

MOLNÁR DÁNIEL – DÚL JENŐ – FODOR KRISZTINA

## Az öntészeti szimuláció alkalmazása a technológiatervezésben

*Az olyan öntészeti technológizálási problémák megoldása, mint a beömlőrendszer tervezése és a tömörre táplálás megvalósítása egyidős az öntvények gyártásának kialakulásával. Kezdetben az egyes megoldási lehetőségek próbálgatásával, majd a felhalmozódó szakmai tapasztalat alapján végezték a méretezéseket, később ezt egészítették ki a természeti jelenségek magyarázataival (Fourier-törvény, Navier–Stokes-egyenletek), melyeket folyamatosan alkalmaztak az öntészeti jelenségek leírására is. Az öntészeti folyamatok számítógépes szimulációja szintén ezeket a tapasztalati és természeti törvényeket alkalmazza, és a nagy számítási igényű folyamatok elvégzésével lehetővé válik az egyes részfolyamatok gyors, gazdaságos és könnyen reprodukálható vizsgálata. Cikkünkben egy nagyméretű gömbgrafitos vasöntvény példáján keresztül mutatjuk be a szimuláció alkalmazását, melynek célja a vevői követelmények kielégítése.*

### Öntészeti szimulációs módszerek

Az öntés közben lejátszódó folyamatok fő jellemzőik alapján két részre oszthatóak: anyag- és hőtranszport folyamatok. Ha ezeknek a folyamatoknak a vizsgálata a célunk, akkor a rendelkezésre álló szimulációs módszerek közül az alapján kell választanunk, hogy melyik részfolyamatot kívánjuk megfelelő pontossággal számítani. Az anyagtranszport folyamatok számítása a Navier–Stokes áramlási egyenlet alkalmazásával történhet, mellyel egy kétegyenletes turbulencia modellt írunk fel. Ez a közelítés a szabadságfokok mindhárom dimen-

ziója esetén alkalmas az áramlási karakterisztikák számítására. A hőtranszport folyamatok, ún. tapasztalati, részben tapasztalati és fizikai alapokon nyugvó szimulációs programokkal számíthatóak:

- A tapasztalati programokkal olyan egyszerű, ismétlődő folyamatokat lehet leírni, ahol a változók kis határon belül alternálnak (pl. hőcentrum számítása).
- A részben tapasztalati programok megfelelően tudják modellezni az olyan folyamatokat, ahol a változók intervalluma limitált, és a lejátszódó fizikai változások egyszerűek és követhetőek.
- A fizikai alapokon nyugvó programok alkalmazásával az öntés közben lejátszódó legtöbb folyamat megfelelő pontossággal számítható. Az eljárás a legtöbb ötvözet–forma–környezet rendszer esetén jól alkalmazható modellt eredményez. Az ilyen programok általában a Fourier hőátadási egyenletet alkalmazzák, amely háromdimenziós hőátadást feltételez és a konvektív hőátadást is figyelembe veszi, amely főleg nagy öntvényke-

resztmetszetek esetén lényeges. Az alkalmazott anyagok részletes hőfizikai adatai lehetővé teszik a hővezetés, a hőáramlás és a hőszugárzás számítását egyenletrendszerrel, amiket így a teljes folyamatra ki lehet terjeszteni. A közelítés lépcsőzetes, időtől függő analízis és lehetővé teszi a hőmérséklet extrapolálását minden helyen és időpillanatban [1].

### Az öntészeti szimuláció folyamata

Elmondható, hogy ugyanazon vizsgált rendszerhez (öntvény–forma–környezet), elhanyagolva annak lényegtelen jegyeit, különféle számítási modelleket rendelhetünk hozzá annak függvényében, hogy a valóságos rendszerben lejátszódó folyamatok melyik aspektusát kívánjuk vizsgálni. A számítási modell megalkotását két, ellentétes kívánalom teljesítése befolyásolja:

- a modell minél jobban helyettesítse a valóságos testet és annak körülményeit,
- a keresett jellemzők lehetőleg kevés időráfordítással, jó közelítéssel meghatározhatók legyenek.

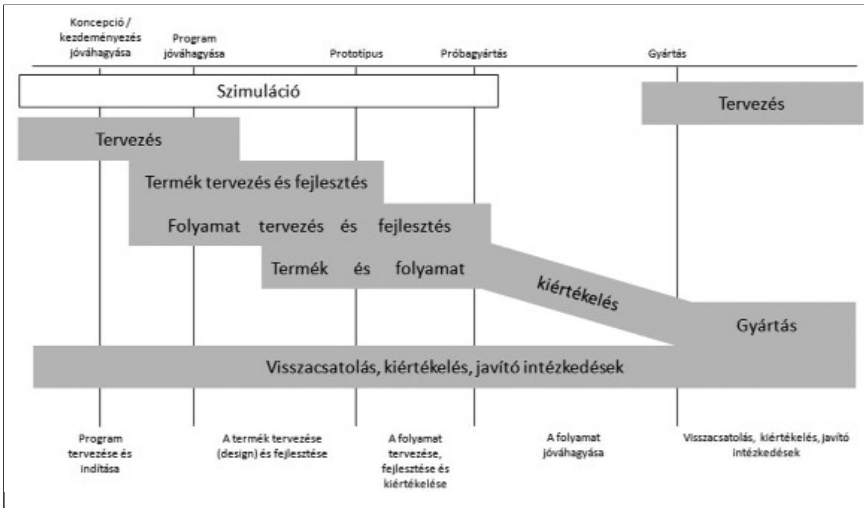
A modellezés során több tényezőt kell mérlegelni: a környezeti hatásokat, a testek kölcsönhatását, az anyag szerkezetét, a geometriai alakot stb. Az elvégzendő műveletek első lépése a matematikai modell megalkotása. Ez az áramlásra és a hőmérséklettől leírására vonatkozó alapegyenletek és határfeltételek (kezdeti- és peremfeltételek) előállítását jelenti. Az öntés közben lejátszódó folyamatok leírása parciális differenciálegyenlet-rendszerekkel történik.

A matematikai modell előállítását követően szükséges egy diszkre-

*Dr. Molnár Dániel szakmai életrajzát 2011/1. számunkban közzeltük.*

*Dr. Dúl Jenő szakmai életrajzát 2010/2. számunkban közzeltük.*

*Fodor Krisztina 1981-ben szerzett öntő ágazatos diplomát a Nehézipari Műszaki Egyetemen. Ezután technológusként dolgozott a Diósgyőri Vasöntődében, az Esztergomi Marógépgyár vasöntődéjében, majd 1996-tól a Csepel Metall Vasöntőde Kft.-ben, ahol egyedi/kissorozatú öntvények és gömbgrafitos öntvények gyártásával foglalkozik.*



■ 1. ábra. A szimuláció integrálása a minőségtervezési folyamatba

tizációs módszer kiválasztása. Ez egy olyan közelítő módszer alkalmazását jelenti, amely során a rendelkezésre álló differenciálegyenleteket a bennük szereplő változók térben és időben felvett értékeinek felhasználásával egy algebrai egyenletrendszer formájában írjuk fel. Öntészeti folyamatok vizsgálata esetén általában végeselem-módszert (FEM) és a szabályozott térfogatok módszerét (CV) alkalmazzák. Azokat a diszkrét helyeket a vizsgált térben, ahol a változók értékeit a számítás végrehajtása során határozzuk meg, a felhasználó által létrehozott numerikus háló rögzíti. A numerikus háló a vizsgált tartomány egy szükségszerűen diszkrét reprezentációja, mely felosztja a megoldási tartományt véges számú résztartományra (véges elemekre, véges térfogatokra).

A háló típusának kiválasztása után a következő feladat az alkalmazásra kerülő diszkrétizációs módszereken belül a közelítések meghatározása. A szabályozott térfogatok alkalmazása esetén az egyenletekben szereplő deriváltaknak a háló pontjaiban való közelítés formáját, végeselem-módszernél pedig az elemeken belül értelmezett alakfüggvény és a súlyfüggvény alakját kell megválasztani.

A diszkrétizáció eredménye egy nagyméretű nem-lineáris algebrai egyenletrendszer. A megoldás módszere függ a megoldandó problémától. Instacioner esetben közönséges differenciálegyenletek kezdeti érték problémáinak időben léptetett megoldása történik. Stacioner problémákat

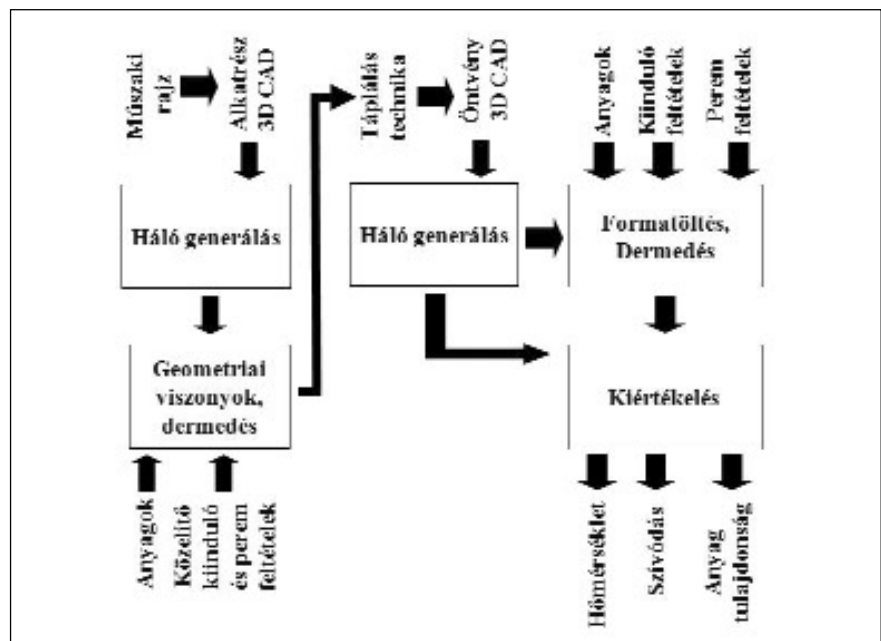
általában iterációs eljárások alkalmazásával oldunk meg [2].

### Szimuláció alkalmazása a technológiatervezésben

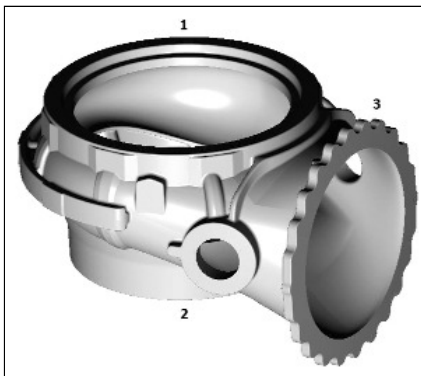
Az öntészeti szimulációt a teljes technológiai tervezés során integráltan kell alkalmazni. A megrendelő által átadott alkatrészt rajz alapján készített 3D CAD geometriát már a beömlő- és táplálórendszer méretezése és tervezése során vizsgálni lehet szimulációs programok segítségével. A geometriai viszonyok, a redukált falvastagság és a hőcentrumok vizsgálata a szimulációs programokon belül lehetséges, az eredmény figyelembevételével kell

kidolgozni az alkalmazandó öntés-technológiát. A szükséges geometriai módosítások vevővel való elfogadtatását is segíti a szimulációval előállított prezentáció. Következő lépésben a szimulációval ellenőrzött formától és táplálási viszonyok vizsgálata alapján módosítható az öntvénycsokor geometriája, majd a végző CAD geometria átadható a minta- illetve szerszámkészítőknek, hogy ily módon a már ellenőrzött geometriai variáció kerüljön gyártásba.

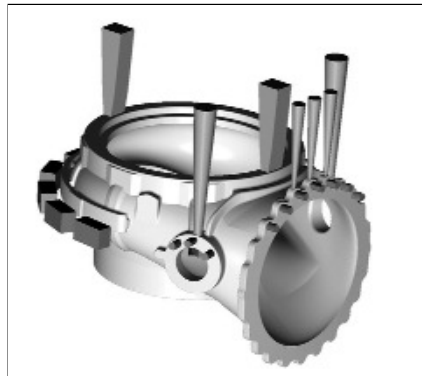
Ahhoz, hogy a szimuláció ne csak színes ábrák sokaságát jelentse, és eredményei visszacsatolhatóak legyenek a tervezési-gyártási folyamatba, érdemes azokat valamely minőségbiztosítási rendszerbe integrálni. Az 1. ábrán a minőségtervezési folyamatba illesztettük az öntészeti folyamatok szimulációját, melynek segítségével így meghatározhatóak és végrehajthatóak azok a tevékenységek, melyek biztosítják, hogy az előállított termék megfeleljen a vevő igényeinek. A szimuláció minőségtervezési folyamatba való integrálásával megvalósítható az erőforrások irányítása a vevői elégedettség eléréseért, a szükséges változások és változtatások korai felismerése és azonosítása, a folyamat kései szakaszában végrehajtható változások megelőzése és a jó minőségű termék biztosítása a szükséges időben, az elérhető legalacsonyabb költségszinten [3].



■ 2. ábra. Öntészeti technológia tervezése szimulációval



■ 3. ábra. Öntvény az öntési helyzetben és a táplálandó öntvényrészek



■ 4. ábra. Öntvénycsokor geometria

### A vizsgált öntvény bemutatása

A technológia tervezés szimulációval való megoldását egy gáz- és diesel-motoroknál alkalmazott nagyméretű kipufogóház-öntvény példáján mutatjuk be. Az öntvény anyagminősége EN-GJS-400-15 típusú gömbgrafitos öntöttvas ötvözet. Az öntvényvel szemben támasztott legfontosabb követelmény a tömörre táplálás, azaz, hogy minél kisebb mennyiségben tartalmazzon szívódási üreget, porozitást. A porozitás mennyiségét a megrendelő az öntvény egyes részein százalékosan írja elő, a legszigorúbb követelmény szerint a porozitások mennyisége nem lehet nagyobb öt százalékánál.

Az öntés- és táplálástechnológia tervezését és a kialakuló szívódási üregek ellenőrzését a 2. ábrán látható algoritmus szerint végeztük.

A táplálástechnika méretezését a NovaFlow&Solid CV szimulációs program segítségével valósítottuk meg. Ennek során az alkatrész 3D CAD geometriája alapján számoltuk a redukált falvastagság értékeket és határoztuk meg az adott öntvényrész kitáplálásához szükséges tápfejek méreteit. Az alkatrész 3D CAD geometriáját Solid Edge alakelem alapú parametrikus modellező szoftver segítségével állítottuk elő.

Az anyagtulajdonságok, a kiindulási- és peremfeltételek definiálása után meghatároztuk a beömlő és táplálórendszer nélküli öntvény (ún. natúr öntvény) dermedési viszonyait. Ennek során, mivel az öntvényhez tartozó beömlőrendszer geometria még nem állt rendelkezésünkre, azt a kiindulási helyzetet vettük alapul, hogy a formaüreg azonos hőmérsékletű olvadékkal

van megtelve, és ettől az időpillanattól számítjuk a dermedési folyamatot.

A redukált falvastagság értékek alapján meghatároztuk azokat a geometriai helyeket, melyek táplálása szükséges. Az alkatrész geometriája, valamint a táplálást igénylő öntvényrészek azonosítása a 3. ábrán látható.

A redukált falvastagságon túl bevezettük a termikus redukált falvastagság fogalmát, mely a geometriai viszonyok kívül figyelembe veszi az öntvény szimulációval meghatározott helyi dermedési viszonyait is. A termikus redukált falvastagság a vizsgált öntvényrész dermedési idejének és egy arányossági tényezőnek a szorzata, mely arányossági tényező egy olyan 1 cm redukált falvastagságú gömb dermedési idejének reciprokja, mely esetén az ötvözet és a forma anyagai és hőmérsékletei megegyeznek a vizsgált kiindulási feltételekkel.

A szimulációs programon belül a szakirodalomból ismert összefüggések alapján lehetőség van a vizsgált öntvényrész tömörre táplálásához szükséges tápfej méreteinek meghatározására.

1. táblázat. Formaszekrény, tápfejek és hűtővasak méretei

Tápfej modul	1	cm	2
	2	cm	2.4
	3	cm	1.8
Tápfej méret (magasság*átmérő)	1	mm	383x(40x90) (szögletes)
	2	mm	577x40
	3	mm	383x20
A típusú hűtővas	37 db	mm	70x70x70x60, r25
B típusú hűtővas	21 db	mm	150x90x70

### Üzemi technológia kidolgozása

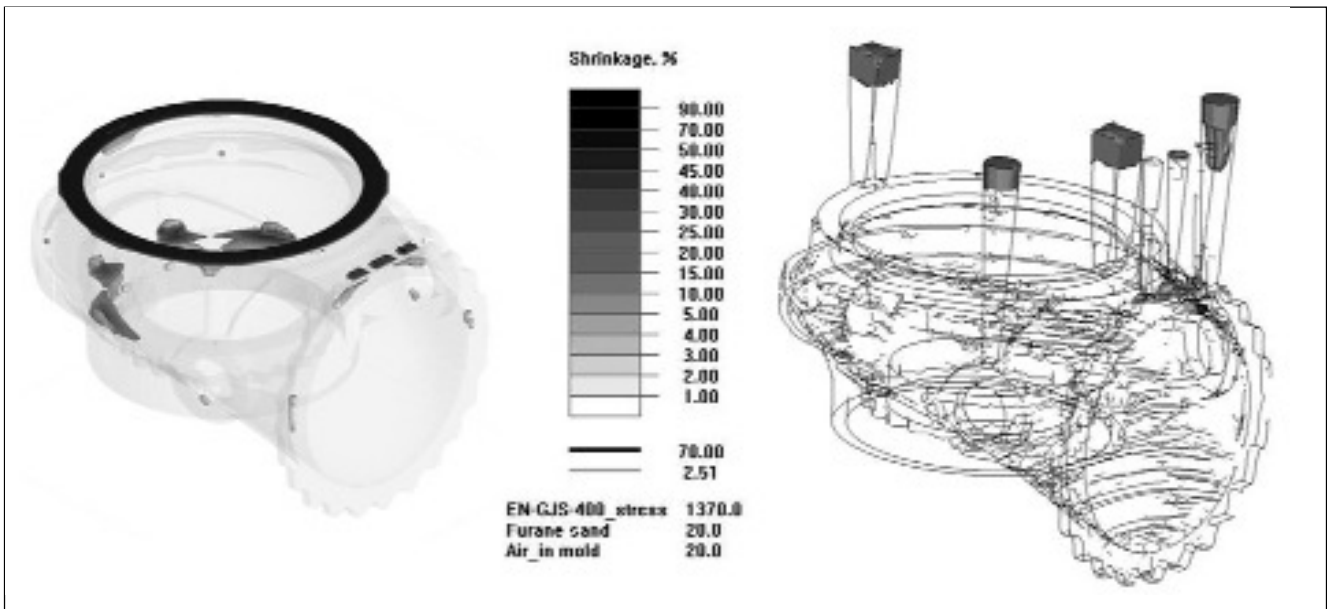
Az üzemi technológia meghatározása során a szimulációs szoftverrel végzett méretezési eredmények alapján határoztuk meg az öntvény tömörre táplálásához szükséges technológiát. Az üzemi technológiát az ún. műszaki lapon foglaltunk össze, melyen jelöltük az osztósíkot, a magok pozícióját, a tápfejek és az alkalmazni kívánt hűtővasak pozícióját és méreteit. A tápfejeket a szimulációval számított várható porozitások figyelembevételével pozícionáltuk. Az üzemi tapasztalatok és a szimuláció eredményei alapján csak tápfejek alkalmazásával nem táplálható tömörre az öntvény, ezért az irányított dermedés megvalósítására hűtővasakat is alkalmazunk. A tápfejek és a hűtővasak méretei az 1. táblázatban láthatóak.

A beömlőrendszer méretezését nem kívánjuk részleteiben bemutatni. Ennek kialakításakor azt tartottuk szem előtt, hogy a dagadó öntéssel történő formatöltés során minél kisebb legyen az olvadék turbulens áramlása. Az állót és az elosztócsatornát a felső formaszekrényben, míg a bekötőcsatornákat az alsó formaszekrényben alakítottuk ki úgy, hogy az öntvényhez alulról egymástól 90°-ban elforgatva négy darab rávágás helyezkedik el [4].

A kialakított táplálástechnika a hűtővasakkal a 4. ábrán látható.

### Szimulációs eredmények

A szimulációs vizsgálatokat a végelem-módszert alkalmazó Simtec/WinCast és a szabályozott térfogatok módszerét alkalmazó NovaFlow&Solid szimulációs programokkal végeztük.



■ 5. ábra. A natúr öntvényben és az öntvénycsokorban kialakuló porozitások

tük. Kiindulási feltételként EN-GJS-400 olvadékot (1370 °C), furános homokkeverékből készült formát (20 °C) és lemezgrafitos öntöttvasból készült hűtővasakat (20 °C) definiáltunk. A kialakuló porozitási viszonyokat a szobahőmérsékletre lehűlt öntvényben határoztuk meg. A táplálás nélküli öntvényben és az öntvénycsokorban kialakuló porozitási viszonyok az 5. ábrán láthatóak.

### Összefoglalás

Vizsgálataink során egy nagyméretű szivattyú alkatrész példáján keresztül mutattuk be a gömbgrafitos öntöttvasak táplálásának különböző méretezési megoldásait. A méretezés eredményeinek kiértékelése alapján megállapítható, hogy a szakirodalmi alapon elvégzett számítás egy alulméretezett, míg az üzemi módszer egy túlméretezett, biztonsági megoldást eredményez. Továbbá megállapítható, hogy az üzemi méretezési módszer eredménye áll közelebb a megvalósíthatósághoz, mivel ekkor lehet ténylegesen figyelembe venni az olyan valós gyártási körülményeket, mint a formaszekrény mérete, az alkalmazható tápfej geometriák és a hűtővasak alkalmazása. Az üzemi méretezésnél figyelembe vettük a szimulációval számított natúr öntvényben kialakuló porozitási eredményeket, és elkészítettük a vizsgálni kívánt öntvénycsokor 3D CAD geometriáját.

A szimulációs vizsgálatok során először az öntvény beömlő- és táplálórendszer nélküli geometriáját vizsgáltuk a dermedési és lehülési viszonyok szempontjából, és a számítási eredmények alapján meghatároztuk a geometriai viszonyokat és a várható szívódásokat. A vizsgálat következő részében a komplett öntvénycsokor esetén kialakuló dermedési és lehülési viszonyokat, valamint a kialakuló zsugorodásokat számítottuk. Mindkét szimulációs módszerrel elvégzett vizsgálat azt mutatta ki, hogy az öntvénycsokor utoljára megdermedő öntvényrésze a tápfejek környezetében, az öntvény felső gyűrű alakú részében alakul ki. A szabályozott térfogatok módszerével elvégzett szimuláció csak a tápfejekben mutatott ki fogyási üreget, míg a végeselem-módszerrel végzett szimuláció a hármasszám azonosított öntvényrészen kismértékű porozitást mutatott (5. ábra). A szimulációs vizsgálatok alapján javasolt a vizsgált öntvényrészhez csatlakozó, tápfejként is funkcionáló túlfolyók oly módon történő geometriai módosítása, hogy azok segítségével az öntvény tömörre táplálható legyen.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki az üzemi háttérrel nyújtó Csepel Metall Vasöntőde Kft. vezetőinek és munkatársainak, és köszönjük *Budavári Imre* szigorló kohómérnök munkáját.

A tanulmány/kutatómunka 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.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönetnyilvánítás

Felhasznált irodalom

### Felhasznált irodalom

- [1.] O. Göser, M. Aloe: Der virtuelle Weg zum Gussteil. Giesserei-Praxis Special, 2007/6
- [2.] Dr. Kalmár László et al.: Hő- és áramlástan feladatok numerikus modellezése. Miskolci Egyetem, 2005
- [3.] Erdei János et al.: Minőségmenedzsment. Oktatási segédlet, BME, Budapest, 2010
- [4.] *Budavári Imre*: Gömbgrafitos vasöntvény technológiai tervezése és szimulációja. Miskolci Egyetem, Diplomamunka, 2011