kellő részletességgel.

Ennek oka, hogy amíg a derivatográf egyensúlyi felmelegedést biztosít, addig a saját módszer alkalmazásakor a próbamagot sokszerű hőhatás éri és létrejön egy a térben és időben változó hőmérséklettér, ahogy az a valós öntési körülmények között is történik.

További különbség, hogy a derivatográf rendkívül kicsi, öntészeti szempontból elhanyagolható tömegű próbát elemez, az általam használt 40, 50 és 60 mm falvastagságok viszont rendkívül gyakoriak a mag-, illetve az öntvénygyártás folyamatában.

A derivatográfus mérés levegő atmoszféra alatt történt, az öntés során azonban nem játszódnak le annyira klasszikusnak tekinthető égési folyamatok, mint amilyenek a derivatográf levegő atmoszférája alatt mennek végbe. Összességében tehát megállapítottam, hogy a saját fejlesztésű módszer segítségével a formázókeverékekben magas hőmérsékleten lejátszódó reakciók sokkal pontosabban és részletesebben vizsgálhatóak.

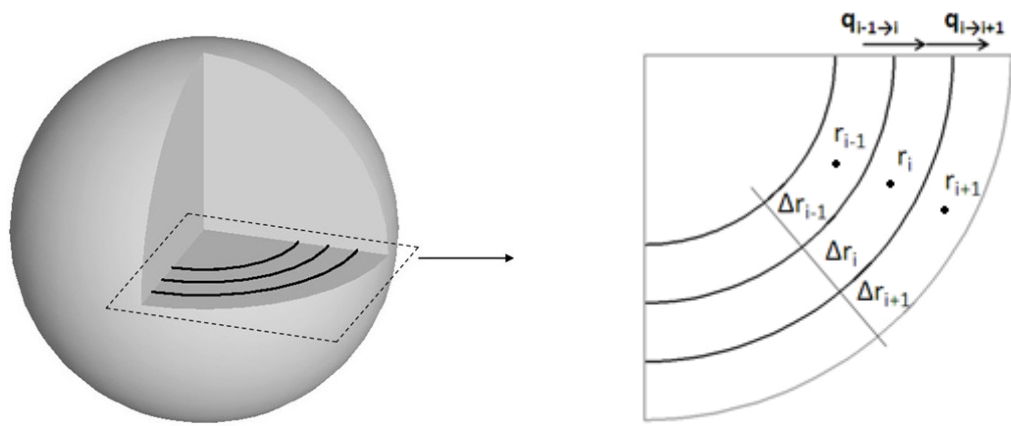
3.9. Szimuláció

Kutatómunkám során a következő célom a vizsgálatok során lejátszódó hőtani jelenségek matematikai megfogalmazása és modellezése volt, mely ismeretek alapján lehetőségem nyílt egy külön erre a kísérleti módszerre írt szimulációs program megalkotására. A mérés során a próbatestben lejátszódó hőterjedési folyamatokat leíró matematikai modellt írtam fel gömbkoordináta rendszerre, a tér elemekre történő felosztásának segítségével.

3.9.1. A próbatest felhevülési folyamatának matematikai modellezése

3.9.1.1. A hővezetés alapegyenletének analitikus megoldása

Az 3.23. ábrán az r sugarú elemekre felbontott térfogat látható, az egyes elemek középpontjától lévő távolságot i -vel jelöltem.



3.23. ábra - A próbatest térfogatának r sugarú elemekre történő felbontása

A hővezetés alapegyenletébe behelyettesítve a gömb felszínét:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow A = 4\pi r^2 \quad (3.22)$$

a következő egyenletet kaptam:

$$\frac{q}{4\pi r^2} dr = -k dT, \quad (3.23)$$

amely integrálva:

$$\frac{q}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} r^{-2} dr = -k \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (3.24)$$

↓

$$\frac{q}{4\pi} \left[\frac{r^{-1}}{-1} \right]_{r_1}^{r_2} = -k(T_2 - T_1) \quad (3.25)$$

↓

$$\frac{q}{4\pi} (r_2^{-1} - r_1^{-1}) = k(T_2 - T_1) \quad (3.26)$$

összefüggés adódik.

Az (3.26) összefüggést q -ra kifejezve megkaptam a hővezetést leíró egyenletet gömb-koordináta rendszerben definiálva:

$$q = \frac{4\pi k(T_2 - T_1)}{\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}} \rightarrow \mathbf{q} = \frac{4\pi k(T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (3.27)$$

3.9.1.2. A hővezetés alapegyenletének numerikus megadása

A szakirodalomban az FDM-CV (Finite Difference Method-Control Volume) módszerként ismert numerikus eljárást használtam a szimulációs modell kifejlesztésére. A rendszer hőegyensúlyát jellemző egyenlet felírható gömb-koordináta rendszerben. Az egyensúly Hattel [27] szerint a

$$Q = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} q_j + Q_f \quad (3.28)$$

összefüggéssel fejezhető ki, ahol a rendszer teljes hőtartalma adott időpillanatban:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.29)$$

Az N felületen áthaladó hőáram az $i-1$ térelem középpontjától az i térelem középpontjáig a

$$q_{i-1 \rightarrow i} = - \frac{T_i - T_{i-1}}{R_{i-1 \rightarrow i}}, \quad (3.30)$$

az i térelem középpontjától az $i+1$ térelem középpontjáig pedig a

$$q_{i \rightarrow i+1} = - \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i \rightarrow i+1}} \quad (3.31)$$

egyenletek szerint alakul, Q_f pedig a kristályosodás során felszabaduló hőmennyiség.

Esetemben az egyensúlyt leíró egyenletben (3.28) a „+” előjel negatívra változik, mivel én hőfelszabadulás helyett hőelnyeléssel foglalkozok. Eszerint a hőelnyelésre vonatkozó alapegyenlet:

$$Q = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} q_j - Q_{elnyelt} \quad (3.32)$$

A (3.29), (3.30) és (3.31) összefüggéseket behelyettesítve az új alapegyenletbe (3.32) a következőt kaptam:

$$V_i(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{i-1 \rightarrow i} - q_{i \rightarrow i+1} - Q_{elnyelt,i} = - \frac{T_i - T_{i-1}}{R_{i-1 \rightarrow i}} - \left\{ - \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i \rightarrow i+1}} \right\} - Q_{elnyelt,i} \quad (3.33)$$

amelyet átrendezve megkaptam a hővezetés alapegyenletének numerikus alakját:

$$V_i(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{T_{i-1} - T_i}{R_{i-1 \rightarrow i}} + \frac{T_{i+1} - T_i}{R_{i \rightarrow i+1}} - Q_{elnyelt,i} \quad (3.34)$$

3.9.1.3. A termikus ellenállás és a gömb térfogatának numerikus megadása

A (3.27) összefüggés alapján felírtam a termikus ellenállást ugyancsak gömb-koordináta rendszerben:

$$R_{th} = \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{4\pi k} \quad (3.35)$$

A próbatest geometriája miatt a térfogatelemeken belül változik a termikus ellenállás értéke is, így azt is szükséges külön definiálni az $i-1$ térelem középpontjától az i térelem középpontjáig:

$$R_i^{bal} = \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{4\pi k} \quad (3.36)$$

valamint, az i térelem középpontjától az $i+1$ térelem középpontjáig:

$$R_i^{jobb} = \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_i + \frac{\Delta r_i}{2}}}{4\pi k} \quad (3.37)$$

A termikus ellenállás a következőképpen alakul az $i-1$ térelem középpontjától az i térelem középpontjáig:

$$R_{i-1 \rightarrow i} = R_{i-1}^{jobb} + R_i^{bal} + R_{i-1 \rightarrow i}^{határfelület} \quad (3.38)$$

$$R_{i-1}^{jobb} = \frac{\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-1} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2}}}{4\pi k_{i-1}} \quad (3.39)$$

$$R_i^{bal} = \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{4\pi k_i} \quad (3.40)$$

$$R_{i-1 \rightarrow i}^{határfelület} = \frac{M_{i-1 \rightarrow i}}{4\pi \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2}\right)^2} \quad (3.41)$$

$$R_{i-1 \rightarrow i} = \frac{\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-1} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2}}}{4\pi k_{i-1}} + \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{4\pi k_i} + \frac{M_{i-1 \rightarrow i}}{4\pi \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2}\right)^2} \quad (3.42)$$

ahol:

$M_{i-1 \rightarrow i}$ - hőellenállási tényező $i-1$ és i térfogatelem között

valamint, az i térelem középpontjától az $i+1$ térelem középpontjáig:

$$R_{i \rightarrow i+1} = R_i^{jobb} + R_{i+1}^{bal} + R_{i \rightarrow i+1}^{határfelület} \quad (3.43)$$

$$R_i^{jobb} = \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_i + \frac{\Delta r_i}{2}}}{4\pi k_i} \quad (3.44)$$

$$R_{i+1}^{bal} = \frac{\frac{1}{r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2}} - \frac{1}{r_{i+1}}}{4\pi k_{i+1}} \quad (3.45)$$

$$R_{i \rightarrow i+1}^{határfelület} = \frac{M_{i \rightarrow i+1}}{4\pi \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{2}\right)^2} \quad (3.46)$$

$$R_{i \rightarrow i+1} = \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+\frac{\Delta r_i}{2}}}}{4\pi k_i} + \frac{\frac{1}{r_{i+1-\frac{\Delta r_{i+1}}{2}}} - \frac{1}{r_{i+1}}}{4\pi k_{i+1}} + \frac{M_{i \rightarrow i+1}}{4\pi \left(r_{i+1-\frac{\Delta r_{i+1}}{2}}\right)^2} \quad (3.47)$$

ahol: $M_{i \rightarrow i+1}$ a hőellenállási tényező i és $i+1$ térfogatelem között.

A gömb térfogata elemek szerint a következőképpen írható fel:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{2}\right)^3 - \frac{4}{3}\pi \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2}\right)^3 \quad (3.48)$$

↓

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(r_i^3 + 3r_i^2 \frac{\Delta r_i}{2} + 3r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3\right) \quad (3.49)$$

↓

$$V = -\frac{4}{3}\pi \left(r_i^3 - 3r_i^2 \frac{\Delta r_i}{2} + 3r_i \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^2 - \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3\right) \quad (3.50)$$

↓

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot 6r_i^2 \frac{\Delta r_i}{2} + \frac{4}{3}\pi \cdot 2 \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3 \quad (3.51)$$

↓

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(6 \cdot r_i^2 \frac{\Delta r_i}{2} + 2 \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3\right) \quad (3.52)$$

↓

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(3r_i^2 \cdot \Delta r_i + \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3 + \left(\frac{\Delta r_i}{2}\right)^3\right) \quad (3.53)$$

↓

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(3r_i^2 \cdot \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{4}\right) \quad (3.54)$$

↓

$$V = 4\pi \left(r_i^2 \cdot \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{12}\right) \quad (3.55)$$

3.9.2. A hővezetés alapegyenletének megoldása gömb-koordináta rendszerben, FDM-CV módszerrel

A (3.34) összefüggésbe behelyettesítve az általam felírt termikus ellenállásra (3.42), (3.47) valamint térfogatra (3.55) vonatkozó alakokat az alábbi egyenletet kaptam:

$$\begin{aligned}
& 4\pi \left(r_i^2 \cdot \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{12} \right) (\rho c_p)_i \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = \\
& = \frac{T_{i-1} - T_i}{\frac{\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-1} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2}}}{4\pi k_{i-1}} + \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{4\pi k_i} + \frac{M_{i-1 \rightarrow i}}{4\pi \left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right)^2}} + \\
& + \frac{T_{i+1} - T_i}{\frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_i + \frac{\Delta r_i}{2}}}{4\pi k_i} + \frac{\frac{1}{r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2}} - \frac{1}{r_{i+1}}}{4\pi k_{i+1}} + \frac{M_{i \rightarrow i+1}}{4\pi \left(r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right)^2}} - Q_{elnyelt,i}
\end{aligned} \tag{3.56}$$

melyet rendezve a

$$\begin{aligned}
& \left(r_i^2 \cdot \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{12} \right) (\rho c_p)_i \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = \\
& = \frac{T_{i-1} - T_i}{\frac{\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-1} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2}}}{k_{i-1}} + \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{k_i} + \frac{M_{i-1 \rightarrow i}}{\left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right)^2}} + \\
& + \frac{T_{i+1} - T_i}{\frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_i + \frac{\Delta r_i}{2}}}{k_i} + \frac{\frac{1}{r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2}} - \frac{1}{r_{i+1}}}{k_{i+1}} + \frac{M_{i \rightarrow i+1}}{\left(r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2} \right)^2}} - \frac{Q_{elnyelt,i}}{4\pi}
\end{aligned} \tag{3.57}$$

összefüggés adódott.

Az egyszerűsítés kedvéért a következőképpen neveztem el az egyes blokkokat:

$$HOR = \left(r_i^2 * \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{12} \right) (\rho c_p)_i \cdot \frac{1}{\Delta t} \tag{3.58}$$

$$HXR_i = \frac{1}{\frac{\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-1} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2}}}{k_{i-1}} + \frac{\frac{1}{r_i - \frac{\Delta r_i}{2}} - \frac{1}{r_i}}{k_i} + \frac{M_{i-1 \rightarrow i}}{\left(r_i - \frac{\Delta r_i}{2} \right)^2}} \tag{3.59}$$

$$HXR_{i+1} = \frac{1}{\frac{1}{r_i} \frac{1}{r_{i+\frac{\Delta r_i}{2}}} + \frac{1}{r_{i+1} \frac{1}{r_{i+\frac{\Delta r_{i+1}}{2}}}} + \frac{M_{i \rightarrow i+1}}{(r_{i+1} - \frac{\Delta r_{i+1}}{2})^2}} \quad (3.60)$$

melyek alapján a (3.57) összefüggés új alakja:

$$HOR_i \Delta T_i = HXR_i (T_{i-1} - T_i) + HXR_{i+1} (T_{i+1} - T_i) - \frac{Q_{elnyelt,i}}{4\pi} \quad (3.61)$$

Numerikusan megközelítve a jelenséget:

$$\begin{aligned} HOR_i &= (1 - \theta) \cdot \left\{ HXR_i (T_{i-1} - T_i) + HXR_{i+1} (T_{i+1} - T_i) - \frac{Q_{elnyelt,i}}{4\pi} \right\}^t + \\ &\quad \theta \cdot \left\{ HXR_i (T_{i-1} - T_i) + HXR_{i+1} (T_{i+1} - T_i) - \frac{Q_{elnyelt,i}}{4\pi} \right\}^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (3.62)$$

↓

$$\begin{aligned} HOR_i^t \Delta T_i &= (1 - \theta) \cdot \left\{ HXR_i^t (T_{i-1}^t - T_i^t) + HXR_{i+1}^t (T_{i+1}^t - T_i^t) - \frac{Q_{elnyelt,i}^t}{4\pi} \right\} + \\ &\quad \theta \cdot \left\{ HXR_i^t (T_{i-1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) + HXR_{i+1}^t (T_{i+1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) - \frac{Q_{elnyelt,i}^{t+\Delta t}}{4\pi} \right\} \end{aligned} \quad (3.63)$$

ahol:

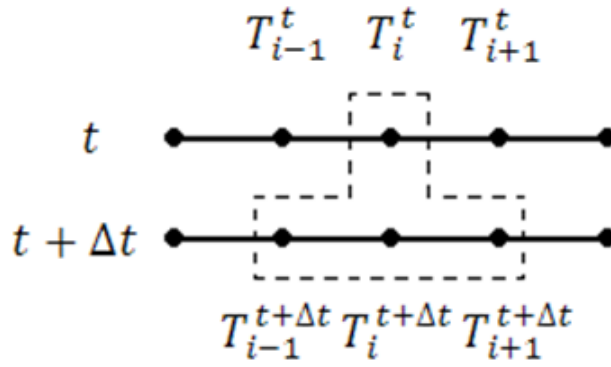
- HOR - rendszer teljes hőtartalma,
- HXR - kondukcióval terjedő hőmennyiség,
- $\theta = 0 \rightarrow$ explicit módszer,
- $\theta = 1 \rightarrow$ implicit módszer.

Az egyensúlyi egyenlet meghatározása kétféle úton történhet, explicit valamint implicit módszerrel.

Az explicit eljárás esetén az új hőmérséklet a központi elemben ($T_i^{t+\Delta t}$) a régi időpontból származó központi, valamint a tőle jobbra és balra eső elemek felhasználásával számítható a (3.61) egyenlet segítségével a $\theta=0$ esetben, ahol a ($T_i^{t+\Delta t}$) az ismeretlen tag.

Az implicit eljárás esetén a 3.24. ábrán bemutatott séma szerint az új időpontban a központi, valamint a tőle jobbra és balra eső elemek hőmérséklete a régi időpontból származó központi elem hőmérsékletének (T_i^t) felhasználásával számítható, a (3.63) egyenlet $\theta=1$ alakjával.

Az explicit eljárás megoldása numerikusan instabil [27], ezért az implicit módszert felhasználva dolgoztam tovább.



3.24. ábra - Az implicit módszer időléptéke [27]

Az implicit alak tehát a (3.61) összefüggés alapján a következőképpen alakul:

$$HOR_i^t(T_i^{t+\Delta t} - T_i^t) = HXR_i^t(T_{i-1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) + HXR_{i+1}^t(T_{i+1}^{t+\Delta t} - T_i^{t+\Delta t}) - \frac{Q_{elnyelt,i}^{t+\Delta t}}{4\pi} \quad (3.64)$$

Az egyenlet bal oldalára rendezve az ismeretleneket (új időpillanat):

$$-HXR_i T_{i-1}^{t+\Delta t} + (HOR_i + HXR_i + HXR_{i+1})T_i^{t+\Delta t} + HXR_{i+1} T_{i+1}^{t+\Delta t} = HOR_i T_i^t - \frac{Q_{elnyelt,i}^{t+\Delta t}}{4\pi} \quad (3.65)$$

Az ismeretlen hőmérsékletekhez tartozó koefficienseket az alábbi módon elnevezve a következő egyenletrendszer írható fel:

$$a_i \cdot T_{i-1}^{t+\Delta t} + b_i \cdot T_i^{t+\Delta t} + c_i \cdot T_{i+1}^{t+\Delta t} = d_i \quad (3.66)$$

ahol:

$$a_i = -HXR_i$$

$$b_i = HOR_i + HXR_i + HXR_{i+1}$$

$$c_i = -HXR_{i+1}$$

$$d_i = HOR_i T_i^t - \frac{Q_{elnyelt,i}^{t+\Delta t}}{4\pi}$$

amely mátrixművelettel oldható meg:

$$\begin{pmatrix} b_1 & c_1 & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ & & & & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \\ & & & & & a_n & b_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \\ d_n \end{pmatrix} \quad (3.67)$$

[27]

A szimulációs program elkészítéséhez a HOR , HXR_i és HXR_{i+1} tagokból kiemeltem a geometriai elemeket, amelyeket a számítás elején csak egyszer kell definiálni a térháló függvényében.

$$HOR$$

↓

$$l_i = r_i^2 * \Delta r_i + \frac{\Delta r_i^3}{12} \quad (3.68)$$

$$HXR_i, HXR_{i+1}$$

↓

$$p_i = \frac{\Delta r_i}{r_i(2r_i + \Delta r_i)} \quad s_i = \frac{\Delta r_i}{(2r_i - \Delta r_i)r_i} \quad o_i = \left(r_i + \frac{\Delta r_i}{2}\right)^2 \quad (3.69)$$

Az $M_{i-1 \rightarrow i}$, valamint az $M_{i \rightarrow i+1}$ hőellenállási tényezők értéke nulla, ha a két térelem határfelülete azonos anyagtípust választ el. Jelentőséget akkor kap, ha a két térelem határfelülete két különböző anyag határfelületét alkotja (pl. fém/forma). Ekkor a hőellenállási tényezőt a hőátadási tényező inverzével határozzuk meg.

Az anyagtulajdonságokat a $HOR(\rho, c_p)$ és a $HXR(k)$ függvények alapján adtam meg a számításokban.

A kötőanyag lebomlásához szükséges hőmennyiséget a szakirodalomban az „entalpia módszer” -ként elnevezett módon vettem figyelembe a szimulációban.

$$Q_{elnyelt} = f_s \cdot \rho \cdot L \quad (3.70)$$

ahol:

$Q_{elnyelt}$ - a formázókeverék által elnyelt hőmennyiség, W

ρ - a formázókeverék sűrűsége, kg/m^3

L - a kötőanyag lebomlásához szükséges hőmennyiség, W

A (3.70) összefüggés alapján:

$$Q_{elnyelt} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \rho \cdot L \quad (3.71)$$

↓

$$Q_{elnyelt} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \rho \cdot L \quad (3.72)$$

A (3.72) összefüggést behelyettesítve a hővezetési egyenlet analitikus alakjába (3.13):
(az egyenletben az „+” előjel negatívra változik, mivel hőfelszabadulás helyett hőelnyelést vizsgálunk)

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \rho \cdot L \quad (3.73)$$

↓

$$(c_p \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot L) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (3.74)$$

Átültetve a numerikus megoldásba a kötőanyag lebomlása során elnyelt hőt, a számolásba a következő módon vezetem be:

$$c_p^* = c_p + \frac{\Delta f_s}{\Delta T} \cdot L \quad (3.75)$$

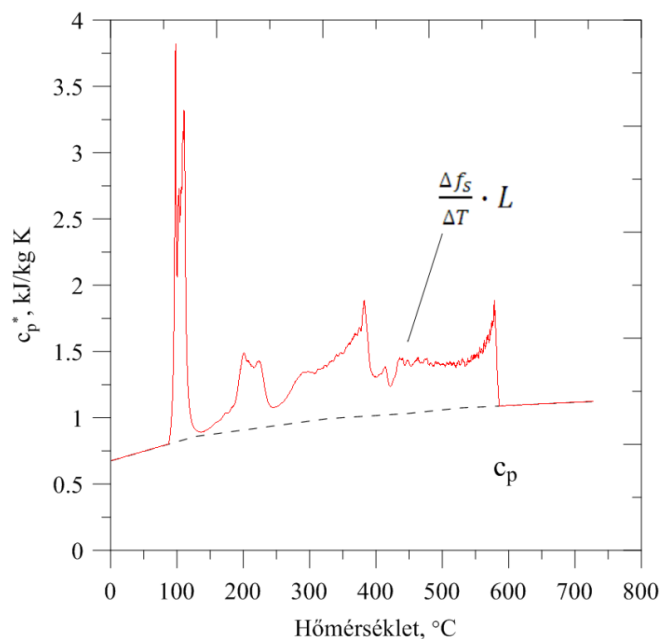
ahol:

c_p^* - relatív hőkapacitás, J/kgK

c_p - valós fajlagos hőkapacitás, J/kgK

$\frac{\Delta f_s}{\Delta T} \cdot L$ - a kötőanyag lebomlásához szükséges hőkapacitás, J/kgK

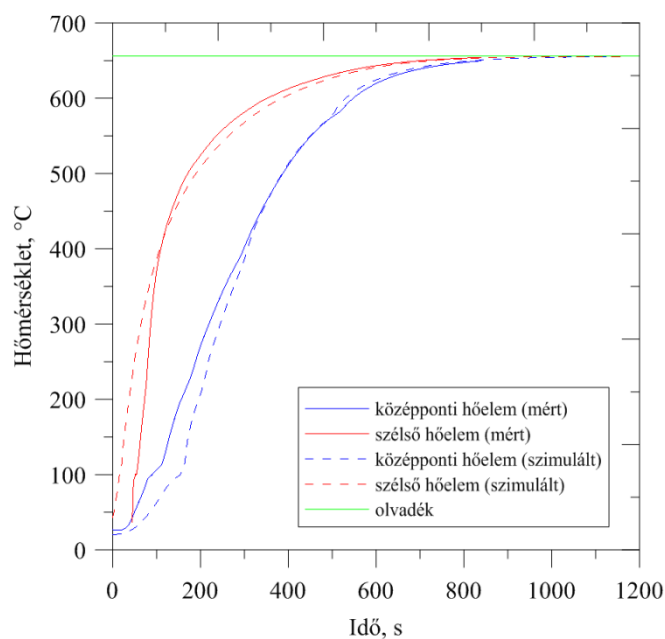
A relatív hőkapacitás a hőmérséklet függvényében a 3.25. ábrán látható.



3.25. ábra - Relatív hőkapacitás a hőmérséklet függvényében

3.10. A szimuláció eredménye

A szimulációt a cold-box kötésű, 50 mm-es próbatest esetén végeztem el, az eredményeket a 3.26. ábra mutatja.



3.26. ábra - Szimulált és mért felhevülési karakterisztikák (cold-box, 50 mm)

Mivel a program a három alapvető hőterjedési forma közül egyedül a kondukció számolására alapszik látható, hogy abban a hőmérséklettartományban (körülbelül 100 °C-tól 400 °C-ig) ahol a kötőanyag lebomlását kísérő gázképződés miatt anyagárammal (konvekció) is terjedhet a hő, eltérést mutatnak a szimulált és a mért görbék. A program tehát a konvekcióval történő hőterjedés bevezetése által tovább pontosítható.

3.11. Összefoglalás, új tudományos eredmények

5. Módszert dolgoztam ki a formázókeverékek bomlása során lejátszódó hőelnyelési folyamatok vizsgálatára, amely a Fourier-féle termikus analízisen alapszik. A módszerrel kiszámolható a formázókeverékek által a felhevülés során elnyelt teljes hőmennyiség, az elnyelt hőmennyiség egyes kötőanyag alkotókra vonatkoztatott részaránya, valamint a hőelnyelés intenzitása is.

- 5.a Meghatároztam az általam vizsgált, üzemi körülményeknek megfelelő összetételű és tulajdonságú cold-box, valamint furángyanta kötésű formázókeverékek hőelnyelő képességei közötti összefüggést, ami a következő egyenlettel adható meg:

$$H_{cb} = 4.5 \cdot 10^{-1} \cdot H_f \quad (3.76)$$

ahol,

H_{cb} - cold-box kötésű keverék hőelnyelő képessége, kJ/kg

H_f - furángyanta kötésű keverék hőelnyelő képessége, kJ/kg

A (3.76) egyenlet a következő peremfeltétel mellett érvényes:

$$40 \text{ mm} \leq \text{homokmag falvastagsága} \leq 60 \text{ mm}$$

6. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált kötőanyagok lebomlása, illetve égése során lejátszódó hőelnyeléssel járó folyamatok jelentős különbséget mutatnak, ami befolyásolja az öntvények dermedési folyamatait. Ezzel a ténnyel eddig sem számítógépes, sem egyéb technológiai tervezés során nem foglalkoztak. Az egyes hőelnyeléssel járó folyamatok közötti eltéréseket a 6.a és 6.b alpontokban mutatom be.

- 6.a Az általam vizsgált, üzemi körülményeknek megfelelő összetételű és tulajdonságú cold-box kötésű formázókeverék esetén a szabad nedvességtartalom, valamint a kötött víz elpárolgásának folyamata a teljes elnyelt hőmennyiség 10%-át képezi.

Azonos feltételek mellett, furángyanta kötésű formázókeverék esetén a szabad nedvességtartalom, valamint a kötött víz elpárolgásának folyamata a teljes elnyelt hőmennyiség 30-40%-át képezi.

- 6.b Az általam vizsgált, üzemi körülményeknek megfelelő összetételű és tulajdonságú furángyanta kötésű formázókeverék vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy a szabad nedvességtartalom, valamint a kötött víz elpárolgása során elnyelt hőmennyiség részaránya a próbatest átmérőjének növekedésével arányosan növekedett. Megállapítottam tehát, hogy a kötőanyagok lebomlása, illetve égése során lejátszódó hőelnyeléssel járó folyamatokat a műgyanták minősége mellett a homokmagok falvastagsága is befolyásolja.

4. Gáztranszport folyamatok a fém/formázóanyag határfelületen

Az alumínium gravitációs formaöntődékekben a vegyi kötésű formázóanyagok alkalmazása nélkülözhetetlen, mivel az egyre bonyolultabb geometriájú öntvények gyártása megkívánja a vékonyfalú magok egyre szélesebb körű felhasználását is. A műgyantakötésű formázókeverékeket megfelelő szemcseösszetételű tűzálló mátrix, valamint kötő- és adalékanyagok (különbféle műgyanták és a térhálósodást segítő aktivátorok) megfelelő arányú és sorrendű keverékeiből állítják össze.

A magok gyártásakor fontos, hogy azok megfelelő szilárdsággal, gázáteresztő képességgel rendelkezzenek, visszamaradó szilárdságuk kicsi legyen, alacsony legyen a gáz-, és a káros anyag kibocsátásuk, továbbá a regenerálhatóság és az alacsony előállítási költség is fontos szempont.

A forma és magkeverékek említett tulajdonságait az öntődékekben szobahőmérsékleten rendszeresen vizsgálják, hitelesített, szabványos mérőkészülékek segítségével. Az öntvénygyártás tapasztalatai azonban a fém/formázóanyag határfelületen, magas hőmérsékleten lejátszódó gázfelszabadulással járó folyamatokra is felhívják a figyelmet. A műgyantakötésű formázóanyagok lebomlása során képződő gázok mennyisége, illetve nyomásviszonyai jelentősen befolyásolhatják az öntvények felületi minőségét, elsősorban a formatöltés során és a fém megszilárdulásának kezdeti szakaszában.

4.1. Összefüggés a műgyantakötésű magokban lejátszódó bomlási folyamatok, valamint a gázhólyagos selejtek kialakulása között

Az öntés alatt a mag felülete folyamatosan érintkezésben van a folyékony fémrel, ezért az magas hőmérsékletre viszonylag gyorsan melegszik fel. A hősokk hatására először alacsonyabb hőmérsékleten (~100 °C) a szabad nedvességtartalom, majd később a kötött nedvesség párolog el.

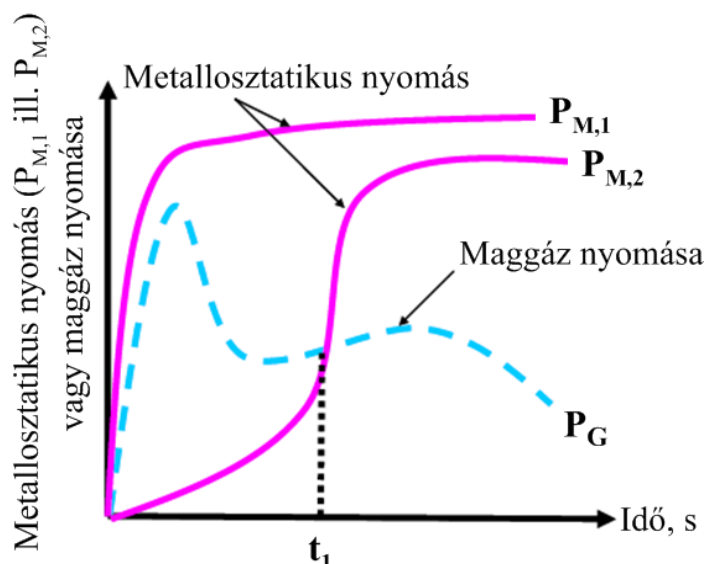
A mag hőmérsékletének további növelésével megkezdődnek a kötőanyag bomlási folyamatai és a kötési hidak részleges bomlása, majd 700 °C környékén elkezdődik a kötőanyag alkotók száraz lepárlása és teljes bomlása (4.1. táblázat).

4.1. táblázat - Műgyantakötésű formázóanyagok bomlási folyamatai a hőmérséklet függvényében [33]

Gőz/gáz felszabadulás	Termikus bomlás	Pirolízis
- vízgőz - etanol - propanol - oldószer	- aromás szénhidrogének - furfurool - furfurilalkohol - fenol - benzol - toluol - formaldehid - izocianát - aminok	- szén (karbon) - hidrogén - metán - szén-monoxid - szén-dioxid - kén-dioxid
szobahőmérséklet - 200 °C	~ 200 °C - 600 °C	~ 600 °C - 1000 °C
Hőmérséklet, °C		

A fent említett folyamatok következtében a formázókeverékből több-kevesebb gáz képződik, ami a magban gáznyomás felépülést eredményez az öntés és a kristályosodás kritikus időszakában.

A magkeverékből képződött gázok a gázáteresztő képességtől függően gyorsabban, vagy lassabban a magjeleken keresztül tudnak eltávozni. A képződési és az eltávozási sebesség viszonya határozza meg a magban felépülő gáznyomás értéket. A 4.1. ábra mutatja be a gázhólyagos selejtek kialakulásának nyomásviszonyait.

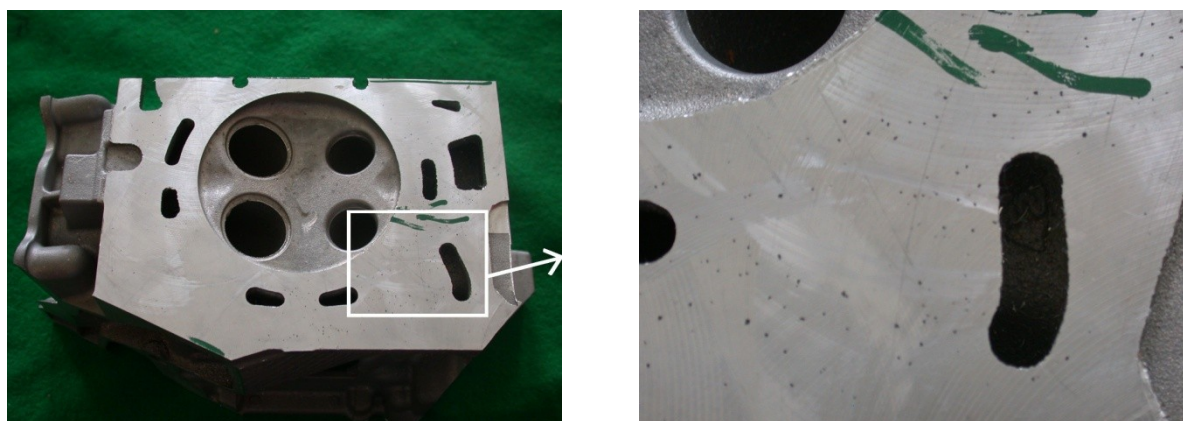


4.1. ábra - Gázhólyagos selejtek kialakulását befolyásoló nyomásviszonyok [34]

$P_{M,1}$ -el jelzett esetben a metallosztatikus nyomás a megszilárdulás szakaszában végig magasabb, mint a magból felszabaduló gázok nyomása, így gázhólyagos selejt nem alakulhat ki. $P_{M,2}$ -vel jelzett esetben a maggáz nyomása a t_1 -el jelzett időpontig meghaladja a metallosztatikus nyomás értékét, így ebben az időintervallumban a magból felszabaduló gáz képes betörni az olvadékba. A fém/mag határfelületen kialakuló kéreg kialakulása miatt a keletkező gázbuborékok az öntvénybe záródhatnak [34].

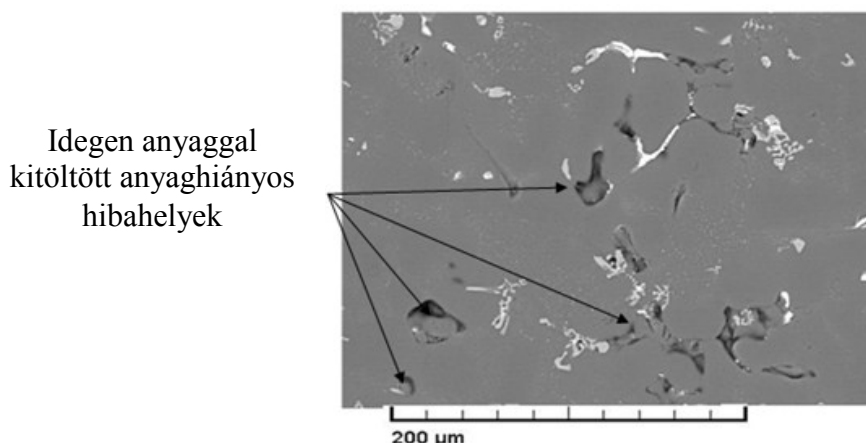
Az öntés közben a formába kerülő, illetve a formában képződő oxidhártya gázporozitást és gázhólyagos selejt kialakulását eredményezi, amelyek szintén a formagázokkal és a magokból felszabaduló gázokkal vannak összefüggésben.

Ezeket a hibahelyeket közelebbről megvizsgálva látható, hogy a felületen megjelenő tűszúrászerű fekete foltok idegen anyaggal részben kitöltött kisméretű apró üregek (4.2. ábra).



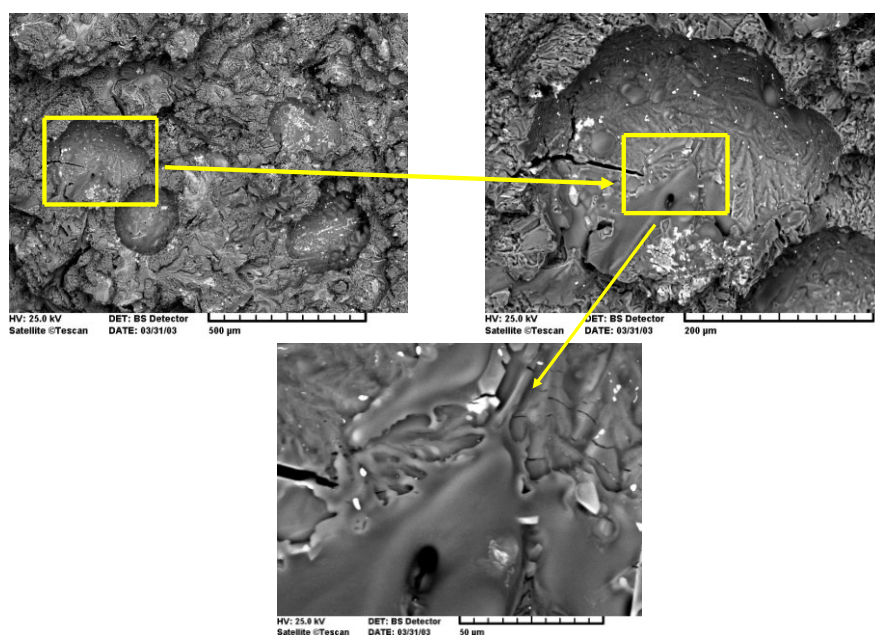
4.2. ábra - Alumínium hengerfej megmunkált felületén látható tűszúrászerű fekete foltok különböző nagyításban [35]

A hengerfej anyagihiányos hibahelyeit polarizációs mikroszkópon is megvizsgálva láthatóvá válik, hogy az üregek kerületén változó vastagságú, az alapfém összetételétől eltérő összetételű hártya van (4.3., 4.4. ábra).



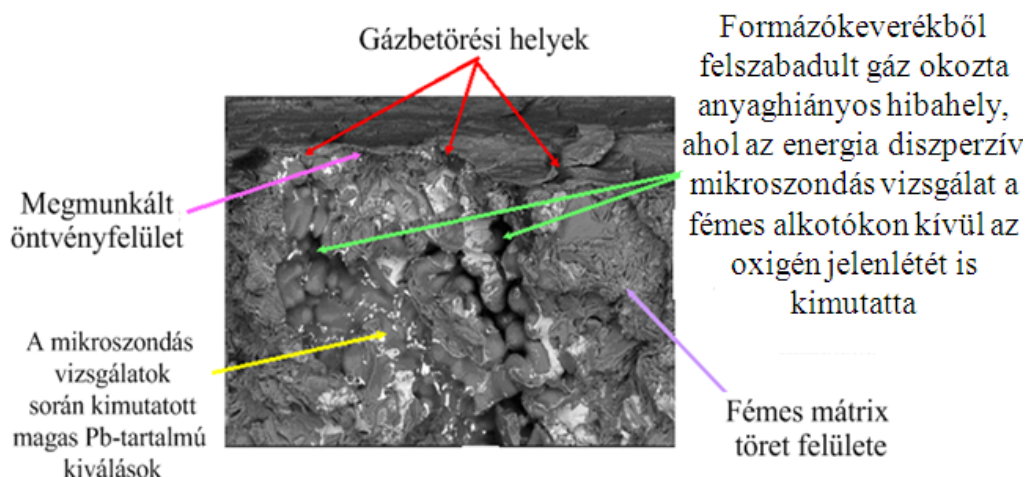
4.3. ábra - Anyagihiányos hibahelyről készült csiszolatkép [36]

Mivel a polarizációs mikroszkópon végzett vizsgálatok során ezeknek a bevonatoknak sem a morfológiájára, sem az összetételére nem kapható információ, ezért a próbákat scanning elektron mikroszkópon és energia diszperzív mikroszondán is megvizsgáltam.



4.4. ábra - Töretképek a 4.3. ábrán látható hibahelyről, különböző nagyításban [36]

A részben idegen anyaggal kitöltött anyagihiányos hibahelyek kialakulását a formatöltéskor a turbulens áramlással a formaüregbe kerülő levegő és/vagy a magból a kristályosodás kezdeti szakaszában felszabaduló és a fémbe betörő maggáz okozhatja, amit az igazol, hogy a scanning elektron mikroszkópos vizsgálatok során az üregek felületén mindig megtalálható volt az oxidhártya (4.5. ábra).



4.5. ábra - Hengerfej megmunkált felületi rétegében talált anyaghiányos hibahelyről és környezetéről scanning elektron mikroszkópon 100x-os nagyításban készült töretfelvétel [36]

Az öntés biztonsága szempontjából igen fontos tehát ismerni a magkeverékek bomlása során képződő gázmennyiséget. Mivel a magból felszabaduló gázok az öntvényt az öntési folyamat kezdetétől a dermedés végéig veszélyeztethetik, a gázfejlődés intenzitásának meghatározása is hasonló jelentőséggel bír.

4.2. A kötőanyagok bomlása során felszabaduló gázok mennyiségét befolyásoló tényezők vizsgálata

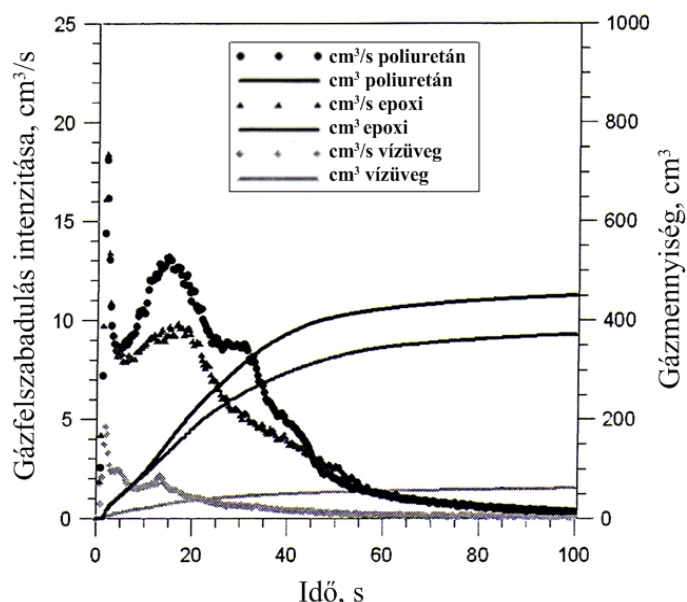
A műgyanta kötésű formázókeverékekből öntés során képződő gázok mennyisége elsősorban a következő tényezőktől függhet:

- a kötőanyag típusa,
- a kötőanyag mennyisége,
- az alaphomok granulometriai jellemzői (gázáteresztő képesség),
- a mag geometriája,
- az alkalmazott magbevonat,
- a mag tárolási ideje,
- a fémolvadék hőmérséklete.

A továbbiakban a fenti tényezők jelentőségét tisztázom korábbi szerzők kísérletei és eredményei alapján.

4.2.1. A kötőanyag típusa

Több más szerző mellett Jessica Orlenius [37] tanulmányozta a különböző kötőanyagok hatását a magkeverékekből felszabaduló gázok mennyiségére. Az öntödékben leggyakrabban használt három kötőanyagot vizsgálta: poliuretán és epoxi gyantákat, valamint vízüveget. Az alaphomokhoz az üzemi felhasználásukra jellemző mennyiségben keverte a kötőanyagokat. Kísérletei során a próbatesteket vasolvadékba merítette. Eredményei a 4.6. ábrán láthatóak.



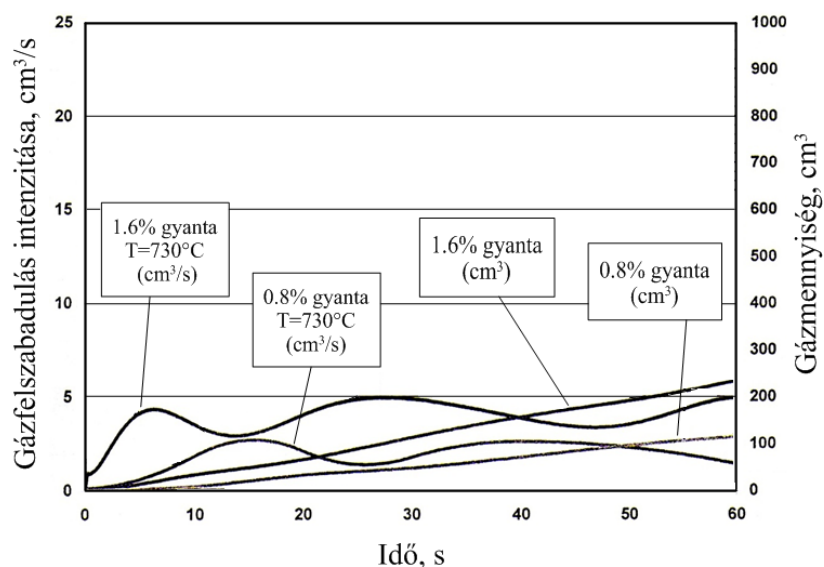
4.6. ábra - Gázmennyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, különböző típusú kötőanyagok esetén [37]

A gázfelszabadulás intenzitását, valamint a gázmennyiséget ábrázolva az idő függvényében jól láthatóak az egyes kötőanyagok közötti különbségek. A gázfelszabadulás intenzitását mutató görbéken megjelennek az egyes kötőanyagok különböző lebomlási folyamataira jellemző, eltérő nagyságú maximum csúcsok.

A három próba közül a vízűveges (szervetlen) keverékből szabadult fel a legkevesebb gáz, annak ellenére, hogy a kötőanyag mennyisége ebben volt a legmagasabb. A gázfelszabadulás intenzitását tekintve is a jelentősen alacsonyabb maximum csúcsokkal rendelkező vízűveges keverék mutatja az öntészeti szempontból legkedvezőbb tulajdonságokat.

4.2.2. A kötőanyag mennyisége

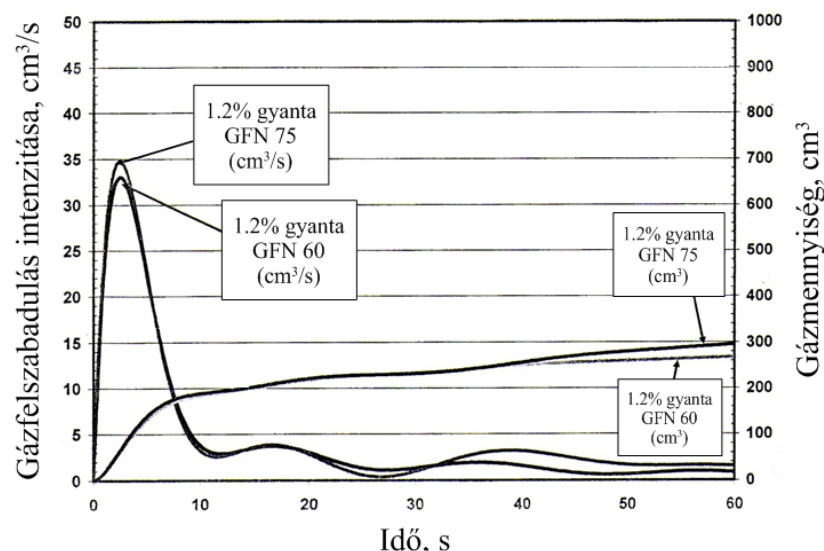
D. Griffin és L. Winardi [38] cold-box kötésű keverékek esetén vizsgálták a kötőanyag mennyiségének hatását. A kísérleteik során a próbatesteket alumínium olvadékba merítették. Eredményeik alapján megállapították, hogy a gyanta tartalom növelésével egyenes arányban nő a formázókeverékből felszabaduló gázok mennyisége, valamint intenzitása is (4.7. ábra).



4.7. ábra - Gázmennyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, eltérő kötőanyag tartalom esetén [38]

4.2.3. Az alaphomok granulometriai tulajdonságai

D. Griffin és L. Winardi [38] eltérő finomsági számú (GFN) alaphomokból készült próbamagok vizsgálata alapján kimutatta, hogy tűzálló mátrix szemcseeloszlásának nincs számottevő hatása a magokból fejlődő gázok mennyiségére (4.8 ábra).

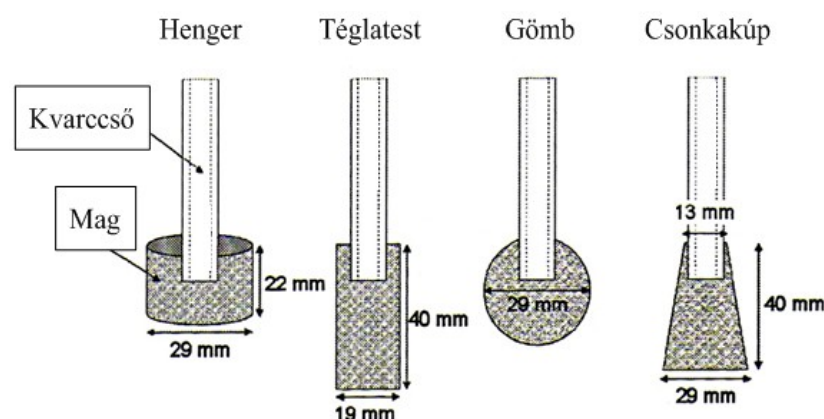


4.8. ábra - Gázmennyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, eltérő alaphomok szemcseeloszlás esetén [38]

Az alaphomok finomsági száma és ezzel együtt a formázókeverék sűrűsége főként a gázáteresztő képességet befolyásolja. A sűrűség növekedésével romlik a gázáteresztő képesség, ami viszont rendkívül fontos a mag belsejében felépülő gáznyomás szempontjából, mivel ennek nagysága döntő szerepet játszik a gázhólyagos selejtek kialakulásában (4.1. ábra).

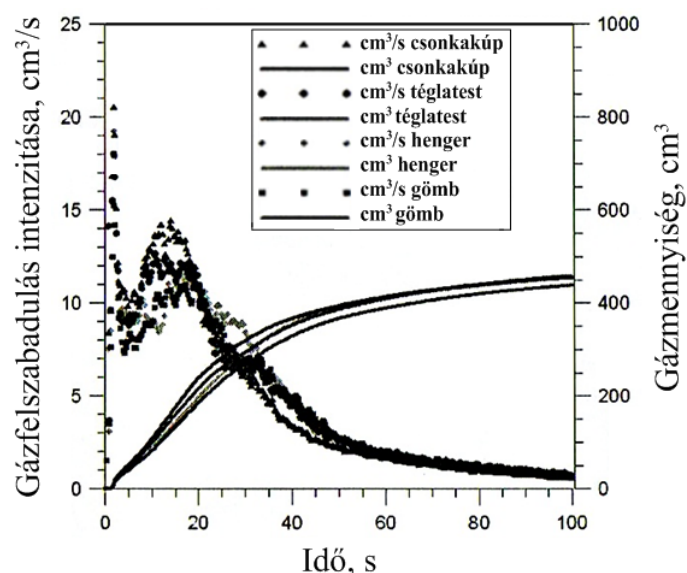
4.2.4. A próbamag geometriája

Jessica Orlenius [37] a 4.9. ábrán látható különböző geometriájú magok esetén vizsgálta a felszabaduló gázmennyiséget. Az egyes próbatestek térfogata, valamint a keverékek összetétele közel azonos volt.



4.9. ábra - Különböző geometriájú próbamagok [37]

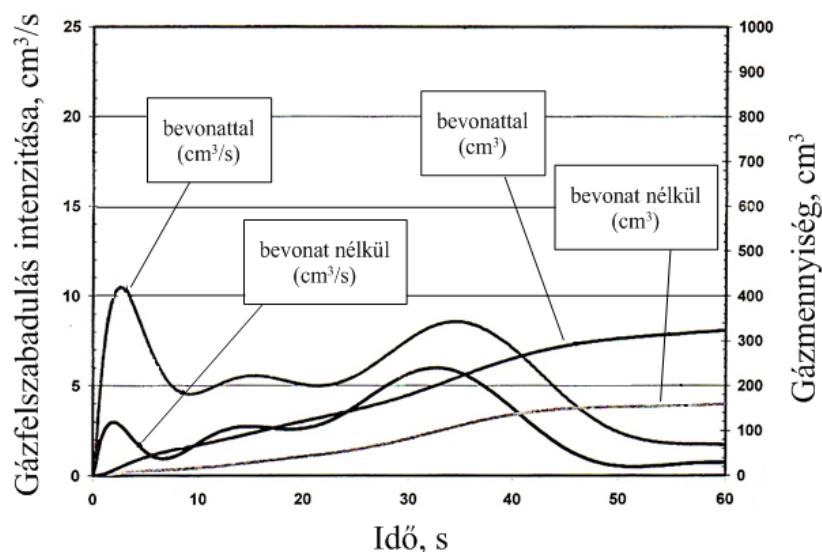
Eredményei alapján megállapította, hogy a téglatest alakú magból szabadult fel a legnagyobb intenzitással a maggáz, mivel sarkossága miatt ez a geometria biztosítja a leggyorsabb felhevülést. A felszabadult gázmennyiségek tekintetében számottevő különbség nem mutatkozott az eltérő geometriák között (4.10. ábra).



4.10. ábra - Gázmenyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, különböző próbatest geometriák esetén [37]

4.2.5. Az alkalmazott magbevonat

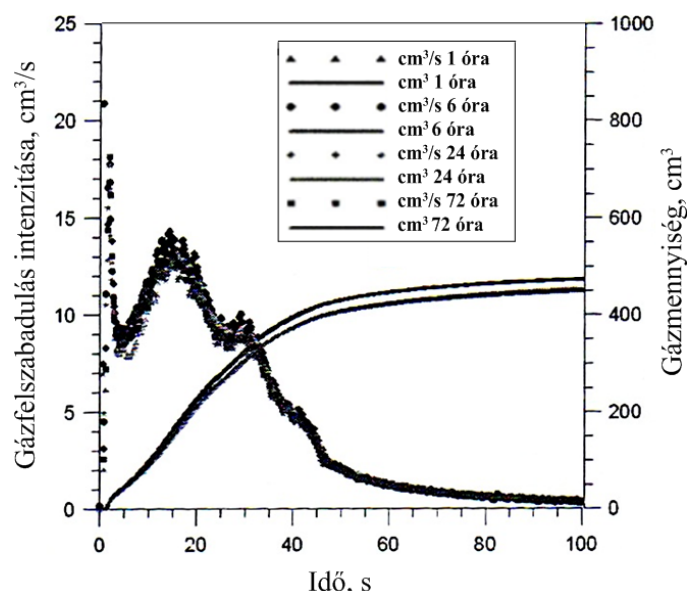
D. Griffin és L. Winardi [38] vizsgálatai rámutattak, hogy bevonóanyag alkalmazása esetén a felszabaduló gázmenyiség értéke duplájára, a gázfelszabadulás intenzitása pedig háromszorosára nőhet, a bevonóanyag nélküli próbatesteken mért adatokhoz képest (4.11. ábra).



4.11. ábra - Gázmenyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, magbevonattal ellátott, illetve bevonat nélküli cold-box kötészű próbatestek esetén [38]

4.2.6. A mag tárolási ideje

Jessica Orlenius [37] cold-box kötészű magokon vizsgálta a tárolási idő hatását a fejlődő gázmenyiségre. 1, 6, 24 illetve 72 óra tárolás után végezte el a kísérleteket, melyek eredményei a 4.12. ábrán láthatóak.

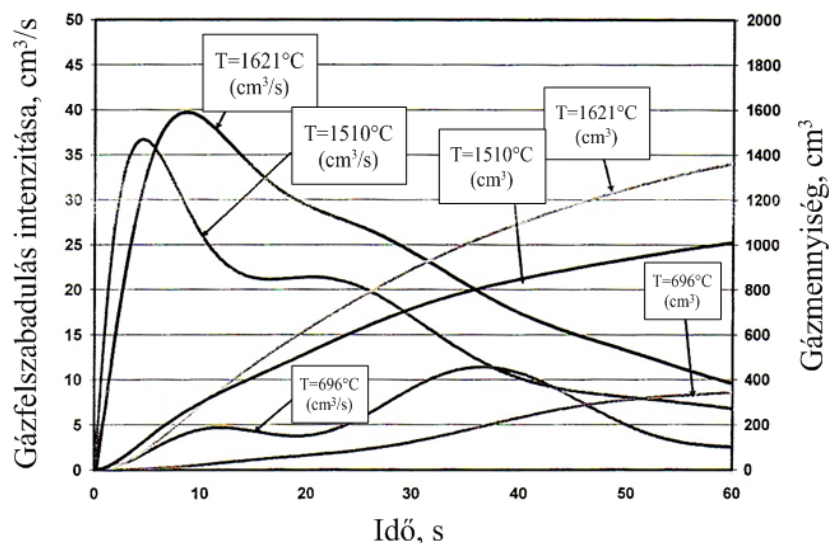


4.12. ábra - Gázmenyiség, illetve gázfelszabadulás intenzitása az idő függvényében, különböző ideig tárolt próbatestek esetén [37]

A tárolási időnek önmagában nincs számottevő hatása a magkeverékekből felszabaduló gázok mennyiségére. A laboratóriumi mérések természetesen nem vonatkoznak az ipari gyakorlatra, ahol tárolási idő mellett fontos a tárolás módjáról, illetve helyéről is beszélni. Üzemenként eltérhet ugyanis az egyes raktárok páratartalma, amit a kész magok idővel felvehetnek.

4.2.7. A fémolvadék hőmérséklete

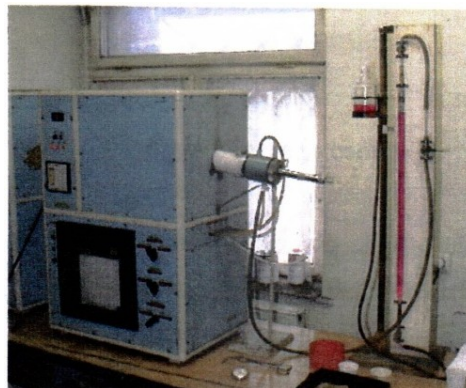
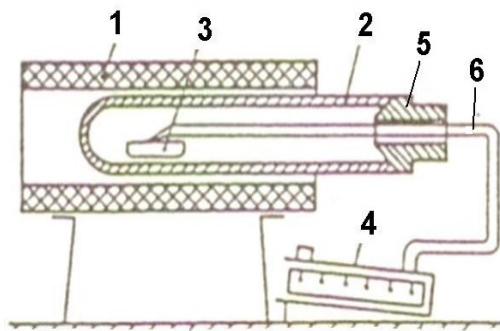
A fémolvadék hőmérsékletének jelentős hatása van mind a képződő gáz mennyiségére, mind a gázfelszabadulás intenzitására. D. Griffin és L. Winardi [38] eredményei alapján, vasolvadékban történő mérés során háromszor nagyobb mennyiségű gáz képződött ugyanannyi idő alatt, mint alumíniumolvadék alkalmazása esetén (4.13. ábra). A gázfelszabadulás intenzitása hasonlóan háromszor nagyobb maximum értékeket mutatott. Ennek oka a formázókeverék nagyságrendekkel gyorsabb ütemű felhevülése. Magasabb hőmérsékleten, ellentétben az alumínium olvadéokra jellemző hőmérséklettartománnyal, a sugárzással történő hőterjedés is szerepet játszik a keverék felmelegedésében.



4.13. ábra - Gázmenyiség, illetve gázfelszabadulás sebessége az idő függvényében, különböző olvadék hőmérsékletek esetén [38]

4.3. Maggáz mennyiség mérése laboratóriumi körülmények között

A laboratóriumi gázmennyiség meghatározó készülékek fő jellemzője, hogy izzítási veszteség mérésén alapulnak. Az ebbe a családba tartozó +GF+SPGM típusú gázmennyiség mérő rendszer az üzemi homok laboratóriumokban, az újabb berendezések megjelenéséig az egyik leggyakrabban használt berendezés volt (4.14. ábra).



4.14. ábra - A +GF+ SPGM gázmennyiség mérő műszer és elvi ábrája [39]

1. kemence 2. kerámiacső 3. vizsgált próbatest 4. mérőegység 5. hőálló gumidugó 6. gáz elvezető cső

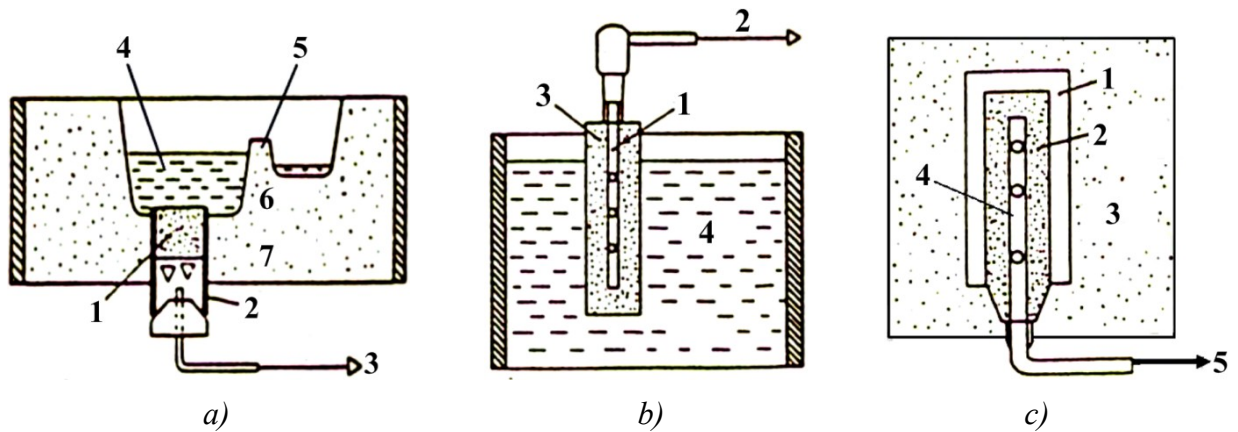
A készülék a következő részekből áll: az alapra ferde helyzetben egy elektromos ellenállásfűtéssel ellátott kemence van szerelve. Ebbe van belehelyezve a kvarcüvegből készült gázfejlesztő cső, melynek nyitott vége kiáll a kemencéből. Ehhez csatlakozik a próba bevitelére szolgáló vízzel hűtött karmantyú, zárószerkezet, a nitrogén csatlakozó, valamint a mágneses adagoló berendezés. A gázmennyiség mérésére szolgáló, kiegyenlítő edénnyel ellátott mérőburette egy különálló falpra van felszerelve [39].

Ez a módszer rendkívül kis tömegű (1g) anyagból felszabaduló gázmennyiséget képes meghatározni. A mérés során az ellenállás fűtésű kemence 850 °C-os izzító zónájába kell helyezni kerámia csónakon előkészített mintát.

A gázmérő berendezések ezen fajtájával viszonylag pontos és fizikailag helyes eredmények érhetők el, a gázfelszabadulás jelenségének alaposabb megismerése érdekében azonban nélkülözhetetlen az ilyen típusú méréseket valós öntési körülmények között (nagyobb tömegű próbatestek, fémolvadékkal való közvetlen érintkezés) végezni.

4.4. Maggáz mennyiség mérése valós öntési körülmények között

A formázóanyagokból felszabaduló gáz mennyiségét tehát célszerűbb öntési kísérletek során meghatározni. Erre az elmúlt években számos eljárást dolgoztak ki úgy a hazai, mint a külföldi kutatók. A mérési összeállítások legfőbb jellemzője, hogy a maghomok keverék közvetlen érintkezésben van a fémolvadékkal. Ezek a módszerek lehetőséget biztosítanak arra, hogy az öntést követően meghatározzuk a gázmennyiség, illetve a gázfelszabadulás intenzitásának értékeit változó homokkeverék-, és öntési paraméterek esetén. Az alábbiakban acél-, illetve vasöntvények gyártásánál használt formázókeverékek vizsgálatára alkalmas mérési összeállításokat mutatok be (4.15. ábra).

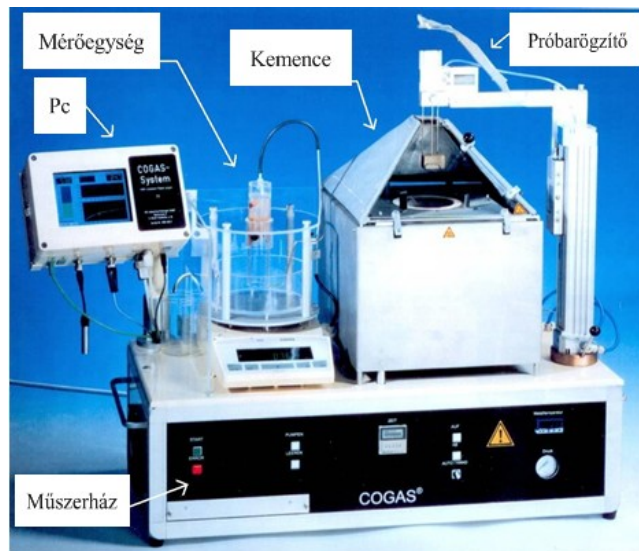


4.15. a,b,c ábra - Különböző gázmennyiség mérési elrendezések elvi ábrái [40]

- a) 1.vizsgált próbatest 2. próbatartó 3. csatlakozás a mérőegységhez 4. folyékony fém 5. metallosztatikus nyomást szabályozó gát 6. túlfolyó 7. homokforma
- b) 1. mérőcső 2. csatlakozás a mérőegységhez 3. vizsgált formázóanyag 4. folyékony fém
- c) 1. folyékony fém 2. vizsgált próbatest 3. homokforma 4. mérőcső 5. csatlakozás a mérőegységhez

4.4.1. A COGAS gázmennyiség mérő készülék

Hosszabb fejlesztőmunka eredményeként Németországban fejlesztették ki a COGAS maggáz mennyiség mérő berendezést, melynek segítségével a felszabaduló gáz mennyisége mellett a gázból leváló kondenzátum mennyisége is meghatározható (4.16. ábra). A műszer bármely kötőanyagrendszerre alkalmazható, a magok vizsgálata változó gyártási paraméterek mellett végezhető. Ez a mérőrendszer kereskedelmi forgalomba kerülése után számos öntőde homoklaborjának fontos elemévé vált.



4.16. ábra - A COGAS gázmennyiség mérő készülék (alumíniumos változat) [36]

A készülék részei:

- kemence (Fe, Al),
- mérőegység (vákuumpumpa, precíziós mérleg, Pc),
- műszerház,
- próbarögzítő állvány.

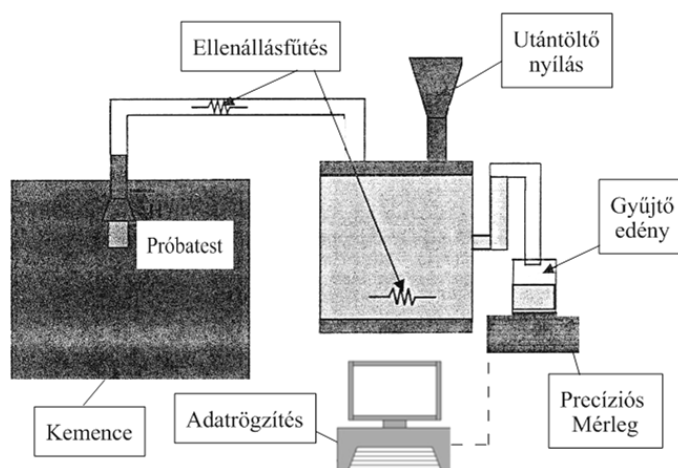
A berendezés öntési körülményeket szimulál, a próbamag pontosan szabályozott hőmérsékletű alumínium, vagy vasolvadékba merül. A magból felszabaduló gáz a próbatest felületéről vékony

csövön vezetődik el, majd halad keresztül egy hűtött, a próbarögzítő állványon elhelyezkedő kondenzátum csapdán. A hűtött csapdában a maggázból lecsapódik a szurokszerű kondenzátum, melynek mennyisége a vizsgálat végén tömegméréssel meghatározható. A maggáz végül eljut a mérőegységbe, ahol a vákuumpumpa segítségével tartott vízoszlopból a saját térfogatának megfelelő térfogatú vizet szorít ki. A kiszorított folyadék tömegét a precíziós mérleg regisztrálja. A mérés végeztével a víz sűrűségének felhasználásával kiszámítható a próbamagból felszabaduló gáz mennyisége.

A vizsgálatához használatos próbamag mérete 23x23x30 mm. Az alumínium olvadékkal dolgozó készülék maximum 120 cm³, az öntöttvas olvasztására alkalmas változat pedig maximum 750 cm³ gázmennyiséget képes mérni.

4.4.2. A C.E. Bates-féle gázmennyiség mérő készülék

A C.E. Bates főleg a műgyantakötésű formázókeverékek lebomlása során keletkező gázmennyiséget vizsgálta, elsősorban az alkalmazott kötőanyag típusának függvényében. Tanulmányozta a magok belsejében kialakuló gáz nyomásviszonyait is. A kísérletekhez henger alakú próbatesteket használt. Az általa tervezett gázmennyiség meghatározó műszer lényegében hasonló módon működik, mint a COGAS berendezés.



4.17. ábra - A C.E. Bates féle gázmennyiség mérő készülék [41]

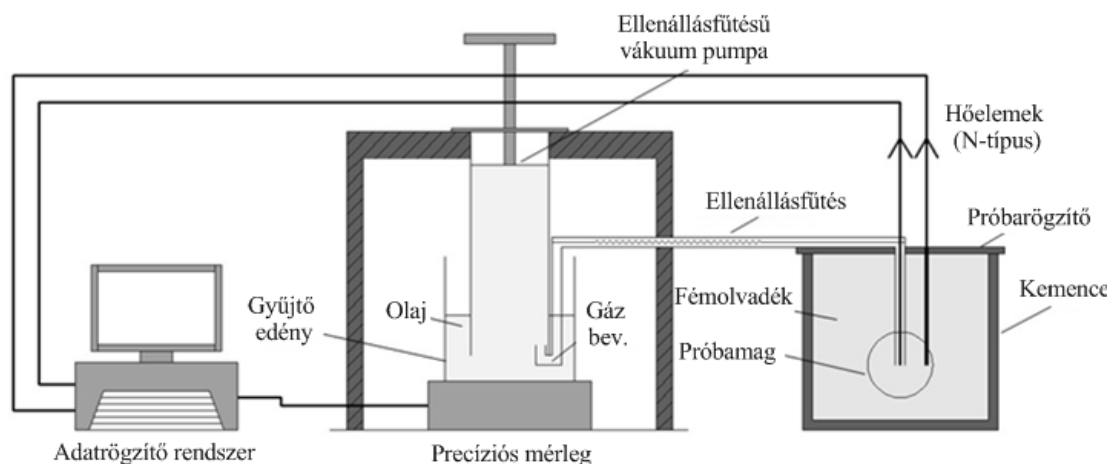
A készülék valós öntési körülményeket biztosít, a henger alakú próbatest a berendezéshez tartozó kemencében hőn tartott folyékony alumíniumba, vagy vasolvadékba merül. A képződő maggáz egy ellenállás fűtésű vezetéken keresztül jut el a mérőegységbe, így a mérés során nem képződik kondenzátum. Ez fontos különbség a COGAS-hoz képest, ahol a gázközvetítő vezeték fűtetlen. Lényeges különbség továbbá, hogy a COGAS készülék vákuum pumpáját, ebben az esetben egy légmentesen zárt, olajjal teli fűtött tartály helyettesíti. A maggáz a mérőegységben 100 °C feletti olajba vezetődik, szemben a COGAS vizes közegével. A tervezőnek tehát egyik fő célja volt a kondenzátum képződés megakadályozása a mérés kezdetétől egészen a végéig. A maggáz által kiszorított olaj egy túlfolyón át a rendszeren kívülre távozik, tömegét precíziós mérleg regisztrálja. Ez a mérőrendszer kereskedelmi forgalomba sohasem került.

4.5. Saját tervezésű gázmennyiség mérő készülék

Az előző fejezetekben ismertetett berendezések a kereskedelmi forgalomban, illetve a szakirodalomban fellelhető legkorszerűbb fejlesztések. Segítségükkel a képződő gázmennyiség, valamint a gázfelszabadulás intenzitása idő függvényében részletesen vizsgálható. A fém/formázókeverék határfelületen lejátszódó gáztranszport folyamatok alaposabb megismerése

céljából azonban rendkívül fontos a maggáz képződésre jellemző tulajdonságokat újabb szempontok szerint is vizsgálni.

Céлом az ismert műszerek előnyös tulajdonságait ötvözve egy olyan újfajta mérőrendszer megtervezése és kivitelezése volt, amellyel lehetőség nyílik a gázmennyiséget, illetve a gázfelszabadulás intenzitását a hőmérséklet, valamint a formázókeverékek hőtani tulajdonságainak függvényében is tanulmányozni. A saját fejlesztésű gázmennyiség mérő készülék elvi ábrája a 4.18. ábrán látható.



4.18. ábra - Saját fejlesztésű gázmennyiség mérő készülék elvi ábrája

Az általam tervezett készülék előnye a korábbiakkal szemben, hogy a próbarögzítő állványt úgy alakítottam ki, hogy a berendezés bármilyen kemencéhez alkalmazható legyen. Így a mérőrendszer hordozhatóvá válik, továbbá alumínium és vas mellett más fémolvadékokban is végezhető a kísérlet. A keletkező maggáz elvezetését a Bates-féle ellenállás fűtésű módszerrel oldottam meg, mivel a kondenzátum képződés megakadályozásával lényegesen pontosabb gázmennyiség értékek mérhetők. A mérőegységben a maggáz a Bates által tervezett készülékekhez hasonlóan olajba vezetődik. A folyadék közeg azonban esetemben nem légmentesen zárt tartályban, hanem a COGAS berendezésre jellemző vákuum pumpában helyezkedik el, ahol 100 °C feletti olajhőmérsékletet szintén ellenállásfűtés biztosítja. A vákuumpumpa térfogata lényegesen nagyobb, mint a COGAS rendszernél, így a maximális mérhető gázmennyiség esetében közel 2000 cm³. A maggáz által kiszorított folyadék tömegét precíziós mérleg regisztrálja, majd a mérés végeztével az olaj sűrűségének felhasználásával meghatározható a próbamagból felszabaduló gáz mennyisége.

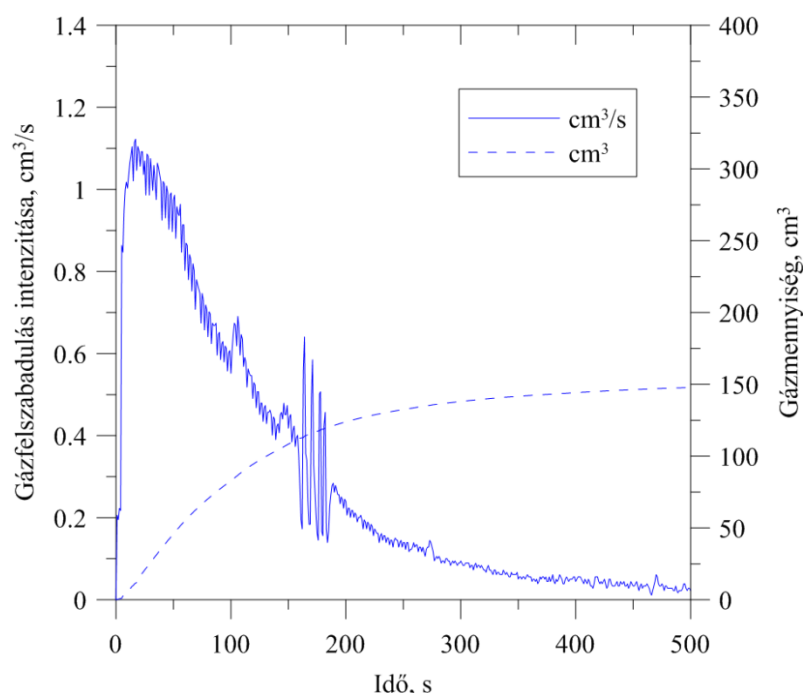
A legfontosabb újdonság, hogy a gázmennyiség mérés mellett a próbatestben egyidejűleg a 3. fejezetben ismertetett módszerrel hőmérsékletmérést és termikus analízist is végzek. Így nyílik lehetőség a gázmennyiséget és a gázfejlődés intenzitását a hőmérséklet, valamint a formázókeverékek hőtani tulajdonságainak függvényében is vizsgálni.

4.6. Saját kísérletek

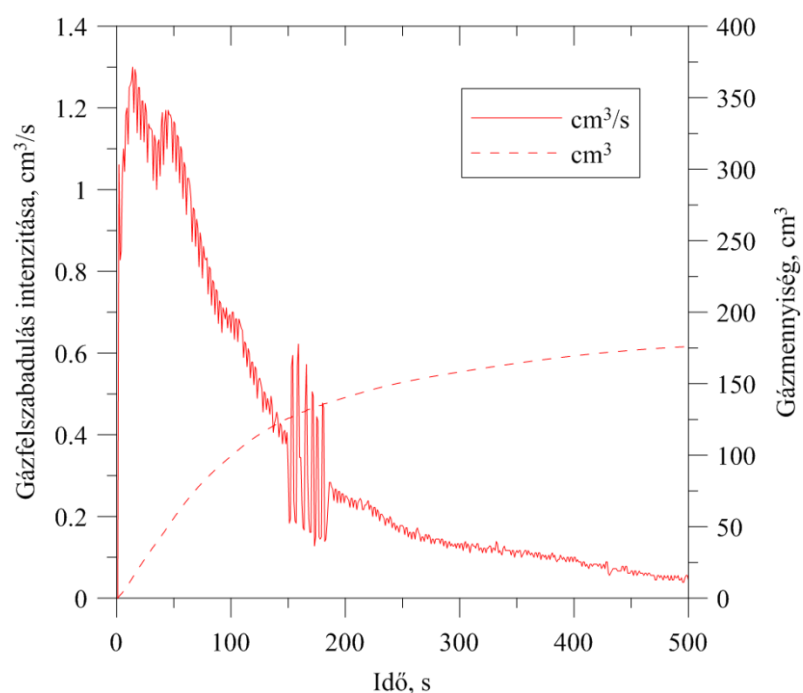
A gázmennyiség mérésekhez a korábban kifejlesztett gömb alakú próbatest 40 mm átmérőjű változatát használtam (3.4. ábra, 3.2. táblázat). A maggázt a középső hőelem védelmére szolgáló kvarccsőven keresztül vezettem el. A szélső hőelemet védő kvarccső végére tűzálló tömítés került.

A próbamagok a 3. fejezetben szereplő kísérletek során használt cold-box, illetve furángyanta kötésű homokkeverékekből készültek. Összetételüket és tulajdonságaikat a 3.3. és 3.4 táblázat tartalmazza. A próbatesteket vizes alapú bevonattal láttam el, majd 30 órás száradást követően 660±10 °C-os alumíniumolvadékba merítettem azokat.

Az eredmények alapján meghatároztam a próbamagokból fejlődő gázmennyiséget, valamint a gázfelszabadulás intenzitását az idő függvényében (4.19 és 4.20. ábra). Az ilyen típusú görbék a korábbi berendezések eredményei alapján is megadhatók.



4.19. ábra - Gázmennyiség, illetve a gázfelszabadulás intenzitása cold-box kötésű próbatest esetén, az idő függvényében



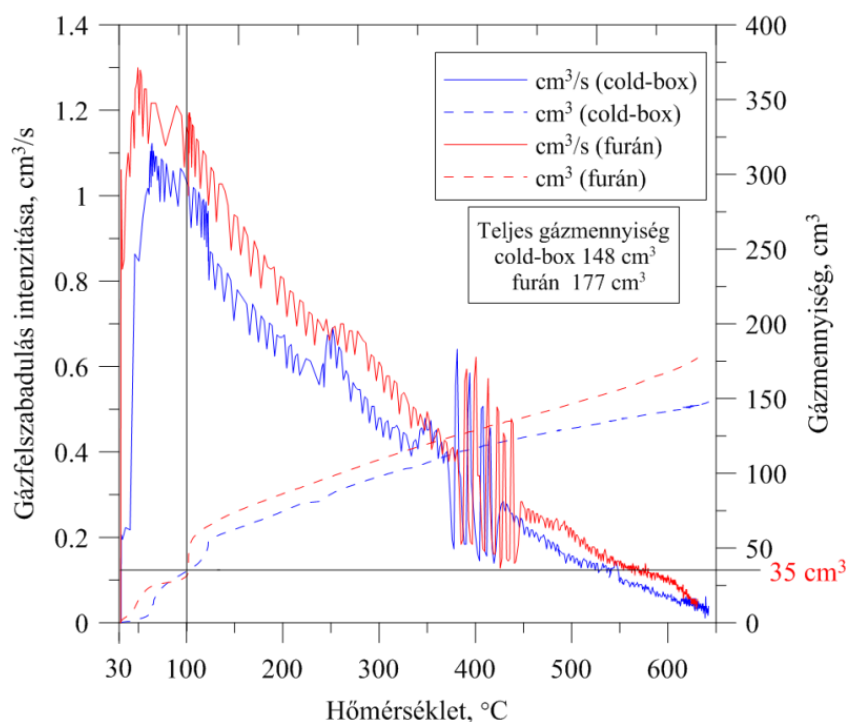
4.20. ábra - Gázmennyiség, illetve a gázfelszabadulás intenzitása furángyanta kötésű próbatest esetén, az idő függvényében

A gázfelszabadulás intenzitásához tartozó görbéken jól láthatóak az egyes gyantaalkotók lebomlását jelző maximum csúcsok. Cold-box kötésű próba esetén 100 illetve 150 másodpercnél, furángyanta keverék esetén pedig 100 másodpercnél figyelhető meg a gázfelszabadulás intenzitásának hirtelen növekedése. Ezek a csúcsok az egyes gyanták lebomlási folyamatainak legintenzívebb, gyantatípusra jellemző szakaszait mutatják. A gázképződéssel járó folyamatok

valójában már a próbatest bemelegítését követő másodpercekben elkezdődnek a pórusokban lévő levegő hősokk okozta tágulásával, valamint a szabad nedvességtartalom és a kötött víz elpárolgásával.

A görbéken 150 és 200 másodperc közötti időközben látható jelentős kitérések a magban felépülő gáznyomással magyarázhatóak. Ebben az intervallumban ugyanis a próbatest teljes keresztmetszetében folyik a kötőanyag bomlása, így a gáznyomás elér egy maximum értéket. Ekkor magban a 4.1. ábrán $P_{M,2}$ -vel jelzett állapot uralkodik, azaz a maggáz nyomása meghaladja a metallosztatikus nyomás értékét. Esetemben azonban a gáz nem távozott a rendszerből, mivel a mérés során nem tapasztaltam buborékolást az olvadék felületén.

A képződő gázmennyiség, valamint a gázfelszabadulás intenzitásának hőmérséklet függvényében történő vizsgálata jelentős előrelépést jelent korábbi módszerekhez képest, mivel plusz információt szolgáltat a kötőanyagok lebomlási folyamatairól. A 4.21. ábra mutatja a gázfelszabadulásra jellemző görbéket a próbamag középpontjában mért hőmérséklet függvényében.



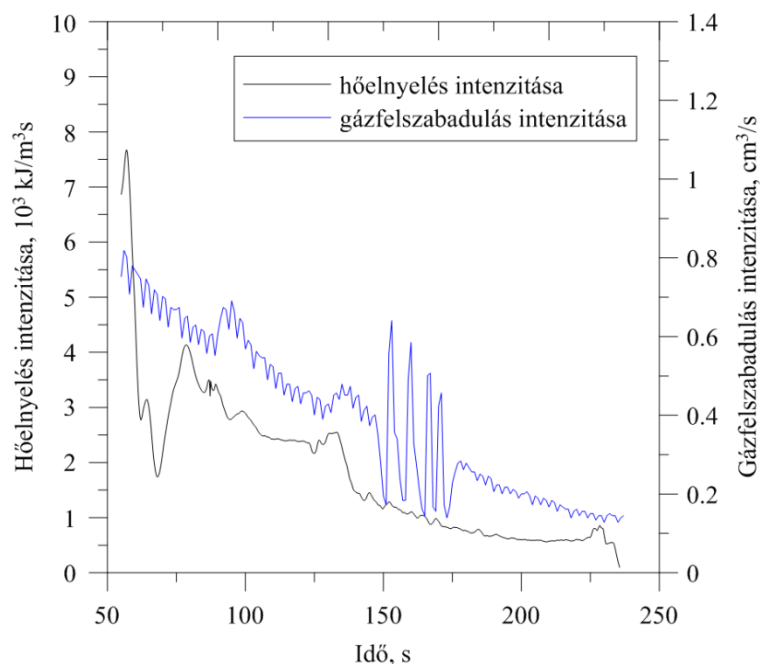
4.21. ábra - Gázmennyiség, illetve a gázfelszabadulás intenzitása cold-box, illetve furángyanta kötésű próbatest esetén, a próbatestek középpontjában mért hőmérséklet függvényében

Ebben az esetben is jól azonosíthatóak azok a maximum csúcsok, melyek a bomlási folyamatok legintenzívebb szakaszait mutatják, körülbelül 230 és 400 °C közötti hőmérséklet tartományban.

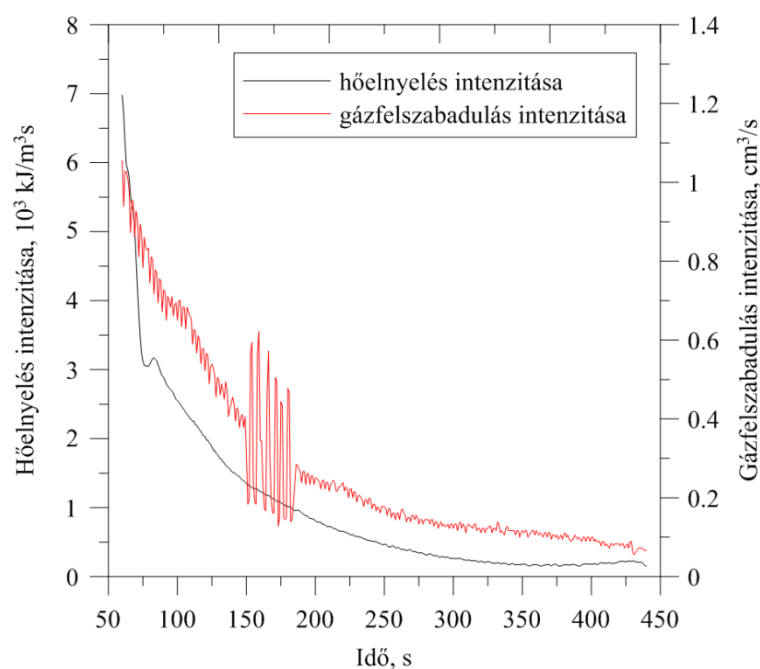
Megjelölve a 100°C-hoz tartozó függőleges vonalat, jól elkülöníthetővé válnak a magkeverékben lejátszódó, gázfelszabadulással járó folyamatok. 100 °C alatt a magkeverék pórusaiban lévő levegő hősokk okozta tágulása növeli a mérőberendezés által regisztrált gázmennyiséget. Ekkor a keverék szabad nedvességtartalmának egy bizonyos fokú kezdeti párolgása is szerepet játszik. 100 °C felett megkezdődik a kötőanyag bomlása. A 100 °C-nál kivetített vízszintes vonal segítségével megadható, hogy a teljes regisztrált gázmennyiség mekkora része köthető a 100 °C alatt lejátszódó, a gyanta termikus bomlásától független folyamatokhoz.

100 °C-ig, amíg a mért gázmennyiséget a keverék sűrűsége (pórusokban lévő levegő), valamint szabad nedvességtartalma határozza meg, mindkét keverékből 35 cm³ maggáz szabadult fel. Ezek az eredmények összhangban vannak a keverékek alaptulajdonságaival (3.4. táblázat), így a mérőberendezés által meghatározott értékek pontosnak tekinthetők.

A hőmérsékletmérések eredményei alapján végzett termikus analízis segítségével a gázfelszabadulásra jellemző tulajdonságok a formázókeverékek hőtani tulajdonságai függvényében is vizsgálhatóak (4.22. és 4.23. ábra).



4.22. ábra - A hőelnyelés, illetve a gázfelszabadulás intenzitása cold-box kötésű próbatest esetén, az idő függvényében



4.23. ábra - A hőelnyelés, illetve a gázfelszabadulás intenzitása furángyanta kötésű próbatest esetén, az idő függvényében

Mivel a kötőanyagok lebomlása során gázfelszabadulással járó reakciók hőt nyelnek el látható, hogy a gázfelszabadulás, valamint a hőelnyelés intenzitásához tartozó görbék lefutása azonos jelleget mutat. A gyanta bomlási folyamataira jellemző maximum csúcsok hasonlóan jelennek meg a különböző tulajdonságokat jelző görbéken mindkét vizsgált maghomok keverék esetén. A mérőberendezéssel meghatározott értékek ebből a szempontból is helyesnek tekinthetőek, a módszer azonban természetesen további finomítást igényel.

4.7. Összefoglalás, új tudományos eredmények

7. Kifejlesztettem saját tervezésű mérőrendszeremet, melynek segítségével a homokkeverékekből felszabaduló gázmennyiség meghatározása mellett, egyidejűleg hőmérsékletmérés és termikus analízis is végezhető. Így lehetőségem nyílt a gázmennyiséget, illetve a gázfelszabadulás intenzitását a hőmérséklet, valamint a formázókeverékek hőtani tulajdonságainak függvényében is tanulmányozni (7.a, 7.b, alpontok).
- 7.a** Az általam vizsgált, üzemi körülményeknek megfelelő összetételű és tulajdonságú cold-box kötésű formázókeverék esetén a kötőanyag bomlásától független, szobahőmérséklettől 100 °C-ig lejátszódó folyamatok során képződő gázok mennyisége a teljes felszabaduló gázmennyiség 25%-át képezi.
- Azonos feltételek mellett, furángyanta kötésű formázókeverék esetén a kötőanyag bomlásától független, szobahőmérséklettől 100 °C-ig lejátszódó folyamatok során képződő gázok mennyisége a teljes felszabaduló gázmennyiség 20%-át képezi.
- 7.b** Megállapítottam, hogy az egyes kötőanyag alkotók lebomlási folyamatait jelző maximum csúcsok a hőelnyelés intenzitását, valamint a gázfelszabadulás intenzitását idő függvényében ábrázoló görbéken egyaránt megjelennek, a gázfelszabadulás intenzitásának maximum értékei azonban időben késve követik a hőelnyelés intenzitásának maximum értékeit.

5. Összefoglalás

A disszertációmban megfogalmazott tudományos eredmények bővítik a formázókeverékekkel kapcsolatos ismereteinket. Kutatásaim fő iránya és módszerei megfelelnek a téma aktuális kutatási trendjének.

Kutatómunkám első szakasza során elért eredmények alapján az öntöttvas foszfortartalmának szakirodalomból ismert szerepe mellett, a formázókeverékek kénartalmának is jelentős szerepe van a penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulásában. A kén -mint felületaktív elem- hatása súlyozottabban jelentkezik, ha a formázókeverékből kerül az öntvényfelülethez közeli rétegbe. Ennek elsősorban olyan formázókeverék rendszerek gyártástechnológiájában van jelentősége, amelyeknél katalizátorként magas kénartamú gázokat és/vagy savakat (SO_2 , SO_3 , para-toluol-szulfonsav) használnak. Az ilyen keverékeknél helyenként előfordulhat magasabb kénartalom, ami az öntvény felülethez közeli rétegében dermedési anomália és/vagy penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulását eredményezheti.

Kutatómunkám második szakaszában elért eredmények öntészeti szempontból új ismeretekkel szolgálnak a műgyanták lebomlási folyamatairól. A Fourier-féle termikus analízisre épülő módszerrel meghatározott hőfizikai tulajdonságok segítségével a kereskedelmi forgalomban lévő szimulációs szoftverek adatbázisa pontosítható és/vagy bővíthető, mivel az ilyen programokban a formázókeverékekre vonatkozó hőfizikai alapadatok pontatlanok, vagy mesterségesen generáltak. A homokkeverékekben konduktív által történő hőszállítás matematikai megfogalmazásával, illetve modellezésével egy újfajta szimulációs program kifejlesztésének első lépését tettem meg.

Kutatómunkám harmadik szakaszában elért eredmények alapján az öntés során a kötőanyag lebomlásához közvetlenül kapcsolódó és attól független, gázképződéssel járó folyamatok szétválasztása alapján a valósághoz jobban közelítő kép alkotható a formák és magok felhevülési folyamatairól. A maggáz mennyiségének és a gázfelszabadulás intenzitásának méréssel történő meghatározása nyomán lehetőség nyílik a homokkeverékekben konvekció útján történő hőszállítás matematikai megfogalmazására, illetve modellezésére, ami az említett szimulációs program fejlesztésének következő fontos lépése lehet.

A hőelnyeléssel, valamint a gázfelszabadulással járó folyamatok összefüggését bemutató eredmények a formázókeverékek felhevülésének és lebomlásának szimulációjára alkalmas szoftver működésének a kulcsa. A hőfizikai, valamint a gázképződéssel járó folyamatok kapcsolatának tisztázásához újabb kiterjedt kísérletsorozatokra van szükség, főként a napjainkban egyre nagyobb teret hódító szerves formázókeverékek területén.

Az értekezésben foglalt eredmények eddig 1 M.Sc. diplomaterv elkészítésénél hasznosultak.

Summary

The results discussed in this dissertation extend the knowledge of moulding materials. The main orientation of my experimental work follows the actual research trends of the topic.

The results in the first part of experimental work showed, that sulphur content of moulding materials influences the formation of penetration surface defects, besides the known role of phosphorus. The effect of sulphur on the metal/mould interface reactions appears to be more significant, if it's originated from the moulding material. This is a very important factor in the aspect of core making procedures, which use gases and/or acids with high sulphur volume. In these cases areas with high sulphur rates can form in the moulding material, resulting in solidification anomaly on the metal/mould interface or appearance of various types of penetration defects.

The results in the second part of experimental work serve new informations about the decomposition processes of binders. Thermophysical properties of moulding mixtures determined by the method based on Fourier-thermal analysis can be applied to make commonly used simulation softwares more accurate. Databases of these softwares regarding to moulding materials are very imprecise or artificially generated. The first step of the development of a new type of simulation programme was performed in this part of my work through modelling heat transport by conduction in sand mixtures.

As of the results in the third part of experimental work, the investigation of decomposition and heating processes became more accurate, through separating the individual gas evolution reactions in the aspect of temperature. Measuring gas evolution and rate of gas evolution, modelling of heat transfer by convection became possible. This could be the next important step in the development of a new type of simulation programme.

The key of above-mentioned software, which is able to simulate the heating and the decomposition of moulding materials is to find the correct connection between the heat-absorbing and the gas evolving processes. This requires more extensive experiments, primarily in the field of inorganic moulding materials.

6. Irodalomjegyzék

- [1] A.B. Draper, J.L. Gaindhar: Metal Penetration - A Critical Literature Review, AFS Transactions, 1977. vol.85, old.163-199.
- [2] Iko Minerals Handbuch (www.ikominerals.de)
- [3] D. M. Stefanescu, S.R. Giese, T.S. Piwonka, A.M. Lane: Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I.: Physics of Penetration Defects and Penetration Model, AFS Transactions, 1996. vol.206, old.1233-1248.
- [4] J.P. Thorpe, The British Foundryman, 1950. vol.10, old. 380-482.
- [5] G. DiSylvestro: Experiences in Defect Diagnosis: Metal Penetration, AFS Paper No.89-07, San Antonio Casting Congress, CA, USA, 1989.
- [6] R.E. Savage , H.F. Taylor, AFS Transactions, 1950. vol.58, old.564-577.
- [7] Izudin Dugic: The Mechanism of Metal Expansion Penetration During Solidification of Cast Iron, Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation No. 1007., 2006.
- [8] Svidró József Tamás: Vasöntvények felületi minőségét befolyásoló tényezők vizsgálata, Tudományos Diákköri Dolgozat, 2006.
- [9] H.G. Levelink, F.P.M.A. Julien: Penetrations- und Lunkererscheinungen Infolge Wechselwirkung Zwischen Erstarrendem Gußstück und Form, Giesserei, 1973. 60. Jahrgang, old.488-495.
- [10] Attila Diószegi, Izudin Dugic: The Mechanism of Metal Expansion Penetration in Grey Cast Iron, Eight International Symposium on Science and Processing of Cast Iron, Beijing China, 2006.
- [11] H. Berndt: Neue Aspekte in der Aufbereitungstechnik und Qualitätssicherung von tongebundenen Sanden, Gießerei 67, 1980, old.667-675.
- [12] J. M. Svoboda: Mechanisms of Metal Penetration in Foundry Molds, AFS Transactions, 1994, vol.24, old.461-471.
- [13] Werner Tilch: Unterlagen zur Lehrveranstaltung Formtechnik: Grundlagen und Formstoffe 2002.
- [14] G. Kaptay: A unified equation for the viscosity of pure liquid metals, Z. Metallkd. 96. 2005.
- [15] J.O. Barlow, M. Owens, D.M. Stefanescu, A.M. Lane, T.S. Piwonka: Chemical Penetration in Sand Molds in Steel Casting, AFS Transactions, 1997, vol.145, old. 325-331.
- [16] G. Kaptay, T. Matsushita, K. Mukai, T. Ohuchi: On Different Modifications of the Capillary Model of Penetration of Inert Liquid Metals Into Porous Refractories and Their Connection to Pore Size Distribution of Refractories, Metall. Mater. Trans. B., 2004, vol. 35B, old.471-486.
- [17] D.M. Stefanescu, S.R. Giese, T.S. Piwonka, A. Lane: Metal Penetration in Sand Molds: A Fundamental Approach to Solving the Problem, AFS Transactions, 1993.
- [18] A. Königer: Giesserei Techn. Wissensch. Beiheft, 1960.
- [19] Dr. Nándori Gyula: Elméleti Öntészeti I. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó Bp. 1975.
- [20] K.I. Waschenko, A.P. Ruday, AFS Transaction, 1962, vol.70, old. 855-864.
- [21] S.R. Giese, D. M. Stefanescu, J. Barlow, T.S. Piwonka: Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II.: Experimental Evaluation of Some Main Parameters Responsible for Penetration, AFS Transaction, 1996, vol.207, old. 1249-1257.
- [22] T. Bárczy, G. Kaptay: Modelling the Infiltration of Liquid Metals Into Porous Ceramics, Materials Science Forum, 2005. vol.473-474. old. 297-302.
- [23] Détári Anikó: Forma-Fém Kölcsönhatásainak Vizsgálata, Különös Tekintettel a Formázóanyagok Újrahasznosíthatóságára, Ph.D. értekezés, Miskolc, 2009.
- [24] Dr. Jónás Pál, Détári Anikó, Svidró József Tamás: Az Öntvények Felületi Minőségét Befolyásoló Tényezők Vizsgálata, Bányászati és Kohászati Lapok, 140. évf. 2. 2007.
- [25] Svidró József Tamás: Lemezes és Gömbgrafitos Vasöntvények Felületi Minőségét Befolyásoló Tényezők Vizsgálata, Diplomaterv 2008.

- [26] Dr. Kapros Tibor: Műszaki Hőtan, Miskolc, 1997.
- [27] Jesper Hattel: Fundamentals of Numerical Modelling of Casting Processes, Polyteknisk Forlag, Kgs. Lyngby 2005.
- [28] Fiala A., Macásek I., Rusin K.: A Formázókeverékek Hőtulajdonságai Befolyásolásának Problematikája, Slévarenstvi, 1973. 8.sz. 313. old.
- [29] Attila Diószegi, Ingvar L. Svensson: Interpretation of Solidification by Thermal Analysis of Cooling Rate, Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 8. No.4. August 2005. old. 611-616.
- [30] Fras E., W. Kapturkiewicz, A. Burbielko, H.F. López: Numerical Simulation and Fourier Thermal Analysis of Solidification Kinetics in High Carbon Fe-C Alloys, AFS Transactions, 1997. vol.28. old. 115-123.
- [31] Daryoush Emadi, Laurence V. Whiting, Mile Djurdjevic, Witold T. Kierkus, Jerry Sokolowski: Comparison of Newtonian and Fourier Thermal Analysis Techniques for Calculation of Latent Heat and Solid Fraction of Aluminium Alloys, Metalurgija, Journal of Metallurgy, vol.10. No.2. 2004.
- [32] Attila Diószegi, Jesper Hattel: An Inverse Thermal Analysis Method to Study the Solidification in Cast Iron, Journal of Cast Metals Research, 2004. vol.17. old. 311-318.
- [33] Jónás Pál: Formázóanyagok c. tantárgy előadásai, 2005.
- [34] L. Winardi, H.E. Littleton, R.D. Griffin J.A. Griffin: Gas from Green Sand Molds and Vapor Transport Zone, AFS Transactions 2008. old.381-399.
- [35] Svidró József Tamás: Studying Binder Decomposition Characteristics in Chemically Bonded Moulding Materials Through Gas Evolution Measurement, VIII. International PhD. World Foundry Conference, 2011. június 7-9. Brno, Csehország
- [36] Svidró József Tamás, Tudományos Diákköri Dolgozat, 2005.
- [37] J. Orlenius, U. Gotthardsson, A. Diószegi: Mould and Core Gas Evolution in Grey Iron Castings, International Journal of Cast Metals Research 2008.
- [38] L. Winardi, R.D. Griffin, H.E. Littleton, J.A. Griffin: Variables Affecting Gas Evolution Rates and Volumes from Cores in Contact with Molten Metal, AFS Transactions, 2008.
- [39] Török Róbert: Diplomamunka, Miskolci Egyetem, 2002.
- [40] Jónás Pál, Dr. Tóth Levente: Formázóanyagok Vizsgálata és Öntödei Gépek, Tankönyvkiadó Budapest, 1986.
- [41] L. Winardi, H.E. Littleton, C.E. Bates: Pressures in Sand Cores, AFS Transactions, 2007. vol.115.

7. Az értekezés témakörében megjelent publikációk

Szakcikkek:

1. *Svidró József Tamás:* A kén hatása a penetrációs öntvényfelületi hibák kialakulására
Miskolci Egyetem Közleményei, II.kötet 35.sz. 1.füzet, Anyagmérnöki Tudományok 2010.
old. 65-75. HU ISSN 1789-7661
2. *Svidró József Tamás:* Burn-on surface defects of iron castings
Miskolci Egyetem Közleményei, II.kötet 35.sz. 2.füzet, Anyagmérnöki Tudományok 2010.
old. 49-59. HU ISSN 1789-7661
3. *Svidró József Tamás:* The Effect of Sulphur Content in Chemical Bonded Sand Mould on
the Mechanism of Penetration
Giessereiforschung/International Foundry Research
no.4. 2010. old. 32-41. ISSN 0046-5933
4. *Svidró József Tamás:* Studying Binder Decomposition Characteristics in Resin Bonded
Moulding Materials Through Core Gas Measurement
Giessereiforschung/International Foundry Research
no.4. 2011.

Szóbeli előadások:

1. *Svidró József Tamás:* Rágéges felületi hibák kialakulása vasöntvények felületén
Miskolci Egyetem, Doktorandusz Fórum, 2008.11.13.
2. *Svidró József Tamás:* Investigation of Gas Pressure Rised During Pouring in Sand Moulds,
XIII. microCAD International Scientific Conference, Miskolc,
2009.03.19.
3. *Svidró József Tamás:* Burn-on surface defects of iron castings
VI. International PhD World Foundry Conferece, Brno, Csehország
2009.06.03.
4. *Svidró József Tamás:* Homokformában az öntés során fellépő gáznyomás vizsgálata, XX.
Magyar Öntőnapok, Tapolca, 2009.10.11.
5. *Svidró József Tamás:* Measurement of Gas Pressure Evolved on Chemically Bonded Sand
Mould/Molten Aluminium Interface,
XXIV. microCAD International Scientific Conference, Miskolc, 2010.03.18-20.
6. *Svidró József Tamás:* The Effect of Sulphur Content in Chemically Bonded Sand Moulds
on the Mechanism of Penetration
VII. International PhD World Foundry Conference, Brno, Csehország
2010.06.24.
7. *Svidró József Tamás:* Studying Binder Decomposition Characteristics in Chemically
Bonded Moulding Materials Through Gas Evolution Measurement
VIII. International PhD World Foundry Conference, Brno, Csehország
2011.06.07.