



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Control Volume szimuláció öntészeti alkalmazása

Készítette:

Budavár Imre

Konzulens:

Dr. Molnár Dániel

egyetemi adjunktus

Öntészeti Intézeti Tanszék
Metallurgiai és Öntészeti Intézet

2011

Tartalom

1. Öntészeti folyamatok számítógépes szimulációja	4
1.1 A szimulációs folyamat matematikai megközelítése.....	4
1.2 A Véges Térfogatok / Szabályozott Térfogatok Módszere (FDM/CV).....	5
1.2.1 Az alkalmazott numerikus módszer matematikai alapjai	6
1.2.2 A hőtani feladat megoldása	7
1.3 Szimulációs vizsgálatok felépítése.....	10
1.3.1 Előkészítő folyamat (Pre-processing)	10
1.3.2 Számítási folyamat (Main-processing)	11
1.3.3 Kiértékelési folyamat (Post-processing)	12
2 Gömbgrafitos vasöntvény technológiai tervezése	12
2.1 A vizsgált öntvény bemutatása	14
2.2 Táplálólrendszer méretezési megoldások	16
2.2.1 A redukált falvastagság alapján történő méretezés	16
2.2.2 Technológiai méretezés szakirodalmi összefüggések alapján	20
2.2.3 Számítógépes méretező program alkalmazása.....	22
2.2.4 Üzemi technológia alapján történő méretezés.....	24
2.3 A vizsgált öntvénycsokor	27
2.4 Control Volume szimulációs vizsgálatok.....	27
2.4.1 Natural Erstarrung vizsgálat eredményei	28
2.4.2 Az öntvénycsokor vizsgálatának eredménye.....	30
2.5 Eredmények validálása véges elemes szimuláció alkalmazásával.....	32
2.5.1 Hálógenerálás	32
2.5.2 Számítási folyamat	34
2.5.3 FEM szimulációs eredmények.....	34
3. Kiértékelés és összefoglalás.....	36
Köszönetnyilvánítás	37
Felhasznált irodalom.....	37

Bevezetés

A számítógépes szimuláció az utóbbi években a korszerű öntvénygyártás és tervezés egyre nagyobb mértékben alkalmazott segédeszközévé vált. Az öntészeti problémák megoldása során alkalmazott számítógépes eszközök az öntvény – forma - környezet rendszerbe helyezve vizsgálják a lejátszódó folyamatokat. A számítógépes szimuláció alkalmazását az alábbi folyamatok indokolják:

- a vizsgált rendszer komplexitása,
- a költséges kísérletsorozatok lerövidítése, illetve mellőzése,
- a kialakuló hibaokok feltárása,
- az öntvényekkel szemben megkövetelt minőségi elvárások növekedése,
- a gyártani kívánt öntvények skálájának növekedése...

Az egyre bonyolultabb öntvények gyártástechnológiájának gyors és hatékony megtervezése többek között szimulációs algoritmust alkalmazó számítógépes programok segítségével lehetséges. Az ilyen programok alkalmazásával már az öntvénytervezés fázisában tanulmányozhatjuk az öntéskor lejátszódó termikus- és mechanikai folyamatokat, amelyek megfigyelésével fontos következtetéseket vonhatunk le az esetlegesen felmerülő öntvényhibák bekövetkezéséről.

Vizsgálataim során ismertetem a különböző öntészeti gyakorlatban elterjedt szimulációs módszereket. Áttekintem a megoldásokat szolgáló numerikus módszereket, a hőfizikai alapokat és az öntvények dermedési folyamatának számítási módszereit. Egy valós, tervezési fázisban lévő nagyméretű gömbgrafitos vasöntvény példáján keresztül bemutatom a véges térfogatok (FDM/CV) szimulációs módszer működését. Az öntvény táplálórendszerének tervezését és ellenőrzését végzem el szimuláció alkalmazásával, melynek célja a tömörre táplálás biztosítása. Az elért eredményeket további matematikai módszerekkel ellenőrzöm.

1. Öntészeti folyamatok számítógépes szimulációja

Öntészeti szempontból a szimuláció, modellek kidolgozását jelenti, melyeken kísérleteket végzünk el hipotetikus, vagy létező rendszerek vizsgálatára. A vizsgált rendszer egyes tulajdonságait számokkal, szimbólumokkal reprezentáljuk.

Napjainkban a szimulációs programok egyre fontosabb szerepet töltenek be az öntvénygyártás és tervezés folyamatában. Segítségével már az öntvénytervezés fázisában vizsgálhatjuk az öntéskor lejátszódó termikus és mechanikai folyamatokat és következtetéseket vonhatunk le a lehetséges öntvényhibák bekövetkezéséről.

Alkalmazásának célja széleskörű:

- A szimuláció eredményeit figyelembe vehetik a technológia megtervezése során.
- Használhatják a gyártás közben felmerülő problémák vizsgálatára pl. öntés után az öntvényen repedések figyelhetők meg az öntési feszültségből adódóan.
- A gyártás volumen növelése, optimalizálása céljából (pl. ciklusidő csökkentése)

Öntészeti esetben a szimulációs programokkal két fő részfolyamatot kell vizsgálnunk:

- anyagtranszport folyamatok: Navier- Stokes áramlási egyenletek segítségével,
- hőtranszport folyamatok: Fourier hővezetési egyenlet alapján.

Az öntészeti szimulációs programokkal vizsgálhatjuk:

- a beömlőrendszer és táplálórendszer kialakításának hatását az áramlási folyamatokra
- az áramlás okozta hibákat
- a hőmérséklet eloszlást
- a dermedési morfológiát
- a dermedési és lehülési időt
- a dermedés-lehülés közben kialakuló hibákat
- az erő és feszültség viszonyokat [JÁA79]

1.1 A szimulációs folyamat matematikai megközelítése

A szimuláció során az (öntvény–forma–környezet) rendszerhez, elhanyagolva annak lényegtelen jegyeit, különféle számítási modelleket rendelhetünk hozzá attól függően, hogy a rendszernek mely részét akarjuk vizsgálni (pl. formatöltés, dermedés, visszamaradó öntési feszültség). A számítási modell megalkotásakor több tényezőt mérlegelni kell:

- a vizsgált geometriákat
- a környezeti hatásokat

- a testek kölcsönhatását
- az anyag szerkezetét
- alakváltozásokat [Pál07]

A számítási modell létrehozásának lépései:

1. A matematikai modell megalkotása, amely az áramlásra és hőmérsékletre leírására vonatkozó alapegyenleteket és határfeltételeket jelenti. Az öntés közben lejátszódó folyamatokat parciális differenciál egyenletrendszerek írják le.
2. A matematikai modell megalkotását követően egy diszkretizációs (közelítő) módszer segítségével a differenciál egyenleteket, a bennük szereplő változók térben és időben felvett értékeinek felhasználásával algebrai egyenletrendszer formájában írjuk fel. Az egyes szimulációs programok eltérő közelítő módszert alkalmaznak. A legjelentősebb közelítő módszerek a véges elem módszer, véges térfogatok módszere, szabályozott térfogatok módszere. A megoldási tartományt numerikus háló segítségével osztjuk fel véges számú résztartományra (elemekre, térfogatokra), melyben a vizsgált probléma megoldásra kerül.
3. A numerikus háló létrehozása után kell elvégezni a közelítéseket: véges elem módszernél az elemeken belül értelmezett alak és súlyfüggvényt kell meghatározni, míg véges differencia módszernél az egyenletekben szereplő háló pontjaiban való közelítés formáját kell megválasztani.
4. A diszkretizációval egy nagyméretű nem lineáris algebrai egyenletrendszert hozunk létre, melynek megoldási módja függ a megoldandó problémától. Instacioner esetben a differenciál egyenletrendszerek kezdeti értékeinek időben léptetett megoldása történik, míg a stacioner problémák iterációs eljárásokkal kerülnek megoldásra.

1.2 A Véges Térfogatok / Szabályozott Térfogatok Módszere (FDM/CV)

A szabályozott térfogatok módszere a vizsgált tartományt véges számú résztartományokká, kisebb térfogati elemekre bontja és a keresett változókat egyszerűbb függvényekkel közelíti.

A közelítés első lépése, hogy a számítási tartomány diszkrét rácspontból álló hálóval kerül lefedésre. A háló kétdimenziós esetben lehet egyenlő-, vagy egyenlőtlen osztásközű derékszögű négyszög háló, háromszög, vagy paralelogramma.

Minden rácspontban a parciális differenciálegyenletekben szereplő parciális deriváltakat differenciáhányadosokkal közelítjük. Ezáltal minden rácspontbeli értékre egy algebrai egyenletet kapunk, amely az illető pontbeli értéken túl általában a környezetében lévő pontokban lévő értékeket is ismeretlenként tartalmazza. A differenciálegyenletekben szereplő változók térkoordináták szerinti első- és második deriváltjait, vagy a rácspontbeli ismeretlen értékekre illesztett polinomot differenciálással, vagy a csonkított Taylor sorral közelítik. A mezőváltozók diszkrét értékeit a cellák középpontjában határozzuk meg. A differenciálegyenleteket integrálva egy-egy cella térfogatára minden divergenciás tag a cella összes részfelületére vonatkozó felületi integrállá alakul. Az integrálok értéke minden cellafelületre egy-egy skalár, ami az adott felületen egységnyi idő alatt átáramló megmaradó mennyiséget fejezi ki, ezek a felület két oldalán tárolt (ismeretlen) mezőváltozóktól függenek. Az egyes transzportegyenlet, minden cellára egy-egy nemlineáris algebrai egyenletet eredményez. A nagyszámú ismeretlen és az egyenletek nemlinearitása miatt az algebrai egyenletrendszer pontos megoldása nem lehetséges, ezért iteratív közelítő eljárások alkalmazhatók. A számítási tartomány határára eső cella-részfelületekre vonatkozó integrálok számításához az elhagyott térrész hatását leíró újabb összefüggések, peremfeltételek megadása szükséges. [ChT03]

1.2.1 Az alkalmazott numerikus módszer matematikai alapjai

A szabályozott térfogatok módszer lényege, hogy a differenciálegyenletek numerikus közelítő megoldásakor az egyenletben szereplő differenciáhányadosokat, ún. differenciáhányadosokkal közelítik, illetve helyettesítik. Ezáltal a differenciálegyenlet megoldása egy lineáris egyenletrendszer megoldására vezethető vissza.

Amikor a szabályozott térfogatok módszerét alkalmazzák egyetlen x változóra vonatkozóan (amely fizikai jelentésénél fogva lehet idő, vagy helykoordináta), kiinduló lépésként az x változó lehetséges L maximális értékét n számú diszkrét értékre kell felosztani a következőképpen:

$$x=0, \quad x_1=\Delta x, \quad x_2=2\Delta x, \quad x_n=n\Delta x=L$$

Az x változó szerinti parciális deriváltakat ezután az x alkalmasan választott értékénél vett véges differenciákkal helyettesítik az alábbi gondolatmenetet követve.

Az $u(x,t)$ függvény x szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, t) - u(x - \Delta x, t)}{2\Delta x}$$

Ha a fenti deriváltat egy véges számértékkel, ún. véges differenciával helyettesítjük, akkor a derivált közelítésére az $x = x_i$ helyen a következő összefüggés adódik:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x_i} \sim \frac{u(x_i + \Delta x, t) - u(x_i - \Delta x, t)}{2\Delta x}$$

A fenti összefüggés átalakítva:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x_i} \sim \frac{1}{2\Delta x} (u_{i+1} - u_{i-1})$$

ahol u_i az $u(x,t)$ függvénynek az x_i helyen vett helyettesítési értéke: $u_i = u(x_i, t)$.

Az x szerinti másodrendű parciális derivált az $x=x_i$ helyen, hasonló megfontolás szerint, az alábbi módon közelíthető:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{x_i} \sim \frac{1}{\Delta x^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x_i + \Delta x/2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x_i - \Delta x/2} \right]$$

A fenti összefüggés átalakítva:

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{x_i} \sim \frac{1}{\Delta x^2} (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1})$$

A fenti összefüggésekkel definiált közelítő képleteket elsőrendű centrális differenciáknak nevezik. Másfajta módon származtatott differenciátípusok, az ún. haladó és retrográd differenciák. Ezek sajátossága az, hogy úgy közelítik a deriváltat, hogy csak az egyik oldalon lévő pontokat (diszkrét helykoordinátákat) veszik figyelembe.

A vizsgálandó objektumra vonatkozó differenciálegyenletben a parciális deriváltakat pontonként véges differenciákkal helyettesítve egy lineáris egyenletrendszer adódik, amelyben a változók száma az n értékének nagyságától, vagyis az L intervallum felbontási finomságától, függően változik. A konkrét számításokhoz felhasznált véges differenciák típusa (centrális, haladó, retrográd), valamint az n választott értéke egyaránt kihat a keresett $u(x,t)$ függvény becslési pontosságára. [BaGy07]

1.2.2 A hőtani feladat megoldása

A legtöbb öntészeti szimulációs program a dermedés-lehülés számítására a kvázi-egyensúlyi kétfázisú zónák elmélet alkalmazza, ami egy közelítő megoldást szolgáltat. A módszer alapja, hogy az ötvözetek és a színfémek kristályosodásának folyamata a likvidusz-szolidusz hőmérsékletközben tér el egymástól. A likvidusz-szolidusz hőmérsékletközben a kialakuló szilárd fázis a folyékony fázissal tart egyensúlyt, tehát mind a folyékony, mind a szilárd fázis jelen van. Mivel a színfémekhez képest az ötvözetek diffúziós együtthatójának

növekménye kismértékű, valamint a konvekcióból adódó keveredés gyenge, ezért a diffúzió jelensége mind a kétfázisú zónában, mind a szilárd fázisban elhanyagolható. A kétfázisú zónák elméletének egyik feltételezése, hogy a kétfázisú zóna állapota, hasonlóan a hőmérsékletmezőhöz $T(r,t)$ és a sebességmezőhöz $v(r,t)$, az alábbi makroszkopikus jellemzőkkel írható le: $S(r,t)$ a szilárd fázis térfogathányada, $L(r,t)$ a folyékony fázis térfogathányada; $P(r,t)$ az üres részek térfogathányada.

A fenti térfogathányadok a hely és az idő lokális függvényei, értékeik 0 és 1 közöttiek.

$$S(r, t) + L(r, t) + P(r, t) = 1$$

A fenti fázisegyensúly idő szerinti deriváltja:

$$\frac{\partial S(r, t)}{\partial t} + \frac{\partial L(r, t)}{\partial t} + \frac{\partial P(r, t)}{\partial t} = 0$$

Az anyagmegmaradás törvénye szerint egyszerűsíthetjük az összefüggést:

$$\rho_s(T) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_L(T) L) = 0$$

$\rho_s(T)$, $\rho_L(T)$ a folyékony és a szilárd fémfázisok sűrűsége a hőmérséklet függvényében.

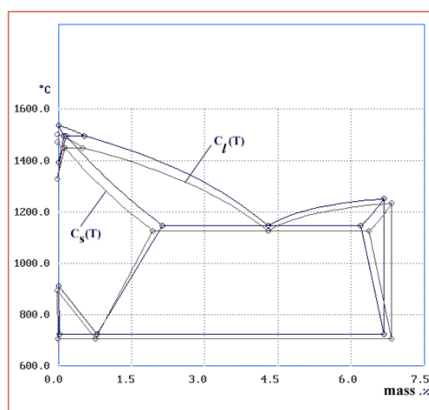
Az ötvözet komponenseinek anyagmegmaradás törvénye szerinti egyszerűsítése után felírható:

$$\rho_s(T) C_L^i(T) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (C_L^i(T) \rho_L(T) L) = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

$C_s^i(T)$, $C_L^i(T)$ az i -edik ötvözet komponens koncentrációja az egyensúlyban lévő folyékony és szilárd fázisban T hőmérsékleten. Az értékek a többfázisú rendszer fázisdiagramjából kerülnek meghatározásra.

A modell egyszerűsítésének céljából a kétalkotós fázisdiagramokat tekintjük kiindulási alapnak. A kétalkotós fázisdiagramokban nem szereplő további ötvözőelemeket, a kétalkotós fázisdiagramokra gyakorolt hatásuk szerint vesszük figyelembe, azaz a fázisdiagram egyes vizsgált pontjait koncentrációjuktól függően lineárisan mely irányba tolják el. A likvidusz és a szolidusz hőmérsékletek módosított értékeit a kapott diagramból határozzuk meg. Az 1. ábrán a vas-karbon kétalkotós fázisdiagram látható.



1 ábra

Az Fe-C kétkotós fázisdiagram

A felírt alapegyenletet egyenletrendszerre alakítjuk a hővezetési- és a konvektív hőátadási egyenletek felírásával.

$$S\rho_s(T)\chi_s(T)\frac{\partial T}{\partial t} + L\rho_L(T)\chi_L(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}\nabla T\right) - q\rho_s(T)\frac{\partial S}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\nabla T)$$

ahol:

ρ_L, ρ_S az ötvözet folyékony és szilárd fázisának sűrűsége a hőmérséklet függvényében,

χ_L, χ_S az ötvözet folyékony és szilárd fázisának fajhője a hőmérséklet függvényében,

λ az ötvözet hővezetési együtthatója a hőmérséklet függvényében,

q az ötvözet kristályosodási hője.

A formában történő hővezetés egyenlete:

$$\rho_K(T)\chi_K(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_K(T)\nabla T)$$

ahol, a k index a forma anyagától való függést jelöli.

A konvektív hőátadás kisméretű öntvények esetén elhanyagolható, a formatöltés során az olvadék lehűlése és a forma felmelegedése elhanyagolható nagyságú.

A zsugorodási üregek kialakulása a szivárgási elméleten alapszik. A kétfázisú olvadékban kialakuló dendritáló a zsugorodás során fokozódó mértékű ellenállást fejt ki az olvadék áramlásával szemben. A szivárgás sebessége arányos a nyomásgradienssel, és a dendritáló áteresztőképességével.

$$V = -m(S)\nabla_p$$

ahol „p” a nyomásra utal.

Az $m(S)$ áteresztőképesség függ az $s(r,t)$ megszilárdult fázis mennyiségétől. Az áteresztőképesség értéke a nullához tart, ha a szilárd fázis mennyisége nagyobb az S_p kritikus átszivárgási keresztmetszetnél.

$$m(S)=0, \quad S>S_p$$

A szivárgási elmélet szerint az S_p értéke $\sim 0,7$, egyes modellekben ötvözetek esetén $S_p=1$.

Ha az öntvényben a dermedés során kialakulnak olyan helyek, ahol már megszilárdult részek vesznek körbe még folyékony részeket, és az átszivárgási keresztmetszet mérete miatt már nem lehetséges az átszivárgás, akkor ennek a körbezárt helynek a kitáplálása nem történhet meg, vagyis ott zsugorodási porozitás kezd kialakulni. A zsugorodási porozitás nagyságának meghatározása során figyelembe kell venni a gravitációs teret, az áteresztést és a hőmérséklet eloszlást. [NoF09, KaL05]

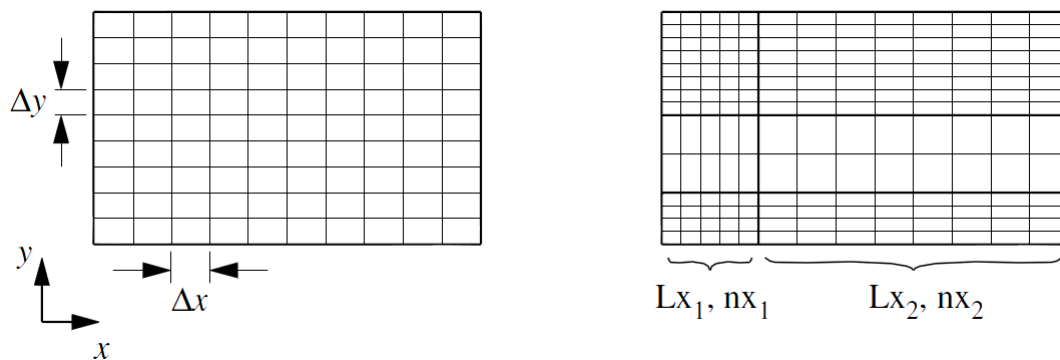
1.3 Szimulációs vizsgálatok felépítése

1.3.1 Előkészítő folyamat (Pre-processing)

Az előkészítő folyamat során történik a kívánt geometria feldolgozása. Minden olyan geometriát be kell vinni a szimulációs programba melyet figyelembe kívánunk venni a folyamat során. Be kell olvasni az öntvénycsokor geometriáját, amely tartalmazza az öntvény, a beömlő- és táplálórendszert. Továbbá minden olyan formaelemet, ami hatással van a kialakuló hőmérsékletterre pl. gravitációs öntés esetén a hűtővasak, szűrők, tápfejsapkák geometriái. Ezeket a geometriai információkat a 3D-s geometriai modellnek tartalmaznia kell, mert ezt fogjuk STL formátumban beimportálni a szimulációs programokba.

A beolvasott geometria alapján történik a hálógenerálás.

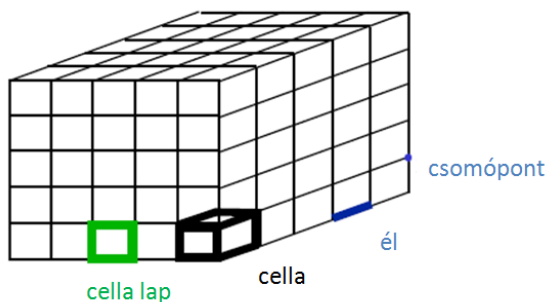
A szabályozott térfogatok elvileg tetszőleges számítási hálóra alkalmazható, azonban a gyakorlatban csak strukturált háló esetén alkalmazták. Ez esetben a rácsvonalak a helyi koordináta vonalakkal esnek egybe. Matematikailag lehetséges nem egyenközű háló alkalmazása is, mely bonyolultabb számítási struktúrát eredményez, de a geometria leíró képessége rugalmasabb. Az 2. ábrán egy számítási tartomány leírása látható bal oldalon egyenközű, jobb oldalon nem egyenközű hálózás esetén.



2. ábra

Egyenközű és nem egyenközű szabályozott térfogatokkal történő hálózás

Az általam használt szimulációs program minden esetben egyenközű hálót alkalmaz. Ez kétdimenziós esetben négyzetet, háromdimenziós esetben kockákat jelent. A szabályozott térfogatok módszer esetén az egyes elemek és nevezetes geometria helyek elnevezése a 3. ábrán látható. [MoD11]



3. ábra

Háromdimenziós CV háló

1.3.2 Számítási folyamat (Main-processing)

A számítási folyamatok során történik a vizsgált folyamatok kiszámítása. A hálógenerálást követően definiálni kell a futtatáshoz szükséges anyagtulajdonságokat, kiindulási és peremfeltételeket. Annak érdekében, hogy a szimulációs vizsgálat minél jobban megközelítse a valós körülményeket, az anyagok tulajdonságainak minél részletesebb megadása szükséges.

Itt kell definiálni a fém-forma-környezet rendszer anyagtulajdonságait. A szimulációs programok adatbázissal rendelkeznek, melyből kiválaszthatjuk az ötvözet, a formázóanyag

típusát, exoterm anyagot, nyomásos öntés esetén a hűtő-fűtő közeg anyagát stb. Az adatbázisok további információkat adnak a kiválasztott anyagra vonatkozólag.

Az anyagtulajdonságok megválasztása után meg kell adnunk a kiindulási-és peremfeltételeket. Ennek során az összes geometriai, időbeli és értelmezési peremfeltételt definiálni kell. A geometriai feltételeknél meg kell határozni a beömlési, táplálási pontokat, szűrők, fekecek, exoterm tápfejsapkák tulajdonságait. Lehetőség van az öntvény adott pontján vizsgálni a dermedést a hőmérséklet-idő függvényében hőelemek elhelyezésével.

Az időbeli definícióknál meg kell adni a formatöltési időt, nyomásos öntés esetén a szerszám zárvatartási időt, ciklusidőket. Egyes programoknál be kell állítani, hogy az adatok milyen időközönként kerüljenek rögzítésre.

Értelmezési feltételként definiálni kell például a kiindulási hőmérsékletet (öntési hőmérsékletet) és a véghőmérsékletet, ezzel azt a tartományt határozzuk meg amelyben a vizsgálatot akarjuk elvégezni.

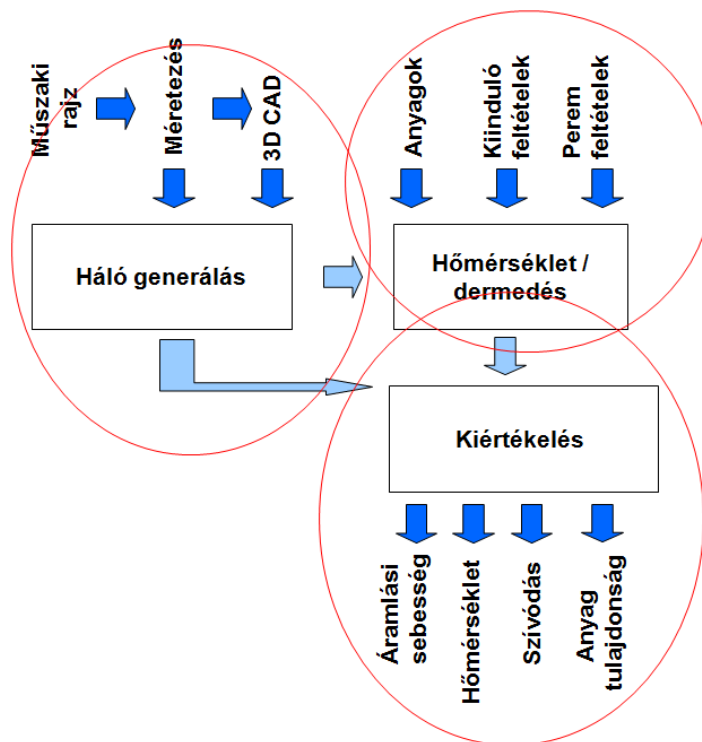
1.3.3 Kiértékelési folyamat (Post-processing)

A kiértékelési folyamatban történik a számítás eredményeinek kiértékelése. Ennek során lehetőség van az anyagtulajdonságok (hőmérséklet, nyomás, sebesség) kiértékelésére ill. a geometriai változások (repedés, vetemedés) megjelenítésére, mely történhet a szimulációs programokon belül vagy más CAD programkörnyezetben.

Az eredmény kiértékelése számokkal, szimbólumokkal, nézetekkel, metszetek és skálák segítségével történik. [EF109, TMi99]

2 Gömbgrafitos vasöntvény technológiai tervezése

Vizsgálataim során egy gömbgrafitos vasöntvény technológiai tervezését és szimulációját végeztem el a valós üzemi gyártási körülményeknek megfelelően. Kísérleti munkámat az 4. ábrán látható logikai séma alapján végeztem. Ezzel célom az volt, hogy az elvégzett méretezések és technologizálás alapján el lehessen végezni az adott folyamatok szimulációs vizsgálatát.



4.ábra

Kísérleti munka menete

Vizsgálataim során a svéd NovaCast Systems AB szoftvercég által fejlesztett szimulációs és méretezési programokat és az RWP GmbH cég által fejlesztett SIMTEC/Wincast programot alkalmaztam.

A NovaCast Systems cég terméke a Foundry Technology III. öntészeti technológizáló program. A programot 1981-óta fejlesztik és ma már több mint 35 ország öntődéiben alkalmazzák. A program a szakirodalom alapján feldolgozott-, ill. saját algoritmusok alapján nyújt méretezési segítséget a különböző öntészeti technológizálási feladatok megoldásához. Segítségével az adagösszeállítás, táplálórendszer méretezés és a beömlőrendszer kialakítás különböző részfolyamatai számíthatóak.

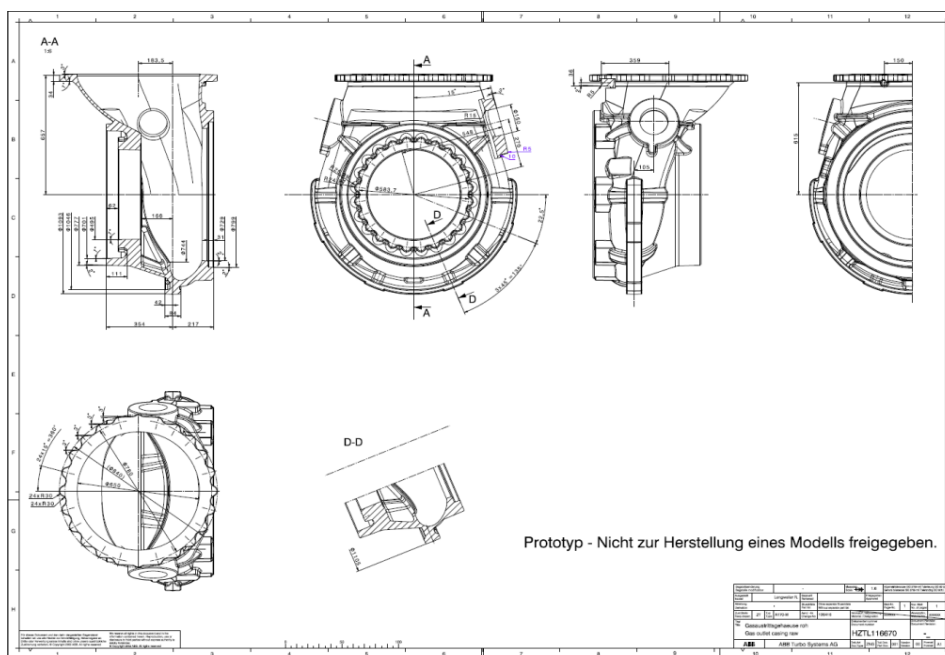
Szintén a NovaCast Systems cég terméke a NovaFlow&Solid CV szimulációs program. Az szimulációs algoritmus a Véges Térfogatelem / Szabályozott térfogatok (Finite Difference Method / Control Volume Method, FDM/CV) módszerét alkalmazza. A program segítségével méretezhetőek és szimulálhatóak az egyes öntési módszerek és eljárások.

A SIMTEC/Wincast programot a németországi RWP GmbH cég fejleszteti, a program a Véges Elem Módszer (Finite Element Method, FEM) elvén működik és többek között

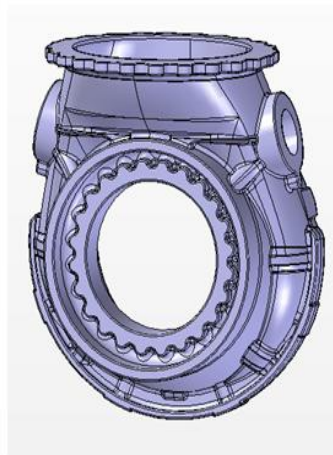
alkalmas a gravitációs-, nyomásos-, precíziós- és folyamatos öntés szimulációjára. A szoftver nagy előnye, hogy a véges elemes háló segítségével egy komplex „műszaki rajz” modul is része, így akár CAD tervezési feladatok is elvégezhetőek közvetlenül a programrendszeren belül.

2.1 A vizsgált öntvény bemutatása

A vizsgált öntvény egy nagyméretű, ún. gázkipufogóház prototípus, melyet gáz-és dieselmotoroknál alkalmaznak. Az 5. ábrán látható az öntvény műszaki rajza, a 6. ábrán a vizsgált öntvény 3D modellje és egy példa annak beszerelésére. Az öntvény műszaki rajzát és 3D modelljét a Csepel Metall Vasöntőde Kft. bocsájtotta a rendelkezésemre. Az elvégzett kísérleti munka az üzem folyamatos egyeztetésével valósult meg.



5.ábra
Műszaki rajz



6.ábra

A vizsgált öntvény 3D modellje és egy példa annak beszerelésére

A megrendelő az öntvénnel szemben az alábbi követelményeket írta elő.

Anyagminőség

Az öntvény anyagminősége (DIN-EN 1563) EN-GJS-400-15 szabványú gömbgrafitos öntöttvas ötvözet. Előírt szakítószilárdsága 400 N/mm^2 , nyúlása: 15%. Ezeket külön öntött (nem az öntvényből kimunkált) Y alakú próbatesten kell ellenőrizni.

Az öntöttvas kémiai összetételénél az alábbiakat írja elő (5):

Si 2,2-2,7; Mn 0,3; P 0,05; S 0,01.

Metallográfiai elvárások

Az öntvény szövetszerkezetét is a külön öntött Y alakú próbatesten kell vizsgálni, melynél a következőknek kell teljesülnie:

- a szövetszerkezet több mint 90 %-ának ferritesnek kell lennie, hogy a kívánt nyúlást tudja biztosítani. A maradék hányada perlites szerkezetű.
- a grafithányad legalább 90%-ának, a grafit alakja szerint a szabványos V. és VI. típusba kell tartoznia, a fennmaradó a III. és IV. típusba tartozhat,
- a grafit mérete szabvány szerint a IV. és VII: típusúnak kell lennie.

Szilárdsági követelmények

Az öntvényt a használata során eltérő igénybevétel érheti. A megrendelő az öntvény három zónára osztotta fel, melyet eltérő igénybevétel ér az alkalmazás során. Ezekre a zónákra külön-külön írja elő a szilárdsági értékeket valamint a grafit alakját.

- 1. zóna: nagymértékű termikus feszültség és mechanikai erő éri a terhelés hatására.

- 2. zóna: az előzőnél kisebb mértékű, de jelentős termikus feszültség, mechanikai erő és súrlódási erő a terhelés hatására.
- 3. zóna: az előzőeknél kisebb mértékű termikus feszültség és mechanikus erő.

Porozitás, szívódási üreg

Minden öntvénnel szemben az egyik legfontosabb követelmény a tömörre táplálás, azaz minél kisebb mennyiségben tartalmazzon szívódási üreget, porozitást. A porozitás mennyiségét is előírja a megrendelő az egyes zónákban. A porozitás százaléka az egyes zónákban nem haladhatja meg az alábbi értékeket: 1. zóna < 5%, 2. zóna < 20%, 3. zóna < 25%.

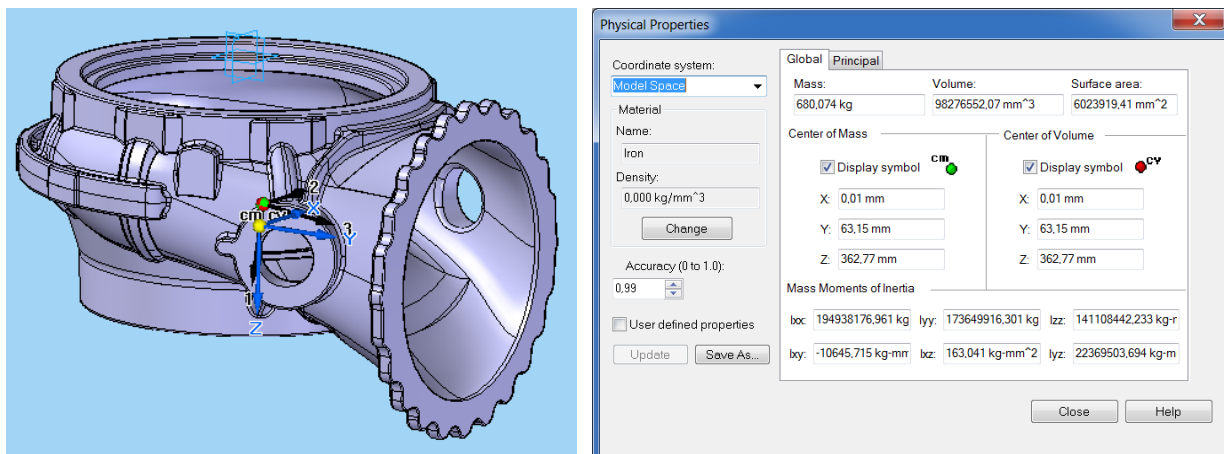
2.2 Táplálórendszer méretezési megoldások

A vizsgált öntvény szimulációs vizsgálatát a 4. ábra logikai sémája alapján végeztem el, melynek első lépése a műszaki rajz és 3D alkatrész geometria felhasználásával az öntvény technológizálása. Az öntvény technológiai méretezésének célja az irányított dermedés eszközeivel az öntvény tömörre táplálásának biztosítása. Ennek egyik eszköze a tápfejek és hűtővasak kialakításának méretezése. A tápfejek méreteinek meghatározására különböző méretezési és közelítő módszereket alkalmaztam.

2.2.1 A redukált falvastagság alapján történő méretezés

A redukált falvastagság alapján történő méretezéshez a NovaFlow&Solid CV szimulációs programot használtam. Ennek során az öntvény geometriai információira van szükségünk, hogy az azok alapján számolt redukált falvastagság értékek alapján lehessen méretezni az adott öntvényrész kitáplálásához szükséges tápfej(ek) méreteit. A méretezéshez tehát szükségünk van az öntvényt leíró CAD geometriára.

Az alkatrész 3D CAD geometriáját Solid Edge V20 alakelem alapú modellező szoftver segítségével állítottam elő. A CAD programon belül lehetséges a teljes öntvény térfogatának és területének, valamint anyagának megadása, de ez nem elégséges a méretezés elvégzéséhez, mivel az adott kitáplálendő öntvényrész moduljainak meghatározására nincs lehetőség. A 7. ábrán az öntvény és annak számított geometriai adatai láthatóak.



7. ábra

Az öntvény és annak számított geometriai adatai

A szimulációs programon belül generált háló felhasználásával lehetséges a tápfejek méretezése. Az egyes öntvényrészek redukált falvastagságainak kiszámítása az alábbi módon történik:

$$m = \frac{V}{A}$$

ahol, m : redukált falvastagság, cm

V : a kitáplálendő öntvényrész térfogata, cm^3

A : a kitáplálendő öntvényrész hűlő felület, cm^2

A redukált falvastagság értéke kizárólag a geometriai viszonyok függvénye. Ezzel szemben az ún. „termikus redukált falvastagság” a geometriai viszonyok mellett a hőfizikai tulajdonságokat is figyelembe veszi. A NovaFlow&Solid programrendszer a termikus redukált falvastagság meghatározásánál az alábbi számítási módot alkalmazza:

$$m_t = k \times t^2$$

ahol, m_t : termikus redukált falvastagság

t : a vizsgált öntvényrész dermedési ideje, s

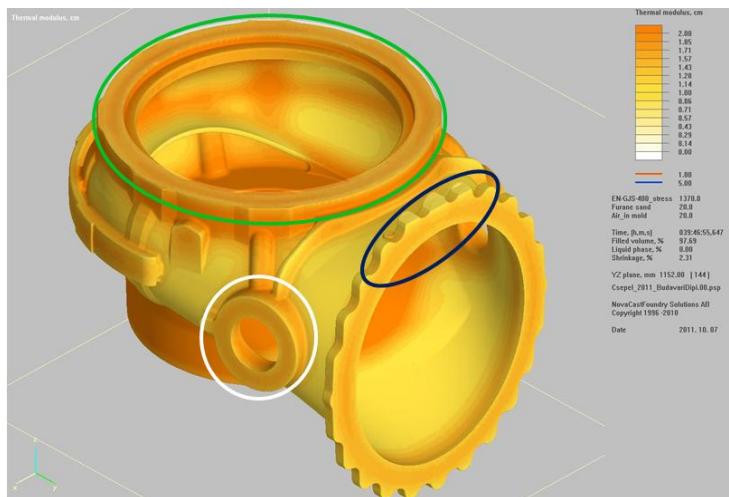
k : arányossági tényező

A „ k ” arányossági tényező egy olyan állandó, amely egy 1 cm redukált falvastagságú gömb dermedési idejét veszi alapul. A gömb (öntvözet) és a forma anyaga, valamint kiinduló hőmérsékletei megegyeznek a valós öntvény vonatkozó értékeivel. A k tényező az alábbi módon számítható:

$$k = \frac{1}{t_0^2}$$

ahol, t_0 : az 1cm redukált falvastagságú gömb dermedési ideje.

A 8. ábra az öntvény termikus redukált falvastagságát szemlélteti. Skála: 0,14-2 cm.



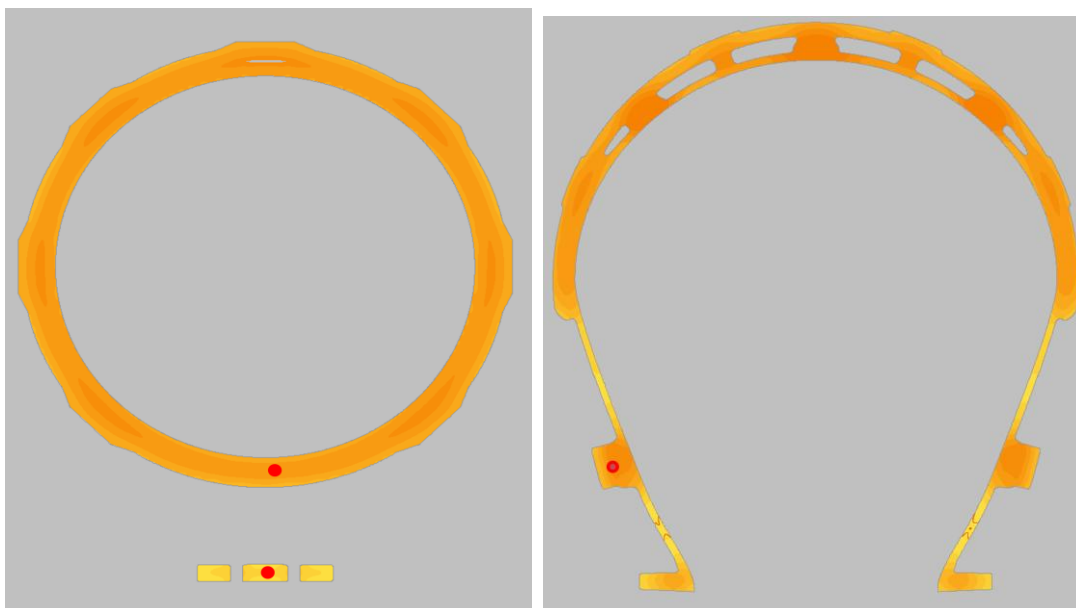
8. ábra

Termikus redukált falvastagság

Az 8. ábrán bejelöltem, hogy a vizsgált geometriának mely részeken nagy a termikus redukált falvastagság értéke, ahol tápfejeket kívánok elhelyezni. A vizsgált részeket az alábbi néven neveztem el az egyértelmű azonosíthatóság érdekében: felső gyűrű (zöld), oldalsó szem (fehér), első gyűrű (fekete).

A NovaFlow&Solid programban a generált hálón, az adott geometriai hely koordinátáját helymegadó kurzor segítségével kell kiválasztani. A program figyelembe veszi a bevitt formaöntvény anyagtulajdonságok alapján számított dermedési időt. A Z (függőleges) tengely mentén metszeteket definiálunk és az adott metszeten kiválasztjuk az öntvény csatlakozásának helyét.

Elsőként az öntvény felső gyűrűjéről és első gyűrűjéről készítettem egy közös metszetet, majd kijelöltem a tápfej csatlakozásának helyét (9. ábra). A 9. ábra bal oldalán a felső- és első gyűrűk, jobb oldalán az oldalsó szem pozíciója látható. A piros pontok jelzik a tápfejek helyét.



9. ábra

Vizsgált metszetek

Ezután a programon belül egy tápfej méretezési munkablakban kell megadni a további értékeket. A munkablakban a bal oldali oszlop azokat az értékeket tartalmazza, melyek a tápfej adatainak kiszámításához szükségesek. Ezek az ötvözet típusa, sűrűsége, öntvényrész modulja, a kitáplálendő öntvényrész tömege, öntési hőmérséklet, a tápfej magasság/átmérő viszonya, a tápfejnyak/öntvény moduljának viszonya. További beállítási lehetőségek a forma keménysége, a tápfej geometriája, pozíciója az öntvényen ill., a tápfejen keresztüli öntés lehetősége.

A munkablak jobb oldali oszlopán a program által számított adatokat láthatóak. Ezek a tápfej modulja, a tápfej/öntvény modul aránya, a tápfej tömege, a tápfejnyak modulja, a tápfej átmérője, magassága. A 10. ábrán az egyes helyekre pozícionált, ráültetett tápfej számított értékei láthatóak.

Feeder size calculation	
Use (Shift+Mouse) on section to input a casting modulus	
Input data	Result
Alloy name: EH-GJS-400 stress	Minimum Feeder modulus, cm: 3.27332
Alloy density, kg/m ³ : 6807.30273	Actual modulus ratio Feeder/Casting: 2.00324
Casting modulus, cm: 1.63401	Feed metal requirement, cm ³ : 1624.52442
Casting weight to be fed, kg: 668.99542	Feeder weight, kg: 42.66948
Pouring temperature, °C: 1370.00	Modulus Feeder neck, cm: 1.30721
Minimum Feed metal requirement, %: 1.65302	Feeder neck dimension square, mm: 52.28843
Minimum Modulus ratio Feeder/Casting: 1.20000	Minimum Feeder diameter, mm: 174.57687
Feeder ratio Height/Diameter: 1.50000	Minimum Feeder height, mm: 261.86530
Modulus ratio Neck/Casting: 0.80000	
Feeder type: Cylinder	
Mould hardness: 80.00000	
Location: Top	
Pour through feeder: No	
N Th.modulu... X, mm Y, mm Z, mm	
Add to list Delete Save to file Save ratio Ok	

Felső gyűrű

Feeder size calculation	
Use (Shift+Mouse) on section to input a casting modulus	
Input data	Result
Alloy name: EH-GJS-400 stress	Minimum Feeder modulus, cm: 2.95219
Alloy density, kg/m ³ : 6807.30273	Actual modulus ratio Feeder/Casting: 2.72051
Casting modulus, cm: 1.08516	Feed metal requirement, cm ³ : 1624.52442
Casting weight to be fed, kg: 668.99542	Feeder weight, kg: 31.32305
Pouring temperature, °C: 1370.00	Modulus Feeder neck, cm: 0.86813
Minimum Feed metal requirement, %: 1.65302	Feeder neck dimension square, mm: 34.72509
Minimum Modulus ratio Feeder/Casting: 1.20000	Minimum Feeder diameter, mm: 157.45018
Feeder ratio Height/Diameter: 1.50000	Minimum Feeder height, mm: 236.17527
Modulus ratio Neck/Casting: 0.80000	
Feeder type: Cylinder	
Mould hardness: 80.00000	
Location: Top	
Pour through feeder: No	
N Th.modulu... X, mm Y, mm Z, mm	
Add to list Delete Save to file Save ratio Ok	

Első gyűrű

Feeder size calculation	
Use (Shift+Mouse) on section to input a casting modulus	
Input data	Result
Alloy name: EH-GJS-400 stress	Minimum Feeder modulus, cm: 3.44776
Alloy density, kg/m ³ : 6807.30273	Actual modulus ratio Feeder/Casting: 1.73909
Casting modulus, cm: 1.98251	Feed metal requirement, cm ³ : 1624.52442
Casting weight to be fed, kg: 668.99542	Feeder weight, kg: 49.86148
Pouring temperature, °C: 1370.00	Modulus Feeder neck, cm: 1.58601
Minimum Feed metal requirement, %: 1.65302	Feeder neck dimension square, mm: 63.44032
Minimum Modulus ratio Feeder/Casting: 1.20000	Minimum Feeder diameter, mm: 183.88064
Feeder ratio Height/Diameter: 1.50000	Minimum Feeder height, mm: 275.82096
Modulus ratio Neck/Casting: 0.80000	
Feeder type: Cylinder	
Mould hardness: 80.00000	
Location: Top	
Pour through feeder: No	
N Th.modulu... X, mm Y, mm Z, mm	
Add to list Delete Save to file Save ratio Ok	

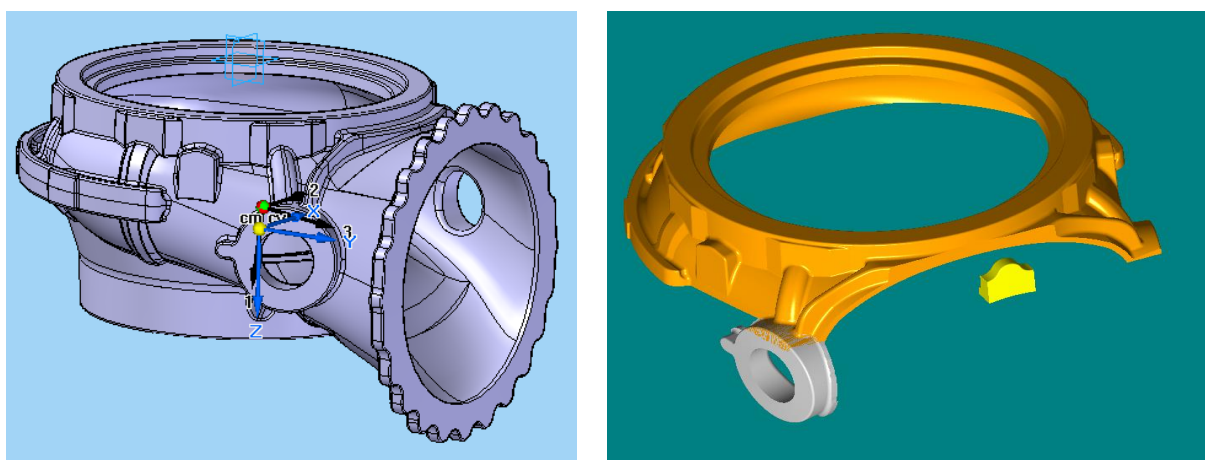
Oldalsó szem

10. ábra

Ráültetett tápfejek számított értékei

2.2.2 Technológiai méretezés szakirodalomi összefüggések alapján

A szakirodalom alapján történő táplálórendszer méretezését a Sorell Metall cég méretezési elvei alapján végeztem el. [RiT00] Mivel az öntvény összetett, bonyolult szerkezetű, ezért a számítások során a Solid Edge 3D-s tervező programot vettem igénybe, melynek egyik opciója a geometria tömegének, térfogatának és felületének kiszámítása. Az egyes vizsgált geometriai helyeken meghatároztam az öntvényrészek redukált falvastagságát. Az öntőde nagyszilárdságú formázást alkalmaz, műgyantás formázókeverék felhasználásával. Mivel az öntvényrészek bonyolult alakzatok, ezért egyszerű geometriai elemeket alkalmaztam közelítésként, hogy ki tudjam számolni azokat a felületeket, amelyek nem vesznek részt a hűlésben. A 11. ábrán eltérő színekkel mutatom be a vizsgált öntvényrészeket.



11. ábra

Az öntvény és az egyes vizsgált kitáplálendő öntvényrészek

A vizsgált térfogatok és felületek alapján az egyes kitáplálendő öntvényrészek vonatkozó értékei az 1. táblázatban láthatóak.

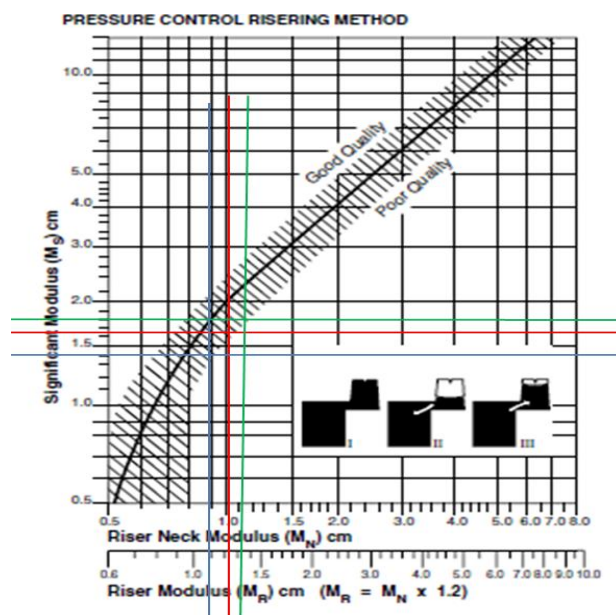
1. táblázat

Vizsgált öntvényrészek geometriai értékei

	Térfogat, cm³	Felület, cm²	Modul, cm
Felső gyűrű	30424,66	19739,66	1,64
Első gyűrű	357,47	339,13	1,39
Oldalsó szem	2819,15	1853,89	1,8

Az öntvényrészek mértékadó moduljának kiszámítását követően, a következő lépés a 12. ábra alapján a tápfej és tápfejnyak moduljának a meghatározása. A diagramon vízszintes egyeneseket vettem fel a mértékadó modulnál, majd a görbe min-max. tartományán belül függőleges egyenesek segítségével olvastam le a tápfejnyakak és a tápfejek moduljának

értékeit. Az egyes öntvényrészekhez tartozó értékeket eltérő színekkel jelöltem, Piros színnel a felső gyűrűhöz-, kék színnel az első gyűrűhöz-, míg zöld színnel az oldalsó szemhez tartozó értékeket jelöltem.



12. ábra

Tápfejnyak, tápfej modul a mértékadó modul függvényében

Mivel minden vizsgált geometriai helyen ráületetett henger alakú tápfejet választottam, ezért a vonatkozó összefüggések alapján (Tápfej átmérő = $4,53 \cdot \text{Tápfej modul}$; Tápfej térfogat = $1,04 \cdot \text{Tápfej átmérő}^3$) meghatároztam a tápfejek térfogatát, átmérőjét és magasságát. a vonatkozó geometriai értékek a 2. táblázatban láthatóak.

2. táblázat

Tápfej, tápfejnyak modul értékei

	Felső gyűrű	Első gyűrű	Oldalsó szem
Mértékadó modul, cm	1,64	1,39	1,8
Tápfejnyak modul, cm	1	0,9	1,1
Tápfej modul, cm	1,3	1,1	1,4
Tápfej átmérő, cm	6	5	6,34
Tápfej magasság, cm	8	6,63	8,39
Tápfej térfogat, cm ³	224,6	130	265

2.2.3 Számítógépes méretező program alkalmazása

Vizsgálataim ezen részében, a Foundry Technology III. szoftvert alkalmaztam. Az alkalmazott algoritmusnak a tápfejek méretezése során az alábbi két kritériumot kell teljesítenie:

1. A tápfejnek ugyanakkor, vagy később kell megdermednie, mint az öntvénynek, azaz dermedési ideje hosszabb, vagy azonos idejű, mint az öntvényé. Mivel a dermedési idő közelítőleg arányos a modul négyzetével, ezért a program ennek kifejezésére az alábbi számítási módot alkalmazza:

$$M_{\text{tápfej}} \geq M_F * M_{\text{öntvény}}$$

Ahol, $M_{\text{tápfej}}$: a tápfej modulja, cm

$M_{\text{öntvény}}$: öntvény modulja, cm

M_F : konstans, érték 0,8-1,3 között változik, ötvözetől függően.

Ha $M_F = 1$ (szürke öntöttvasakra jellemző), akkor a tápfej és az öntvény dermedési ideje azonos.

2. A tápfej által táplálásra fordítható fémtérfogatnak nagyobbnak, vagy egyenlőnek kell lennie a kitáplálendő öntvényrész térfogatával.

$$V_{\text{tápfej}} * RY \geq SF * V_{\text{öntvény}}$$

ahol $V_{\text{tápfej}}$: a tápfej térfogata

$V_{\text{öntvény}}$: öntvény térfogata

RY : a tápfej kihozatala százalékosan. Értéke függ a tápfej alakjától, elhelyezésétől, de főként az M_F konstans értéktől.

SF : kitáplálendő öntvényrész térfogata, a teljes öntvényrész százalékában. Az SF értéke függ az ötvözet típusától, az öntési hőmérséklettől és a forma keménységtől.

A tápfej méretezése során a program először egy hipotetikus tápfejet számol, a bevitt adatok valamint az 1. kritérium alapján. Ezt követően a program ellenőrzi, hogy teljesült-e a 2. kritérium is. Ha nem teljesül, akkor automatikusan növeli a tápfej magasságát. A tápfej méreteit optimális értékek között változtatja (a tápfej magassága 1,1-1,5-szerese az átmérőnek), majd újra ellenőrzi a számításokat. Ezt a műveletet addig ismétli a program, amíg a két kritérium nem teljesül. Ezután kerülhet sor a tápfej tömegének és a tápfej tényleges méreteinek kiszámítására.

A három vizsgált öntvényrészre, a felső gyűrűre, az első gyűrűre és az oldalsó szemre végzem el tápfejek méretezését. A tápfej számításának menete:

1. Az öntött ötvözet típusának kiválasztása.
2. Kitáplálendő öntvényrészek tömegének megadása.
3. A lehetséges tápfej magasságok legkisebb és legnagyobb értékeinek megadása.
Mindhárom esetben a program automatikusan megadott értékét, 0-2000 mm-t használtam.
4. A tápfej formázási módjának megadása (homok).
5. Formakeménység megadása (kemény formák esetén 100 GF).
6. Ráültetett tápfej típus definiálása.
7. Öntési hőmérséklet megadása (1370°C).
8. Számítások elvégzése.

A programmal kiszámoltam az egyes tápfejek modulját, átlagos átmérőjét, magasságát, tápfejnyak modulját, a táplálási hatósugarat véglaphatással és a nélkül. A három vizsgált öntvényrészre kapott adatokat a 3. táblázatban foglaltam össze. A méretezés során a tápfej minimum és maximum magasságánál a program által megadott értéket vettem fel 0-2000 mm.

3. táblázat

Foundry Technology III. szoftver méretezés eredményei

		üzemi		üzemi		üzemi
Kiinduló adatok	Felső gyűrű	Felső gyűrű	Első gyűrű	Első gyűrű	Oldalsó szem	Oldalsó szem
Térfogat (cm ³)	30424,66	30424,67	357,46	357,46	2819,15	2819,15
Redukált falvastagság (cm)	1,64	1,64	1,39	1,39	1,8	1,8
egy tápfejre eső kitáplálendő tömeg (kg)	105	105	2,47	2,47	19,51	
min tápfej magasság (mm)	0	383	0	383	0	577
max tápfej magasság (mm)	2000	383	2000	383	2000	577
tápfej típusa	homok	homok	homok	homok	homok	homok
forma keménység (GF)	100	100	100	100	100	100
tápfej pozíció	ráültetett	ráültetett	ráültetett	ráültetett	ráültetett	ráültetett
tápfejen keresztüli öntés	nem	nem	nem	nem	nem	nem
öntési hőmérséklet (°C)	1370	1370	1370	1370	1370	1370
Eredmények						
tápfej modul (cm)	2,2	2	1,5	1,8	1,9	2,4
tápfej átlagos átmérő (mm)	108	91	81	81	104	104
tápfej magasság (mm)	193+25	383+21	89+19	383+19	115+24	577+24
tápfejnyak modul (cm)	0,88	0,88	0,8	0,8	0,99	0,99
táplálási sugár (mm)	118	118	104	104	135	135
táplálási hatósugár véglaphatással (mm)	251	251	222	222	288	288

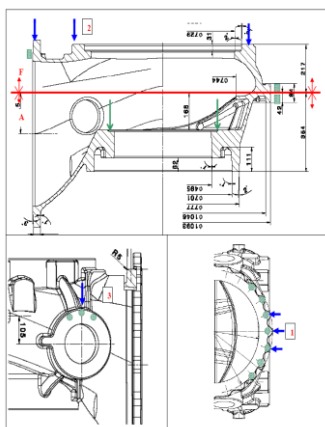
A méretezés után, a kiinduló adatoknál megváltoztattam a tápfej minimum és maximum magasságát. Ekkor az üzemben alkalmazott méretezés során meghatározott értékekkel számoltam újra a tápfej méreteket. Ezek a táblázatban „üzemi” megjelöléssel láthatóak.

2.2.4 Üzemi technológia alapján történő méretezés

Tápfejek méretezése

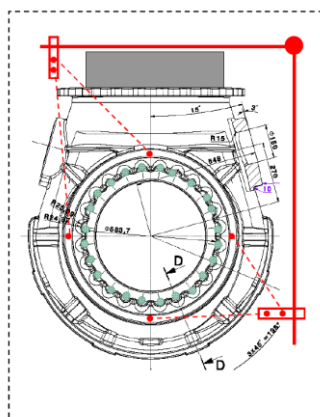
A redukált falvastagság alapján történő méretezéshez, a NovaFlow&Soldid CV szimulációs szoftverrel végzett előzetes szimuláció eredményeit figyelembe véve az üzemben alkalmazott módszerekkel, az ipari konzulensem segítségével terveztük meg az öntvényhez tartozó tápláló- és beömlőrendszert, melynek eredményeit az ún. műszaki lapon foglaltuk össze.

Az első lépés a táplálórendszer megtervezése volt. A 13-16. ábrák a műszaki lapon dokumentált tervezési eredményeket szemléltetik.



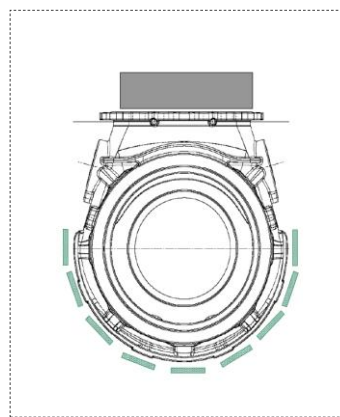
13. ábra

Osztósík pozíciója



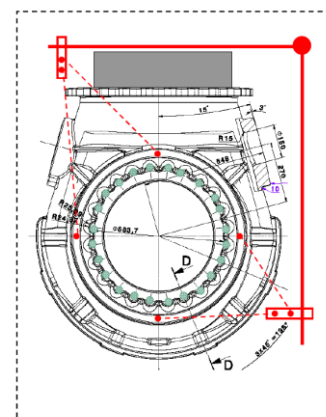
14. ábra

Beömlőrendszer pozíciója



15. ábra

Hűtővasak pozíciója



16. ábra

Hűtővasak pozíciója

A 13-16. ábrákon az öntvényt az öntési helyzetben ábrázoltuk, az osztósíkot pirossal, a tápfejek kék nyilakkal, a hűtővasakat zölddel ábrázoltuk. A tápfejek pozicionálásánál figyelembe vettük, hogy az előzetes szimuláció az öntvénynek melyik részén mutatott nagyobb termikus redukált falvastagságot, ill. várható porozitást. A három vizsgált öntvényrészénél ráültetett, nyitott tápfejeket használtunk. Az öntvény felső gyűrűjén egymással szemben két szögletes 40x90mm-es tápfejet helyeztünk el, az első gyűrűn három 20 mm átmérőjű tápfejet, míg az öntvény mindkét oldalsó szemén egy-egy 40 mm-es henger alakú tápfejet helyeztünk el.

Hűtővasak pozicionálása

Az üzemi technológiai tapasztalat alapján csak a tápfejek alkalmazásával nem táplálható tömörre az öntvény. Ezért az irányított dermedés egyik további eszközét, hűtővasakat is alkalmazunk a technologizálás során. Hűtővasak alkalmazása esetén a Csepel Metall Vasöntőde Kft.-ben két különböző típust alkalmaznak.

- Warman kocka: 150x90x70mm
- Roper hűtővasat: 70 mm élhosszúságú, egyenlő oldalú háromszög, 60 mm vastag, 25-ös rádiusszal lekerekítve.

A hűtővasak elhelyezése a 13-16. ábrákon szemléltetem. A zöld körök a Roper, míg a zöld téglalapok és nyilak, a Warman kockák pozícióját ábrázolják.

37 darab Roper típusú hűtővasat helyeztünk el, ebből hét darabot az első gyűrűn, három-három darabot a két oldalsó szemén, valamint 24 darabot az alsó gyűrűn.

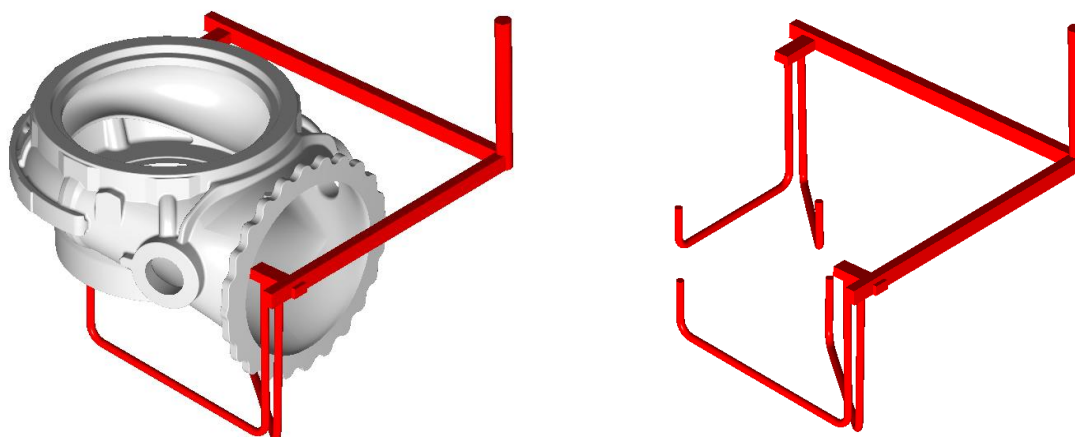
A Warman hűtővasból 21 darabot használtunk, ebből kilenc darabot a külső gyűrűn az öntvénytől 10 mm mélyen elhelyezve a formában. A többi 12 darabot az öntvény belsejét kiképző formarészbe építettük bele, melyek a legnagyobb felületükkel érintkeznek az öntvénnel.

Beömlőrendszer méretezése

A beömlőrendszer méretezését nem kívántam részleteiben bemutatni, így az üzemi technológiai méretezésen kívül ennek lépéseit nem is végeztem el. De ahhoz, hogy előállítsak egy olyan öntvénycsokor geometriát, mely alkalmas a szimulációs vizsgálatokra, mindenképpen szükségem van egy valós gyártási körülményeknek megfelelő beömlőrendszer geometriára. A beömlőrendszer méretezését üzemi konzulensem segítségével végeztem el.

Elsőként egy olyan formaszekrényt választottunk, amelybe az öntvényt elhelyezhető. Az üzemben használt szekrények közül a 2000*1500*600/900 mm-es méretű szekrényt választottunk.

A beömlőrendszer kialakításakor azt tartottuk szem előtt, hogy lehetőleg minél kisebb legyen az olvadék turbulens áramlása a formatöltés során, ezért dagadó öntési módot választottunk. Az állót és az elosztócsatornát a felső formaszekrényben, míg a bekötőcsatornákat az alsó formaszekrényben alakítottuk ki úgy, hogy az öntvényhez alulról egymástól 90°-ban négy darab rávágás helyezkedik el. A beömlőrendszer 3D geometriáját a 17. ábrán szemléltetem.



17. ábra

Beömlőrendszer

A 4. táblázatban az összes elvégzett méretezési módszerrel kapott eredmények összefoglalása látható.

4. táblázat

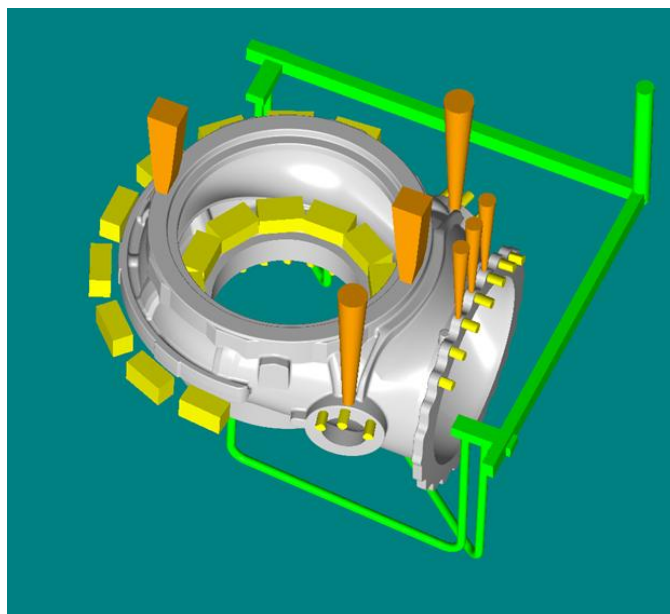
Különböző méretezési módszerek eredményeinek összehasonlítása

		Méretezési mód			
		Redukált falvastagság alapján	Szakirodalom alapján	Foundry Technology szoftver alapján	Üzemi technológia alapján
Tápfej modul [cm]	felső gyűrű	3,27	1,3	2,2	2
	első gyűrű	2,95	1,1	1,5	1,8
	oldalsó szem	3,44	1,4	1,9	2,4
Tápfej magasság [cm]	felső gyűrű	26,2	8	21,8	38,3
	első gyűrű	23,6	6,63	10,8	38,3
	oldalsó szem	27,5	8,39	13,9	57,7
Tápfej átmérő [cm]	felső gyűrű	17,4	6	10,8	4*9 (szögletes)
	első gyűrű	15,7	5	8,1	2
	oldalsó szem	18,3	6,34	10,4	4

Az elvégzett méretezések alapján szükséges kialakítani egy olyan 3D CAD modellt, mely alkalmas a szimulációs vizsgálatok elvégzésére. Ezt a modellt az üzemi technológia méretezések alapján készítettem el, mert ez áll legközelebb a valós gyártási körülményekhez.

2.3 A vizsgált öntvénycsokor

Az öntvénycsokrot Solid Edge V20 tervező programban készítettem el. Az alkatrész geometriáját kész 3D modellként kaptam meg az üzemtől, ehhez készítettem el az üzemi méretezés alapján a beömlő-és táplálórendszert valamint a hűtővasakat. A 18. ábra a kész öntvénycsokrot mutatja, ahol az egyes formaelemeket eltérő színnel jelöltem: sárgával a hűtővasakat, zölddel a beömlőrendszert, narancssárgával a tápfejeket.



18. ábra

Az öntvénycsokor 3D modellje

2.4 Control Volume szimulációs vizsgálatok

Az öntvénycsokor 3D modelljének elkészítése után kerülhetett sor a szimulációs vizsgálatokra. Vizsgálataim során két különböző elevet alkalmaztam a vizsgálatok során. Először egy beömlő- és táplálórendszer nélküli öntvényvariációt vizsgáltam. Ezt a szakirodalom „Natural Erstarrung-nak” nevezi. Ennek során az öntési helyzetben lévő öntvényen vizsgáljuk a kialakuló szívódási üregeket és ezek pozíciójának figyelembevételével helyezhessük el a tápfejeket és hűtővasakat. A szimuláció célja a geometriai viszonyok, redukált falvastagság és hőhalmozódási helyek vizsgálata

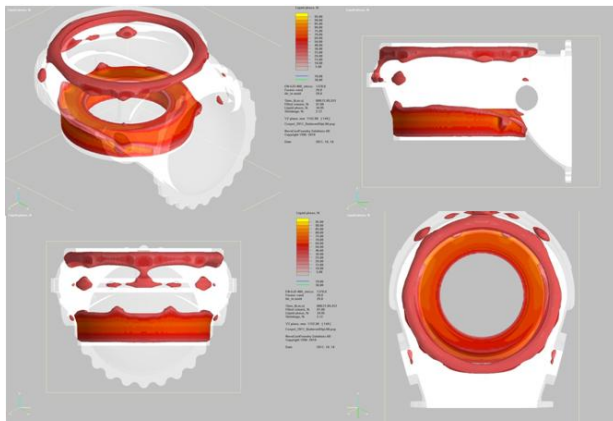
Második vizsgálatom során a teljes öntvénycsokrot szimuláltam és vizsgáltam a táplálás hatékonyságát.

Mindkét vizsgálat során azonos anyag-, kiinduló és határfeltételeket definiáltam.

A szabályozott térfogatok (továbbiakban CV) geometria definiálása során megadtam a számítási tartomány (forma) méretét, az öntvény helyét a formán belül, a minimális formavastagságot és a cellaméretet. A választott 8 mm élhosszúságú hálóval nagy pontossággal leírható a vizsgált geometria. A számítási folyamat során definiálni kell az öntvény-forma-környezet anyagainak tulajdonságait. Az egyes anyagtulajdonságok a program adatbankjából hívhatók be. Ezek az egyes anyagok esetén a kétalkotós- és az ötvözők hatását figyelembe vevő módosított fázisdiagramok, valamint a különböző hőfizikai-és mechanikai tulajdonságok a hőmérséklet függvényében. Vizsgálataim során az alábbi kiindulási feltételeket definiáltam: ötvözet GJS-400; öntési hőmérséklet 1370°C; forma anyaga furános homokkeverék; kiinduló hőmérséklete: 20°C.

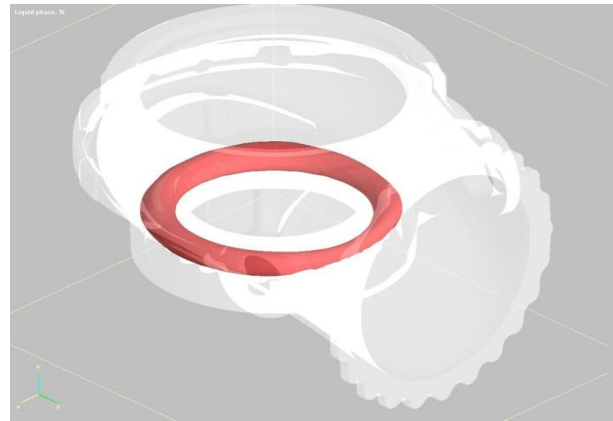
2.4.1 Natural Erstarrung vizsgálat eredményei

Ezen szimuláció során a termikus redukált falvastagságok viszonyait vizsgáltam. Megállapítottam, hogy hol vannak az öntvénynek nagyobb falvastagságú részei, ahol az olvadék dermedése lassabban mehet végbe. A nagyobb falvastagságú öntvényrész a felső gyűrű, alsó gyűrű, első gyűrű, valamint a külső gyűrű és az oldalsó szemek. Az termikus redukált falvastagság értékeit az irányított dermedés módszereivel befolyásolhatjuk, a technológizálás során csak tápfejeket és hűtővasakat használtam erre a célra. Az öntvény termikus redukált falvastagság viszonyait a 8. ábrán láthatóak. A még 35%-ban folyékony állapotban lévő öntvényrészek a 19. ábrán láthatóak. Látható, hogy az öntvénynek a nagyobb redukált falvastagságú helyein (felső gyűrű, alsó gyűrű, oldalsó szem, első gyűrű) lassabban megy végbe a dermedés, az olvadék még folyékony állapotban van jelen.



19. ábra

35%-ban folyékony állapotban lévő
öntvényrészek

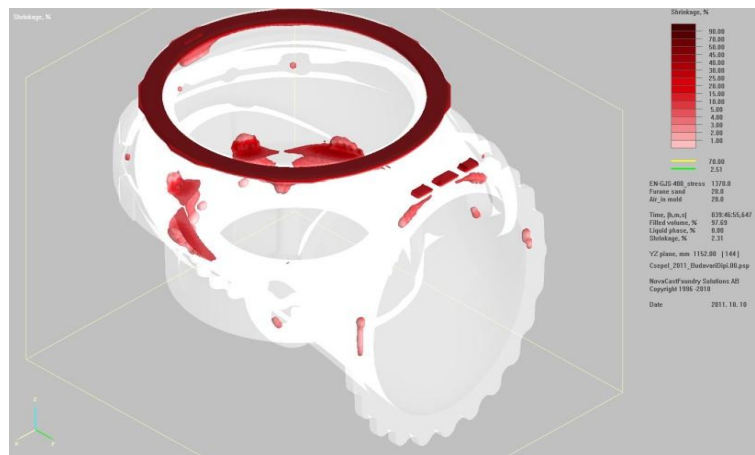


20. ábra

Utoljára dermedő öntvényrészek

A dermedés során az utoljára dermedő öntvényrész az alsó gyűrűben található (20. ábra) Az ábrán az öntvénynek még 4%-a olvadék állapotban van jelen. A technológizálást ennek figyelembevételével kell megtervezni. A cél az, hogy az öntvény utoljára megdermedő öntvényrészei a tápfejek környezetében legyenek. Az alsó gyűrűnél célszerű hűtővasakat elhelyezni.

A szobahőmérsékletűre lehűlt öntvényen vizsgáltam a fogyási üregek kialakulását (21. ábra).



21. ábra

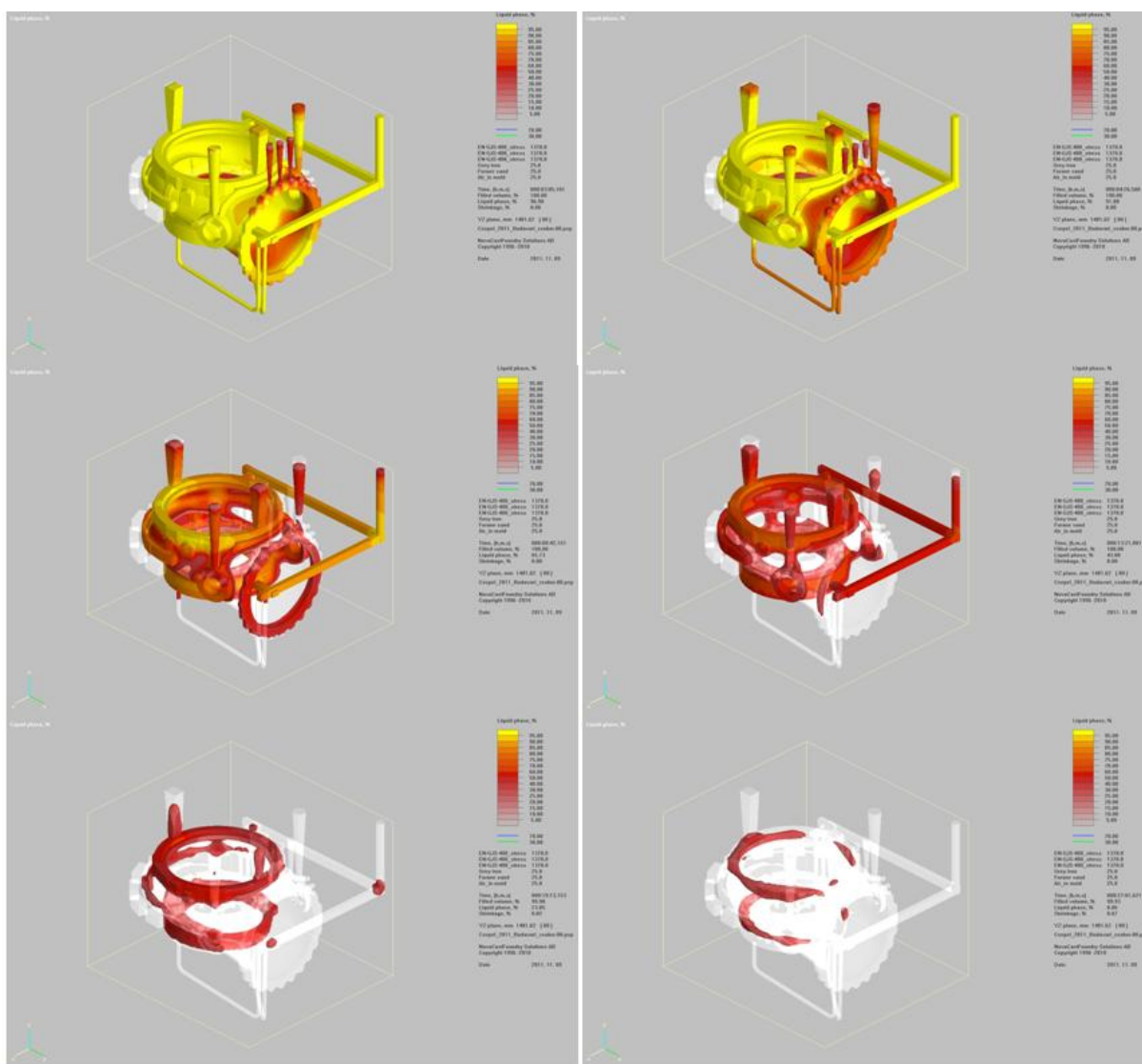
Fogyási üregek

A vizsgálat az mutatta ki, hogy a fogyási üregek jelentős része a nagyobb redukált falvastagságú, utoljára dermedő öntvényrészeknél figyelhető meg.

2.4.2 Az öntvénycsokor vizsgálatának eredménye

Szimulációs vizsgálataim második részében a teljes öntvénycsokor dermedési vizsgálatát végeztem el. A kiindulási és határfeltételek megegyeznek az előző vizsgálati beállításokkal, az alábbi kiegészítésekkel: beömlőrendszer és táplálórendszer anyaga: EN-GJS-400, hőmérséklete: 1370°C, Hűtővas anyaga: lemezgrafitos öntöttvas, hőmérséklete: 25°C. Az elemi cella mérete 18mm, a metallosztatikus nyomómagasság: 98mm, formatöltés sebessége 23,7 kg/s.

Az öntvény dermedése az idő függvényében a 22. ábraszorozaton látható. Az ábrákon a még folyékony öntvényrészek láthatóak, skála: 5-95%.



22. ábrásor

Az öntvény dermedése

Figure 10 displays two screenshots from SolidWorks illustrating the liquid phase volume fraction in a gear pump. The left image shows a cross-section of the pump housing with a red ring indicating the liquid phase. The right image shows a 3D view of the pump assembly with red areas indicating the liquid phase. A color scale on the right ranges from 0.00 to 1.00.

Utoljára dermedő öntvényrészek

Fogyási üregek a tápfejben

2.5 Eredmények validálása véges elemes szimuláció alkalmazásával

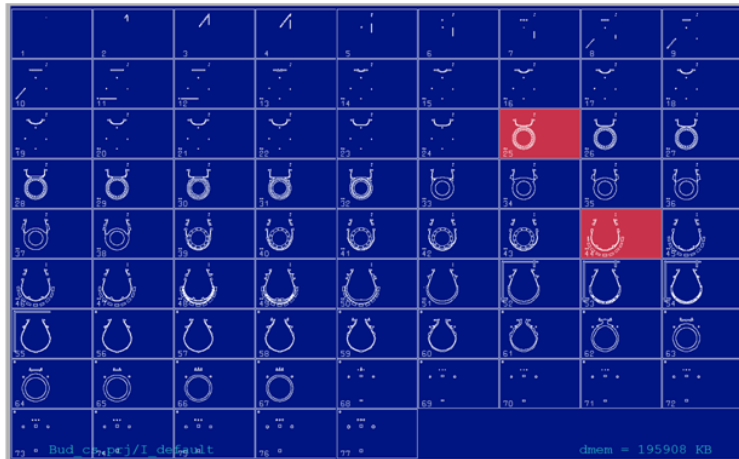
Az elvégzett szimulációs vizsgálatok után a teljes öntvénycsokor dermedés-lehűlés folyamatát és a tömörre táplálást véges elemes szimulációs módszer alkalmazásával kívántam ellenőrizni. Az általam alkalmazott módszer a megoldási tartományt véges számú háromszögekből, ún. prizmákból építi fel.

A módszer lényege, hogy a vizsgálandó testet diszkrét elemekre osztjuk és ezután végzünk folyamat számításokat a rendszeren. Folytonos közeg számításakor a változók (nyomás, hőmérséklet, idő) végtelen számú értéket vehetnek fel, mivel az értékek az adott test minden egyes pontjának függvényei. Ezáltal az adott problémának végtelen számú megoldása lehetséges. Ezért elemekre osztjuk fel a testet, melyek csomópontokban érintkeznek, így véges számúra csökkentjük az ismeretlenek számát. Egy elemnek az elemhatárokon elhelyezkedő csomópontokon kívül további belső csomópontjai is lehetnek. A vizsgált tartományon belül a csomópontokban történik a feltételezett közelítő értékek meghatározása.

2.5.1 Hálógenerálás

A véges elemes geometria definiálása során, először a beolvasott 3D STL geometriát felosztottam metszősíkok segítségével. Kijelöltem az öntvény alsó és legfelső pontját és a program felosztotta a geometriát az általam megadott számú metszetekre. Az öntvénycsokrot 78 metszetre osztottam fel, így állítva elő egy ún. Layer modellt.

A Layer modell létrehozása után következett az automatikus hálógenerálás. Először a 2D hálózás paramétereit állítottam be: a geometria körül definiált számítási tartomány nagyságát, az irányadó elemméretet és mértékegységét. A vizsgálat során az alkalmazott elemi cellák (háromszögek) irányadó átfogója 46 mm volt. A paraméterek beállítását követően a létrehozott metszetek közül kiválasztottam azokat, melyeket egy virtuális síkra másoltam össze és a program ez alapján generálta a 2D véges elem hálót. A 25. ábrán a létrehozott metszősíkok láthatóak, pirossal jelölve azok, melyeket figyelembe vett a program a 2D hálózás során.



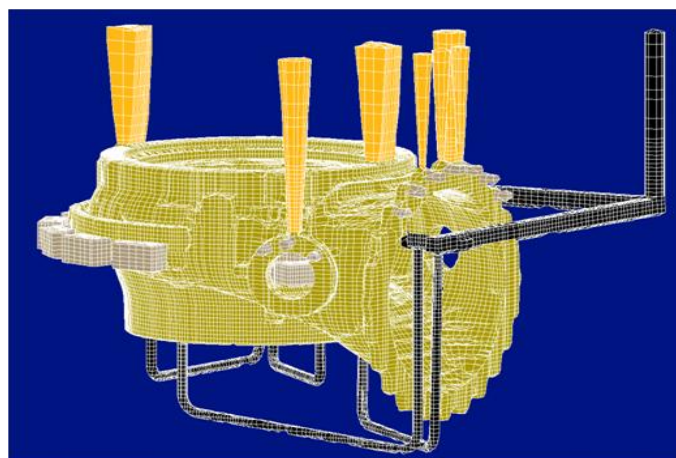
25. ábra

Metszősíkok megjelenítése

A 2D hálózás során, először a virtuális síkon a geometria közül történik a hálózás, majd a számítási tartományt is behálózzuk úgy, hogy eltérő sűrűségű hálót alkalmazunk. A program ezután elkezd a háló térbeli kifejtését a megadott tengely mentén. Síkról-síkra történik a háló másolása, a 3D elemek (pentahedron, prizmaelemek) igazítása a valós geometriához. A háromdimenziós hálót manuális módosítottam azokon a helyeken, ahol pontatlan volt a hálózás. A programban tetszőlegesen módosítható a végelelem háló, a háromszögek csúcspontjainak, éleinek, méreteinek és szögeinek változtatásával.

Az elkészült háló adatai az alábbiak: cellamérete (46 mm), elemi cellák száma (3037770 db), csomók száma (1532250 db), rétegek száma (135 db). A hálózás során a geometria elemek cellaszáma: beömlőrendszer (24357 db), hűtővas (34807 db), öntvény (266325 db), tápfej (5562 db), forma (2706719 db).

Az 26. ábrán látható a teljes öntvénycsokor véges elem geometriája.



26. ábra

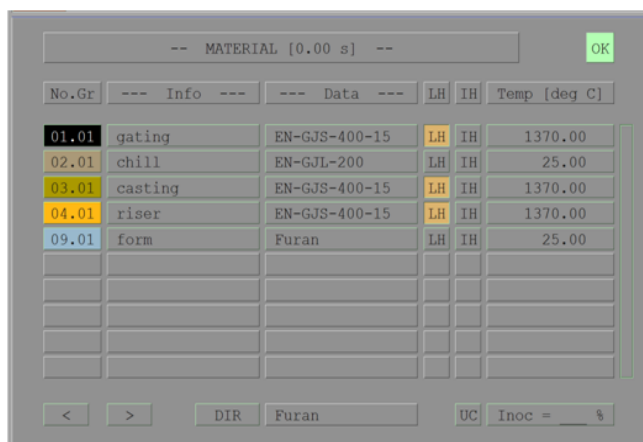
Végelelem geometria

2.5.2 Számítási folyamat

A geometria partícionálása után következett a számítási folyamat, melynek során definiáltam az öntvény-forma-rendszer anyagtulajdonságait, a kiindulási és peremfeltételeket, az egyes vonatkozó anyagtulajdonságokat adatbankból beolvasva. Definiáltam a beömlőrendszer, hűtővas, öntvény, tápfej és forma anyagát, valamint kiinduló hőmérsékletüket. A bevitt adatok megegyeznek a Control Volume szimuláció során alkalmazott értékekkel. A kiindulási feltételek adatait a 27. ábra tartalmazza.

Az egyes anyagtipusok definiálása után beállítottam, hogy a program milyen időléptékkel számolja a dermedési időt. A bevitt információk alapján a kiindulási időpillanattól kezdve 238108s időpillanatig számolja- és a megadott lépésközönként rögzíti az öntvénycsokor dermedés/lehülés folyamatának adatait.

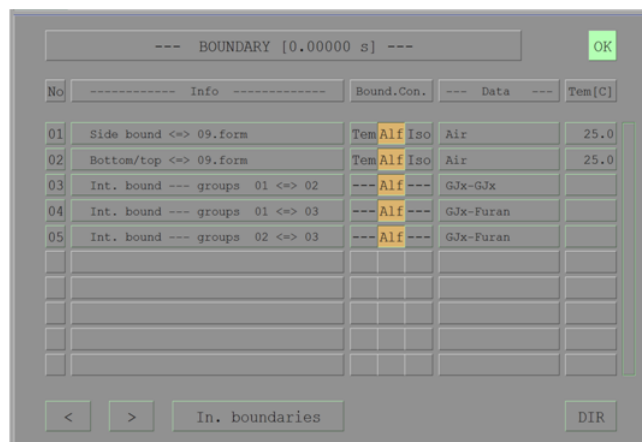
A számítási beállítások következő lépésében az érintkezési feltételeket adtam meg. Definiáltam az öntvény dermedése és lehülése során az anyagok közötti hőátadási viszonyokat. A 28. ábrán látható, az egyes anyagok közötti hőátadási viszonyok meghatározása.



No.Gr	Info	Data	LH	IH	Temp [deg C]
01.01	gating	EN-GJS-400-15	LH	IH	1370.00
02.01	chill	EN-GJL-200	LH	IH	25.00
03.01	casting	EN-GJS-400-15	LH	IH	1370.00
04.01	riser	EN-GJS-400-15	LH	IH	1370.00
09.01	form	Furan	LH	IH	25.00

27. ábra

A kiindulási anyagok adatai



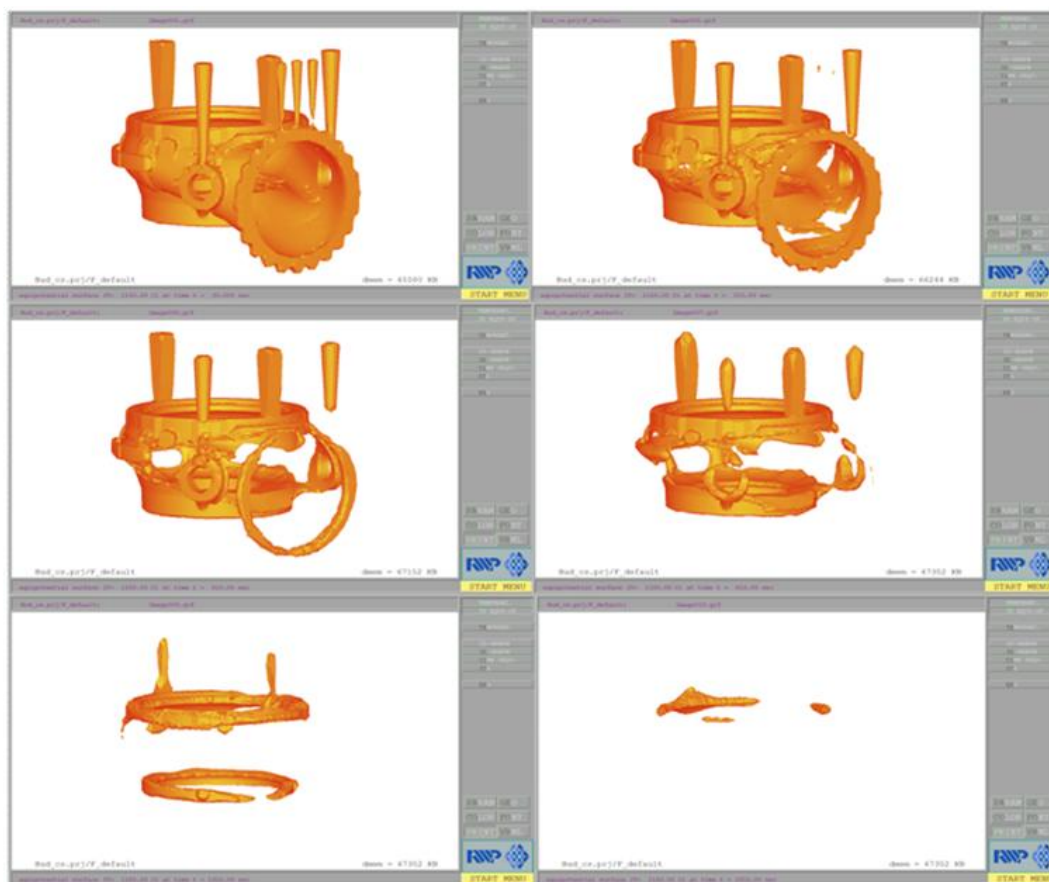
No	Info	Bound.Con.	Data	Tem[C]
01	Side bound <=> 09.form	TemAlf Iso	Air	25.0
02	Bottom/top <=> 09.form	TemAlf Iso	Air	25.0
03	Int. bound --- groups 01 <=> 02	Alf	GJx-GJx	
04	Int. bound --- groups 01 <=> 03	Alf	GJx-Furan	
05	Int. bound --- groups 02 <=> 03	Alf	GJx-Furan	

28. ábra

Az érintkezési feltételek

2.5.3 FEM szimulációs eredmények

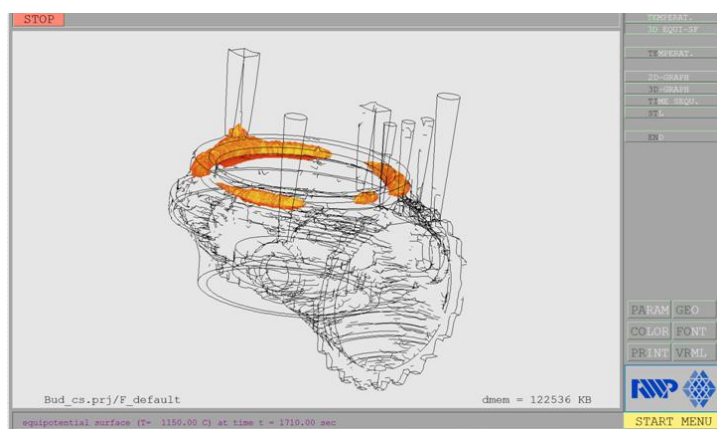
Az öntvénycsokor dermedésének folyamata a még folyékony öntvényrészek megjelenítésével a 29. ábrasoron látható. A képeknek nincs skálázása, azokat a geometriai helyeket jelenítjük meg, ahol az olvadék hőmérséklete nagyobb, mint a szolidusz hőmérséklet (1150°C).



29. ábrásor

Az öntvény dermedésének folyamata

Az utoljára dermedő öntvényrész a 30. ábrán látható. A szobahőmérsékletre lehűlt öntvényen vizsgáltam a fogyási üregek kialakulását is. A 31. ábrán az öntvényben számított fogyási üregek, porozitások figyelhetők meg, melyen a skála a fogyási üreg térfogathányadát szemlélteti százalékból kifejezve.



30. ábra

Az utoljára megdermedő öntvényrész



31. ábra

Fogyási üregek pozíciója

3. Kiértékelés és összefoglalás

Vizsgálataim során összefoglaltam az öntészeti folyamatok számítógépes szimulációs módszereit. Ezen belül részletesen bemutattam az FDM/CV módszer működését és matematikai alapjait.

Valós üzemi probléma megoldási példáján elvégeztem a gömbgrafitos öntöttvasak táplálásának különböző méretezési módjait. A különböző technológizálási módszerek alapján elmondható, hogy a szakirodalmi alapon elvégzett számítás egy erősen alulméretezett, míg az üzemi módszer egy túlméretezett, biztonsági megoldást eredményez. Az üzemi módszer túlméretezése annak is köszönhető, hogy itt tudtuk ténylegesen figyelembe venni a valós gyártási körülményeket (pl. formaszekrény mérete, alkalmazott tápfej-geometriák). Ezen kívül egyedül az üzemi méretezésnél tudtuk figyelembe venni a hűtővasak elhelyezését.

A fentiek alapján az üzem tapasztalati módszerrel méretezett geometriai megoldást választva elkészítettem a vizsgálni kívánt öntvénycsokor geometriát. Az öntvénycsokor és a "Natural Erstarrung" szimulációk alapján vizsgáltam CV szimulációval a tömörre táplálást. Ennek eredményei alapján elmondható, hogy az üzemi technológizálás olyan megoldást eredményez, melynek alapján az öntvény tömörre táplálható. Szívódási üreg az öntvénygeometrián belül nem alakul ki. A szimulációs vizsgálatok alapján javaslom a tápfejek méretének oly módon való csökkentését, hogy az a tömörre táplálást ne veszélyeztesse, de általa az öntvénykihozatal javítható legyen.

A CV szimuláció után, egy másik, véges elem módszer elvén működő SIMTEC/WINCAST programmal is megvizsgáltam a tömörre táplálást, a CV eredmények ellenőrzése céljából. A vizsgálatok során megállapítottam, hogy az utoljára megdermedő öntvényrész a tápfejek környezetében helyezkedik el. Fogyási üreg az első gyűrűben, ill. a tápfejekben figyelhető meg. A porozitás vizsgálat során kismértékben ugyan, de eltérést mutat a két szimuláció. Ez az eltérő működési elvvel (CV, FEM) magyarázható.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki a Csepel Metall Vasöntöde Kft. vezetőinek és munkatársainak, különösen Fodor Krisztinának, hogy vizsgálataimhoz megteremtették a feltételeket és készséggel álltak rendelkezésemre felmerülő kérdéseim megválaszolásával kapcsolatban. Köszönöm az Öntészeti Intézeti Tanszék munkatársainak és konzulensemnek Dr. Molnár Dánielnek, hogy biztosították számomra a szimulációs szoftverekhez való hozzáférést. Köszönöm Erdélyi Jánosnak a felmerülő CAD kérdéseimre adott konstruktív válaszait. A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Felhasznált irodalom

- [JáA79] Jávör A., Benkő T.: Diszkrét rendszerek szimulációja
Műszaki könyvkiadó Budapest, 1979
- [PáI07] Páczelt István, et al.: A végeelem-módszer alapjai
Miskolci Egyetem, 2007
- [ChT03] T.J. Chung: Computational fluid dynamics
Cambridge University Press, 2003
- [BaGy07] Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő: Bevezetés az anyagtechnológiák informatikájába
Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007
- [NoF09] NovaFlow&Solid Userguide
Ronneby, Sweden, 2009
- [MoD11] Molnár Dániel: Öntészeti szimuláció elméleti alapok és megoldások
Miskolci Egyetem, 2011
- [KaL05] Dr. Kalmár László, et.al.: Hő- és áramlástan feladatok numerikus modellezése
Miskolci Egyetem, 2005
- [EF109] Erwin Flender: Gießtechnische Simulation
Giesserei 2009/5
- [TMi99] Tony C. Midea, David Schmidt: 1999 Casting simulation software survey
Modern Casting, 1999 May