

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Metallurgiai és Öntészeti Tanszék



**Visszamaradó öntési feszültség és méretváltozás
mérése és szimulációja**

(PhD értekezés)

Készítette:

MOLNÁR DÁNIEL

okleveles kohómérnök

Tudományos vezető: Dr. Dúl Jenő

Miskolci Egyetem

Metallurgiai és Öntészeti Tanszék

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Roósz András

Miskolc

2010

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés és a doktori munka célkitűzései.....	5
1.1 A szimuláció definiálása és integrálása a gyártási folyamatba.....	6
1.2 Az öntészeti szimuláció fő típusai.....	11
2. Alkalmazott matematikai módszerek.....	13
2.1 A véges elemes módszer kialakulása.....	13
2.2 Az öntészeti szimulációs programok kialakulása	15
2.3 A véges elemes rendszerek működése	17
2.4 Hálógenerálás	20
3. Öntészeti folyamatok szimulációja.....	26
3.1 A hőtani és hőfeszültségi feladat megoldása	26
3.1.1 Stacionárius hővezetési feladat	26
3.1.2 Instacionárius hővezetési feladat.....	28
3.1.3 Hőfeszültségek számítása	30
3.2 Hőfizikai anyagtulajdonságok	31
3.3 Az öntvényekben keletkező feszültségek eredete és következményei	35
3.4 A maradó öntési feszültség kísérleti meghatározása.....	43
3.4.1 Az öntési feszültség meghatározása a Bauer-Shipp féle feszültségrács esetén.....	47
4. Visszamaradó öntési feszültségek mérése és szimulációja technológiai próbatesteken	49
4.1 Visszamaradó öntési feszültségek vizsgálatának körülményei.....	51
4.2 a visszamaradó öntési feszültség és A szilárdsági tulajdonságok kapcsolata	54
4.3 Visszamaradó öntési feszültség vizsgálata szimulációval	58
4.4 Az öntési feszültség és a lehülési viszonyok kapcsolata	65
5. Visszamaradó öntési Feszültség és méretpontosság szimulációja valós öntvényen.....	67
5.1 A gyártási technológia bemutatása	67
5.2 A kidolgozott szimulációs folyamat ismertetése.....	71
5. 3 A szimulációs projekt eredményei	79
6. Összefoglalás	85
7. Summary	88
Köszönetnyilvánítás.....	90
Felhasznált irodalom	91

Új tudományos eredmények	95
Az értekezés tudományos eredményeinek hasznosítása	97
Az értekezés témaköréből megjelent írásbeli publikációk	98
Szóbeli előadások az értekezés témakörében	102
Mellékletek.....	105

Rövidítések jegyzéke

CAD	Számítógéppel támogatott tervezés
CAE	Számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység
PDM	Termék adatkezelés
DMU	Termék vizualizálás
ERP	Vállalati forrástervezés
CAQ	Számítógéppel támogatott minőségbiztosítás
CAP	Számítógéppel támogatott művelettervezés
CAM	számítógéppel támogatott gyártás
RPT	Gyors prototípusgyártás
CAT	Számítógéppel támogatott technológia tervezés
FEM	Véges elemes módszer
FDM	Véges térfogatelemes módszer
CV	Szabályozott térfogatok módszere
+GF+	Georg Fischer
STL	Stereolithography - felületmodell
ANG	Hálógeneráló modul
TFB	Hőmérséklettér számító modul
SPA	Feszültségállapot számító modul
EDA	Kiértékelő modul
ISO	Izoláció (szimmetria esetén)

1. BEVEZETÉS ÉS A DOKTORI MUNKA CÉLKITŰZÉSEI

A számítógépes szimuláció az utóbbi években a korszerű öntvénygyártás és tervezés egyre nagyobb mértékben alkalmazott segédeszközzé vált. A költséges kísérletsorozatok lerövidítése, illetve mellőzése, valamint a kialakuló hibaokok feltárása érdekében napjainkban már széles körben elterjedt a különféle öntészeti szimulációs programok alkalmazása. Az ilyen programok segítségével már az öntvénytervezés fázisában tanulmányozhatjuk az öntéskor lejátszódó termikus- és mechanikai folyamatokat, amelyek megfigyelésével fontos következtetéseket vonhatunk le az esetlegesen felmerülő öntvényhibák bekövetkezéséről.

Mivel folyamatosan növekednek az öntvényekkel szemben megkövetelt minőségi elvárások és szélesedik a gyártani kívánt öntvények skálája, ezért egyre fontosabbak a munkát segítő modern eszközök. Az öntészeti problémák megoldása során alkalmazott számítógépes eszközök az öntvény - forma - környezet rendszerbe helyezve vizsgálják a lejátszódó folyamatokat.

Az egyre bonyolultabb öntvények gyártástechnológiájának gyors és hatékony megtervezése, valamint a drága és időigényes tesztelés kiküszöbölése, csak szimulációs algoritmust alkalmazó számítógépes programok segítségével lehetséges. A legnagyobb problémát a vizsgált rendszer komplexitása jelenti. A valóságban nehezen megfigyelhető folyamatokhoz képest a szimulációs programok alkalmazásával lehetővé válik a számítógép képernyőjén megfigyelni a formatöltést, a hőmérséklet eloszlást, a dermedési folyamatot, a feszültség eloszlását és a különböző technológiai paraméterek változtatásának hatását. A jelenleg alkalmazott számítógépes algoritmusok nincsenek kidolgozva a teljes öntészeti folyamat összefüggő megoldására, dolgozatom célja egy ilyen komplex rendszer kialakítása. [1-4]

1.1 A SZIMULÁCIÓ DEFINIÁLÁSA ÉS INTEGRÁLÁSA A GYÁRTÁSI FOLYAMATBA

A számítógépes szimuláció fogalmának definiálása számtalan módon lehetséges. Az angolszász szakirodalmakban fellelhető definíciók általában az informatika és számítástudomány szempontjából közelítenek, ami a mérnöki folyamatok szimulációját kevésbé jól írja le:

- Simulation is the technique of representing the real world by a computer program. A simulation should imitate the internal processes and not merely the results of the thing being simulated.
- Simulation is the imitation of some real thing, state of affairs, or process. The act of simulating something generally entails representing certain key characteristics or behaviours of a selected physical or abstract system.
- Simulation is the use of a mathematical model to recreate a situation, often repeatedly, so that the likelihood of various outcomes can be more accurately estimated. [5-7]

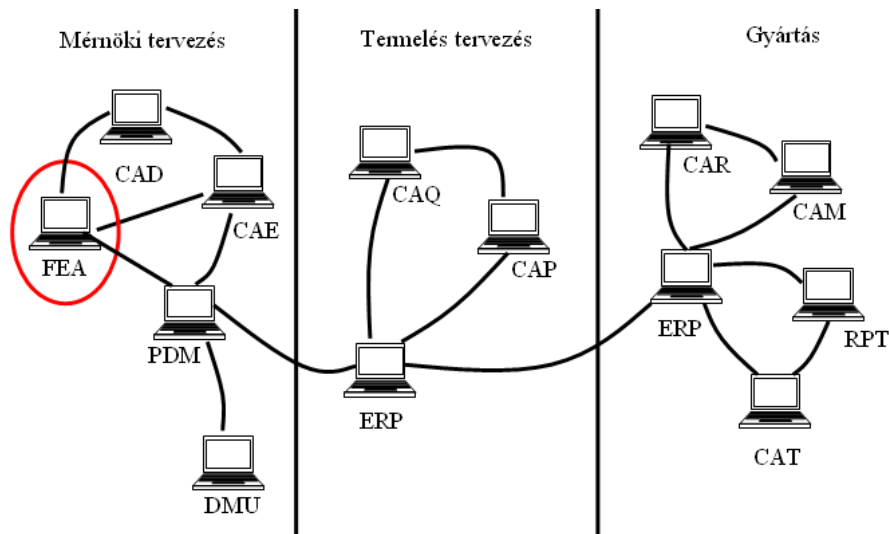
A magyar nyelvű szakirodalmak alapján az alábbi egyszerű definíciókat lehet alkalmazni:

- A számítógépes szimuláció egy formális matematikai modell.
- A szimuláció egy olyan folyamat vagy eljárás, amely a valóságot próbálja minél pontosabban visszaadni, vagy előre jelezni.
- A szimuláció nem más, mint válaszkérés a "Mi lenne, ha?" kérdésre. A kísérlet a szimuláció gyakorlati megvalósítása. [8-10]

A fenti definíciók túl általánosak, ezért az alábbi megfogalmazást alkalmazom:

A szimuláció modellek kidolgozása és azon kísérletek elvégzése létező, vagy hipotetikus rendszerek vizsgálatára. Ennek során a vizsgált rendszer egyes aspektusait számokkal, vagy szimbólumokkal reprezentáljuk oly módon, hogy azok könnyen kezelhetők legyenek és elősegítsék a rendszerek tanulmányozását és kiértékelését. [11]

Az öntészeti problémák megoldására alkalmazott számítógépes szimulációt, mely a mérnöki tervezés feladatai közé tartozik, több különböző módon lehet integrálni a gyártási folyamatba. Ennek egyik módját az 1. ábra szemlélteti. [12]



1. ábra A számítógépes szimuláció integrációja a gyártási folyamatba

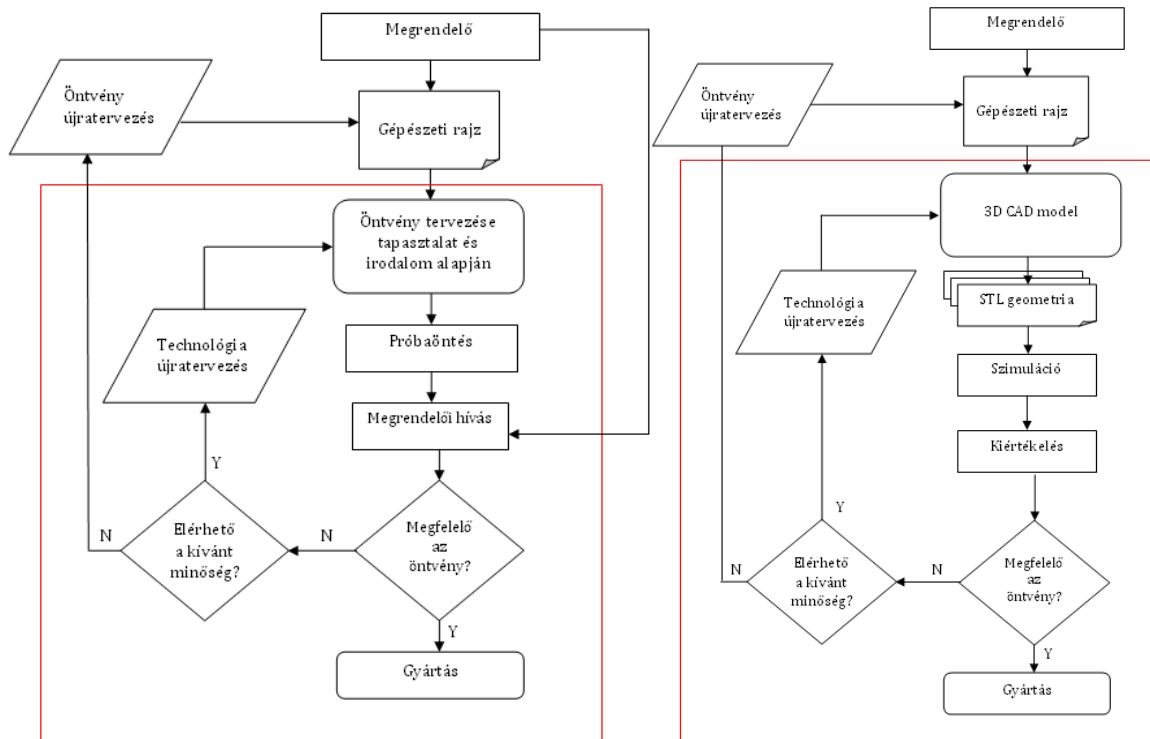
A mérnöki tervezés során a számítógéppel támogatott tervezés alkalmazásával elkészítjük a gyártandó öntvény háromdimenziós számítógépi mását és az előállított geometriát ellenőrizzük a számítógépes szimuláció segítségével. Ezzel párhuzamosan folyik a számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység tervezése melynek segítségével megtörténik, pl. a mintalap, vagy a szerszám gyárthatóságának ellenőrzése. Az így előállt adatokat a termék adatkezelés segítségével kezeljük és a termék vizualizálás segítségével jelenítjük meg. A kidolgozott technológiát reprezentáló adatok átkerülnek a termelés tervezésre területére.

A termelés tervezés során a vállalati forrástervezés alkalmazásával tervezik meg a gyártási részfolyamatok időbeni lefolyását és összehangolását (pl. olvasztás, maggyártás, formázás) és a folyamatok megfelelőségét a számítógéppel támogatott minőségbiztosítás és a számítógéppel támogatott művelettervezés segítségével biztosítják.

A technológiát reprezentáló- és a gyártáshoz kapcsolódó adatok végül átkerülnek a gyártás területére, ahol a számítógéppel támogatott gyártás, a gyors prototípusgyártás és a számítógéppel támogatott technológia tervezés segítségével biztosítják a termelés feltételeit.

A magyarországi öntödei üzemek nagy részében a technológiai tervezés során nem alkalmaznak számítógépes szimulációt. A hagyományos öntvénytervezés technológiai lépéseit a 2. ábra bal oldali folyamatábrája írja le.

A 2. ábra jobb oldali folyamatábrája azt az esetet mutatja be, ha az üzemben a technológiai tervezés során számítógépes szimulációt alkalmaznak. [13]



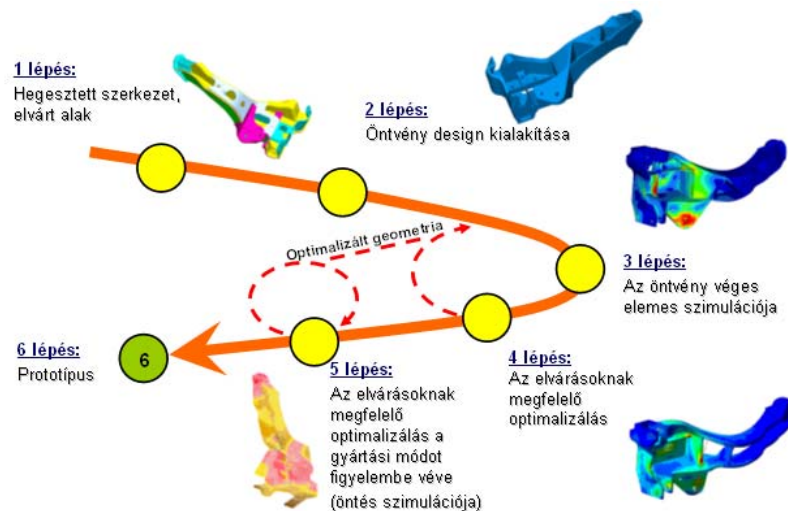
2. ábra bal A hagyományos öntvénytervezés technológiai lépései

2. ábra jobb Az öntvénytervezés lépései szimulációs program alkalmazása esetén

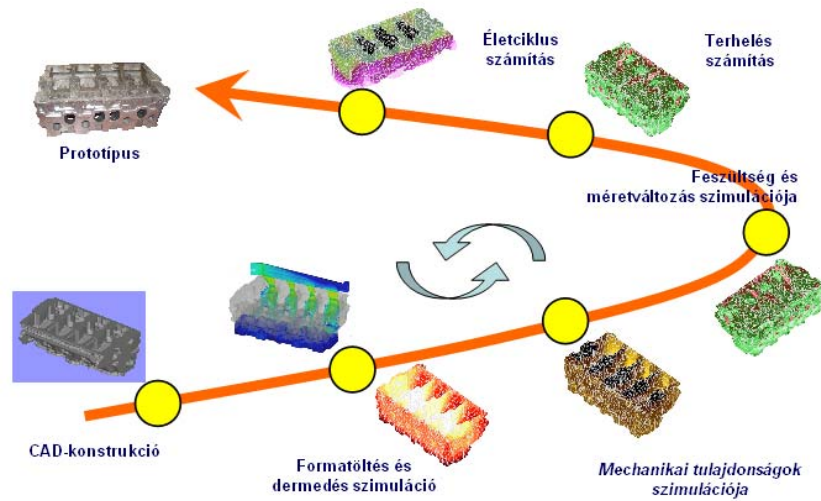
Üzemi viszonyok között a szimuláció alkalmazására az alábbi alapvető esetekben kerülhet sor:

- Optimális esetben a szimulációt a technológiai tervezés során alkalmazzák és eredményeit figyelembe veszik a végső technológia kialakítása során.
- A legtöbb esetben akkor kerül sor szimulációra, ha a gyártás során valamilyen probléma lép fel, aminek vizsgálata praktikusán csak szimuláció segítségével végezhető el.
- Általános eset, hogy a gyártási volumen növelésére van szükség és a szimulációt pl. a ciklusidő csökkenthetőségének eldöntésére használják.
- Legrosszabb esetben csak azért futtatnak szimulációt, mivel ahhoz a megrendelő ragaszkodik.

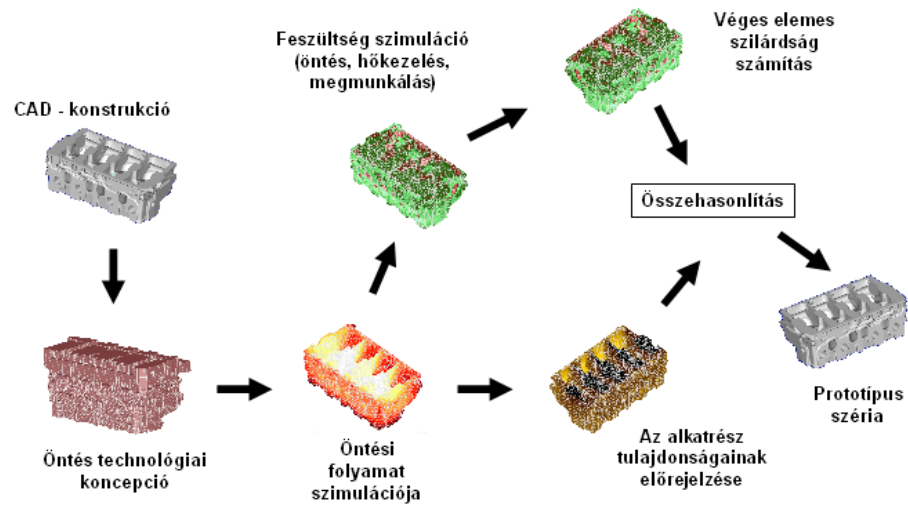
A technológia tervezés során megfelelően kialakított szimulációs algoritmusokat mutatok be a 3. ábra, 4. ábra és 5. ábra segítségével. [14]



3. ábra Öntött alkatrész virtuális fejlesztése



4. ábra Virtuális termék fejlesztés



5. ábra Öntött alkatrész virtuális fejlesztésének új lehetőségei

1.2 AZ ÖNTÉSZETI SZIMULÁCIÓ FŐ TÍPUSAI

A formatöltés és a dermedés modellezésének az alábbi céljai lehetnek:

- vizsgálni a beömlő- és táplálórendszer kialakításának hatását az áramlásra,
- vizsgálni az áramlás okozta hibákat, pl. oxid-besodródás,
- vizsgálni a hőmérséklet eloszlást öntés közben és után,
- vizsgálni a dermedési morfológiát,
- vizsgálni a dermedés és lehűlés közben kialakuló hibákat, pl. zsugorodási üregek, melegrepedés,
- vizsgálni a dermedési és lehűlési időt,
- vizsgálni az erő és feszültség viszonyokat, valamint a méretváltozásokat.

Az öntés közben lejátszódó folyamatokat fő jellemzőik alapján kétfelé lehet osztani:

- anyagtranszport folyamatok: formatöltés,
- hőtranszport folyamatok: dermedés, lehűlés, feszültségek kialakulása.

Attól függően, hogy melyik részfolyamatot akarjuk megfelelő pontossággal számítani választanunk kell a rendelkezésre álló matematikai megoldások közül.

- Az anyagtranszport folyamatokat legegyszerűbben olyan szimulációs programokkal lehet számítani, amik a Navier-Stokes áramlási egyenletet alkalmazzák, aminek segítségével egy kétegyenletes turbulencia modell írható fel. Ez a közelítés a szabadságfokok mindhárom dimenziója esetén alkalmas az áramlási karakterisztikák számítására.
- A hőtranszport folyamatok tapasztalati-, részben tapasztalati- és fizikai alapokon nyugvó szimulációs programokkal is számíthatóak. A tapasztalati programok csak olyan egyszerű, ismétlődő folyamatokat tudnak leírni, ahol a változók kis határokon belül alternálnak (pl. hőcentrum számítása).

- A részben tapasztalati programok megfelelően tudják modellezni az olyan egyszerű folyamatokat, ahol a változók intervalluma limitált és a lejátszódó fizikai változások egyszerűek és követhetőek.
- A fizikai alapokon nyugvó programok alkalmazásával a öntés közben lejátszódó legtöbb folyamat megfelelő pontossággal számítható. Az eljárás a legtöbb ötvözet-formázóanyag rendszer esetén jól alkalmazható modellt eredményez. Az ilyen programok általában a Fourier hőátadási egyenletet alkalmazzák, mely háromdimenziós hőátadást feltételez és a konvektív hőátadást is figyelembe veszi, amely főleg nagy öntvénykeresztmetszetek esetén lényeges. Az alkalmazott anyagok részletes hőfizikai adatai lehetővé teszik a hővezetés, a hőáramlás és a hőszugárzás számítását egyenletrendszerekkel, amiket így a teljes folyamatra ki lehet terjeszteni. A közelítés lépcsőzetes, időtől függő analízis és lehetővé teszi a hőmérséklet extrapolálását minden helyen és időpillanatban. [15-17]

2. ALKALMAZOTT MATEMATIKAI MÓDSZEREK

Az öntéskor végbemenő anyagtranszport és hőtranszport folyamatok leírása differenciálegyenletek rendszerével történik. Ezek matematikai megoldására különböző módszerek használhatóak. Az öntészetben alkalmazott szoftverek az alábbi megoldásokat alkalmazzák:

- Véges elemes módszer (Finite Element Method - FEM)
- Véges térfogatelemes módszer (Finite Difference Method - FDM)
- Szabályozott térfogatok módszere (Control Volume Method - CV)

A rendelkezésre álló matematikai módszerek közül vizsgálataim során a véges elemes módszert alkalmaztam.

[18-22]

2.1 A VÉGES ELEMES MÓDSZER KIALAKULÁSA

A számítógépek megjelenése és elterjedése alapvetően befolyásolta a modellezés nem könnyű feladatát és egyre bonyolultabb modellek felállítására és megoldására nyílt lehetőség. A számítógépek, a programozás-technika fejlődése és a grafikai lehetőségek szélesedése összetett tervezői rendszerek létrehozását eredményezte.

A véges elemes módszer kidolgozása a szilárdságtan tudományterületén történt meg. A mérnöki gyakorlatban jelentkező szerkezetek nagy része rugalmas anyagból készül, s a terhelés bizonyos intervallumában lineárisan viselkedik. A klasszikus rugalmasságtan számos módszert dolgozott ki a homogén, izotróp anyagú testek viselkedésének számítására. Nem sikerült viszont egy általános, bármilyen feladat megoldására alkalmas, megfelelően pontos megoldást adó módszert kidolgozni. Sok esetben a mérnöki gyakorlat is megelégedett közelítő megoldásokkal. A huszadik század elején kidolgozott variációs elvek (Rayleigh, Ritz, Timoshenko, Bubnov-Galjorkin) majd a későbbiekben kifejlesztett más elvek (Kantrovics, Reissner) már lehetővé tették az olyan feladatok közelítő megoldását is, melyek korábban nem voltak megoldhatók.

A digitális számítógépek megjelenése (1946 Los Alamos; 1949 Joniac, 1951 IBM), majd az 1964-re kifejlesztett BASIC programozási nyelv gyökeresen megváltoztatták és kiszélesítették a feladatok megoldhatóságának körét. A munkák egy része továbbra is a kontinuumként kezelt testre vonatkozó parciális differenciál egyenletrendszert oldotta meg közelítő módon. Nevezetesen a kontinuumra vonatkozó peremérték feladatot a differenciamódszer révén megjelenő lineáris, vagy nem lineáris algebrai egyenletrendszer megoldásán keresztül kapták meg. A további kutatások abba az irányba mozdultak el, hogy hogyan lehetne egyesíteni a variációs módszert a differencia módszernél használatos felbontással, háló felvételével. Az első ilyen mérnöki feladat megoldása során síkbeli feladatoknál az elmozdulásmezőt három-, illetve négyszögletű elemeken keresztül közelítették, majd azok csatolásánál állították elő a teljes potenciális energia minimum-elv alapján a végső csatolási csomópontokbeli elmozdulásokat, mint ismeretleneket magába foglaló lineáris algebrai egyenletrendszert.

A 60-as években a lineáris feladatok megoldására szolgáló elmozdulás-módszeren alapuló általános érvényű végelem programrendszerek kerültek kidolgozásra. A 70-es években a nemlineáris viselkedésű szerkezetekkel kapcsolatos programok kerültek kidolgozásra, továbbá bonyolult képlékenység-tani, hőtani, hidrodinamikai feladatok megoldására került sor. A 80-as években a hidrodinamika, a kompozit anyagú szerkezetek számítása és a nemlineáris anyagtulajdonságok figyelembevételének lehetősége került kidolgozásra. [23]

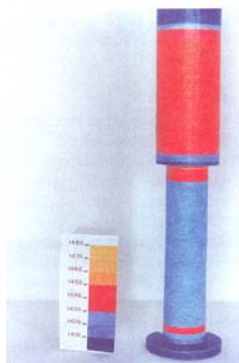
2.2 AZ ÖNTÉSZETI SZIMULÁCIÓS PROGRAMOK KIALAKULÁSA

N. Chorinow 1940-ben publikálta az első cikket a dermedési folyamatok matematikai leírásáról a Giesserei Zeitung öntészeti folyóiratban. A cikk első oldalát a 6. ábra mutatja.



6. ábra Az első publikált cikk a dermedési folyamatok matematikai leírásáról

Az 1950-es években alkalmaztak először analóg számítógépeket a dermedési front mozgásának egy- és kétdimenziós számítására. Digitális számítógépet először K.Fursund alkalmazott 1962-ben, aki a homokformába történő acélpenetrációt vizsgálta. Fontos lépés volt J.G.Hentzel és J.Keverian 1965-ös publikációja az acél öntvények dermedésének kétdimenziós vizsgálatáról, aminek során egy General Electric cég által kifejlesztett hőátadási programot fejlesztettek tovább. 1968-ban O.Vestby publikálta az általa kidolgozott kétdimenziós hegesztés közbeni hőterjedési modellt. 1970 körül V.Davies és O. Vestby egy kétdimenziós programot dolgozott ki lapalakú öntvények kitáplálhatóságának meghatározására. 1975-ben P.N.Hansen acélöntvények melegrepedésének modellezését oldotta meg, ami az első háromdimenziós szimulációs megoldás volt. A szimulációs eredmény 3D-s prezentációját famodellre festve oldotta meg, amit a 7. ábra illusztrál.



7. ábra Hőmérséklet eloszlás szemléltetése famodellre festve

Az 1980-as évek elején fellendült az öntészeti folyamatok szimulációjának kutatása. A főbb kutatási bázisok egy-egy meghatározó kutatóhoz kapcsolódóan, általában műszaki egyetemeken alakultak ki, jellemzően Dániában, az Egyesült Államokban, Japánban és Svájcban. A legfontosabb kutatóműhely a németországi RWTH Aachen Főiskola Öntészeti Intézetéből fejlődött ki Peter Sahm professzor irányításával. [24]

A kísérleteim során alkalmazott SIMTEC/WinCast szimulációs programrendszert fejlesztő Dr. Konrad Weiss és Dr. Christoph Honsel által vezetett RWP GmbH cég is az aacheni Öntészeti Intézetből indult és 1985 óta foglalkozik öntészeti folyamatok szimulációjának fejlesztésével.

2.3 A VÉGES ELEMES RENDSZEREK MŰKÖDÉSE

Folytonos közegek számítása esetén bármely változó (nyomás, hőmérséklet, elmozdulás, feszültség) végtelen számú értéket vehet fel, mivel ezek az értékek az adott test minden egyes pontjának függvényei, következésképpen a problémának végtelen számú megoldása lehetséges. A véges elemes diszkretizálás a vizsgált test elemekre való felosztásával véges számúra csökkenti az ismeretlenek számát, és azokat az elemeken belül egy feltételezett közelítő értékkel fejezi ki. A közelítő (interpolált) értékek a vizsgált tartomány meghatározott pontjaiban, a csomópontokban kerülnek meghatározásra. A csomópontok általában az elemhatárokon helyezkednek el és a szomszédos elemekhez kapcsolódnak. Egy elemnek, az elemhatárokon elhelyezkedő csomópontokon kívül, több belső csomópontja is lehet. A változók csomóponti értékei és az interpolált változók egyértelműen meghatározzák az elemeken belül a változók értékeit.

Egy adott probléma véges elemes reprezentációja esetén a vizsgált tartomány csomóponti értékei lesznek az ismeretlenek. Amint ezeket az ismeretleneket meghatározzuk, az interpolációs funkciók meghatározzák az elemek keresett értékeiket.

A megoldás jellege és a közelítés mértéke nem csak az elemek méretéről és számától függ, hanem a választott interpolációs eljárástól is. A funkciókat gyakran úgy választják ki, hogy a változók, vagy azok deriváltjai a szomszédos elemhatárokon keresztül folytonosak legyenek.

Fontos továbbá a véges elemes módszernek az a képessége, hogy az egyes elemekre az előtt ki tudjuk számítani a megoldásokat, mielőtt összegeznénk őket. Lényegében a komplex problémát leegyszerűsített problémák sorozataként kezeljük.

Folytonos közegek számítása esetén a véges elemes módszer mindig egy többlépcsős számítási struktúrát követ, ami az alábbi lépésekből áll.

1. A kontinuum diszkretizációja

Az első lépés a kontinuum, vagyis a megoldandó régió elemekre osztása, melynek megoldása során különféle elemtípusok alkalmazhatóak. Vannak olyan esetek, pl. bonyolult alakú rugalmas testek számítása, amikor nemcsak lehetséges, hanem szükséges is különböző elemtípusok alkalmazása. Az elemek számának és típusának eldöntése főként mérnöki tapasztalat alapján történik.

2. Az interpolációs függvény kiválasztása

A csomópontokat hozzárendeljük az elemekhez és kiválasztjuk a változó értékeket reprezentáló interpolációs függvényt. A változók lehetnek skalárok, vektorok, vagy magasabb rendű tenzorok. Gyakran polinómat választanak interpolációs függvénynek, mivel azokat könnyű integrálni és differenciálni. A kiválasztott polinómok foka függ az adott elemhez rendelt csomópontok számától és az ismeretlenek számától és sajátosságaitól.

3. Az elemek értékeinek meghatározása

Az egyes elemek tulajdonságait leíró, mátrixban lévő egyenletek felírása. Ennek elvégzéséhez alkalmazható direkt-, vagy variációs közelítés.

4. Az elemek értékeinek összesítése a rendszert leíró egyenletek felírásához

A vizsgált rendszer össztulajdonságainak meghatározásához összegezni kell az egyes elemek kiszámított tulajdonságait. Az egyes elemek tulajdonságait leíró mátrix egyenleteket úgy kell módosítani, hogy azok leírják a teljes rendszer viselkedését. A rendszert leíró mátrixban lévő egyenletek alakja megegyezik az egyes elemeket leíró egyenletekkel, de sokkal több tagból állnak, mivel az összes csomópontra vonatkoznak.

Az összegzési folyamat azon alapszik, hogy az elemek csatlakozási pontjában, a csomópontban, a változók értéke vonatkozik az összes-, az ehhez a csomópontához kapcsolódó elemre.

5. A peremfeltételek megadása

A rendszert leíró egyenleteket a megoldásuk előtt módosítani kell, hogy figyelembe lehessen venni a peremfeltételeket. Ekkor kell meghatározni a változók csomóponti értékeit.

6. A rendszert leíró egyenletek megoldása

Az összegzési folyamat több, szimultán megoldandó egyenletet eredményez, amik megoldásával megkapjuk az ismeretlen csomóponti értékeket. Ha a felírt probléma egyensúlyi jellegű, akkor algebrai-, ha nem egyensúlyi jellegű, például a csomóponti értékek időben változóak, differenciál egyenletrendszert kell megoldanunk. Mindkét egyenletrendszer lehet lineáris, vagy nem lineáris.

7. További számítások elvégzése

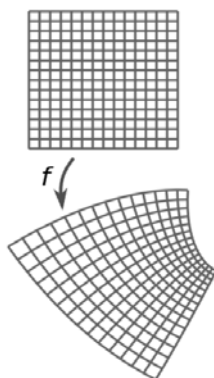
Számos esetben a rendszert leíró egyenletek megoldásával előállt eredményeket további számítások bemenő paramétereiként alkalmazzuk. Például az időben változó inhomogén hőmérsékletterben kialakuló visszamaradó öntési feszültségek számítása. [25-26]

2.4 HÁLÓGENERÁLÁS

Az öntvények, mint háromdimenziós testek hálózása, a legtöbb esetben nehéz feladat, mivel általában bonyolult, falvastagság átmenetekkel rendelkező geometriákról van szó. A megfelelő hálózás kialakításához először a kétdimenziós hálót generáljuk, majd annak térbeli kifejtésével hozzuk létre a háromdimenziós hálót. A kétdimenziós háló generálására az alábbi módszereket lehet alkalmazni:

Konform leképezés (conformal mapping)

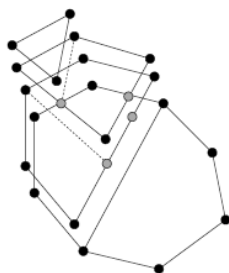
Olyan leképezése a testnek, mely szög és aránytartó, a kapott objektum csúcspontjainak száma megegyezik az eredeti test csúcspontjainak számával. A konform leképezés elvét a 8. ábra mutatja. [27]



8. ábra Konform leképezés

Geometria partícionálása (geometry decomposition)

A geometria partícionálása során többszörösen felezzük a testet a csúcsokat összekötő átlók segítségével. Ezt addig végezzük, míg a kapott egységek csak háromszögekből állnak. A geometria partícionálásának elvét a 9. ábra illusztrálja.



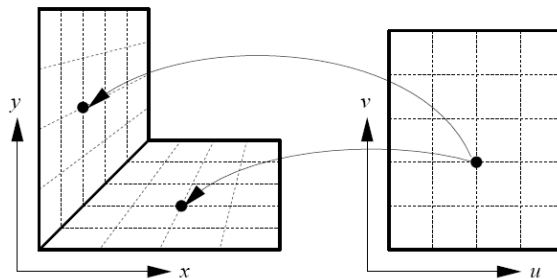
9. ábra Geometria partícionálása

Illesztett rács alapú közelítés (grid-based approach)

Az illesztett rács alapú közelítés során egy adott szélességű rácsot helyezünk a geometriára: a határra eső rácselemeket illesztjük, a területen kívül eső rácselemeket pedig eltávolítjuk. Az így kapott rács megfelelően írja le a körbehátrólt geometriai részeket.

Csatlakoztatott elem közelítés (mapped element approach)

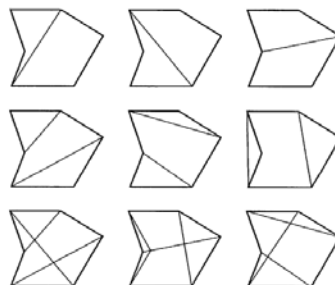
A csatlakoztatott elem közelítés esetén három-, vagy négyszög alakú részekre, domain-okra osztjuk fel az objektumot. A következő lépésben egy átalakítással a kapott hálófelosztást megfeleltetjük az eredeti geometriának és meghatározzuk a csomópontokat. A csatlakoztatott elem közelítés elvét a 10. ábra mutatja be. [28]



10. ábra Csatlakoztatott elem közelítés

Csomópont összekötő közelítés (node connection approach)

A felsorolt módszerek közül a csomópont összekötő közelítés a leggyakrabban alkalmazott módszer: a hálót a geometria csomópontjainak összekötésével alakítjuk ki. Az így kapott elemek közvetlenül is alkalmazhatóak, de illeszteni is lehet őket az objektum határához. A csomópont összekötő közelítés elvét a 10. ábra mutatja be. [29-31]

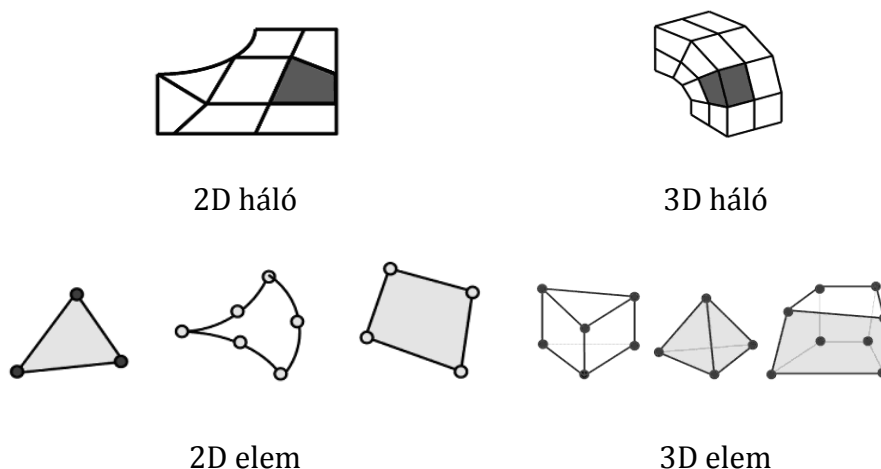


11. ábra Csatlakoztatott elem közelítés

A vizsgálataimhoz használt SIMTEC/WinCast programrendszer hálógenerálása során az alábbi lépések elvégzésével hoztam létre a hálót.

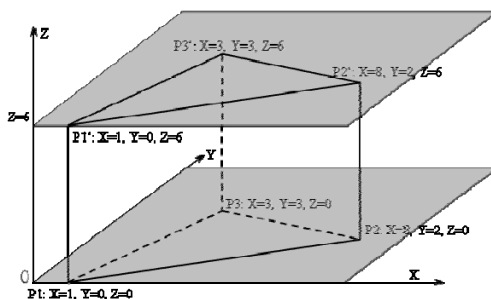
- Az öntvény geometriájának leírása CAD felületmodell alkalmazásával, ami a lehető legkevesebb információval írja le a befoglalt öntvény geometriát.
- A geometria felszeletelése metszetek definiálásával, amivel egy layer-modell áll elő. Fontos a metsző síkok megfelelő megválasztása, mivel az nagyban segítheti a pontos geometriakövetést. A metszetek definiálása általában valamelyik tengelyre merőlegesen történik, melynek megválasztása során érdemes figyelembe venni az alkalmazott gravitációs vektor irányát. Például gravitációs öntés esetén a gravitációs vektor iránya $Z=-1$, ekkor, ha a geometria felépítése azt megengedi, érdemes a Z sík mentén felszeletelni a testet.
- A hálózás szempontjából szignifikáns metszetek összemácsolása egy virtuális metszetre. Ennek eredménye egy olyan layer-modell, ami tartalmazza a különböző geometriájú részek metszeteit.
- A kétdimenziós háló létrehozása csomópont összekötő közelítéssel, melynek során figyelembe vesszük a virtuális metszeten előállt jellemző geometriai viszonyokat.
- A kétdimenziós háló térbeli kifejtése a metszeteknek megfelelő tengely mentén. Ennek során a virtuális metszetnek megfelelő kétdimenziós hálót fejtjük ki háromdimenzióssá és a kialakított hálót az adott metszeten látható valós geometriai metszetnek megfelelően módosítjuk. Az elemek száma a hálózás végén minden síkon megegyezik, de azok eloszlása és alakja változhat.

A véges elemes hálózás során alkalmazható elem- és hálótípusokat a 12. ábra vázlatai mutatják be.

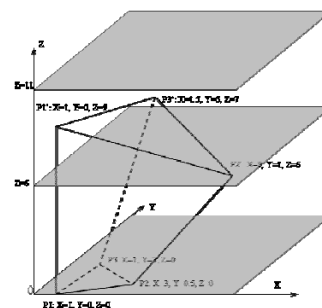


12. ábra A véges elemes hálózás során alkalmazható elem- és hálótípusok

A vizsgálataim során alkalmazott háromdimenziós pentahedron (prizma) elemet a 13. ábra és a 14. ábra szemlélteti.



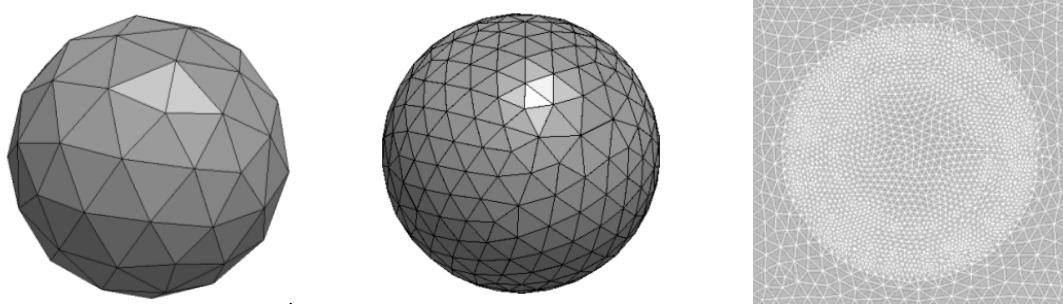
13. ábra Alkalmazott véges elem: prizma



14. ábra Alkalmazott véges elem: eltolt prizma

A véges elemes hálózás esetén lehetőség van a prizmák méretének tetszőleges megválasztására. Falvastagság átmenetekkel rendelkező valós öntvények esetén az öntvénygeometria jobb leírása érdekében a minél kisebb elemmérettel való hálózást érdemes alkalmazni. Az elemek méretének csökkentése lokálisan is kivitelezhető, így az egyes hálóméretek alkalmazása esetén az elemek összes számában nem lesz exponenciális növekmény. A 15. ábrán egy gömb geometria hálózását mutatom be két

különböző hálómérettel, valamint a gömb geometria középvonali metszetét változó eloszlás és elemméret alkalmazása esetén.

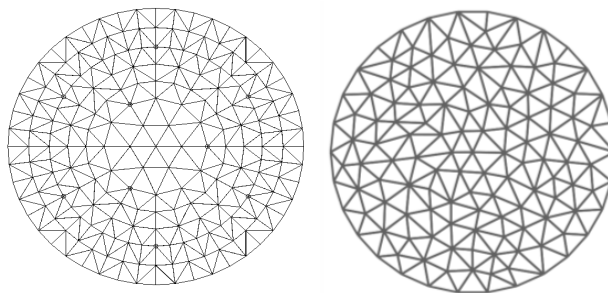


15. ábra Gömb geometria hálózása különböző hálóméret alkalmazásával és a geometria középvonali metszete változó eloszlás és elemméret alkalmazása esetén

Kétdimenziós véges elemes háló létrehozása során különböző rendszerű elemelrendeződéseket lehet alkalmazni:

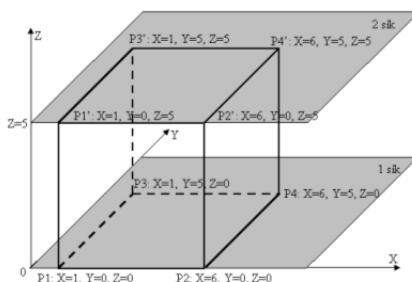
- struktúrált hálózás: ebben az esetben valamilyen előre definiált rendezőelv alapján hozzuk létre a hálót.
- izotropikus hálózás: ebben az esetben egy iránytangenstől független elemelrendezésű hálót hozunk létre.

Valós öntvények esetén izotropikus hálózást érdemes alkalmazni a jobb geometria követés érdekében. A struktúrált és az izotropikus hálózás összehasonlítása a 16. ábrán látható.



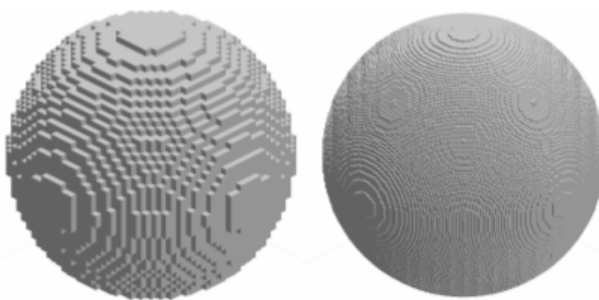
16. ábra A struktúrált és az izotropikus hálózás összehasonlítása

Összehasonlításképpen bemutatom a véges térfogatelemes módszer során alkalmazott hálógenerálást. A véges elemes hálózással szemben a véges térfogatelemes hálózás esetén a háló generálása automatikus módon is történhet. ennek során meg kell adni a hálógenerálás során alkalmazott koordináta-rendszer nullpontját és ebből kiindulva előre definiált élhosszúságú kockákkal töltjük ki a teret. Ebben az esetben a térbeli geometria minden síkján azonos az elemek eloszlása és mérete. A véges térfogatelemes módszer kockaelemét a 17. ábra illusztrálja. [32-36]



17. ábra Kocka alakú véges térfogat elem

Valós öntvények geometriájának kockákkal való közelítése esetén a geometria megfelelően pontos leírásához nagyszámú, kisméretű elemre van szükség, ami az elemek számának, és így a számítási kapacitásszükséglet exponenciális növekedését eredményezi. A 18. ábrán bemutatom a már ismertetett gömb geometria véges térfogatelemes hálózási eredményeit.



hálóméret:	2mm	0,5mm
elemszám:	~33500	~2140000

18. ábra Gömb geometria hálózásának véges térfogatelemes eredményei

3. ÖNTÉSZETI FOLYAMATOK SZIMULÁCIÓJA

3.1 A HŐTANI ÉS HŐFESZÜLTSEGI FELADAT MEGOLDÁSA

A termodinamika első főtétele szerint felírható

$$\dot{u} \rho = \mathbf{F} \cdot \cdot \dot{\mathbf{A}} + r \rho - \mathbf{h}_f \cdot \nabla \quad (1)$$

ahol: $\dot{u}$ tömegben megoszló belső energiaváltozási sebesség
 ρ anyag tömegsűrűsége
 $\mathbf{F}$ feszültség tenzor
 $\dot{\mathbf{A}}$ alakváltozás sebesség tenzor
 r tömegben megoszló hőforrás teljesítmény
 $\mathbf{h}_f$ felületi hőáramsűrűség
 ∇ Hamilton-féle differenciál operátor jele.

Az összefüggésből látszik, hogy a hőtani és a mechanikai állapotok nem függetlenek egymástól. Thermo-mechanikai problémáknál (pl. melegalakítás) a hőtani és mechanikai feladatot kapcsolt módon kell megoldani, ellenben öntési folyamatok modellezése esetén az is jó közelítést jelent, ha a hőtani és a mechanikai feladatot egymástól függetlenül oldjuk meg. Ekkor először a hőtani probléma megoldására kerül sor, majd ezután a megoldással kapott hőmérséklet eloszlás ismeretében határozhatók meg a hőhatásból származó alakváltozások és feszültségek.

3.1.1 STACIONÁRIUS HŐVEZETÉSI FELADAT

Ha a termodinamika első főtételében nem vesszük figyelembe az alakváltozási energia és a teljes belső energia megváltozását, valamint érvényesnek tételezzük fel a

$$\mathbf{h}_f = -\Lambda \cdot (\nabla T) \quad (2.a)$$

Fourier hővezetési törvényt, amelyben a hőmérséklet gradiense a $(\nabla T)^T = \left[\frac{\partial T}{\partial x}; \frac{\partial T}{\partial y}; \frac{\partial T}{\partial z} \right]$

alakban számítható és a hővezetési tenzor $\Lambda = \langle \lambda_x \lambda_y \lambda_z \rangle$ csak a főátlóban tartalmaz elemeket, akkor a hővezetés stacionárius esetre vonatkozó Fourier differenciál egyenletét kapjuk:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \rho = 0 \quad (2.b)$$

ahol: $T=T(x,y,z)$ hőmérséklet

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ hővezetési együtthatók az x, y, z irányban.

A (2.b) differenciál egyenletet az alábbi típusú peremfeltételek figyelembe vételével kell megoldani:

- hőmérsékleti peremfeltétel: azon az A_T felületen, ahol a T_0 hőmérséklet ismert

$$T(x, y, z) = T_0 \quad (3.a)$$

- hőáramlási peremfeltétel: azon az A_h felületen, ahol a h hőáram-vektor ismert

$$-\lambda_n \frac{\partial T}{\partial n} = h_n \quad (3.b)$$

- hőátadási peremfeltétel: azon az A_a felületen, ahol a χ hőátadási tényező ismert

$$-\chi (T - T_k) = h_a \quad (3.c)$$

- hőszugárzási peremfeltétel: azon az A_s felületen, ahol a κ hőszugárzási tényező ismert

$$-\kappa(T - T_s) = h_s \quad (3.d)$$

Az A_T, A_h, A_a és A_s felületek együttesen a vizsgált test teljes felületét szolgáltatják:

$$A = A_T + A_h + A_a + A_s$$

A peremfeltételekben:

n felületre merőleges irány

h_n a fluxus felületre merőleges koordinátája

h_a hőátadásból származó fluxus felületre merőleges koordinátája

h_s a hőszugárzásból származó fluxus felületre merőleges koordinátája

T_k környezeti hőmérséklet

T_s sugárforrás hőmérséklete

A stacionárius hővezetési feladat végeselem módszer szerinti megoldásának alapját, a virtuális munka elvének analógiájára, a virtuális hőmérsékletek elve szolgáltatja:

$$\int_V \delta \mathbf{D}_T^T \wedge \mathbf{D}_T dV = \int_V \delta T r \rho dV + \int_{A_h} \delta T h_n dA + \int_{A_k} \delta T \chi (T - T_\infty) dA + \int_{A_s} \delta T \kappa (T - T_s) dA \quad (4)$$

A vizsgált tartományt véges-elemekre bontjuk és a hőmérsékletmezőt elemenként közelítjük:

$$T^e(x, y, z) = \sum_{i=1}^N G_i^e(\xi, \eta, \zeta) T_i^e \quad (5)$$

ahol: N az elem csomópontjainak száma
 G_i^e alakfüggvények
 T_i^e csomóponti hőmérsékletek

Az elemekre felvett mezőket az elemhatárokon összekapcsolva, a $\mathbf{T}^T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_i \ \dots]$ csomóponti hőmérsékletekre a

$$\mathbf{K}_\Lambda \mathbf{T} = \mathbf{h} \quad (6)$$

lineáris algebrai egyenletrendszer kapjuk. A $\mathbf{K}_\Lambda$ hővezetési mátrix a (4) egyenlet bal oldalán álló kifejezésből és a jobboldalon álló harmadik és negyedik tag első feléből származik. A $\mathbf{h}$ csomóponti hőterhelési vektor a (4) egyenlet jobb oldalán álló első és második tagból, valamint a harmadik és negyedik tag második részéből származik.

A (6) egyenlet peremfeltételeket figyelembe vevő megoldása a csomóponti hőmérsékleteket, illetve a (5) összefüggést felhasználva a keresett hőmérsékletmezőt szolgáltatja.

3.1.2 INSTACIONÁRIUS HŐVEZETÉSI FELADAT

Ha a hőáramok, és ezekkel együtt a hőmérsékletmező időben változik, akkor azt is figyelembe kell venni, hogy a hőteljesítmény egy részét a test anyaga tárolja és ezzel megváltozik a belső energiája. Ha a termodinamika első főtételében a bal oldalon álló belső energiát

$$u = c_v T \quad (7.a)$$

a hőmérséklettől függőnek tételezzük fel, akkor a Fourier-féle differenciálegyenlet egy időtől függő taggal bővül:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \rho = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7.b)$$

ahol: t idő
 c_v az anyag fajhője.

A hőtároló képesség mechanikai analógiája az anyag tehetetlensége.

Instacionárius esetben a (3.a-d) peremfeltételek mellett a $t = t_0$ kezdeti időpillanatra vonatkozó kezdeti feltételt is ki kell elégíteni. Az egész vizsgált térfogatra ismerni kell a hőmérsékletet:

$$T(x, y, z, t_0) = T_0(x, y, z) \quad (8)$$

Ebben az esetben a virtuális hőmérsékletek elve alapján felírt (4) egyenlet bal oldala kiegészül a hőtároló képességet tartalmazó taggal (ugyanúgy, mint a virtuális munka elv a tehetetlenségi erőket tartalmazó taggal):

$$\begin{aligned} \int_V \delta \mathbf{D}_T^T \Lambda \mathbf{D}_T dV + \int_V \delta T c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} dV = \\ = \int_V \delta T r \rho dV + \int_{A_h} \delta T h_n dA + \int_{A_k} \delta T \chi (T - T_\infty) dA + \int_{A_s} \delta T \kappa (T - T_s) dA. \end{aligned} \quad (9)$$

A végeelem-diszkretizációnál továbbra is csak a hőmérsékletmező térbeli eloszlását közelítjük és csak a csomóponti hőmérsékleteket tekintjük időtől függőnek:

$$T^e(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N G_i^e(\xi, \eta, \zeta) T_i^e(t) \quad (10)$$

Így a csomóponti hőmérsékletekre nézve közönséges differenciálegyenlet-rendszert kapunk:

$$\mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_\Lambda \mathbf{T} = \mathbf{h} \quad (11)$$

ahol: $\mathbf{C}$ hőtárolási (hőkapacitási) mátrix.

A (11) egyenletet numerikus integrálással oldjuk meg, az integrálást a (8) kezdeti feltételből indítva. Feltételezzük, hogy a Δt időintervallumon a T hőmérséklet lineárisan változik, tehát fennállnak az alábbi összefüggések:

$$t = t(\beta) = t_i + \beta \Delta t = t_i + \beta(t_{i+1} - t_i) \Rightarrow t = t(\beta) = (1 - \beta)t_i + \beta t_{i+1} \quad (12.a)$$

$$T = T(\beta) = T_i + \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} \beta \Delta t = T_i + \beta(T_{i+1} - T_i) \Rightarrow T = T(\beta) = (1 - \beta)T_i + \beta T_{i+1} \quad (12.b)$$

ahol: $0 \leq \beta \leq 1$ integrálási paraméter

Ha a (11) egyenletben a hőmérséklet idő szerinti differenciálját a

$$\dot{\mathbf{T}} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} \approx \frac{\mathbf{T}_{i+1} - \mathbf{T}_i}{\Delta t} \quad (13)$$

differenciával helyettesítjük, akkor a (11) differenciálegyenlet-rendszerből a következő lineáris algebrai egyenletrendszert kapjuk:

$$[\mathbf{C} + \Delta t \beta \mathbf{K}_\Lambda] \mathbf{T}_{i+1} = [\mathbf{C} - \Delta t (1 - \beta) \mathbf{K}_\Lambda] \mathbf{T}_i + \Delta t [(1 - \beta) \mathbf{h}_i + \beta \mathbf{h}_{i+1}] \quad (14)$$

amelynek segítségével a hőmérsékletmező Δt időlépésként előállítható.

3.1.3 HŐFESZÜLTSEGEK SZÁMÍTÁSA

A hőmérséklet változás hatására bekövetkező feszültségek számításának módját rugalmas anyagi viselkedés esetén mutatom be, ami öntvények esetén jó közelítésnek tekinthető. Ebben az esetben a feszültségi vektor az alábbi alakban állítható elő:

$$\sigma^e(X) = \mathbf{C}^e [\varepsilon^e(X) - \varepsilon_0^e(X)] = \mathbf{C}^e \mathbf{B}^e(X) \mathbf{q}^e - \mathbf{C}^e \varepsilon_0^e(X) \quad (15.a)$$

ahol: X helytől való függés jelölése
 $\mathbf{C}^e$ anyagállandók mátrixa
 $\mathbf{q}^e$ csomóponti elmozdulás-vektor

$$(\varepsilon^e)^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xz}] \quad \text{és} \quad (\varepsilon_0^e)^T = [\alpha \Delta T(X) \ \alpha \Delta T(X) \ \alpha \Delta T(X) \ 0 \ 0 \ 0] \quad (15.b)$$

A (15.b) összefüggésben a felső indexben lévő T betű a transzponálást jelöli. A (15.a) egyenlet felhasználásával a potenciális energia minimuma elvből a csomóponti elmozdulás-vektorra a következő lineáris algebrai egyenletrendszer adódik:

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{q} = \Delta \mathbf{f}_T \quad (16.a)$$

$$\Delta \mathbf{f}_T = \int_{V^e} [\mathbf{B}^e(X)]^T \mathbf{C}^e \varepsilon_0^e(X) dV \quad (16.b)$$

A (16.b) összefüggés a hőmérsékletváltozásból származó csomóponti terhelésvektor. A (16.a) egyenlet megoldásaként előálló $\Delta \mathbf{q}$ elmozdulások szolgáltatják az öntvény vetemedését és zsugorodását. [37-44]

Az alkatrészben ébredő aktuális feszültség értéke az egyes időintervallumok feszültségváltozásainak összege:

$$\sigma^e(X) = \sum_i \Delta \sigma_i^e = \sum_i \mathbf{C}^e \mathbf{B}^e(X) \Delta \mathbf{q}_i^e \quad (17)$$

3.2 HŐFIZIKAI ANYAGTULAJDONSÁGOK

Hőmérséklet eloszlás numerikus számítása során a valós folyamat közbeni állapotokat a Fourier hővezetési egyenleten alapuló matematikai modellel közelítjük. Ahhoz, hogy a rendszer alkalmas legyen a folyamatok leírására, az alkalmazott modellnek elégséges egyezést kell mutatnia a számított eredmények- és a valós folyamatok között. Ehhez az alkalmazott anyagminőségek széleskörű hőfizikai ismeretére van szükség.

Hőátadási tényező

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{\Delta T \cdot A} \quad (18)$$

ahol: α hőátadási tényező, (W/cm²K)

$\dot{Q}$ hőáram, (W)

ΔT hőmérsékletkülönbség, (K)

A felület, (cm²)

Fizikai szempontból nincs különbség a belső és a külső hőátadás között, programozási szempontból viszont meg kell különböztetni a két esetet, ugyanis belső hőátadás kezelése esetén a hőátadási tényező különböző módokon kezelhető:

- idő függvényében,
- hőmérséklet függvényében. Ebben az esetben a ΔT hőmérsékletkülönbséget adó magasabb hőmérsékleti érték függvényében adjuk meg a hőátadási tényező értékét.

Hővezető képesség

Ha egy d vastagságú egyenes fal két oldala stacionárius esetben különböző T_1 és T_2 hőmérsékletű, akkor a Q hőmennyiség az A felületen t idő alatt áramlik keresztül.

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T \quad (19)$$

ahol: $\dot{Q}$ hőáram, (W)
 λ hővezető képesség, (W/cmK)
 A felület, (cm²)
 d falvastagság, (cm)
 ΔT hőmérsékletkülönbség, (K)

Látens hő

A kristályosodás típusától függően a látens hő miatt adódó energia felszabadulás nem lineárisan, hanem fajlagosan megy végbe. Emiatt valós hőmérsékletmező számításához a szolidusz- és a likvidusz hőmérsékletek megadása mellett szükség van a dermedés közben felszabaduló hőmennyiségre, továbbá annak a likvidusz-szolidusz hőmérsékletközben való eloszlására is.

Hőkapacitás

$$C_p = \frac{Q}{V \cdot \Delta T} \quad (20)$$

ahol: Q hőmennyiség, (J)
 C_p hőkapacitás, (J/cm³)
 V térfogat, (cm³)
 ΔT hőmérséklet különbség, (K)

Rugalmassági (Young) modulusz (E)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (21)$$

ahol: $\sigma = \frac{F}{A}$ feszültség, (N/mm²)

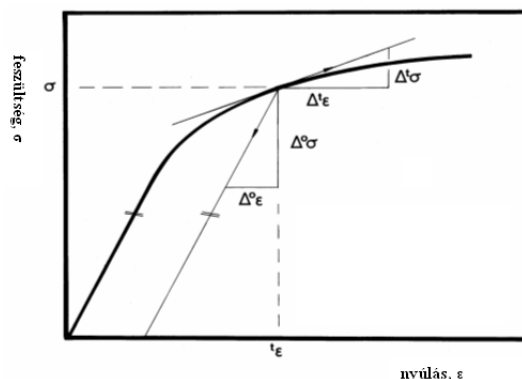
$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ nyúlás, (%)

F erő, (N)

A terület, (mm²)

Δl hosszváltozás, (mm)

l kezdeti hossz, (mm)



Mivel a számításnál használt rugalmas anyagtulajdonságokat leíró fájl a húzófeszültségen kívül is tartalmaz adatokat, nem alkalmazhatjuk csak a rugalmassági modult, hanem helyette a tangenciális modult kell használnunk. A tangenciális modul értékei erősen függenek a hőmérséklettől, de a műszaki szakirodalom nem tartalmazza annak értékeit a szolidusz hőmérséklet alatt. A rugalmassági modul nulla értéke numerikus szempontból nem értelmezhető.

Hőtágulási együttható

A hőtágulási együttható egy testnek azt a hosszváltozását fejezi ki, amely adott hőmérsékletváltozás hatására megy végbe.

$$\Delta l = AP \cdot l \cdot \Delta T \quad (22)$$

ahol: Δl hosszváltozás, (cm)

l kezdeti hossz, (cm)

ΔT hőmérsékletkülönbség, (K)

AP hőtágulási együttható, (10⁻⁶/K)

Keresztirányú kontrakciós együttható

Szakítópróba során a hengeres próbatest nem csak hosszváltozást, hanem Δd átmérőcsökkenést is szenved. Az X és Y irányú nyúlás értékei között lineáris kapcsolat van. A dimenzió nélküli ν konstans felhasználásával a következő egyenlet írható fel:

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x \quad (22)$$

$$\Delta l = l - l_0, \quad \Delta d = d - d_0 \quad (24)$$

$$\varepsilon_x = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad \varepsilon_y = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (25)$$

ahol: Δl	hosszváltozás, (mm)
l	kezdeti hossz, (mm)
l_0	megnyúlt hossz, (mm)
Δd	átmérőváltozás, (mm)
d	kezdeti átmérő, (mm)
d_0	megváltozott átmérő, (mm)
ε_y	y irányú nyúlás, (mm)
ε_x	x irányú nyúlás, (mm)
ν	keresztirányú kontrakciós együttható

Összenyomhatatlan anyagok esetén a keresztirányú kontrakciós együttható értéke 0,5. Ez az érték numerikus szempontból nem alkalmazható, mivel ebben az esetben a mátrix elemek között nullával való osztás fordulna elő. Fémek keresztirányú kontrakciós együtthatója $\sim 0,3$.

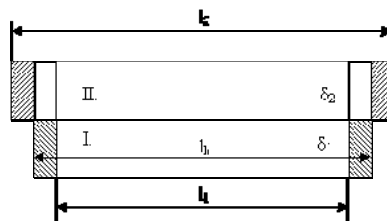
Az ε_x és az ε_y segítségével határozható meg a Poisson szám (NY) értéke: $\varepsilon_y = -NY \cdot \varepsilon_x$

3.3 AZ ÖNTVÉNYEK BEN KELETKEZŐ FESZÜLTSEGEK EREDETE ÉS KÖVETKEZMÉNYEI

Az öntvényekben a megszilárdulás- és lehűlés folyamán feszültségek keletkeznek. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy az öntvények zsugorodnak és bennük hőmérséklet különbségek alakulnak ki. Ha az ötvözet folyási határánál a keletkezett feszültségek nagyobbak, az öntvényben képlékeny alakváltozás jön létre és a méreti megváltoznak.

Ha a lehűlés folyamán az öntvény képlékeny alakváltozásra nem képes részeiben rugalmas alakváltozás közben belső feszültségek halmozódnak fel, akkor ez a visszamaradó feszültség csökkenti az öntvény szerkezeti szilárdságát. Kedvezőtlen körülmények között (ütés, hirtelen terhelés) a felhalmozódott rugalmas feszültségek elősegíthetik az öntvény törését valamint a feszültségekkel terhelt öntvények a megmunkálás során méretüket változtatják és bekövetkezhet az öntvények vetemedése, deformálódása. A felhalmozódott rugalmas feszültségek következtében az öntvények alakjukat hosszú időn keresztül, kis mértékben változtathatják és a rugalmas erők által előidézett vetemedés nagymértékben veszélyezteti a készre munkált öntvények méretpontosságát. A feszültségek kialakulását egy egyszerű geometriai esetben kívánom bemutatni.

A 19. ábrán látható két hasáb egy egységet képez, és eredeti hosszúságuk T_1 hőmérsékleten δ_1 .



19. ábra Kiindulási eset

Ha a II. hasábot az I. hasáb δ_1 hőmérsékleténél nagyobbra melegítjük, akkor a II. hasáb hosszának növekedését a következő alakban írhatjuk fel.

$$l_2 = l_1 [1 + \alpha_{lin} (\delta_2 - \delta_1)] \quad (26)$$

ahol: α_{lin} vonalas tágulási együttható,

δ_1, δ_2 a két hasáb hőmérséklete

Mivel a két hasáb egy rendszert képez, a közölt hő hatására megnyúló II. hasáb nem tud szabadon tágulni, mivel az I. hasáb nem engedi. Ezért a két hasábból álló rendszer csupán egy közepes l_k hosszúságra nyúlhat meg. Ebben az esetben $l_2 > l_k > l_1$.

Tehát az I. jelű hasáb $l_k - l_1$ hosszúsággal rugalmasan megnyúlt, a II. jelű hasáb pedig $l_2 - l_k$ hosszúsággal rugalmasan összenyomódott. Az I. jelű hasáb húzó-, a II. jelű hasáb nyomó feszültség hatása alatt áll.

Jelöljük P_I , ill. P_{II} -vel a húzott, ill. a nyomott rudakban ható erőket, akkor

$$P_I = \sigma_I \cdot f_I \quad (27)$$

$$P_{II} = -\sigma_{II} \cdot f_{II} \quad (28)$$

ahol: σ_I húzófeszültség

$-\sigma_{II}$ nyomófeszültség

f_I az I. jelű hasáb keresztmetszete

f_{II} a II. jelű hasáb keresztmetszete

Egyensúlyi állapotban, ha a rudak hőmérsékletkülönbsége állandó, a P_I és P_{II} erők összege nulla, akkor

$$\sigma_I f_I - \sigma_{II} f_{II} = 0 \quad (29)$$

Ha a két hasábban az alakváltozás rugalmas és a σ_I , ill. σ_{II} feszültségek nem lépik túl az adott fémekben a rugalmasság határát, akkor a Hooke törvény alapján felírható a következő összefüggés

$$\sigma_I = E \frac{l_k - l_1}{l_I} \quad (30)$$

$$\sigma_{II} = -E \frac{l_1 [1 + \alpha(\delta_2 - \delta_1)] - l_k}{l_I} \quad (31)$$

Ha ezeket az értékeket az egyensúlyi állapotot kifejező (29) egyenletbe helyettesítjük, akkor

$$\sigma_I = E \frac{f_{II}}{f_I + f_{II}} \alpha (\delta_2 - \delta_1) \quad (32)$$

$$\sigma_{II} = -E \frac{f_{II}}{f_I + f_{II}} \alpha (\delta_2 - \delta_1) \quad (33)$$

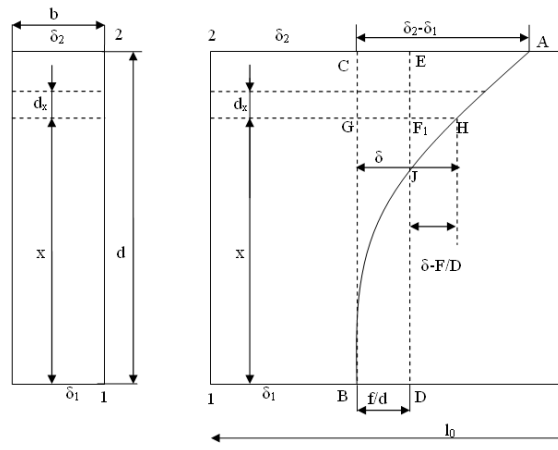
E két egyenletből következik, hogy a húzó, illetve nyomó feszültségek arányosak a fém rugalmassági modulusával (E), a fém vonalas tágulási együtthatójával (α) és a két hasáb hőmérsékletének különbségével, valamint függetlenek a hasábok hosszúságától. Ha a (32) és (33) egyenleteket a következő alakban írjuk fel

$$\frac{\sigma_I}{\sigma_{II}} = -\frac{f_{II}}{f_I} \quad (34)$$

akkor megállapíthatjuk, hogy a húzó, ill. a nyomófeszültségek fordított arányban vannak azokkal a keresztmetszetekkel, amelyekben keletkeztek. Ha a termikus feszültségek nagysága az anyag folyási határát túllépi, akkor az öntvényben képlékeny alakváltozás keletkezik. Ennek oka, hogy a húzó és a nyomófeszültségek hajlító nyomatékot képeznek, amelyek az öntvények alakjának torzulását, vetemedését okozzák.

Az öntvényekben különböző helyeken mérhető hőmérsékletkülönbség következtében állandóan képződnek feszültségek, ezért a hűlés, vagy melegítés során képződő feszültségektől meg kell különböztetni a visszamaradó feszültséget.

Az utóbbi a lehűlés végén mindig kisebb, mint a pillanatnyi feszültségek, amelyek a falvastagság különbség mellett a hőmérséklet különbség következtében nagyobb hőmérsékleten keletkeznek. E feszültségek hatásának magyarázatára vizsgáljuk meg egy d falvastagságú, b szélességű és l_0 hosszúságú hasáb alakváltozását, amikor a hasáb két oldalán mérhető hőmérsékletek nem egyenlők egymással. Az ismertetett geometriájú hasáb alakváltozását a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra Az ismertetett geometriájú hasáb alakváltozása

Legyen az 1. jelű felületen mérhető hőmérséklet δ_1 és a 2. jelű felületen δ_2 , valamint $\delta_2 > \delta_1$.

A hőmérséklet a hasáb keresztmetszetében az AB görbe vonal mentén oszlik meg. Az 1. jelű felülettől mért x távolságoknak $\delta = \delta_x - \delta_1$ hőmérsékletkülönbség felel meg (G-H metszet).

Az AB görbe egyenletét $\delta = f(x)$ függvény alakjában fejezhetjük ki, ahol $x = 0$ esetén $\delta_1 = 0$ és, ha $x = d$ akkor $\delta = \delta_2 - \delta_1$ (C-A metszet).

A végtelen kis dx vastagságú és $b \cdot dx$ keresztmetszetű elemi résznek hőmérsékletkülönbsége $\delta = \delta_x - \delta_1$, megnyúlása $l_0 \alpha \delta$.

Mivel az elemi rész a szomszédos részekhez kapcsolódik, ezért a megnyúlás λ_k közepes nagyságot ér el. Ennek következtében dx elemi részben σ_x feszültség keletkezik, amely arányos a rugalmas alakváltozással $(\lambda_k - l_0 \alpha \delta)$.

$$\delta_x = E \frac{\lambda_k - l_0 \alpha \delta}{l_0} \quad \text{és}$$

$$\delta_x = E \frac{\lambda_k}{l_0} - E \alpha \delta \quad (35)$$

A $b \cdot dx$ keresztmetszetben $P_x = b \cdot dx \cdot \sigma_x$ erő keletkezik. Egyensúlyi állapotban, ha a

hasáb nem görbül el és nincs benne maradós alakváltozás, akkor $\sum P = 0$ és $b \int_0^d \sigma_x dx = 0$.

A (38) egyenlet behelyettesítése után $E \cdot b \int_0^d \left(\frac{\lambda_k}{l_0} - \alpha \delta \right) dx = 0$, mivel $\delta = f(x)$, ezért

$\frac{\lambda_k}{l_0} \int_0^d dx - \alpha \int_0^d f(x) dx = 0$, mivel a $\int_0^d f(x) dx$ tag integrálja egyenlő az ABC=f felülettel, akkor

$\frac{\lambda_k}{l_0} d - \alpha f = 0$, valamint

$$\lambda_k = l_0 \alpha \frac{f}{d} \quad (36)$$

A λ_k értékét a (35) egyenletbe helyettesítve

$$\sigma_x = -E \alpha \left(\delta - \frac{f}{d} \right) \quad (37)$$

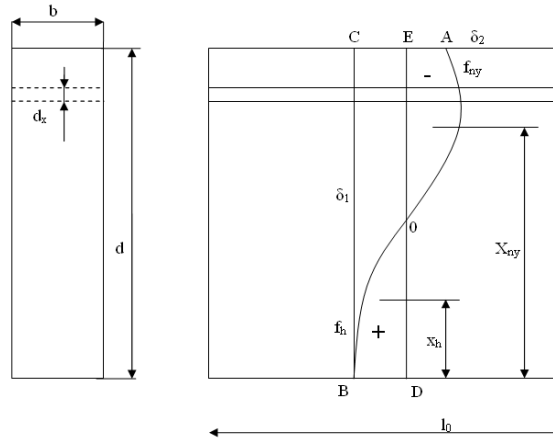
Az egyenletnek a zárójelben lévő tagja szerint állapíthatjuk meg grafikusán a tengelyirányú feszültségek előjelét. Húzófeszültség akkor képződik, ha $\delta < \frac{f}{d}$, nyomófeszültséggel akkor számolhatunk, ha $\delta > \frac{f}{d}$.

A hőmérséklet eloszlásgörbéjének ismeretében az f területet számítással, vagy szerkesztéssel határozhatjuk meg. Az f ismeretében megrajzolható a CEBD téglalap, amelynek magassága d , szélessége $CE=GF_1=BD=f/d$. A $\delta - \frac{f}{d}$ nagyságát minden keresztmetszetben az AB görbének a DE függőlegestől való távolsága határozza meg. A tengelyirányú feszültség megszűnik, ha $\delta - \frac{f}{d} = 0$ ez megfelel a J pontnak a 3.2 ábrán.

A J ponton áthaladó semleges vonal felett minden szálban nyomófeszültség-, $\left(\delta - \frac{f}{d} > 0 \right)$ a J pont alatti részben húzófeszültség keletkezik. A hasáb a képződő húzó és nyomófeszültségek hatására meggyöngyösülhet. A hasáb nagyobb hőmérsékletű oldala tágulni igyekszik, kisebb hőmérsékletű része ezt a tágulást akadályozza. A képződő feszültségek nagysága azonban az AB görbe alakjától, tehát az öntvény keresztmetszetében mérhető hőmérsékletkülönbségtől függ.

A leírt elemzés nem nyújt kielégítő magyarázatot a valós öntvényekben képződő feszültségállapotról, ugyanis a feszültség hatására bekövetkező elmozdulás hatására a feszültségeknek csökkennie kellene. Ezzel valóban számolhatunk, ha képlekeny

alakváltozás közben egyes feszültség alatt álló öntvényrészek elmozdulnak. Ez a szabad mozgás azonban a Heyn-féle idealizált állapot szerint a belső erők hatásának következménye. A belső erők által létrehozott nyomaték az a hatás, amelynek következménye az öntvény alakváltozása. Nézzük meg egy l_0 hosszúságú, $b \cdot d$ keresztmetszetű hasámban az alakváltozást előidéző nyomaték nagyságát, ha a hasábot melegítjük és δ_1 -ről δ_2 -re változik a hőmérséklete. A vázolt esetet a 21. ábra szemlélteti.



21. ábra Az ismertetett geometriájú hasámban az alakváltozást előidéző nyomaték nagysága

A 21. ábra segítségével felírható, hogy a belső erők a hasámban

$$M = b \cdot E \cdot \alpha (f_{ny} x_{ny} - f_n x_n) \quad (38)$$

hajlító nyomatékot hoznak létre, ahol:

x_n, x_{ny} a húzott és a nyomott lapok súlypontjának távolsága az alaptól

f_{ny}, f_n a húzott és a nyomott felületek

A hasáb alsó és felső részén fellépő maximális hajlító-feszültségek egyenlete

$$\sigma' = \sigma'_{\max} \left(\frac{2x}{d} - 1 \right) = \frac{M}{W} \left(\frac{2x}{d} - 1 \right) \quad (39)$$

A visszamaradó feszültség nagyságának megállapítására, a húzó és nyomó feszültségek összefüggéséből a hajlító feszültséget levonjuk.

$$\sigma_x - \sigma' = E \alpha \left(\frac{f}{d} - \delta \right) - \frac{M}{W} \left(\frac{2x}{d} - 1 \right) \quad (40)$$

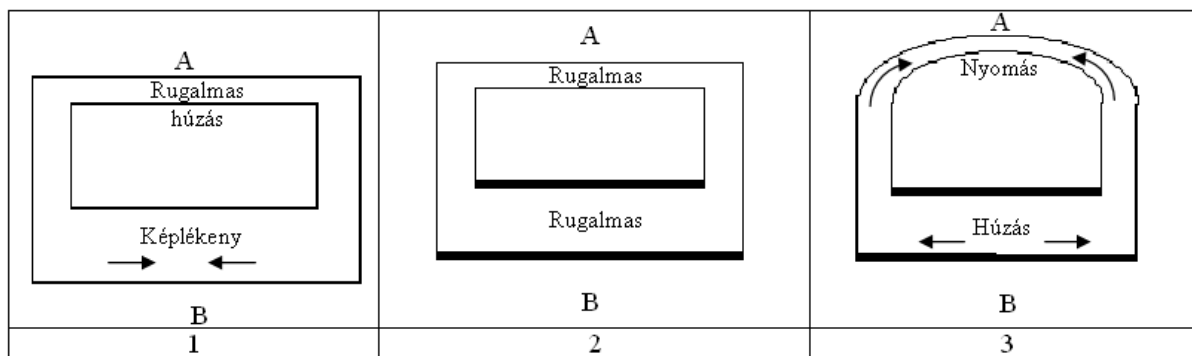
ahol W a vizsgált keresztmetszet ellenálló nyomatéka.

Ha a belső erők nyomatéka ismert, akkor a szilárdságtani képletek alapján a hasáb alakváltozását jellemző adatokat (görbületi sugár: ρ , behajlás, f) kiszámíthatjuk:

$$\rho = \frac{EI}{W}; \quad f = \frac{M}{8} \cdot \frac{l^2}{EI}$$

A felírt egyenletek abban az esetben érvényesek, ha a példákban említett hasábok végig rögzítettek. Valójában az öntvényekben ébredő feszültségek képződésénél az esetek túlnyomó többségében az egyes öntvényrészek szabad elmozdulását gátolják a csatlakozó öntvényrészek. Az öntvények lehűlésük során a képlékeny alakváltozás hőmérsékletéből folyamatosan hűlnék a rugalmas alakváltozás hőmérsékletére. Azt az átmeneti hőmérsékletet, ahol a fém képlékeny alakváltozása megszűnik, és az öntvényben csak rugalmas alakváltozás képződhet, kritikus hőmérsékletnek nevezzük. Tehát a belső feszültségek folyamatosan képződnek a hőtágulás következtében, de a bekövetkező alakváltozás ezeket túlnyomórészt megszünteti. Visszamaradó feszültségek azonban mindig képződnek, ha az öntvény egyes részei átlépik a rugalmas alakváltozás kritikus hőmérsékletét. A visszamaradó feszültségek oka a különféle öntvényrészek lehűlési sebessége és ugyanazon idő alatt létrejövő különböző mértékű zsugorodása.

Mivel az öntvényrészek egymáshoz kapcsolódnak, azért egymásban húzó és nyomófeszültségek képződését okozzák. Ezeket a jelenségeket a feszültséggrácson és egyéb egyenlőtlen falvastagsággal kiképzett technológiai próbákön lehet tanulmányozni. Vizsgáljuk meg a visszamaradó feszültségek képződésének folyamatát egy olyan öntöttvas öntvényen, mely egy vékony A, és egy vastag B részből áll. Az adott testet a 22. ábra szemlélteti.



22. ábra A vizsgált test geometriája

A vékony A rész gyorsabban hűl és zsugorodik, mint a vastag B rész, és gyorsabban éri el a rugalmas alakváltozás hőmérsékletét. A vékony rész a vastag részt összenyomás révén képlékeny alakváltozásra kényszeríti, miközben a vékony részben húzófeszültség ébred (22. ábra 1). A vastag rész képlékeny alakváltozása következtében az ébredő feszültségek jelentéktelen nagyságúak.

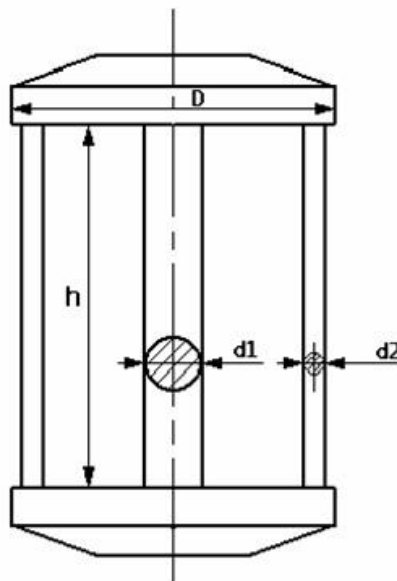
Második esetben a képlékeny alakváltozás közben a vastag rész is eléri a rugalmasság határát. Ekkor a lassabban hűlő és kevésbé zsugorodó vékony résszel szemben a vastag rész most kezd gyorsabban hűlni és zsugorodni, eközben a két rész között a feszültségek kiegyenlítődnek. A vastag rész azonban tovább hűl és zsugorodik, mivel vastagabb és hőmérséklete nagyobb, mint a vékony részé. A vastag rész zsugorodása tehát tovább tart addig, ameddig a vékony és a vastag rész között a hőmérsékletkülönbség ki nem egyenlítődik. Ekkor a vékony részben feszültség ébred és mivel a vastag rész zsugorodását akadályozza, ezért ebben húzófeszültség keletkezik. Ezek a feszültségek azonban már nem egyenlítődhetnek ki, mivel a vékony és a vastag részek is merevek. Ezért a vékony részben rugalmas nyomó-, a vastag részben rugalmas húzófeszültségek halmozódnak fel. [45]

3.4 A MARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTSG KÍSÉRLETI MEGHATÁROZÁSA

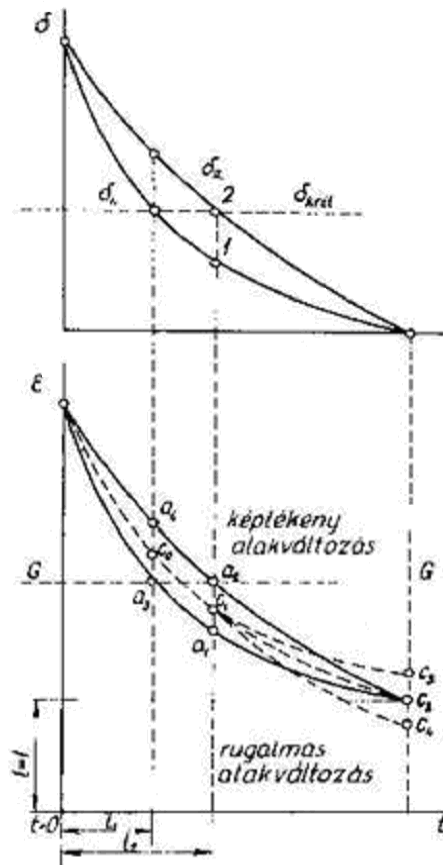
Az öntvényekben visszamaradó feszültségek mérése rendkívül bonyolult és nehezen kivitelezhető feladat. Ezért a törvényszerűségek összefüggésének megállapítására egyszerű próbatesteken végeznek méréseket és gyűjtenek adatokat. Összefüggéseket keresnek az ötvözetek összetételétől függően a várható visszamaradó öntési feszültség, a rugalmas alakváltozás, a vetemedés és a hosszú ideig tartó öntvény-alakváltozás okainak felderítésére. A leggyakoribb technológiai próba a különféle falvastagságú rudakból álló szimmetrikus Bauer-Shipp-féle feszültségrács, amit a

23. ábra szemléltet.

A 24. ábra alapján követhetjük nyomon a feszültségrács vastag és vékony rúdjának hőmérséklet és elvi zsugorodás változását a lehűlés során. [46-52]



23. ábra Bauer-Shipp féle feszültségrács próbatest



24. ábra A rudak hőmérséklet- és zsugorodás változása a lehűlés során

Ha az ábrán a lehűlési görbéket és az azonos időpontokban végbement összehúzódásokat figyeljük, akkor látható, hogy a vékony rúd t_1 időpontban éri el a rugalmas alakváltozás határát. Ez alapján a lehűlési folyamat három szakaszra osztható.

- A lehűlés első szakaszában δ_{kr} hőmérséklet eléréséig a feszültségrács rúdjaiknak szabad zsugorodása nem mehet végbe akadálytalanul, ezért valójában a zsugorodási görbe alakját a c_0, c_1, c_2 szaggatott vonallal jelölt görbe mutatja. Így látható, hogy a vékony rúd $\overline{c_a a_2}$ távolsággal arányosan, a vastag rúd $\overline{c_0 a_4}$ távolsággal arányosan összenyomódott.

- A t_1 - t_2 időtartamban a képlékeny alakváltozás tartományában lévő vastag rúd méretváltozása követi a rugalmas alakváltozási tartományban lévő vékony rúd méretváltozását.

A t_2 időpontban a vastag rúd is elérte a rugalmas alakváltozás tartományát, ezen a kritikus területen a vastagabb rúd $\overline{a_2 c_1} - \overline{a_4 c_0}$ távolsággal arányosan képlékenyen összenyomódott, míg a vékony rúd megnyúlása ($\overline{c_0 a_3} = \overline{c_1 a_1}$) változatlan maradt. A

lehűlés végén a vékony rúd $\overline{c_2 c_3}$ mértékben rugalmasan összenyomódott, a vastag rúd $\overline{c_2 c_4}$ arányban rugalmasan megnyúlt.

Ezért a vastag rúdban fokozatosan növekvő húzófeszültség ébred. A feszültséggrács próbatest vastag rúdjában húzó- a vékony rúdjában nyomófeszültség keletkezik.

- A hátralévő időben mindkét rúd a rugalmas alakváltozás tartományában van.

A rugalmas alakváltozások teljes nagysága

$$\varepsilon = \overline{c_2 c_4} + \overline{c_2 c_3} = \alpha \delta_{kt} (e^{-k_2 t_2} - e^{-k_1 t_1}) \quad (41)$$

A vékony (I.) és a vastag (II.) rúdban képződött feszültségek nagysága

$$f_I = -E \frac{f_2}{f_1 + f_2} \alpha_{kr}^0 \delta_{kr} (e^{-k_2 t_2} - e^{-k_1 t_1}) \quad (42)$$

$$f_{II} = -E \frac{f_2}{f_1 + f_2} \alpha_{kr}^0 \delta_{kr} (e^{-k_2 t_2} - e^{-k_1 t_1}) \quad (43)$$

A t_2 időponttól kezdve az egész rendszer a rugalmas alakváltozás zónájában van.

$$T_1 = T_{krit} e^{-k_1 t} \quad (44)$$

$$T_2 = T_{krit} e^{-k_2 t} \quad (45)$$

$$T_2 - T_1 = T_{krit} (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t}) \quad (46)$$

ahol: $k_1 > k_2$

$$k = m \frac{a}{R}$$

a hőmérsékletvezetési tényező

R redukált falvastagság

m állandó

Mivel a zsugorodás a hőmérsékletváltozással egyenesen arányos, a zsugorodási görbe is hasonlóan fog változni

$$\varepsilon_1 = \alpha \cdot T_{kr} e^{-k_1 t_2} \quad (47)$$

$$\varepsilon_2 = \alpha \cdot T_{kr} e^{-k_2 t_2} \quad (48)$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \alpha \cdot T_{kr} (e^{-k_2 t_2} - e^{-k_1 t_2}) \quad (49)$$

A c_1 közös ponttól a vékony rúdnak a $\overline{c_1 c_3}$, a vastag rúdnak pedig a $\overline{c_2 c_4}$ mentén kell zsugorodnia, ez párhuzamos az eredeti szabad zsugorodási görbékkel. Mind a két rúd valójában a c_2 értéket veszi fel.

$$-\varepsilon_1 = \overline{c_2 c_3} \quad (50)$$

$$+\varepsilon_2 = \overline{c_2 c_4} \quad (51)$$

A feszültség a teljes keresztmetszeten ébred

$$\sum \varepsilon = \overline{c_2 c_4} + \overline{c_2 c_3} = \alpha \cdot T_{kr} (e^{-k_2 t_2} - e^{-k_1 t_1}) \quad (52)$$

$$\sum \sigma = E \sum \varepsilon \quad (53)$$

A vékony rúdra

$$\sigma_1 = -E \varepsilon_{\text{össz}} \frac{A_2}{A_1 + A_2} = -E \frac{A_2}{A_1 + A_2} \alpha \cdot T_{kr} (e^{-k_1 t_1} - e^{-k_2 t_2}) \quad (54)$$

A vastag rúdra:

$$\sigma_2 = +E \varepsilon_{\text{össz}} \frac{A_1}{A_1 + A_2} = E \frac{A_1}{A_1 + A_2} \alpha \cdot T_{kr} (e^{-k_1 t_1} - e^{-k_2 t_2}) \quad (55)$$

$$T_{kr} = T_0 \cdot e^{-k_2 t_2} \quad (56)$$

$$T_2 = \frac{1}{k_2} \ln \frac{T_0}{T_{kr}} \quad (57)$$

Az (56) és (57) összefüggéseket figyelembe véve felírható, hogy

$$\sigma_{1,2} = \pm E \frac{A_2, A_1}{A_1 + A_2} \alpha \cdot T_{kr} c [1 - (\frac{T_{kr}}{T_0})^{\frac{k_1}{k_2} - 1}] \quad (58)$$

3.4.1 AZ ÖNTÉSI FESZÜLTSEG MEGHATÁROZÁSA A BAUER-SHIPPI FÉLE FESZÜLTSEGRÁCS ESETÉN

A vizsgálat alapja az, hogy a vastagabb öntvényrészt a rugalmas húzó feszültség hatása alól felszabadítjuk. Lassan befűrészeljük, majd egy bizonyos csökkent keresztmetszetenél a visszamaradó feszültségek hatására magától elszakad. Az elszakadt felületet megmérjük és matematikai közelítésekkel kiszámítjuk a területét. A vastagabb rúdból kimunkált szakító próbatestnek meghatározzuk a szakító szilárdságát.

A visszamaradó feszültség hatására elszakadt keresztmetszet F_1 , akkor a vastagabb rúdban az F_1 keresztmetszet elszakadását létrehozó erő:

$$F = F_1 R_m \quad (59)$$

Ez az F erő hatott a rúd teljes keresztmetszetében (F_0) a szétfűrészelés előtt, és okozója volt a rugalmas visszamaradó öntési feszültségnek (σ_m).

$$F = \sigma_m F_0 \quad (60)$$

A két erő egymással egyenlő:

$$\sigma_m \cdot F_0 = F_1 R_m \quad (61)$$

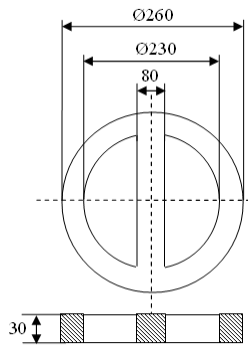
Ebből a visszamaradó feszültség:

$$\sigma_m = \sigma_B \frac{F_1}{F_0} \quad (62)$$

Ezzel a módszerrel a feszültségrács technológiai próba jól használható a tényleges visszamaradó feszültség meghatározására és a különféle befolyásoló tényezők hatásának megállapítására.

A Bauer-Shipp-féle feszültségrács próbatest az úgynevezett szimmetrikus, kettőskeretű rácsok csoportjába tartozik és különféle alakú, hasonló kiképezésű öntvények feszültségállapotának kialakulása az itt elmondottak szerint értelmezhető.

Szimmetrikus kiképezésű, kör elrendezésű feszültségrács próbatestet mutat be a 25. ábra.

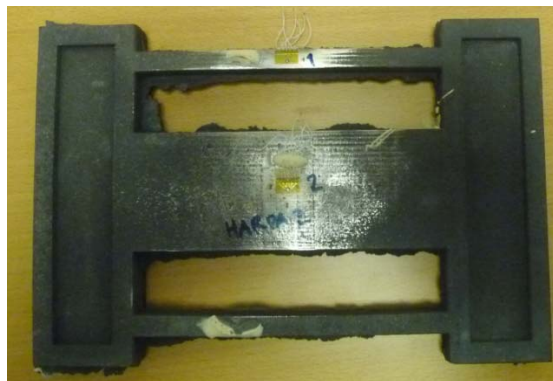


25. ábra Kör elrendezésű feszültséggrács próbatest [45]

A középső rúdban felhalmozódó visszamaradó öntési feszültségek növekedését nagymértékben segíti elő a vékony rudak kör alakú kiképzése, melyek a középső rudakban ébredő húzó feszültségek hatására meghajlanak. Az ilyen típusú feszültséggrácsok adatainak értékelését úgy is el lehet végezni, hogy a középső vastag részek szétfűrészelése után a rugalmas visszamaradó feszültségek megszűnésével az elvágott rudak eltávolodnak egymástól. A rés vastagságának növekedése egyenesen arányos a Hooke-törvény alapján számítható rugalmas feszültséggel.

A technológiai próbákon mért feszültségek jellemzőek, de nem azonosak az öntvényeken mérhető feszültségekkel. Az öntvényekben keletkező öntési feszültségek nagyságának megállapítására nincsenek kialakult módszerek, és vizsgálatuk nehézkesek. Ezért ebben az esetben fokozott igény merül fel a szimulációs módszerek alkalmazására.

Lokális feszültségállapot meghatározására használják a nyúlásmérő bélyeges mérést. Ebben az esetben az öntvénybe munkált furat környezetében a nyúlásmérő bélyeggel a feszültségek hatására kialakuló deformációt mérik és ebből a feszültség viszonyok meghatározhatóak. Ilyen próbatestet mutat a 26. ábra.



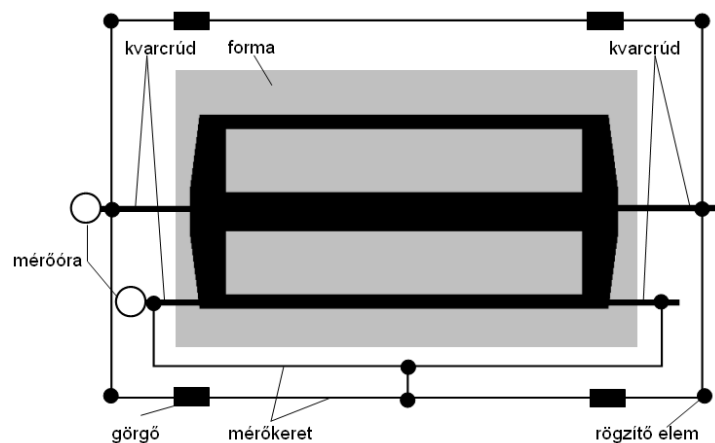
26. ábra Lokális feszültségek meghatározása nyúlásmérő bélyegek segítségével

4. VISSZAMARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTSEGEK MÉRÉSE ÉS SZIMULÁCIÓJA TECHOLÓGIAI PRÓBATESTEKEN

A visszamaradó öntési feszültségek tényleges értékének meghatározására a Bauer-Shipp típusú feszültséggrács próbatestet alkalmazzák. A mérés kivitelezése kiterjedhet a feszültséggrács próbatest középső-, és egyik szélső rúdjának lineáris méretváltozási görbéinek meghatározására is.

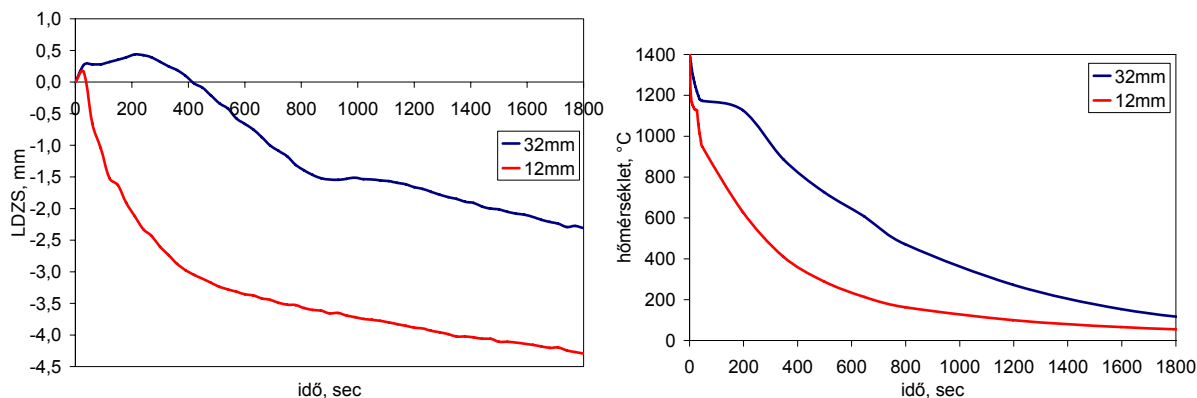
A lineáris méretváltozás vizsgálata az öntöttvasak kristályosodása és lehűlése közben létrejött fajtérfogat változásairól nyújt felvilágosítást. A mérés során a feszültséggrács próbatest rúdjaiknak hosszváltozását mérjük és a mért értékek felhasználásával megszerkeszthető egy olyan görbe, amelyből a dermedést kísérő duzzadás és a lehűlés során bekövetkező zsugorodások mértéke meghatározható.

A mérés során a megfelelően kiképzett formába, a középső- és az egyik szélső rúd végéhez kapcsolódóan kvarcüveg rudakat rögzítünk. Az egyik kvarcüveg rúd méretváltozását közvetlenül adja át egy megfelelően kialakított merev keretnek, a másik kvarcüveg rúd méretváltozását a kerethez rögzített mozgó elemnek adja át. A próbatest hosszváltozását, a hossz tengellyel megegyező két irányban, a keret elmozdulása révén az útjeladó összegezve jelzi. A mérési elrendezés elvi rajzát a 27. ábra mutatja be.



27. ábra A feszültséggrács lineáris méretváltozás mérésének elvi rajza

A 28. ábra GJL-200 anyagminőségből öntött, átmérő 32-12 mm átmérőjű rudakból álló 350mm hosszú feszültséggrács rúdjaiknak lineáris méretváltozását és lehűlési görbéjének mérési eredményeit mutatja be bentonitos homokformába öntve.



28. ábra Feszültségrács próbatest rúdjaianak lineáris méretváltozása és lehűlési görbéje

A megszilárdulás folyamata közben kialakul egy méretkülönbség a vastag és a vékony rúd között a megszilárdulás és a lehűlés maradó alakváltozási tartományában, ami összefüggésbe hozható a grafitos kristályosodás közben kialakuló duzzadással és a zsugorodást befolyásoló tényezőkkel (pl. szekunder grafitkiválás, a forma szilárdságának a zsugorodást befolyásoló hatása). Ezt a kezdeti szakaszban kialakult méretkülönbséget az A1 átalakulás közben kialakuló méretváltozás és az azt követő lehűlés közben az eltérő hőmérsékletekhez tartozó zsugorodás is befolyásolja.

A méretpontos öntvények technologizálása során az öntvény átlagos zsugorodásával számolnak. Az adott öntvény egyes részeinek az átlagostól eltérő zsugorodása csak abban az esetben kerül vizsgálatra, ha valamilyen méretpontossági probléma lép fel.

Az öntött feszültségrács próbatesthez kapcsolódó tényleges méretváltozások a szimuláció segítségével nem követhetőek. A szimulációs programok csak az átlagos zsugorodások adatait használják, ennek ellenére a véges elemes módszer megfelelő pontossággal definiált kiindulási- és határfeltételek esetén alkalmas az öntvényben keletkező visszamaradó feszültségek kimutatására.

A feszültségrács próbatestekkel kapcsolatos vizsgálataim során az alábbi részfeladatokat végeztem el:

- öntött próbatestek visszamaradó öntési feszültségeinek meghatározása méréssel,
- visszamaradó öntési feszültségek szimulációja különböző anyagminőségek és geometriai viszonyok esetén.

4.1 VISSZAMARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTSEGEK VIZSGÁLATÁNAK KÖRÜLMÉNYEI

Vizsgálataim során különböző átmérőaránnal kialakított Bauer-Shipp típusú feszültségrács próbatesteket vizsgáltam. A feszültségrács próbatestek átmérőviszonyai az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat

A feszültségrács geometriák átmérőviszonyai

Jel	Keresztmetszet arány	Középső rúd átmérő (mm)	Szélső rúd átmérő (mm)
32-12	7,11	32	12
32-20	2,56	32	20
42-20	4,41	42	20
42-30	1,96	42	30

A vizsgált átmérő 32-12 mm próbatest geometriát a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra A vizsgált átmérő 32-12 mm feszültségrács geometria

Az öntött próbatesteknek az alábbi jellemzőit vizsgáltam:

- Kémiai összetétel: C, Si, Mn, S, P (%)
- Telítési szám: a tényleges karbontartalom és az eutektikus összetételhez tartozó karbontartalom viszonya

$$S_c = \frac{C\%}{4,3 - 0,317Si\% - 0,33P\% + 0,0027Mn\% + 0,066S\%} \quad (63)$$

- Grafitosodási hajlam:

$$K = \frac{4}{3} Si\% \left(1 - \frac{5}{3C\% + Si\%} \right) \quad (64)$$

- Szakítószilárdság: a feszültségrács vastagabb rúdjaából kimunkált próbatest szakítószilárdsága, Rm_{32} (N/mm²)
- Brinell keménység: a feszültségrács vastagabb rúdjának hossz tengelyére merőleges metszeten mért keménység, HB_{32} (-)
- Visszamaradó öntési feszültség: σ_v (N/mm²)
- Relatív feszültség: visszamaradó öntési feszültség és szakítószilárdság hányadosa, (%)

$$\frac{\sigma_v}{Rm} \cdot 100 \quad (65)$$

- Számított rugalmassági modulusz: a szakirodalom adatai szerint a lemezgrafitos öntöttvasak rugalmassági moduluszát nem a szakítóvizsgálattal határozzák meg (nem azonos átmérőjű a szakító próbatest) hanem ennek közelítő értékét a szakítószilárdság és a Brinell keménység hányadosa alapján határozzák meg.

$$E_0 = \frac{Rm}{HB} \cdot 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (66)$$

- Relatív keménység: a mért Brinell keménység és a mért szakítószilárdság alapján számolt keménység hányadosa

$$RH_{32} = \frac{HB_{mért}}{100 + 0,44 \cdot Rm_{mért}} \quad (67)$$

- Relatív szilárdság: a mért szakítószilárdság és a telítési szám alapján számított szakítószilárdság hányadosa

$$RG_{32} = \frac{Rm_{mért}}{Rm_{szám}} = \frac{Rm_{mért}}{1020 - 825S_C} \quad (68)$$

A kísérleti adagokat 50kg befogadóképességű középfrekvenciás indukciós téglkemencében olvasztottuk. A forma anyaga minden esetben bentonitos nyers formázókeverék volt.

Az öntöttvas anyagminőségek vizsgálatához kapcsolódó saját méréseimet korábbi kutatómunkákhoz tartozó vizsgálatok eredményeinek feldolgozásával egészítettem ki. A leöntött próbatestek és a korábbi mérési eredmények adatainak felhasználásával létrehoztam egy olyan adatbázist, amely alapján vizsgálom a feszültségrács próbatest mérési eredményei és a szimulációs eredmények közötti kapcsolatot. [53-56]

A vizsgált feszültségrácsok öntési és metallurgiai körülményei, összetétele, valamint a mért és származtatott értékek a mellékletben találhatóak.

4.2 A VISSZAMARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTÉG ÉS A SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGOK KAPCSOLATA

A visszamaradó öntési feszültség összefügg a lemezgrafitos öntöttvas mechanikai tulajdonságaival és a szövetszerkezetével.

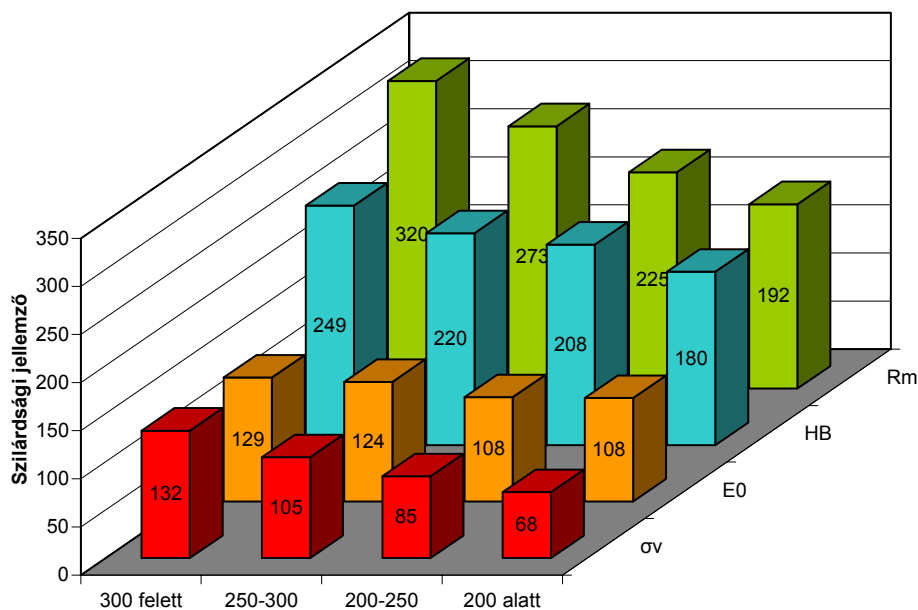
A lemezgrafitos öntöttvasak mechanikai tulajdonságainak vizsgált jellemzője a szakítószilárdság (R_m) és a Brinell keménység (HB). Ezekből származtatott jellemző a rugalmassági modulus (E_0).

A visszamaradó öntési feszültség és a szilárdsági tulajdonságok kapcsolatát a szabványos szilárdsági kategóriák szerinti csoportokat képezve, a mérési eredményeim átlagértéki alapján mutatom be. Az átmérő 32-12 mm geometriájú próbatestek mért és számított értékeinek átlaga a 2. táblázatban található.

2. táblázat
Átmérő 32-12 mm geometriájú próbatestek mért és számított értékek átlaga

	Telítési szám	Grafitosodási hajlam	Szakító szilárdság	Visszamaradó feszültség	Relatív feszültség	Keménység	Rugalmassági Modulus
Öntvény-minőség	Sc	K	R_m , N/mm ²	σ_v , N/mm ²	$(\sigma_v/R_m)^* 100$	HB	E_0 kN/mm ²
GJL-150	0,96	1,62	191,8	68,5	35,7	177,75	107,6
GJL-200	0,93	1,83	225,0	84,9	37,7	221	108,4
GJL-250	0,87	1,35	272,9	104,8	38,4	210,75	124,4
GJL-300	0,82	1,11	319,9	132,3	41,4	232,25	128,9

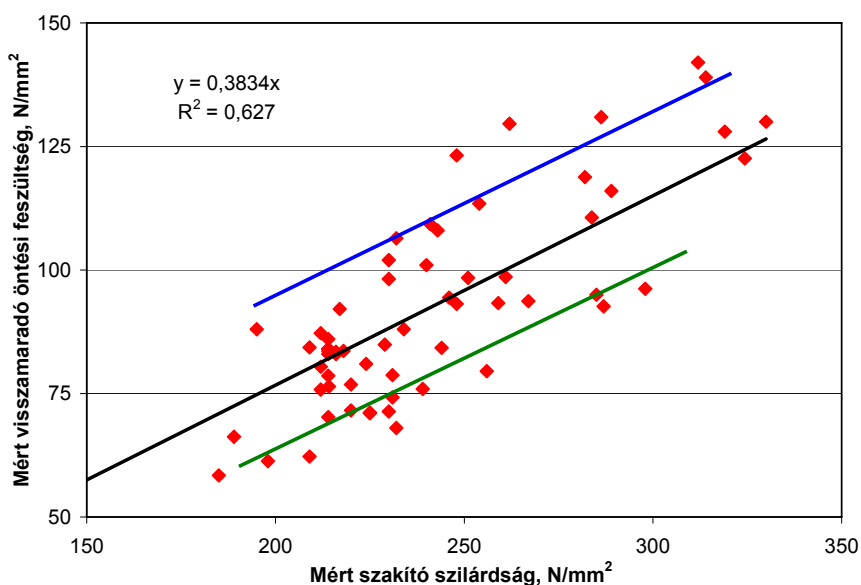
A visszamaradó öntési feszültség és szilárdsági tulajdonságok kapcsolatát a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra A visszamaradó öntési feszültség és a szilárdsági jellemzők összefüggése a szabványos szilárdsági kategóriák szerint

A mérési eredmények statisztikai kiértékelése alapján elmondható, hogy a nagyobb szakítószilárdságú öntvényminőséghez nagyobb visszamaradó öntési feszültség, nagyobb Brinell keménység és nagyobb rugalmassági modulus tartozik.

A visszamaradó öntési feszültség és a szakítószilárdság kapcsolatát a vizsgált próbatestek adatai alapján a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra A szakítószilárdság és a visszamaradó öntési feszültség szilárdsági kategóriák szerinti kapcsolata

A 30. ábra trendvonalának egyenlete

$$\sigma = 0,3834 \cdot Rm \quad (69)$$

A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,63$

A visszamaradó öntési feszültség közelítő értékeként elfogadható, hogy $\sigma_{\text{átlag}} = 0,4 \cdot Rm$.

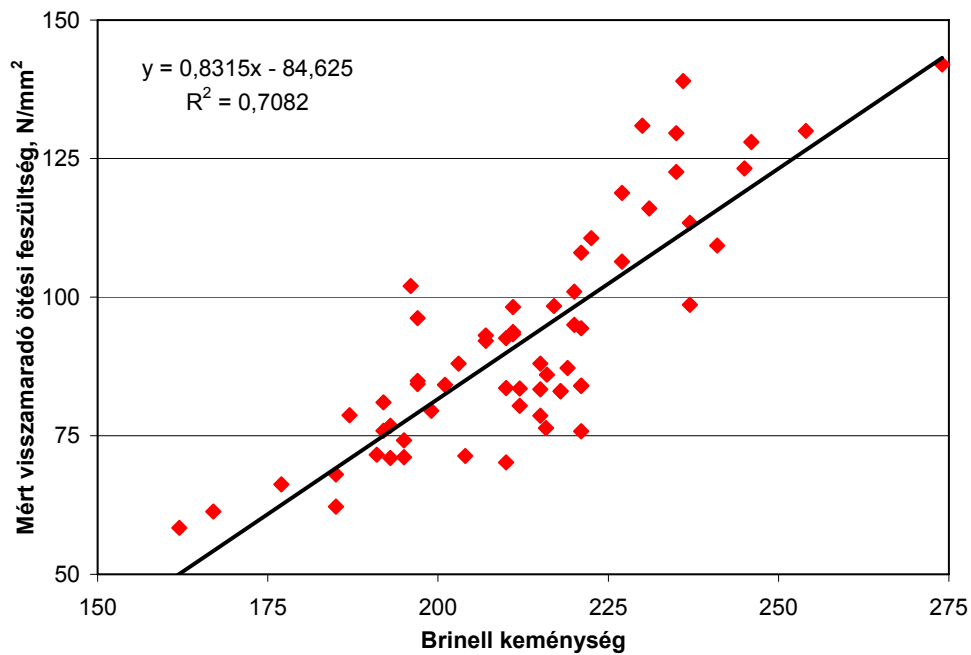
A különböző összetételű, különböző betétanyagból, különböző olvadékkezeléssel előállított próbák mérési eredményei azt mutatják, hogy azonos szakítószilárdság esetén a visszamaradó öntési feszültség jelentős mértékben változik.

A vizsgált próbák metallurgiai jellemzői alapján (lásd melléklet) a közelítő összefüggéshez képest nagyobb feszültség értékeket a kedvezőtlen betétanyagból (öntöttvas töredék, forgács, acélhulladék), illetve a nem megfelelő olvadékkezeléssel, csíráképző beoltással előállított próbák esetén kaptunk. A közelítő összefüggéshez képest kisebb visszamaradó öntési feszültség értékeket a kedvező betétanyagból (hematit nyersvasat is tartalmazó betét), illetve a hatásos csíráképző beoltással előállított próbák esetén kaptunk.

A visszamaradó öntési feszültség összefügg a lemezgrafitos öntöttvas szövetszerkezetével is.

A szövetszerkezet hatásának kimutatására a a Brinell keménység (HB) értékeket használtam.

A visszamaradó öntési feszültség és a Brinell keménység kapcsolatát a 31. ábra szemlélteti.



31. ábra A visszamaradó öntési feszültség és a Brinell keménység kapcsolata

A 31. ábra trendvonalát, vagyis a mérési eredmények kapcsolata egyenes arányosságot feltételezve a

$$\sigma = 0,83 \cdot HB - 85 \quad (70)$$

összefüggéssel írható le, a korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,71$.

Megállapítható, hogy a visszamaradó feszültség várható értéke jobb közelítéssel határozható meg a Brinell keménység értékéből, mint a szakítószilárdság alapján.

Az elvégzett vizsgálatok mérési eredményeinek kiértékelése a szimulációhoz történő felhasználás szempontjai szerint történt. A lemezgrafitos öntöttvasak visszamaradó öntési feszültség viszonyai szimulációjához használt adatbázis nem tartalmazza a szövetszerkezetre utaló keménység értékét, ezért elvégzett vizsgálataim alapján ennek az adatbázisba bevitelét javaslom és indokoltnak tartom.

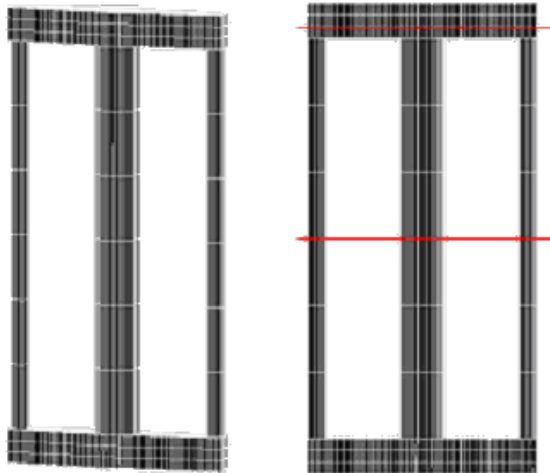
A lemezgrafitos öntöttvasak visszamaradó öntési feszültsége összefügg a kialakult szövetszerkezettel, mely a keménység értékével minősíthető.

A lemezgrafitos öntöttvas visszamaradó öntési feszültség szimulációval történő meghatározásához az E_0 szakirodalmi adatok helyett a szakító szilárdság és Brinell keménység hányadosa alapján meghatározott közelítő érték használható.

Az öntési feszültség szimulációnál ennek hatását vizsgálom.

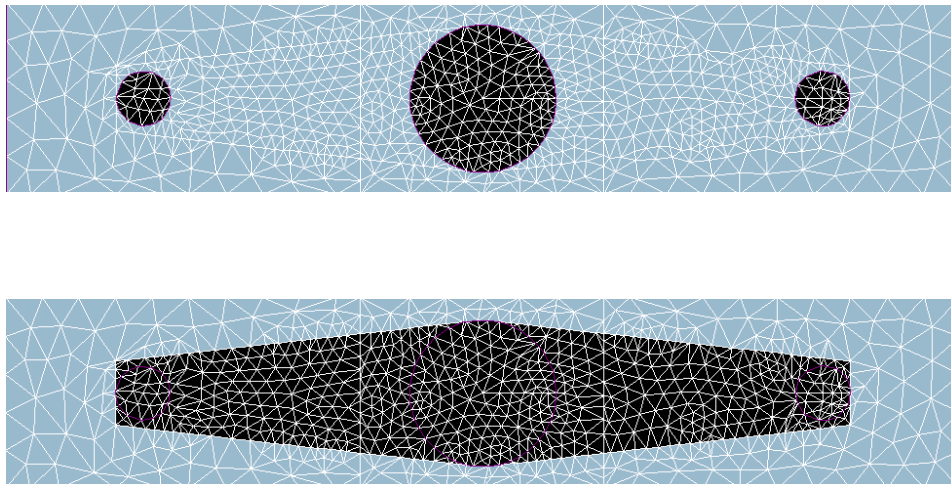
4.3 VISSZAMARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTSG VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓVAL

A véges elemes szimuláció során a feszültséggrács próbatestek CAD geometriájából kiindulva hoztam létre a véges elemes hálót. A 3D véges elemes próbatest geometriáját és annak jellemző geometriai helyein definiált metszetek pozícióját a 32. ábra szemlélteti.



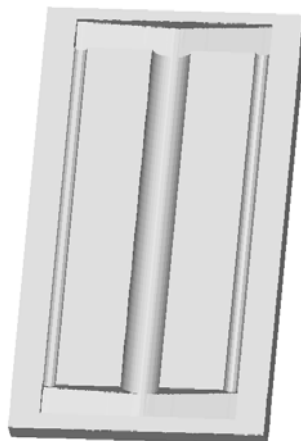
32. ábra A véges elemes próbatest geometria

A 33. ábra a definiált 2D metszeteket szemlélteti az öntvény jellemző geometriai helyein.



33. ábra A definiált 2D metszetek

A vizsgált geometriát körbevevő számítási tartományt, a forma geometriáját a 34. ábra szemlélteti.



34. ábra Az öntvényt körbevevő számítási tartomány, forma geometria

A vizsgált modell hálózása során izotropikus hálózási elvet alkalmaztam, így alacsony elemszám mellett is megfelelő pontossággal tudtam leírni a vizsgált geometriát. Az előállt véges elemes háló adatai:

- csomópontok száma: 830
- metszetek száma: 18
- öntvényt leíró elem száma: 8532
- számítási tartományt leíró elemek száma: 20196

A kiindulási és peremfeltételek megadása során az alábbi bemenő paramétereket definiáltam:

- öntvény anyaga: GJL-200, GJL-300
- öntvény kiinduló hőmérséklete: 1400°C
- forma anyaga: bentonitos homokkeverék
- forma kiinduló hőmérséklete: 25°C
- külső- és belső hőátadási viszonyok hőátadási tényezővel definiálva
- megfogási feltételek a szabadteesszerű mozgás megakadályozására:
 - a középső rúd geometriai középpontjában $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 0$
 - a szélső rúd geometriai középpontjában $\Delta Y = 0$
 - a középső rúd geometriai középpontja felett egy síkkal egy további pontra $\Delta X, \Delta Y = 0$
- gravitációs vektor iránya: $Z=-1$ ($-9,81\text{m/s}^2$)

A szoftver adatbázisa a hőfizikai paramétereket a hőmérséklet függvényében adja meg.

A 3. táblázatban a feszültség számításhoz definiált hőfizikai paraméterek láthatóak.

3. táblázat
Definiált hőfizikai paraméterek

Poisson szám		
	GJL-200	GJL-300
T	NY	
°C	-	
0	0,275	0,26
100	0,282	0,267
200	0,287	0,272
300	0,293	0,278
400	0,298	0,283
500	0,305	0,29
600	0,312	0,297
700	0,319	0,304
800	0,327	0,312

Hőátadási tényező (öv-homok)	
	GJL-200, GJL-300
T	AL
°C	W/cm ² K
25	0,04
725	0,06
950	0,1
1125	0,3
1180	0,4

A szimulációhoz alkalmazott hőtágulási együttható (AP), valamint a visszamaradó öntési feszültség - tangenciális modul értékeinek hőmérséklet-függését a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat
A hőtágulási együttható (AP) és a tangenciális modul (EM) adatbázis szerinti értékei

Hőtágulási együttható		
	GJL-200	GJL-300
Hőm. °C	AP 10 ⁻⁶ /K	AP 10 ⁻⁶ /K
0	10	9,5
200		12,5
400	13	15
600		18
1125	15	18
1180	0	0

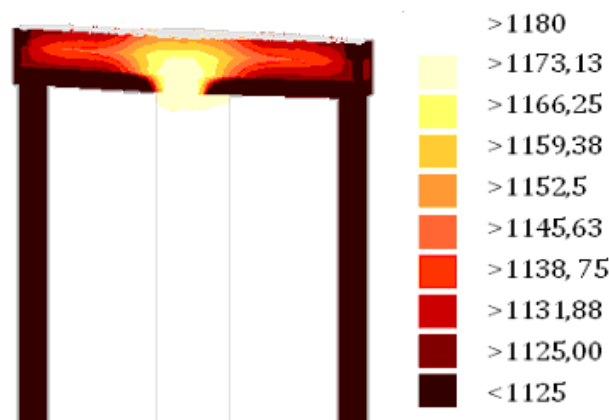
Zsugorodás a dermedés közben:
-2,1%
Grafitkiválás miatti duzzadás:
+1,9%

Tangenciális modul				
	GJL-200		GJL-300	
Hőm. °C	Fesz. N/mm ²	EM 10 ⁶ N/cm ²	Fesz. N/mm ²	EM 10 ⁶ N/cm ²
0	0	10,8	0	11
	160	10,8	195	11
	250	0,01	300	0,01
400	0	10,8	0	11
	160	10,8	195	11
	250	0,01	300	0,01
800	0	5	0	6
	80	5	100	6
	120	0,01	150	0,01
1153	0	0,01	0	0,01
	0,1	0,01	0,1	0,01

A feszültség rács visszamaradó öntési feszültségének szimulációját elvégeztem a 3. és 4. táblázatban található adatbázis szerinti értékek alkalmazásával, valamint a AP és NY módosított értékeinek alkalmazásával is. Először az adatváltoztatással elvégzett szimuláció eredményeit mutatom be.

A szimuláció során ún. „Natural Erstarrung” kiindulási feltételt definiáltam. Ez azt jelenti, hogy az adott geometriát a formatöltés elhanyagolásával vizsgálom, ami azt feltételezi, hogy a számítás kezdeti időpontjában a formaüreg azonos hőmérsékletű olvadékkal van kitöltve és a teljes számítási tartományban homogén hőmérséklettér van, ami megfelelő közelítés a valós viszonyok leírására gravitációs öntési viszonyok és bentonitos homokforma alkalmazása esetén.

Az átmérő 32-12 mm próbatest dermedését GJL-200 anyagminőség esetén a $t=27,5$ s időpillanatban a 35. ábra szemlélteti. Skála: hőmérséklet. T_L-T_s : 1180-1125°C.



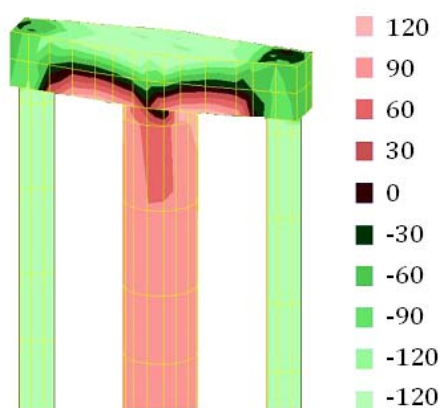
35. ábra A próbatest dermedése

A 35. ábra szemlélteti, hogy a geometriai viszonyokból adódóan a középső vastag rúd lassabban dermed meg, mint a szélső rudak.

A szimulációban külön lehet vizsgálni a koordináta rendszernek megfelelő tengelyirányú feszültséget, az iránytól független főfeszültséget és az előjeltől független Huber - Mises - féle feszültséget.

A visszamaradó öntési feszültségek szimulációjának eredményeiből a főfeszültség értékeket a 36. ábra szemlélteti. Skála: visszamaradó öntési feszültség: -120 - +120N/mm².

A középső rúdban húzófeszültség, a szélső rudakban nyomófeszültség, az összekötő hámban hajlító nyomaték keletkezik.



36. ábra Visszamaradó öntési feszültség

Megvizsgáltam, hogy a szimulációhoz alkalmazott hőfizikai adatok közül melyiknek van jelentős hatása a visszamaradó öntési feszültség és a vetemedés kialakulása szempontjából. Az összefüggések alapján két paramétert választottam ki ellenőrzésre:

- Hőtágulási együttható AP (10-6/K)
- Poisson szám NY (-)

A vizsgált adatok érzékenységeinek vizsgálatához, különböző bemenő adat értékekkel futtattam hőmérséklet - és feszültség számítást az átmérő 32-12 mm-es próbatestre GJL-200 anyagminőség esetén.

Az eredetihez képest megváltoztatott adatok arányát és a megváltoztatott adatok visszamaradó öntési feszültségre gyakorolt hatását a 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat

A próbatestek geometriai középpontjában kialakuló visszamaradó öntési feszültségek

Próba jele	AP	NY	σ_m N/mm ²
32_12 A	100%	100%	100%
32_12 B	125%	100%	126%
32_12 C	75%	100%	76%
32_12 D	100%	125%	136%
32_12 E	100%	75%	87%

Az adatelemzés alapján megállapítható, hogy a hőtágulási együtthatóval egyenes arányosan változik a visszamaradó öntési feszültség és a Poisson szám változtatása is jelentős hatású.

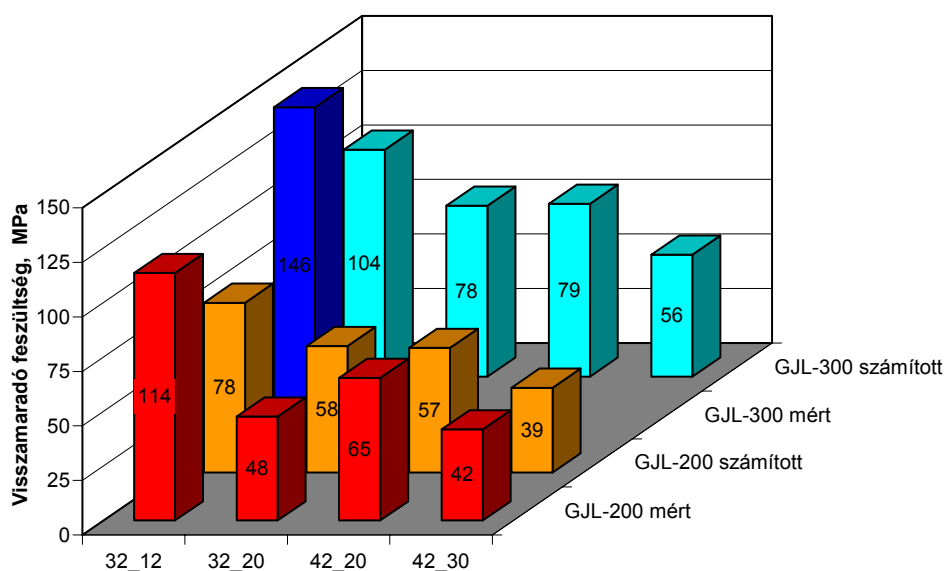
A különböző keresztmetszet arányú feszültséggrác próbatesteken mért és szimulációval számított visszamaradó öntési feszültségek értéke az 6. táblázatban láthatóak.

6. táblázat

A próbatesteken mért és szimulációval számított visszamaradó öntési feszültségek

Átmérő mm	Keresztmetszet arány	GJL-200		GJL-300	
		σ_m mért	σ_m számított	σ_m mért	σ_m számított
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
32_12	7,11	113,5	77,8	145,6	104,1
32_20	2,56	47,7	58,0	-	78,4
42_20	4,41	65,4	57,2	-	79,3
42_30	1,96	41,8	38,9	-	56,0

A mért és számított visszamaradó öntési feszültségek értékeit különböző geometriájú feszültségrácsokon a 37. ábra szemlélteti.



37. ábra A mért és szimulált visszamaradó öntési feszültségek értékei különböző geometriájú feszültségrácsokon

A mérési eredmények szerint a nagyobb keresztmetszet arányhoz nagyobb visszamaradó öntési feszültség tartozik. A szimulációval meghatározott maradó öntési feszültség eredmények az átmérő 32-20 és 42-20 mm méretű próbatestek esetén közel azonos eredményt hoznak.

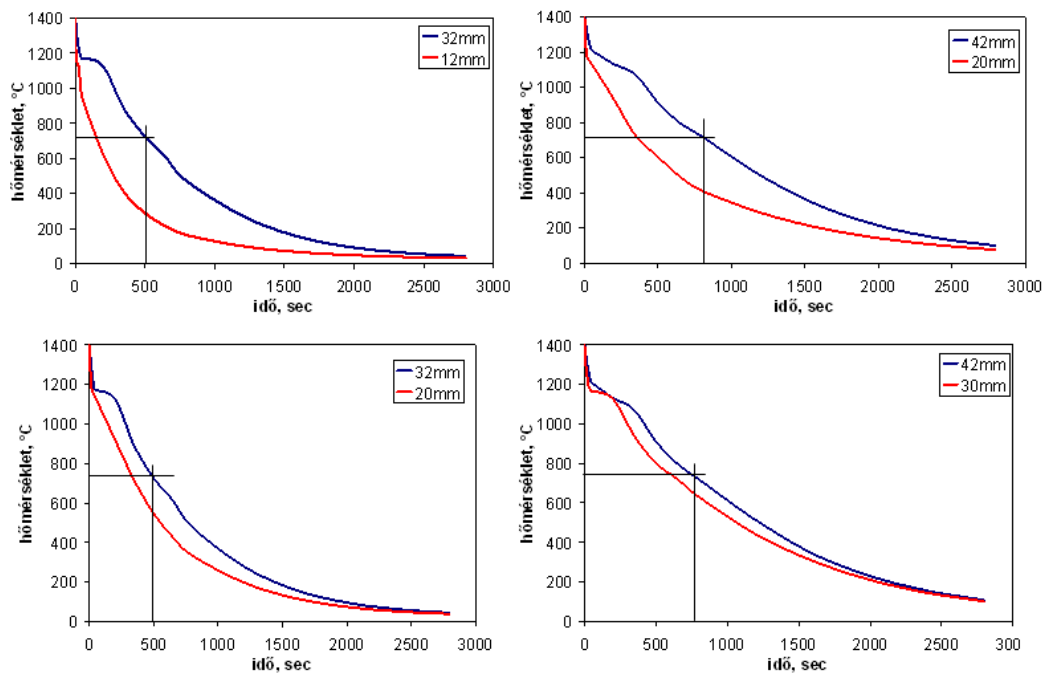
Az próbatestek középső rúdja méréssel és szimulációval meghatározott visszamaradó öntési feszültség eredmények tendenciában azonosak, nagyságot illetően nagyobbak a méréssel kapott eredmények.

Az eltérés a mért és a szimulációval meghatározott eredmények között függ a keresztmetszet aránytól, nagyobb keresztmetszet arány esetén a legnagyobb a mért és a szimulációval kapott eredmény eltérése.

Az eltérés oka az is lehet, hogy a szimuláció nem kezeli megfelelően a zsugorodási tulajdonságokat, valamint a vastag és vékony rúd szövetszerkezetbeli eltérését.

4.4 AZ ÖNTÉSI FESZÜLTSG ÉS A LEHŰLÉSI VISZONYOK KAPCSOLATA

A feszültségrács próbatest hossz tengelyre merőleges szimmetria síkjában a középső és a szélső rúd középpontjában lehűlési görbék adatát vizsgáltam a szimuláció eredményei alapján. A különböző keresztmetszet arányú próbatestek lehűlési görbéit GJL-200 anyagminőség esetén a 38. ábra szemlélteti.



38. ábra A feszültségrács próbatestek rúdjaik geometriai középpontjában felvett lehűlési görbék GJL-200 anyagminőség esetén

A lehűlési görbék kezdőértéke (öntési hőmérséklet) és végső értéke (szobahőmérséklet) azonos, a két szélső időpont között változó hőmérséklet-különbséget mutatnak. Amint az a 3. és a 4. táblázat hőfizikai adataiból is látszik, a lemezgrafitos öntöttvasak esetén az öntési feszültség az A1 átalakulási hőmérsékletet követően alakul ki.

Ennek figyelembe vételével vizsgáltam a kialakuló visszamaradó öntési feszültség és a feszültségrács vastag és vékony rúdja közötti hőmérséklet különbség kapcsolatát. A különböző átmérő kombinációjú feszültségrácsok esetén a vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletének időpontjához tartozó hőmérséklet különbséget jelöltem ki az összefüggések vizsgálatára.

A lehűlési görbéken jelöltem az A1 átalakulás hőmérsékletét. Ahol ez az egyenes el metszi a vastag rúd lehűlési görbéjét, ott az Y tengellyel párhuzamosan levetíték egy

egyenest, ami metszi a vastag és a vékony rudak lehülési görbáját és így meghatározható a vastag rúd A1 hőmérsékletéhez tartozó hőmérséklet különbség (ΔT_{A1}). Az így mért hőmérsékletkülönbség értékek és a szimulációval meghatározott visszamaradó öntési feszültség (középső rúd főfeszültsége) értékek a 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat

A hőmérséklet-különbség és a visszamaradó öntési feszültség kapcsolata

	GJL-150		GJL-200		GJL-300	
Átmérő, mm	ΔT_{A1} °C	σ_v N/mm ²	ΔT_{A1} °C	σ_v N/mm ²	ΔT_{A1} °C	σ_v N/mm ²
32-12	428,1	64,3	437,3	77,9	436,1	104,1
32-20	163,9	46,9	179,5	58,0	174,5	78,4
42-20	299,9	51,3	308,1	57,2	308,3	79,3
42-30	77,9	36,7	90,0	38,9	89,6	56,0

Az elvégzett szimulációs vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a visszamaradó öntési feszültség várható értéke meghatározható a vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó, időben kialakuló vastag-vékony rúd hőmérsékletkülönbsége alapján.

- GJL-150 anyagminőség esetén az összefüggés az (-) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,956$.

$$\sigma_v = 0,0726 \cdot \Delta T_{A1} + 32,185 \quad (71)$$

- GJL-200 anyagminőség esetén az összefüggés az (-) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,8633$.

$$\sigma_v = 0,0976 \cdot \Delta T_{A1} + 33,221 \quad (72)$$

- GJL-300 anyagminőség esetén az összefüggés az (-) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,8811$.

$$\sigma_v = 0,1214 \cdot \Delta T_{A1} + 48,833 \quad (73)$$

A visszamaradó öntési feszültség várható értéke a szakító szilárdság és a vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó, időben kialakuló vastag-vékony rúd hőmérsékletkülönbsége alapján:

$$\sigma_v = (0,0003 \cdot Rm + 0,0299) \cdot \Delta T_{A1} + (0,1178 \cdot Rm + 12,563) \quad (74)$$

5. VISSZAMARADÓ ÖNTÉSI FESZÜLTSG ÉS MÉRETPONTOSSÁG SZIMULÁCIÓJA VALÓS ÖNTVÉNYEN

A visszamaradó öntési feszültséggel terhelt öntvények méretpontosságával kapcsolatos méréseimet a németországi Georg Fischer Mettmann cégnél végeztem, az RWP GmbH-val együttműködve. A vizsgálatok célja egy olyan szimulációs algoritmus kidolgozása volt, mely a vasöntődén belül működő prototípus öntöde munkáját segíti.

A Georg Fischer cégcsoport Mettmann-i öntödéjében járműipari öntvényeket állítanak elő jellemzően gömbgrafitos öntöttvasból. Az üzemben a nagy gyártási szériák miatt már kis százaléknyi selejt is nagy veszteséget jelent. A hibák egyik fő oka az öntvények vetemedése, aminek oka a nem egyenletes falvastagságból adódó eltérő dermedési idő indukált feszültségek kialakulása. A vetemedések az öntvény végső méreteinek megváltozását okozzák, amik így nem felelnek meg a tűréseknek, és azokat nem lehet felhasználni. A problémát felismerve az üzemen belül méretpontosságot ellenőrző laboratóriumi műszeres mérést vezetnek be (random test), de annak költsége és időszükséglete indokoltá tette a folyamatok véges elemes módszerrel való vizsgálatát.

5.1 A GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIA BEMUTATÁSA

Kísérleteim során egy olyan öntvényt kellett vizsgálatra kiválasztanom, mely reprezentálja a gyártási technológiát, a méretpontossággal kapcsolatos problémákat, valamint az öntvény geometria kialakítása lehetővé teszi a véges elemes analízis alkalmazását. A vizsgálatra kiválasztott öntvény egy járműipari keréktartó alkatrész (Schwenklager), mely személygépjárművek futóművébe kerül beépítésre. [56-58]

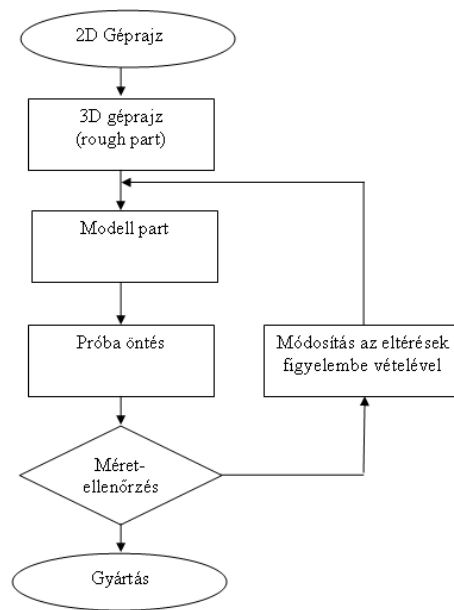
A vizsgált öntvény anyaga gömbgrafitos öntöttvas ötvözet (Fe26Spe4). Összetétele a szabványostól eltérő, csak a +GF+ öntödében alkalmazott: C% 3,42-3,68; Si% 1,97-2,33; Mn% max. 0,22; Cu% max. 0,12. A szimuláció elvégzéséhez meghatározásra kerültek a szükséges hőfizikai paraméterek, melyek a 6. táblázatban láthatóak.

A vizsgált ötvözet hőfizikai paraméterei

Hővezető képesség		Látens hő		Hőkapacitás	
°C	W/cmK	°C	J/cm ³	°C	J/cm ³ K
100	0,39	720	0	200	3,8
200	0,36	730	0,151	500	3,95
300	0,33	1153	0,152	800	5,09
400	0,3	1153,2	0,5	1000	5,17
500	0,27	1153,5	0,94	1200	5,096
600	0,25	1159	0,941	1400	5,74
700	0,23	1159,5	0,95	1500	5,52
800	0,21	1161	1		
900	0,19				
1000	0,169				
1100	0,149				
1200	0,128				
1300	0,107				

Hőátadási tényező (Fe-sand)		Hőtágulási együttható	
°C	W/cm ² K	°C	10 ⁻⁶ /K
25	0,04	0	4,22
725	0,06	200	5,56
950	0,1	400	6,67
1153	0,4	600	8
1161	0,7	1153	8

A keréktartó alkatrész gyártása során visszamaradó öntési feszültségek keletkeznek, melyek az öntvény vetemedését okozzák. A deformácók / vetemedések vizsgálatának alkalmazott üzemben alkalmazott technológia sorát a 39. ábra szemlélteti.



39. ábra A deformácók / vetemedések vizsgálatának üzemi technológia sora

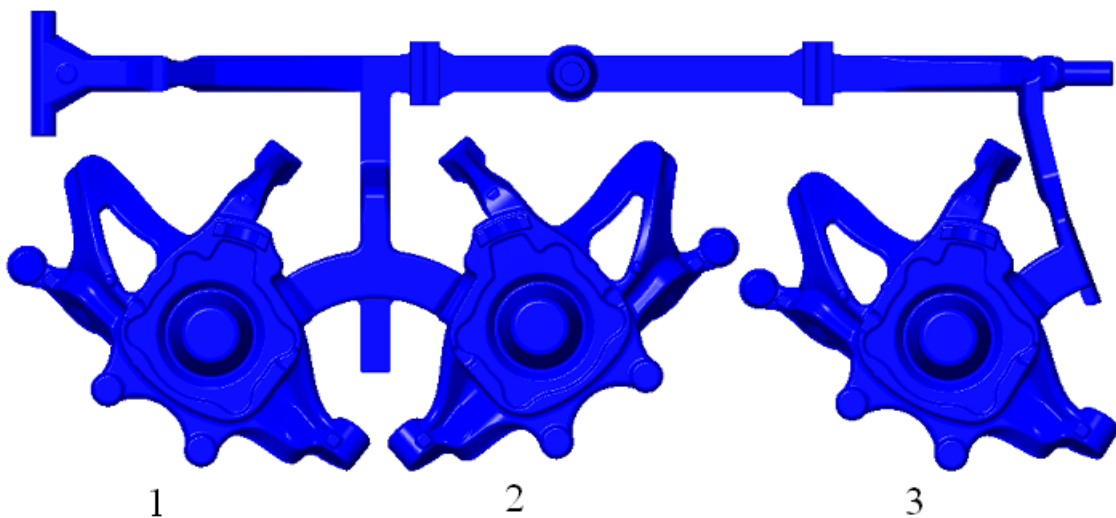
Az üzemben alkalmazott gyártási folyamat lépései az alábbiak:

- Kétdimenziós gépészeti rajz beérkezése a megrendelőtől: 2D géprajz.
- A kétdimenziós gépészeti rajz alapján háromdimenziós CAD modell készítése: rough part.
- Technologizálás. A CAD modell módosítása a zsugorodási értékek figyelembevételével korábbi tapasztalatok alapján és beömlő és táplálórendszer kialakítása: Modell part.
- Prototípus széria leöntése.
- Az öntvények végső méreteinek ellenőrzése 3D letapogatásos méret ellenőrzéssel: random test. A mérést a 40. ábra szemlélteti.
- Ha az ellenőrzött méreteltérések nagyobbak a tűrés által engedélyezetttnél, akkor a CAD geometria módosítása.
- Ha az ellenőrzött méreteltérések a tűrésnek megfelelnek, sorozatgyártás indítása.



40. ábra 3D letapogatásos méret ellenőrzés (random test)

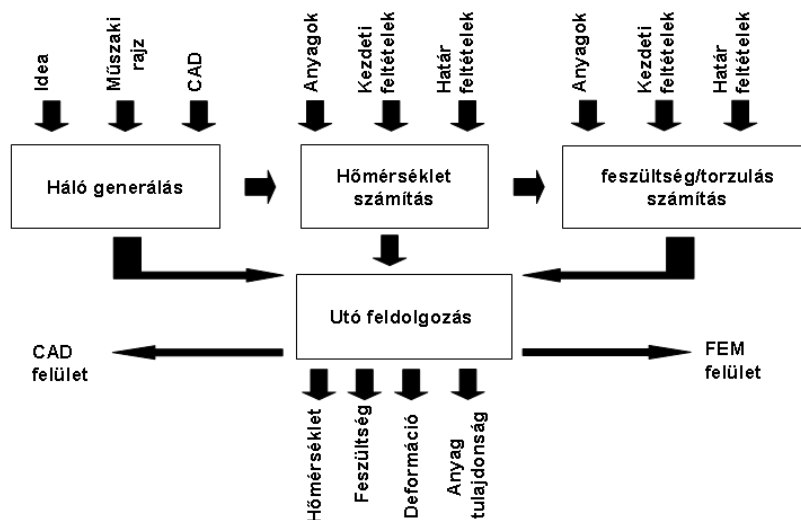
A gyártás során a formaszekrényben egyszerre hat öntvény kerül leöntésre. Mivel az öntvénycsokor szimmetrikus, így a szimulációs számítás során megfelelő izolációs feltételek előírásával lehetővé válik csak a fél öntvénycsokor vizsgálata, mely jelentős számítási kapacitás megtakarítást eredményez. A szimuláció során alkalmazott fél öntvénycsokor CAD rajzát a 41. ábra szemlélteti. A fészkeket az azonosíthatóság miatt beszámoltam.



41. ábra A vizsgált rész öntvénycsokor CAD rajza és a fészek kiosztás

5.2 A KIDOLGOZOTT SZIMULÁCIÓS FOLYAMAT ISMERTETÉSE

A számítások során a 42. ábra által reprezentált logikai rendszert alkalmaztam.



42. ábra A szimuláció kidolgozott logikai rendszere

A szimuláció folyamata három részre osztható:

1. Pre-processing (előkészítő folyamat): geometria bevitele, hálógenerálás, kezdeti- és határfeltételek részleges definíciója.
2. Main-processing (számítási folyamatok): kezdeti- és határ feltételek definíciója, hőmérsékletmező számítása. Visszamaradó öntési feszültségek számítása az előállt inhomogén hőmérséklet térben.
3. Post-processing (kiértékelés): eredmények kiértékelése, geometria vizsgálata CAD rendszerben, vagy véges elemes felületen.

A hálógenerálás során a Modell part CAD geometriájából kiindulva hoztam létre az izotropikus véges elemes hálót. Az előállt véges elemes háló adatai:

- csomópontok száma: 15109
- metszetek száma: 93
- összes elemszám: 29836

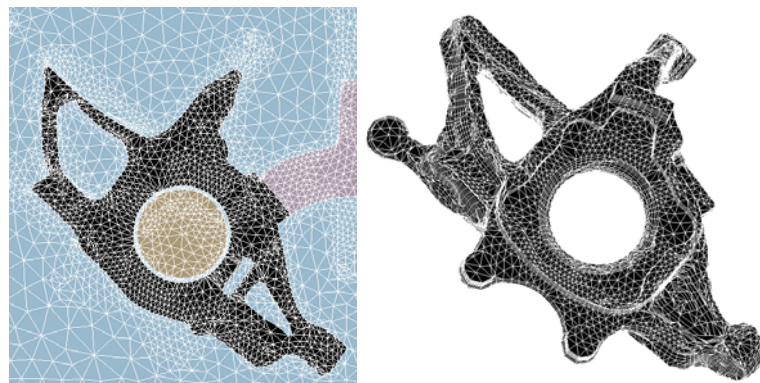
A kiindulási és peremfeltételek megadása során az alábbi bemenő paramétereket definiáltam:

- öntvény anyaga: Fe26spe4
- öntési hőmérséklet: 1370°C
- öntési idő: 12s
- forma anyaga bentonitos homokkeverék
- forma kiinduló hőmérséklete: 25°C
- külső és belső hűtadási viszonyok hűtadási tényezővel definiálva
- megfogási feltételek a szabadteszterű mozgás megakadályozására: a szimmetriasíkon lévő csomópontokra $\Delta Y=0$ és egy további központi csomópontra $\Delta Y, \Delta Z=0$.
- gravitációs vektor iránya: $Z=-1$ ($-9,81\text{m/s}^2$)

A manuális hálógenerálás során előállt véges elemes geometriát a 43. ábra és a 44. ábra szemlélteti. A geometrián különböző színekkel jelöltem az egyes öntvényrészeket, hogy a kiértékelés során azok külön-külön vizsgálhatóak legyenek.



43. ábra Az vizsgált háromdimenziós véges elemes geometria

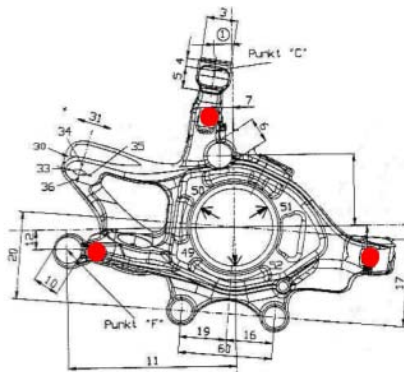


44. ábra Az öntvény két- és háromdimenziós hálója

Az üzemi technológia és a véges elemes rendszer működése alapján kidolgoztam egy szimulációs folyamatot, melynek segítségével a véges elemes rendszeren belül kezelhetővé válik az öntvények méretpontosságának vizsgálata. A kidolgozott folyamat az alábbi lépésekből áll.

1. lépés

Háló generálása a Modell part CAD geometria alapján. A 40. ábra szemlélteti a 3D letapogatásos méret ellenőrzést. Az ábrán látható, hogy a méretellenőrzés során az öntvényt egy tartóra helyezzük, mely három, előre definiált ponton rögzíti az öntvényt (rögzítési pontok). Fontos, hogy ezeknek a pontoknak a véges elemes rendszeren belüli koordinátái, valamint a pontok egymáshoz viszonyított helyzete megegyezzenek a valós méretellenőrzés során alkalmazott rögzítési pontokkal, hogy a szimulált és a méréssel meghatározott méretek összehasonlíthatóak legyenek. A geometria rögzítési pontjait a 45. ábra szemlélteti.



45. ábra Rögzítési pontok a méretellenőrzés során

2. lépés

Határ- és peremfeltételek definiálása. Szimmetrikus geometriák vizsgálata esetén lehetséges, hogy csak a geometria egy részét vegyük figyelembe, a szimmetria tengely mentén osztva a darabot. A szimmetriasíkon lévő elemekre hőmérsékleti és szilárdsági izolációt kell előírni.

- hőmérsékleti izoláció: a definiált hőátadás a síkra merőlegesen nulla
- szilárdsági izoláció: a visszamaradó öntési feszültség számítása során további peremfeltételek megadása szükséges. Ha a valós geometriának csak egy részét vizsgáljuk, akkor definiálni kell, hogy a szimmetriasíkon lévő csomópontok ne mozdulhassanak át a szimmetriasíkon. Ehhez a szimmetria síkon lévő összes elemre

$\Delta Y=0$ megfogási paramétert kell definiálni. Továbbá a szimmetriasík mértani középpontjában lévő csomópontra $\Delta Y=\Delta Z=0$ megfogási paramétert kell definiálni, amivel megakadályozzuk a geometria esetleges szabadtest-szerű elmozdulását.

3. lépés

Dermedés és lehülés számítása. Visszamaradó öntési feszültségek számítása a hőmérséklet számítás eredményeként előállt inhomogén, időben változó hőmérséklettérben.

4. lépés.

A visszamaradó öntési feszültségek hatására vetemedett öntvény geometria exportálása CAD modellé.

5. lépés

A vetemedett CAD geometria beolvasása a hálógeneráló modulba és az alapján új véges elemes háló generálása.

6. lépés

Az új véges elemes háló pozicionálása. A vetemedett geometriának megfelelő háromdimenziós véges elemes háló eltolása és elforgatása, melynek célja, hogy a rögzítési pontok koordinátái megegyezzenek az első pontban meghatározottakkal és teljesüljenek az ott definiált feltételek. Ezt a lépést minden formaüregben lévő öntvény esetén külön-külön kell elvégezni. Az így előállított véges elemes hálót orientált véges elemes geometriának neveztem el.

7. lépés

Az orientált véges elemes háló a módosítások (elforgatás, eltolás) miatt, nem felel meg a véges elemes hálóval szemben támasztott követelményeknek. Ezért az orientált véges elemes háló alapján egy orientált CAD modellt hozok létre.

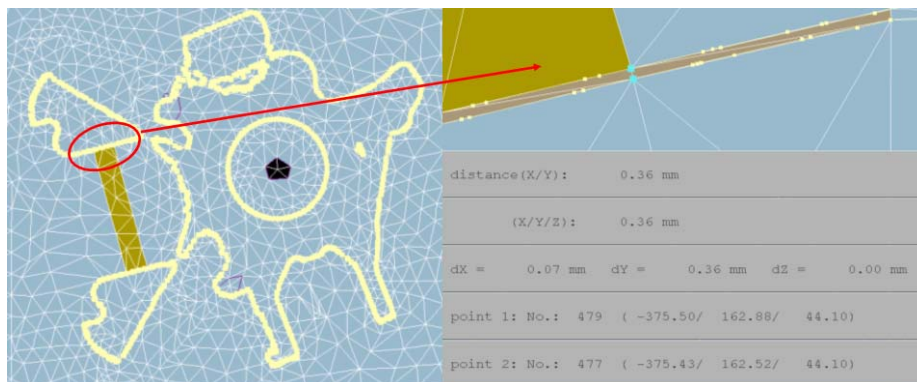
8. lépés

Az orientált CAD modell beolvasása a hálógeneráló modulba. Automatikus hálógenerálás futtatása.

9. lépés

Az ellenőrizendő méretek meghatározása a véges elemes hálón. A véges elemes háló annak ellenére alkalmas a méretek (sugár, átmérő, távolság, bezárt szög)

meghatározására, hogy nem felel meg a véges elemes hálóval szemben támasztott követelményeknek. Az 46. ábraán példaképpen bemutatom egy távolság meghatározását a véges elemes hálón. A mért távolság értéke 0,36mm. A mérésre szolgáló háromszög elem befogójának mérete annak ellenére meghatározható, hogy az elem a befogó kis mérete, és ebből adódóan az egyik bezárt szög túl alacsony értéke miatt nem felel meg a véges elemes hálóval szemben támasztott követelményeknek. [59-62]

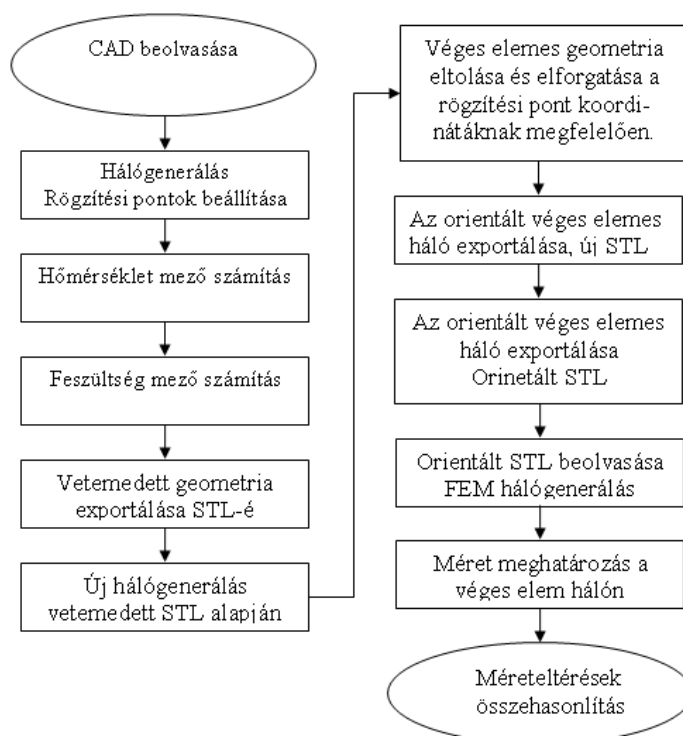


46. ábra Méretek meghatározása a véges elemes hálón

10. lépés

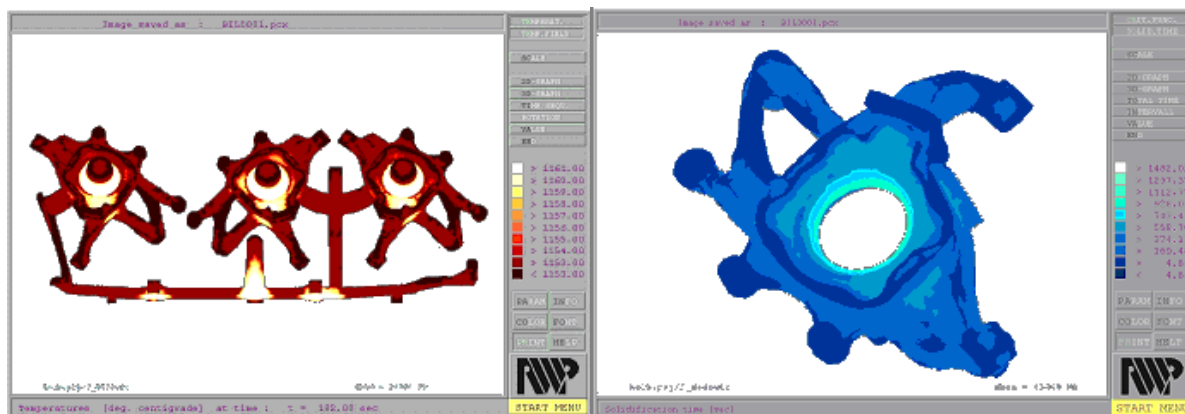
A mért és a számított méretek összehasonlítása.

A kidolgozott szimulációs folyamat vázlatát a 47. ábra szemlélteti.



47. ábra A kidolgozott szimulációs folyamat

Az öntvény dermedését az öntést követő 142. másodpercben a 48. ábra bal oldali része szemlélteti. Skála: hőmérséklet, T_L-T_S : 1153-1161°C. Az öntvény dermedési idejét a 48. ábra jobb oldali része szemlélteti. Skála: dermedési idő: 4,84-1482s.

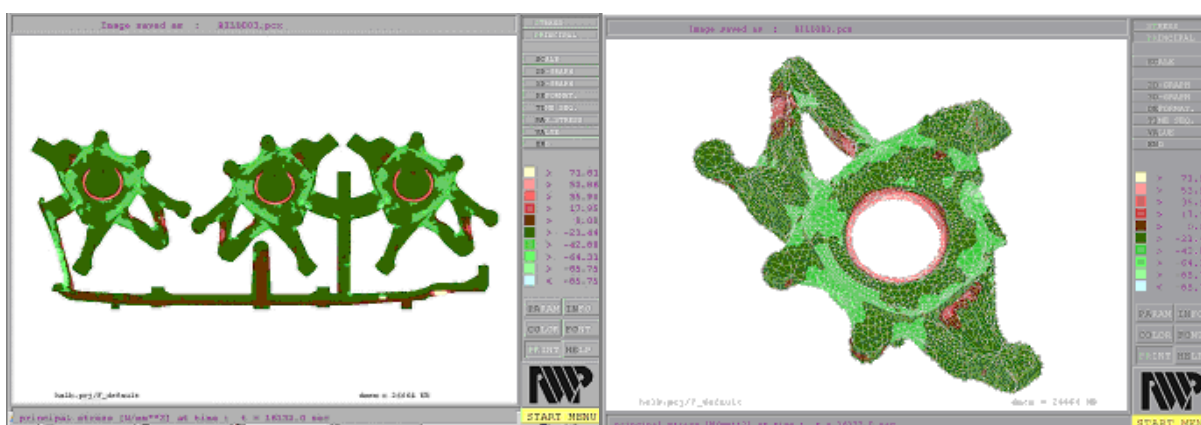


48. ábra Az öntvénycsokorban kialakuló hőcentrumok

Hőmérséklet skála: $T=1153-1161^{\circ}\text{C}$

Dermedési idő skála: $t=4,84-1482\text{s}$

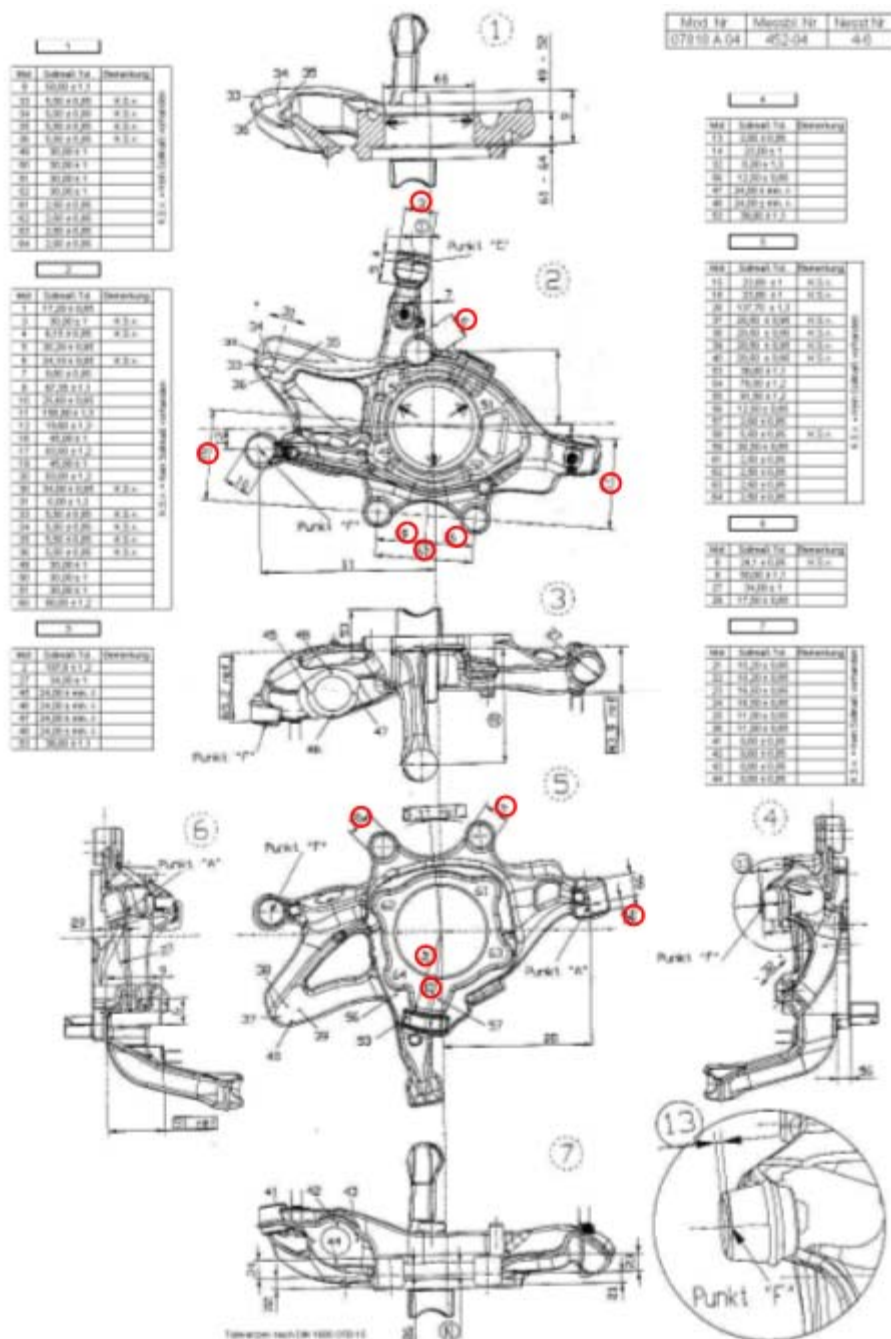
A geometriai viszonyokból adódóan hőcentrumok alakultak ki az öntvény középső részén a tápfej csatlakozásánál, a beömlő rendszerben és a tápfejek környezetében. Az eltérő dermedési sebességek miatt visszamaradó öntési feszültségek ébrednek, amik az öntvény vetemedését okozzák. Az öntvényben kialakuló visszamaradó öntési feszültségeket a 49. ábra szemlélteti.



49. ábra Visszamaradó öntési feszültségek

Skála: visszamaradó öntési feszültség: $-85,75-71,81\text{N/mm}^2$; $t=1613\text{s}$

A valós öntvények méretpontosságának meghatározására háromdimenziós letapogatásos méret ellenőrzést végeztem, melynek során az öntvény 65 méretét ellenőriztem. A 50. ábra szemlélteti az öntvény 3D letapogatásos méretellenőrzéssel meghatározott méreteit.



50. ábra Az öntvény 3D letapogatásos méretellenőrzéssel rögzített méretei

(Az ábra a mellékletben nagy méretben található)

A háromdimenziós letapogatásos méretellenőrzés eredményei alapján határoztam meg, hogy a kidolgozott szimulációs eljárással mely méreteket kívánom ellenőrizni. Ehhez ismerni kell a 50. ábra ellenőrzött méreteinek tűrését. A méretek tűrései a 7. táblázatban láthatóak.

7. táblázat: Mérettűrések

szám	tűrés	szám	tűrés	szám	tűrés	szám	tűrés
1	$17,20 \pm 0,85$	20	$83,00 \pm 1,2$	36	$5,50 \pm 0,85$	52	$30,00 \pm 1$
2	$107,8 \pm 1,2$	21	$10,20 \pm 0,85$	37	$20,50 \pm 0,95$	53	$38,00 \pm 1,1$
3	$30,00 \pm 1$	22	$10,20 \pm 0,85$	38	$20,50 \pm 0,95$	53	$38,00 \pm 1,1$
4	$6,15 \pm 0,85$	23	$16,50 \pm 0,85$	39	$20,50 \pm 0,95$	53	$38,00 \pm 1,1$
5	$20,20 \pm 0,95$	24	$16,50 \pm 0,85$	40	$20,50 \pm 0,95$	54	$78,50 \pm 1,2$
6	$24,10 \pm 0,95$	25	$11,00 \pm 0,85$	41	$0,00 \pm 0,85$	55	$91,50 \pm 1,2$
7	$9,80 \pm 0,85$	26	$11,00 \pm 0,85$	42	$0,00 \pm 0,85$	56	$12,50 \pm 0,85$
8	$67,35 \pm 1,1$	27	$34,00 \pm 1$	43	$0,00 \pm 0,85$	56	$12,50 \pm 0,85$
8	$24,1 \pm 0,85$	27	$34,00 \pm 1$	44	$0,00 \pm 0,85$	57	$2,00 \pm 0,85$
9	$50,00 \pm 1,1$	28	$137,70 \pm 1,3$	45	$24,00 \pm \text{min.} / -$	58	$5,50 \pm 0,85$
9	$50,00 \pm 1,1$	29	$17,50 \pm 0,85$	46	$24,00 \pm \text{min.} / -$	59	$20,50 \pm 0,85$
10	$25,60 \pm 0,85$	30	$34,00 \pm 0,95$	47	$24,00 \pm \text{min.} / -$	60	$90,00 \pm 1,2$
11	$158,80 \pm 1,3$	31	$0,00 \pm 1,3$	47	$24,00 \pm \text{min.} / -$	61	$2,50 \pm 0,85$
12	$19,60 \pm 1,3$	32	$0,00 \pm 1,3$	48	$24,00 \pm \text{min.} / -$	61	$2,50 \pm 0,85$
13	$2,00 \pm 0,85$	33	$5,50 \pm 0,85$	48	$24,00 \pm \text{min.} / -$	62	$2,50 \pm 0,85$
14	$23,00 \pm 1$	33	$5,50 \pm 0,85$	49	$30,00 \pm 1$	62	$2,50 \pm 0,85$
15	$23,80 \pm 1$	34	$5,50 \pm 0,85$	49	$30,00 \pm 1$	63	$2,50 \pm 0,85$
16	$45,00 \pm 1$	34	$5,50 \pm 0,85$	50	$30,00 \pm 1$	63	$2,50 \pm 0,85$
17	$83,00 \pm 1,2$	35	$5,50 \pm 0,85$	50	$30,00 \pm 1$	64	$2,50 \pm 0,85$
18	$23,80 \pm 1$	35	$5,50 \pm 0,85$	51	$30,00 \pm 1$	64	$2,50 \pm 0,85$
19	$45,00 \pm 1$	36	$5,50 \pm 0,85$	51	$30,00 \pm 1$		

A 3D letapogatásos méretellenőrzés eredményei, valamint az előírt mérettűrések alapján a normális eloszlás sűrűségfüggvényének segítségével határoztam meg az ellenőrizendő méreteket. Azokat a méreteket választottam ki, melyek az előírt tűrések kétharmadánál nagyobb mértékben tértek el. A kiválasztott méretek a 50. ábra pirossal jelzett méretei:

3, 6, 16, 19, 16&19, 15, 17, 18, 20, 54, 55, 58, 60 méretek.

5. 3 A SZIMULÁCIÓS PROJEKT EREDMÉNYEI

Az öntvény kiválasztott kritikus méreteit ellenőriztem véges elemes szimulációval, ami a három formaüregben összesen 39 ellenőrzött méretet jelent. Az így meghatározott méreteket hasonlítottam össze a háromdimenziós letapogatásos méretellenőrzés során rögzített értékekkel és a két adatbázist formaüregenként, valamint összesítve is összehasonlítottam. A háromdimenziós letapogatásos méretellenőrzéssel és a szimulációval meghatározott értékek a 8. táblázatban láthatóak.

8. táblázat

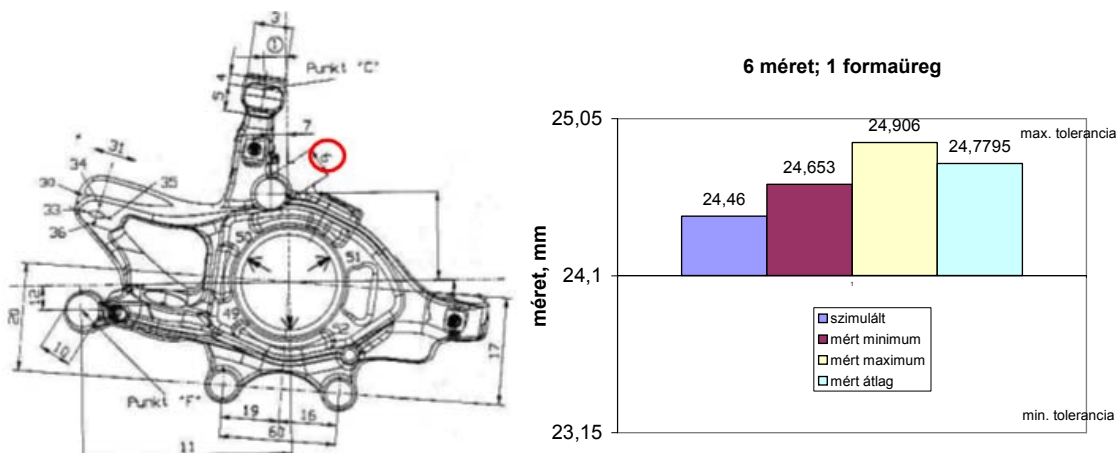
Számított és mért értékek (mm)

méret	7818 (jobbos öntvény)					7817 (balos öntvény)				tűrés
	1 üreg	3 üreg	3D méret meghatározás			2 üreg	3D méret meghatározás			
	sim	sim	X _{min}	X _{max}	átlag	sim	X _{min}	X _{max}	átlag	
6	24,46	24,7	24,653	24,906	24,7795	24,56	24,622	24,743	24,6825	24,1 ± 0,95
16	44,4	45,06	45,332	45,868	45,6	45,21	45,405	45,800	45,6025	45 ± 1
19	45,74	45,07	44,169	44,793	44,481	45	44,275	44,703	44,489	45 ± 1
16&19	90,14	90,13	89,501	90,661	90,081	90,21	89,680	90,503	90,0915	-
54	80,28	80,14	80,129	80,633	80,381	80,24	80,116	80,574	80,345	78,5 ± 1,2
58	9,32	9,23	9,038	9,671	9,3545	9,19	8,974	9,724	9,349	5,5 ± 0,85
3	30,59	30,67	30,277	30,787	30,532	-	-	-	-	30 ± 1
60	90,14	90,13	89,647	89,807	89,727	90,21	89,670	89,801	89,7355	90 ± 1,2
55	91,04	90,99	90,788	91,379	91,0835	91,22	90,763	91,286	91,0245	91,5 ± 1,2
18	24,10	23,84	24,107	24,266	24,1865	24,14	24,056	24,277	24,1665	23,8 ± 1
15	23,98	23,86	24,095	24,280	24,1875	24,06	24,129	24,281	24,205	23,8 ± 1
20	83,13	83,21	83,075	83,692	83,3835	83,02	83,145	83,551	83,348	83 ± 1,2
17	83,00	82,93	82,929	83,316	83,1225	83,09	82,806	83,380	83,093	83 ± 1,2

Az alábbiakban három különböző típusú méret ellenőrzését mutatom be: átmérő (6. méret), távolság (3. méret) és sugár (54. méret). A többi méret meghatározása a mellékletben található.

6 méret

A 51. ábra a 6. ellenőrzött méret pozícióját és méreteit mutatja.



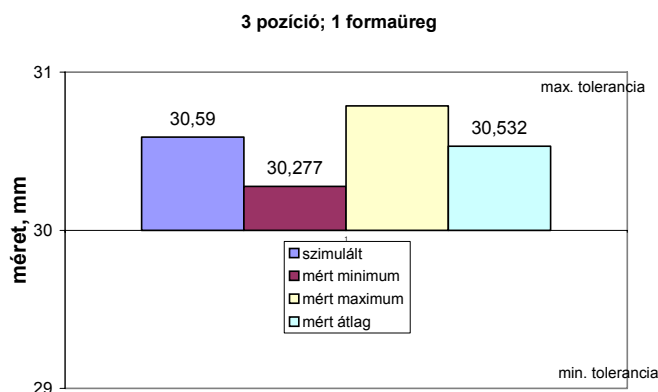
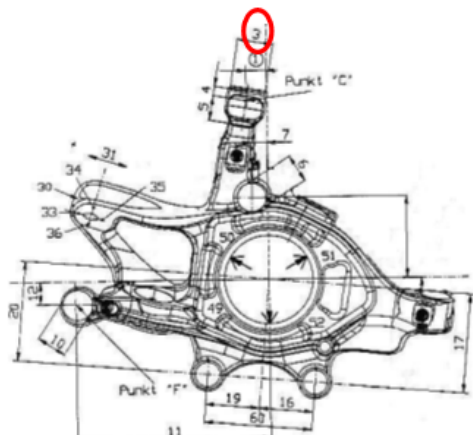
51. ábra A 6. ellenőrzött méret pozíciója és méretei

6. méret értékei az 1. formaüregben:	24,46mm
Eltérés a mért minimum értéktől:	0,193mm
Eltérés a mért maximum értéktől:	-0,446mm
Eltérés a mért- és szimulált átlag értékek között:	0,3195mm
Átlagos szimulált méret:	24,5733mm
Átlagos mért érték:	24,731mm
Eltérés:	-0,1577mm
Tolerancia:	±0,95mm

Az eltérés a szimulált és a mért értékek között -0,1577mm, a tolerancia értéke ±0,95mm, tehát a szimuláció megfelel a toleranciának.

3. méret

Az 52. ábra a 3. ellenőrzött méret pozícióját és méreteit mutatja.



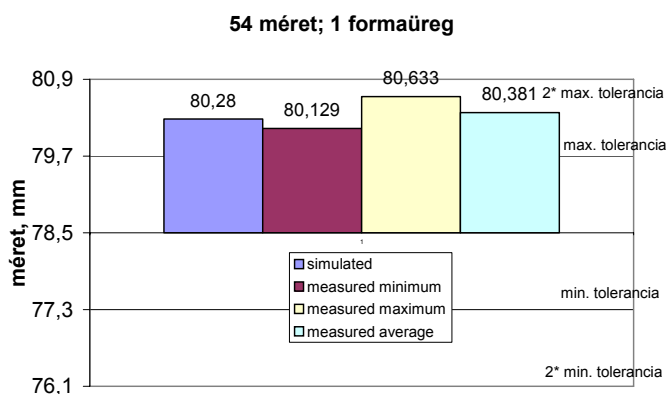
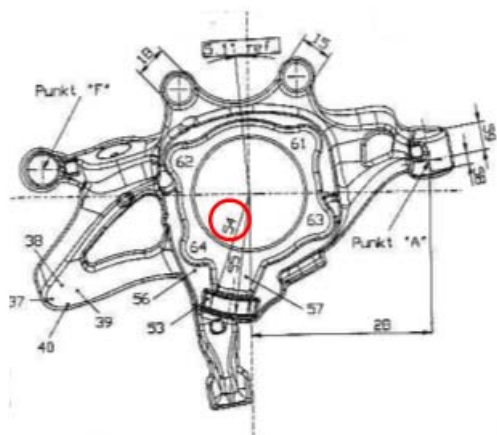
52. ábra A 3. ellenőrzött méret pozíciója és méretei

A 3. méret értékei az 1. formaüregben:	30,59mm
Eltérés a mért minimum értéktől:	0,313mm
Eltérés a mért maximum értéktől:	-0,197mm
Eltérés a mért- és szimulált átlag értékek között:	-0,058mm
Átlagos szimulált méret:	30,63mm
Átlagos mért érték:	30,532mm
Eltérés:	0,098mm
Tolerancia:	±1mm

Az eltérés a szimulált és a mért értékek között +0,098mm, a tolerancia értéke ±1mm, tehát a szimuláció megfelel a toleranciának.

54 méret

Az 53. ábra az 54. ellenőrzött méret pozícióját és méretet mutatja.



53. ábra Az 54. ellenőrzött méret pozíciója és méretei

54 méret értékei az 1. formaüregben:	80,28mm
Eltérés a mért minimum értéktől:	0,151mm
Eltérés a mért maximum értéktől:	-0,353mm
Eltérés a mért- és szimulált átlag értékek között:	-0,11mm
Átlagos szimulált méret:	80,22mm
Átlagos mért érték:	80,363mm
Eltérés:	-0,143mm
Tolerancia:	±1,2mm

Az eltérés a szimulált és a mért értékek között -0,143mm, a tolerancia értéke ±1,2mm, tehát a szimuláció megfelel a toleranciának.

A 9. táblázaton láthatóak a szimulációval és a méréssel meghatározott méretek átlag értékei.

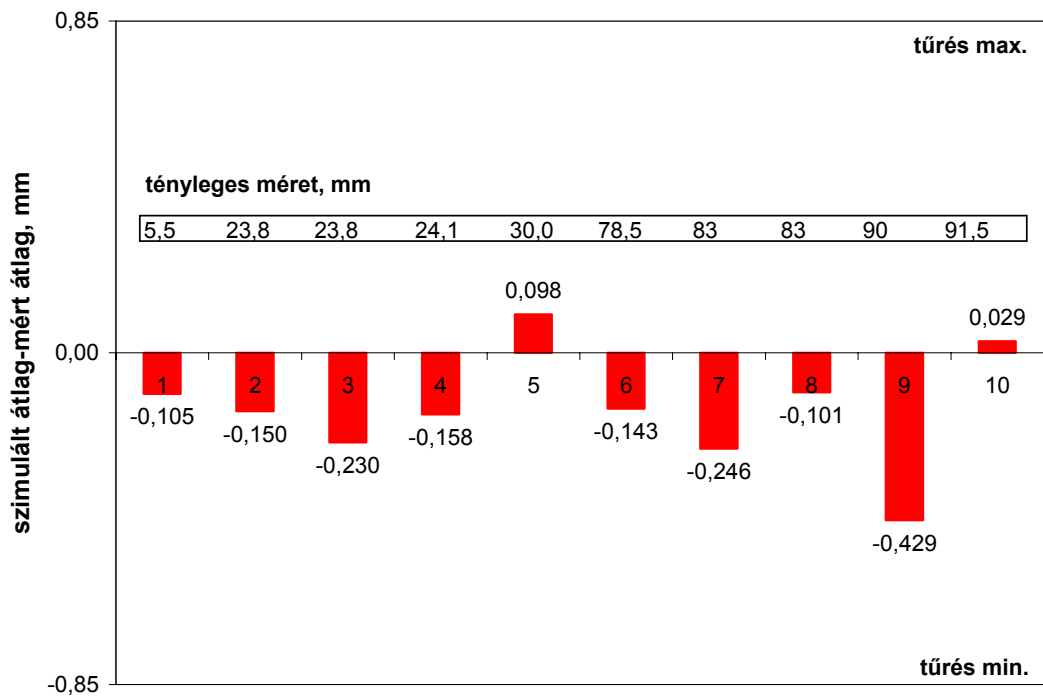
9. táblázat

A szimulációval és a méréssel meghatározott méretek átlag értékei

pozíció	tényleges méret, mm	mért átlag, mm	szimulált átlag, mm	mért-szimulált átlag, mm
58	5,5	9,352	9,247	-0,105
18	23,8	24,177	24,027	-0,150
15	23,8	24,196	23,967	-0,230
6	24,1	24,731	24,573	-0,158
3	30	30,532	30,630	0,098
54	78,5	80,363	80,220	-0,143
20	83	83,366	83,120	-0,246
17	83	83,108	83,007	-0,101
60	90	89,731	90,160	-0,429
55	91,5	91,054	91,083	0,029

A háromdimenziós letapogatásos méretellenőrzéssel meghatározott és a véges elemes módszerrel számított értékek közötti eltérések nagysága +0,029mm és -0,429mm között változnak. Az előírt legkisebb mérettűrési értéke $\pm 0,85\text{mm}$. A korrelációs együttható értéke a mért és a szimulált adatok között: $R^2=0,9997$

A kidolgozott szimulációs algoritmus minden ellenőrzött méretre azt az eredményt adta, hogy az eltérés a háromdimenziós letapogatásos méretellenőrzéssel meghatározott- és a véges elemes módszerrel számított értékek között teljesítette a tolerancia elvárásait. Az 54. ábra az eltérések összegzését mutatja.



54. ábra Eltérés a 3D letapogatásos méretellenőrzéssel meghatározott- és a véges elemes módszerrel számított méretek között

A méreteltérések és a tényleges méretek nagysága között nincs szoros összefüggés, közel azonos eltéréseket kaptam a tényleges mérettől függetlenül. Az eltérések többsége negatív, ezek a bonyolult geometriájú öntvény helyi falvastagság eltéréseivel összefüggő zsugorodási viszonyokkal hozhatóak kapcsolatba.

Kidolgoztam egy olyan algoritmust, melyben összekapcsoltam a véges elemes szimuláció alkalmazásával a CAD geometriában előállított és a valós öntvényen mért méreteket. A szimulációval kialakult méreteket visszaviszem a CAD geometriába és annak a szimuláció adatai alapján történő módosítása biztosítja a méretpontos öntvénygyártást.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori disszertációmban a méretpontos öntvénygyártás vizsgálatával és szimulációjával foglalkoztam. Az öntvények méretpontosságát – különösen a high-tech öntvények esetén – befolyásolják a visszamaradó feszültségekből eredő torzulások, esetleg hibák. Ilyenek pl. gépjárművek biztonsági alkatrészei, nyomdagépek öntvényei, repülőgép alkatrészek, stb.

Ezért célkitűzésem a visszamaradó feszültségek okozta méreteltérésekből adódó hibák csökkentése. Célom ezen folyamatok vizsgálata, öntött próbatesteken és szimuláció segítségével

A feszültségrács próbatestekkel kapcsolatos vizsgálataim mérési eredményeinek statisztikai kiértékelése alapján elmondható, hogy adott szakítószilárdságú öntvényhez a visszamaradó öntési feszültség értékek tág határok között változnak.

A különböző összetételű, különböző betétanyagból, olvadékkezeléssel előállított próbák mérési eredményei azt mutatják, hogy azonos szakítószilárdsághoz a visszamaradó öntési feszültség jelentős mértékben változik. Az általam meghatározott közelítő összefüggéshez képest ($\sigma_{\text{átlag}} = 0,4 \cdot R_m$) nagyobb feszültség értékek a kedvezőtlen betétanyagból (öntöttvas töredék, forgács, acélhulladék), ill. a nem megfelelő olvadékkezelés, csíráképző beoltással előállított próbák esetén kaptunk. A közelítő összefüggéshez képest kisebb visszamaradó öntési feszültség értékek a kedvező betétanyagból (hematit nyersvasat is tartalmazó betét), ill. hatásos csíráképző beoltással előállított próbák esetén kaptunk.

Megvizsgáltam a visszamaradó öntési feszültség és a kísérleteim során mért és származtatott értékek közötti összefüggéseket. Ezek közül a visszamaradó öntési feszültség és a Brinell-keménység kapcsolatát vizsgáltam részletesen, mivel a mért keménység a szövetszerkezetre jellemző szilárdsági mérőszám.

A mérési eredmények kiértékelése alapján a visszamaradó öntési feszültség várható értéke jobb közelítéssel határozható meg a Brinell-keménység értékéből, mint a szakítószilárdság alapján.

Az öntött próbatestek középső rúdja meghatározott húzófeszültség eredményei tendenciában azonosak, nagyságot illetően nagyobbak a szimuláció alapján a középső rúd, geometriai középpontjában meghatározott főfeszültség értékekkel. Az eltérés a mért és a szimulációs eredmények között függ a keresztmetszet aránytól, nagyobb keresztmetszet arány esetén a legnagyobb a mért és a szimulációval kapott eredmény eltérése. Az eltérés oka az lehet, hogy a szimuláció nem kezeli megfelelően a vastag és vékony rúd méretváltozását és szövetszerkezetbeli eltérését.

A méréssel és szimulációval kapott eredmények eltérése indokolja, hogy az öntési feszültség szimulációhoz használt tangenciális modul (EM) értéknek a mért szakítószilárdság és a Brinell-keménység hányadosa alapján számolt rugalmassági modulus értéket használjuk.

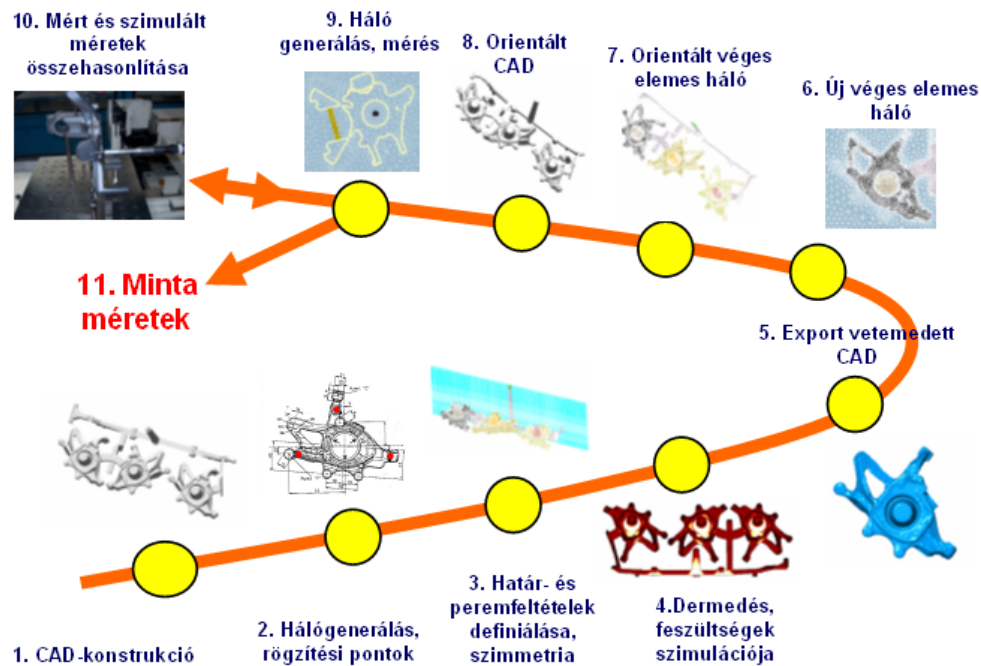
A visszamaradó öntési feszültség és a lehülési viszonyok kapcsolatát vizsgáltam az öntési feszültség értéke és a feszültségrács vastag és vékony rúdja közötti hőmérséklet különbség alapján. A különböző átmérő kombinációjú feszültségrácsok esetén a vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó időponthoz tartozó hőmérséklet különbséget jelöltem ki az összefüggések vizsgálatára.

A lehülési görbéken jelöltem az A1 átalakulás hőmérsékletét. Ahol ez az egyenes el metszi a vastag rúd lehülési görbét, ott az Y tengellyel párhuzamosan levetíték egy egyenest, ami metszi a vastag és a vékony rudak lehülési görbét és így meghatároztam a vastag rúd A1 hőmérsékletéhez tartozó hőmérséklet különbséget (ΔT_{A1}).

Az elvégzett szimulációs vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a visszamaradó öntési feszültség várható értéke meghatározható a vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó, időpontban kialakuló vastag-vékony rúd hőmérsékletének különbsége alapján.

A valós öntvény visszamaradó öntési feszültségeinek és méretpontosságának vizsgálata során egy járműipari biztonsági alkatrész gyártástechnológiáját vizsgáltam.

Az elvégzett nagyszámú mérés és szimulációs vizsgálat alapján kidolgoztam egy olyan algoritmust, mellyel nagy pontossággal számíthatóak a visszamaradó öntési feszültségek okozta vetemedések és az ebből adódó méretpontossági hibák. Az algoritmust az 55. ábra szemlélteti.



55. ábra A kidolgozott szimulációs algoritmus

A kidolgozott algoritmusban összekapcsoltam a véges elemes szimuláció alkalmazásával a CAD geometriában előállított és a valós öntvényen mért méreteket. A szimulációval kialakult méreteket visszaviszem a CAD geometriába és annak a szimuláció adatai alapján történő módosítása biztosítja a méretpontos öntvénygyártást.

7. SUMMARY

The subject of this PhD dissertation is the examination and simulation of the dimension accurate casting process. Dimension accuracy of the castings -especially in case of high-tech castings like automotive parts, printing machine parts and aircraft safety parts- influenced by the residual stress state and the distortions. My target is the reduction of the residual stress caused dimensional imperfection errors and the examination of these processes in casted parts and by the help of computer simulation.

By the help of the statistical estimation of casted specimens we can tell that in case of a given tensile strength the value of the residual stress is changing in a wide range.

The effect of different base materials-, charge compositions- and melting processes is, that in case of a given tensile strength the value of the residual stress is changing in a wide range. I have determined the $\sigma_{\text{átlag}} = 0,4 \cdot Rm$ approximate correlation. Specimens with a higher residual stress value are casted from unfavourable charge material (cast iron fragments, chips, steel waste) and with improper melt treatment and inoculation. Specimens with a lower residual stress value are casted from favourable charge material (charge containing hematite iron-ore) and with efficient nucleation inoculation.

I have examined the correlations between residual stress and measured-derived values. I have examined the connection between the residual stress and Brinell hardness in details because the measured hardness is related to the grain texture. As a result we can tell that the value of the probable residual stress can be better calculated by the help of Brinell hardness than using tensile strength.

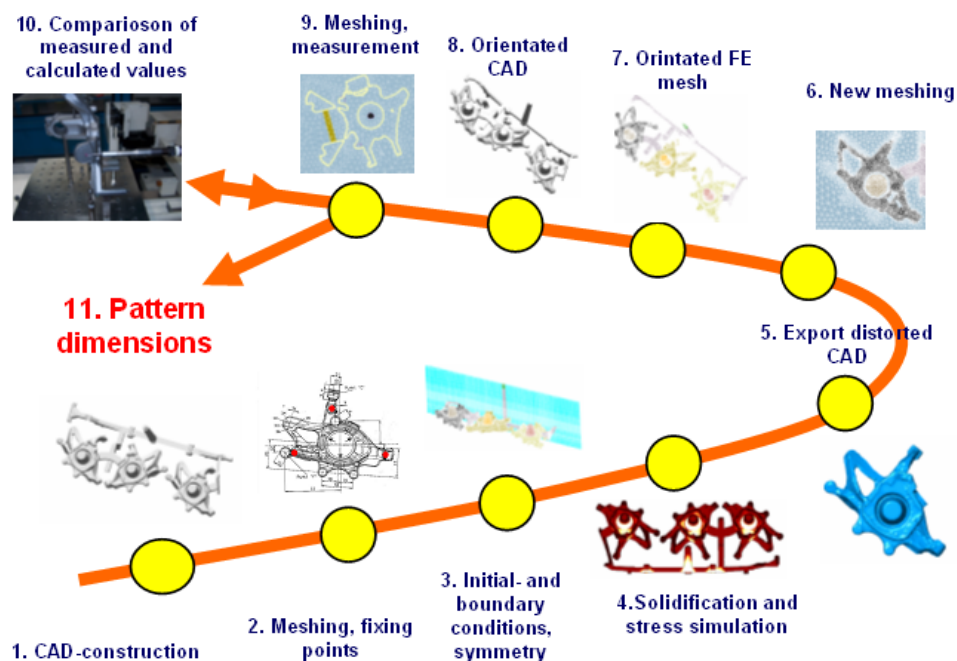
The tensile stress value of the stress harp are analogous to the calculated principal stress values in the middle of the thicker bar of the specimen. The difference between measured and calculated values depends on the cross-section ratio: higher cross-section ratio effects higher difference. The reason can be that simulation doesn't handle adequate the dimensional change- and the grain texture difference on the bars of the specimen.

Because of the deviation between measured and calculated values it is reasonable to use the calculated modulus of elasticity instead of tangential modul (EM) because the modulus of elasticity is a quotient of the measured tensile strength and Brinell hardness.

I have examined the connection between cooling states and residual stress by the help of the cooling curves of the specimen bars. I have determined the temperature difference of the cooling curves at the moment when the thick bar reaches the A1 temperature. I have examined specimens with several -section ratio.

On the cooling curves I have sign the A1 temperature. Where this line sections the thick bars cooling curve I have project a line parallel to the Y axis. This line sections both cooling curves and it is possible to determine the ΔT_{A1} temperature difference. We can tell that the residual stress value can be calculated by the help of the ΔT_{A1} temperature difference.

I have examined the manufacturing process, the residual stress state and the dimensional accuracy of a real automotive casting part. By the help of numerous measurement and simulation process I have elaborated a simulation algorithm which is suitable for the calculation of the residual stress induced distortions and the dimensional accuracy defects. The algorithm can be seen on the following figure.



I have elaborated an algorithm which connects the dimensions originated from the CAD system and the measured values of the real casting by the help of finite elemen analysis. I feedback the measured dimensions of the finite element system to the CAD geometry and the modification of the casting pattern, which is given by the simulation results ensure the castings correct dimensions.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezem ki köszönetemet tudományos vezetőmnek, Dr. Dúl Jenőnek, aki figyelmemet a szimuláció felé fordította, munkámat mindvégig támogatta és a dolgozat megírásához nélkülözhetetlen segítséget nyújtott.

Köszönettel tartozom a Metallurgiai és Öntészeti Tanszék munkatársainak, különösen Dr. Jónás Pálnak és Dr. Tóth Leventének a szakmai és emberi támogatásért.

Köszönöm az RWP GmbH munkatársainak, Dr. Konrad Weißnak, Dr. Christoph Honselnek és Annegret Weißnak, hogy németországi kutatómunkám során biztosították a folyamatos szakmai fejlődés lehetőségét. Külön köszönöm Maria Feige odaadó barátságát.

Köszönöm a németországi Georg Fischer Automotive Mettmann öntöde munkatársainak, hogy lehetővé tették méréseim elvégzését.

Köszönöm az ARGE Metallguß munkatársainak Dr. Thomas Heckelnek és Léránth Gábornak, hogy rendelkezésemre álltak szimulációs problémáim megoldásával kapcsolatosan.

Köszönöm Dr. Jaromir Roucka, Dr. Vladimir Krutis és Ales Veverka támogatását a Brno University of Technology-ról.

Köszönöm a DAAD, a Leonardo da Vinci Program és az Erasmus Program támogatását.

Hálás vagyok családom és barátaim támogatásáért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Friedrich Klein, Eugenius Pokora, Dúl Jenő: A nyomásos cinköntvények dermedésének számítógépes szimulálása
Bányászati és Kohászati Lapok, 129. évfolyam 1. szám, 1996
2. Michael Franken: Simulation von Gießereiprozessen
Giesserei Kompakt, 2004/2
3. Martin Brahman: Angewandtes Wissensmanagement in Gießereinetzwerken
Giesserei, 2006/11
4. Shannon Wetzel: Simulation, not just for the big guys
Modern Casting, 2008 September
5. www.thefreedictionary.com
6. <http://en.wikipedia.org>
7. www.investorwords.com
8. Gulyás László: Modellek, reprezentációk és összehasonlítások a számítógépes szimulációkban
ELTE TTK, Tudománytörténet és Tudományfilozófia Tanszék, 2006
9. Nikosz Fokasz, Szabados László: A káosz kutatás új eredményei
Magyar Tudomány, 2002. 10
10. Bárány Lászlóné szerk.: Magyar Nagylexikon
Budapest, 2003
11. Jávor A., Benkő T.: Diszkrét rendszerek szimulációja
Műszaki könyvkiadó Budapest, 1979
12. Bohdan Mochnecki, Jozef S. Suchy: Numerical methods in computations of foundry processes
Polish Foundrymen's Association, Krakow, 1995
13. Arno Louvo: Casting Simulation as a Tool in Concurrent Engineering
International ADI and Simulation Conference, Finland, 1997
14. Mathias Todte: Prognose der Mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gußteilen durch numerische Simulation des Erstarrungsprozesses
Dissertation, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg, 2003
15. Tony C. Midea, David Schmidt: 1999 Casting simulation software survey
Modern Casting, 1999 May.
16. O. Göser, M. Aloe: Der virtuelle Weg zum Gussteil
Giesserei-Praxis Special, 2007/6

17. Wojcieh Kapturkiewicz, Edvard Fras: Why is the computer modelling needed in casting?
Przegląd Odlewnictwa, 1/2005
18. Lawrence E. Smiley: Calculating Riser Size, Location via CAD Models
Modern Casting, March 2002
19. Edward Vinarik: Succeeding with Concurrent Engineering
Modern Casting, February 2005, p.36-38
20. Michael Barkhudarov, Gengsheng Wei: Modelling Casting on the Move
Modern Casting, August 2006,
21. A. Lechner, H. Cramer: Verbesserung von Aluminiumschweißkonstruktionen durch neue Berechnungsmethoden
International Aluminium Journal, 2007 December
22. Regina Lenz: Simulationstechnologien
Giesserei, 2007/10
23. Páczelt István: Végeselem módszer a mérnöki gyakorlatban
Miskolci Egyetemi Kiadó 1999
24. Erwin Flender: Gießtechnische Simulation
Giesserei 2009/5
25. Kenneth H. Huebner: Finite element for engineers
John Willey & Sons, Canada 2001
26. M. Gremaud: Modeling of foundry processes: differences between various solutions
AFS Transactions, 2001
27. Dr. Gausz Tamás: Szárnyprofil, szárny és légcsavar vizsgálata
BME 1995
28. Dr. W. Cho, Prof. N. M. Patrikalakis: Computational geometry
Massachusetts Institute of Technology, 2003
29. Method and system for optimizing a finite element mesh; United States Patent 6970165
30. Joachim Wendt, Anu Piira: Automatic finite element mesh generation for industrial use
VTT Technical Research Centre of Finland, 1995
31. O.P. Gupta: Finite and boundary element methods in engineering
Swets & Zeitlinger Publishers, 2002
32. SIMTEC/WinCast User's Manual
Roetgen, Germany, 2003

33. Kurutzné Kovács Márta, Scharle Péter: A végelem-módszer egyszerű elemei és elemcsaládjai
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
34. Y.Zheng, J. Cross, A.S. Usmani, R.W. Lewis: Finite element meshing techniques in casting modelling
VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1995
35. V.P.Iu, L.N. Lamas, Y.P. Li, K.M. Mok: Computational methods in engineering and science
Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003
36. Jörg C. Sturm, Guido Busch, Jens Spangenberg: Stand der simulation für gusseisen
Giesserei Kompakt, 2/2004
37. Richter, W.: Numerische Lösung partieller Differentialgleichungen mit der Finite-Elemente-Methode
Vieweg, Braunschweig, 1986
38. Grigorieff, R. D.: Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen Band 1
Teubner, 1972
39. Schwartz, H. R.: Numerische Mathematik
Stuttgart, 1986
40. Prinz B., Neite G., Schulze T., Klodt, J., Honsel, C.: Messung und Modellierung des Einflusses von Schichten auf den Wärmüebergang zwischen Schmelze/Gußstück und Kokille beim Dauerformguß von Aluminiumlegierungen
BMFT Zárójelentés, 1995
41. Hahn, H. G.: Einführung in die Methode der finiten Elemente in der Festigkeitslehre
Frankfurt, 1975
42. Christoph Honsel: Die Berechnung von Wärme- und Eigenspannungen infolge von Abkühlprozessen mit der Methode der tangentialen Steifigkeiten
Dissertation RWTH Aachen, 1992
43. Bathe, K. J.: Finite-Elemente-Methoden
Berlin, 1986
44. Truckenbrodt E.: Fluidmechanik Band 1
Springer-Verlag Berlin, 1980
45. Dr. Nándori Gyula: Elméleti öntészet II.
Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
46. B.G. Thomas: Stress Modeling of Casting Processes: An Overview
Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993
47. R. Allen Miller: Prediction of Part Distortion in Die Casting
The Ohio State University, 2002 February 12

48. Erik Gustafsson: Optimization of Castings by using Surrogate Models
Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 1325, 2007 October
49. E. Gustafsson: Residual Stresses in Castings, a literature review
Linköping, Sweden 2007
50. E. Gustafsson, M. Hofwing, N. Strömberg: Simulation and Measurement of Residual Stresses in a Stress Lattice
Linköping, Sweden 2007
51. NovaCast Technologies AB: Understanding Novastress;
User Guide, Ronneby, Sweden, 2007
52. Dr.-Ing. A. Egner-Walter, S. Olive: Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings
Metallurgical Science and Technology; volume 24 n.º2
53. Az olvasztástechnológia korszerűsítése, Zárójelentés
Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1977
54. Hazai acélnyersvasak átolvasztása indukciós tégelykemencében, Zárójelentés
Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1980
55. Vékonyfalú lemezes és gömbgrafitos öntvénygyártáshoz használható nagy hatékonyságú módosítóanyag előállítása, Zárójelentés
Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1989
56. W. Menk, S. Prukner, L. Kniewaller: Gussteile erobern das Hoheitsgebiet der Schmiedeteile;
Giesserei, 2007/12
57. Georg Fischer Staff: An wirtschaftliche Rahmenbedingungen angepasst
Giesserei, 2009/1
58. Michael J. Lessiter: Engineered cast components for the automotive industry
Engineered Casting Solutions, 2000 Fall
59. Naoto Sakakibara: Finite Element Method in Fracture Mechanics
The University of Texas, Austin, 2008
60. Pamela J. Waterman: Meshing, The Critical Bridge
Desktop Engineering, Vol. 13, 2008 Aug.
61. Pär Fransson, Gert Pettersson: Fatigue Life Prediction using Forces in Welded Plates of Moderate Thickness
Department of Mechanical Engineering, University of Ronneby, Sweden, 2000
62. Peter Thor: Knowledge driven preprocessing for weld simulation
Lulea University of Technology, Sweden, 2006

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A lemezgrafitos öntöttvasak visszamaradó öntési feszültsége összefügg a kialakult szövetszerkezettel, mely a keménység értékével minősíthető.

Megállapítottam, hogy az öntöttvas szilárdsági és minőségi jellemzői közül a visszamaradó öntési feszültség és a Brinell-keménység összefüggése adja a legjobb korrelációt:

$$\sigma_v = 0,83 * HB - 85$$

2. A lemezgrafitos öntöttvas visszamaradó öntési feszültségének szimulációval történő meghatározásához az EM jelű tangenciális modul értékének megadásához az E_0 szakirodalmi adatai helyett a szakító szilárdság és Brinell keménység hányadosa alapján meghatározott értéke adja a mért értékekkel jobban megegyező szimulációs értékeket.
3. Megállapítottam, hogy a visszamaradó öntési feszültség várható értéke meghatározható a különböző szakítószilárdságú kategóriájú öntvények esetén a szimmetrikus feszültség rács vastagabb rúdjának A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó időpontban, a vastag- és a vékony rúdban kialakuló hőmérsékletek különbsége alapján.

- GJL-150 anyagminőség esetén:

$$\sigma_v = 0,0726 \cdot \Delta T_{A1} + 32,185$$

- GJL-200 anyagminőség esetén:

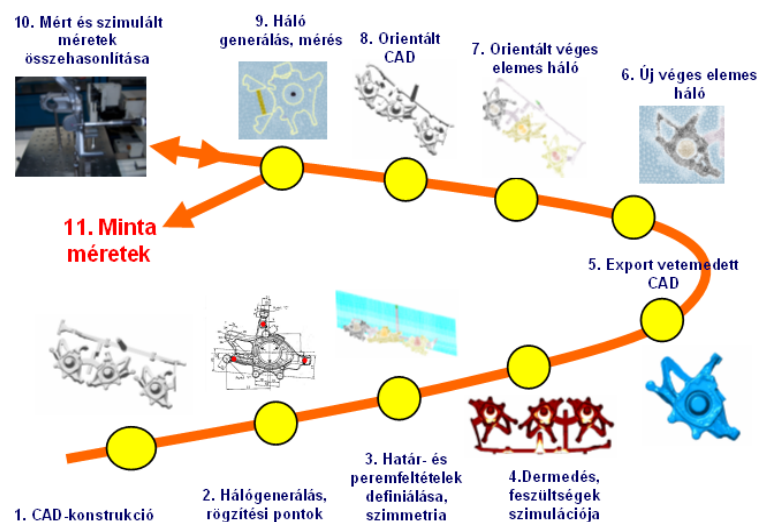
$$\sigma_v = 0,0976 \cdot \Delta T_{A1} + 33,221$$

- GJL-300 anyagminőség esetén:

$$\sigma_v = 0,1214 \cdot \Delta T_{A1} + 48,833$$

A visszamaradó öntési feszültség várható értéke meghatározható a tényleges szakító szilárdság és a szimmetrikus feszültség rács vastag rúd A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó, időben kialakuló vastag-vékony rúd hőmérsékleteinek különbsége alapján: $\sigma_v = (0,0003 \cdot R_m + 0,0299) \cdot \Delta T_{A1} + (0,1178 \cdot R_m + 12,563)$

4. A különböző keresztmetszet arányú feszültségrács próbatesteken mért és szimulációval számított visszamaradó öntési feszültségek értéke szerint is a nagyobb keresztmetszet arányhoz tartozik nagyobb visszamaradó öntési feszültség.
 5. Kidolgoztam egy szimulációs eljárást nedves bentonitos homokformába gravitációsan öntött gömbgrafitos vasöntvény méretpontos gyártásának megoldására.
- A kidolgozott eljárás szerint az öntvény várható mérete a véges elemes szimuláció rendszerében a hőmérsékletmező, a visszamaradó öntési feszültség és deformáció eredményeit orientált CAD geometriává transzformálva lehetővé teszik a CAD geometriával összevetésre alkalmas méret előállítását, melynek CAD geometriába átvitele biztosítja az öntvény méretpontosságát.



- A méretek meghatározásához szükséges felbontású és elrendezésű izotropikus véges elemes háló annak ellenére alkalmas a méretek meghatározására, hogy nem felel meg, a véges elemes hálózással szemben támasztott követelményeknek.

AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSA

Az értekezés tudományos eredményei:

- közvetlenül felhasználhatóak a BSc és MSc oktatásban,
- beépülnek a kidolgozás alatt álló akkreditált felnőttképzési tanfolyami anyagokba,
- felhasználhatóak a TÁMOP digitális tananyagok elkészítése során,
- alkalmazhatóak az ÖKOLIC szimulációs laboratórium működtetése során.

A kidolgozott szimulációs algoritmus bevezetésre került a Georg Fischer Automotive Mettmann vasöntőde gyártási struktúrájába.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBŐL MEGJELENT ÍRÁSBELI PUBLIKÁCIÓK

1. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Öntvénydermedés szimulációja WinCast szoftverrendszerrel
MicroCAD 2003. Nemzetközi Tudományos Konferencia
(Miskolci Egyetem Innovációs és Transzfer Centrum, ISBN 963-661-550-0, p.6)
2. Molnár Dániel: Öntvények dermedésének véges-elemes szimulációja
VIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia 2003
(Műszaki Tudományos Füzetek; ISBN 973-8231-20-5, pp.267-270)
3. Dániel Molnár: The simulation of castings solidification
10th International Student Days of Metallurgy, Leoben, Ausztria, 2003
(The Austrian Society for Metallurgy and Materials, ISBN 3-7739-5986-9, pp.105-108)
4. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Temperature and form filling simulation of high pressure die casting
MicroCad 2004 Nemzetközi Tudományos Konferencia
(Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centrum, ISBN 963-661-608-6 ö; ISBN 963-661-611-6; pp.93-98)
5. Dániel, Molnár: High pressure die casting simulation
12. International Studententag der Metallurgie, Aachen, Németország 2004.
(Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen, pp.166-171)
6. Dániel, Molnár: Stress calculation- basics and examples
International Wincast Usermeeting, Roetgen, Németország 2004
(Konferencia kiadvány, p.8)
7. Dániel Molnár, Dr. Jenő Dúl, Szabó Richárd: Simulation of high pressure die casting solidification
4th International Conference on Solidification and gravity, Miskolc 2004
Materials Science Forum, Volume 508. Impact Factor: 0.498
(Trans Tech Publications, ISBN 0-87849-991-1; ISSN 0255-5476, pp.555-559)

Hivatkozás

- Viktor Bánhidi: Evaluation of Microgravity Heat Conductivity Measurements with FLUENT System

Materials Science Forum Vol. 589 (2008)

- Madan, J., Rao, P.V.M., Kundra, T.K.: Optimal-parting direction selection for die-casting

International Journal of Manufacturing Technology and Management, 18 (2), (2009)

8. Molnár Dániel: Öntéstechnológia tervezése szimuláció alkalmazásával
Doktoranduszok Fóruma, 2004
(Miskolci Egyetem Innovációs és Technológiai Transzfer Centrum, Nyomdaszám: ME. Tu-539/2005. pp.83-93)
9. Dániel Molnár: The examination of process engineering of automotive castings with finite element method
MicroCad 2005 Nemzetközi Tudományos Konferencia
(Miskolci Egyetem Innovációs és Transzfer Centrum, ISBN 963 661 646 9 ö; ISBN 963 661 650 7; pp.31-36)
10. Molnár Dániel: Öntészeti folyamatok véges elemes és véges differencia szimulációja
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2005
(Műszaki Tudományos Füzetek; Az Erdélyi Múzeum Egyesület kiadványa; ISBN 973-8231-44-2, pp.165-168)
11. Dúl Jenő, Molnár Dániel: Nyomásos öntészeti folyamatok szimulációja
Bányászati és kohászati lapok 138. évf. 2005/2. szám
(HU ISSN 0005-5670, PP.19-21)
12. Daniel Molnar, Károly Bakó, Jenő Dúl: Investigation and simulation of residual stress at grey iron castings
Research & Development Issues for the Foundry Industry, Roznov pod Radhostem, Csehország, 2005
(Pobocka České Slévárenské Společnosti, VSB-Technická Univerzita Ostrava, ISBN 80-248-0899-4, pp.16-22)
13. Dániel Molnár: The simulation of dimension accurate manufacturing of automotive iron castings
42nd Czech Foundry Days, Brno, Csehország, 2005
(Czech Foundrymen Society, BUT Faculty of Mechanical Engineering, ISBN 80-214-2967-4 CD kiadvány p.7)
14. Dániel Molnár, Dr. Jenő Dúl: Finite Element Simulation of Automotive Iron Castings
13. Internationaler Studententag der Metallurgie, Leoben, Ausztria, 2006
(The Austrian Society for Metallurgy and Materials, ISBN 3-901384-18-9, pp.92-101)
15. Dániel Molnár: Modelling and verification of casting deformation during cooling
Internationaler Wincast User Meeting, Roetgen, 2006
(Konferencia kiadvány, p.9)
16. Molnár Dániel: Véges elemes szimuláció alkalmazása járműipari alkatrészek tervezésében
Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Sepsiszentgyörgy, Románia 2006
(Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, ISBN (10) 973-7840-09-7; ISBN (13) 978-973-7840-09-7)

17. Dániel Molnár: Simulation at foundry research & development
43rd Czech Foundry Days, Brno, Csehország, 2006
(Brno University of Technology, Czech Foundrymen Society, ISBN 80-214-3244-6, p.8)
18. Molnár Dániel, Szabó Richárd: Öntészeti szimuláció alkalmazása
MEAKKK, Mechatronikai és Anyagtudományi Kooperációs Kutatóközpont Információs Napok, Miskolc, 2007
(Mechatronika, Anyagtudomány, Miskolc, Vol.1, No.3, ISSN 1589-827X; pp.111-120)
19. Molnár Dániel, Dúl Jenő: Járműipari öntvény gyártásának szimulációja
IX. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Buziásfürdő, Románia, 2007
(Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, INCITATO Nyomda Kolozsvár, pp.114-117)
20. Molnár Dániel: Simualtion of casting deformation
44th. Czech Foundry Days, Brno, 2007
(Czech Foundrymen Society, BUT Faculty of Mechanical Engineering, ISBN 978-80-214-3496-7 CD kiadvány p.9)
21. Daniel Molnar, Jeno Dul: Simulation as a tool of process optimzization
15th Students Dayt of Metallurgy, Freiberg, 2008
(Technische Universität Bergakademie Freiberg, ISBN 978-3-00-024126-0, pp.139-144)
22. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Véges elemes szimuláció alkalmazása az öntészetben
X. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyszeben, 2008
(Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, INCITATO Nyomda Kolozsvár, pp.71-74)
23. Daniel, Molnar: Research & development with finite element simulation
45th Foundry Days, Brno, 2008
(Czech Foundrymen Society, BUT Faculty of Mechanical Engineering, ISBN, CD kiadvány p.8)
24. Daniel Molnar, Jeno Dul: Influence of the solidification process to the stress field of iron castings
5th International Conference on Solidification and Gravity, Miskolc 2008
Materials Science Forum, Volume 649.
(Trans Tech Publications, ISBN 0-87849-290-9; ISSN 0255-5476, pp.431-436)

25. Dániel Molnár, Jenő Dúl: Simulation of casting Processes: filling, Solidification, Residual stress calculation

World Technical Forum, 46. Czech Foundry Days, Brno; 2009

(CD kiadvány, ISBN 978-80-904020-2-7, p.8)

Hivatkozás

J. Kasala, M. Mäsiar: Investigation of selected thermo-physical properties in the CO-based superalloy: experiment and application study

Archives of Foundry Engineering, Vol. 10 Special Issue 1/2010

26. Dániel Molnár, Jenő Dúl: Simulation research & development at the University of Miskolc

2009 Internationales Anwendertreffen, Roetgen, Germany

(Konferencia kiadvány, p.9)

SZÓBELI ELŐADÁSOK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

1. Molnár Dániel, Détári Anikó: Residual stress and the perdurable deformation capability at grey cast irons
9. Studententag des Hüttenwesens, TU Bergakademie Freiberg, 04-06.04.2002
2. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Öntvénydermedés szimulációja WinCast szoftverrendszerrel
MicroCAD 2003. Nemzetközi Tudományos Konferencia, 2003.03.6-7
3. Molnár Dániel: Öntvények dermedésének véges-elemes vizsgálata
VIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia 2003.03.21-22
4. Dániel Molnár: The simulation of castings' solidification
10th International Student Days of Metallurgy, Leoben, Ausztria, 2003.04.3-5
5. Attila Simcsák, Dániel Molnár: The effects of high pressure die casting machine parameters to the density of castings
10th International Student Days of Metallurgy, Leoben, Ausztria, 2003.04.3-5
6. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Öntészeti folyamatok szimulációja végelelemes módszerrel
Bányászati, kohászati, földtani konferencia, Zilah, Románia, 2003.04.11-13
7. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Nyomásos öntőforma hőmérsékletviszonyainak szimulációja
17. Magyar Öntőnapok, Lillafüred, 2003.10.5-7
8. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Temperature and form filling simulation of high pressure die casting
MicroCad 2004 Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2004.03.18-19
9. Dániel Molnár: High pressure die casting simulation
11. International Studententag der Metallurgie, Aachen, Németország 2004.04.1
10. Dániel Molnár: Stress calculation- basics and examples
International Wincast Usermeeting, Roetgen, Németország, 2004.05.11-13
11. Dr. Dúl Jenő, Molnár Dániel: FDM- szimuláció alkalmazása a nyomásos öntési technológia fejlesztésében
Bányászati Kohászati Földtani Konferencia, Petrozsény, Románia , 2004.05.20-23
12. Molnár Dániel: The examination of process engineering of automotive castings with finite element method
MicroCad 2005 Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2005.03.10-11
13. Molnár Dániel: Öntészeti folyamatok véges elemes és véges differencia szimulációja
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2005.03.18-19
14. Molnár Dániel: Véges elemes szimuláció alkalmazása járműipari gyártástechnológia fejlesztésében
Bányászati, földtani, kohászati konferencia, Nagyvárad, Románia, 2005.03.31
15. Dániel Molnár, Károly Bakó, Jenő Dúl: Investigation and simulation of residual stress at grey iron castings
Research & Development Issues for the Foundry Industry, Roznov pod Radhostem, Csehország, 2005.09.6-7

16. Dániel Molnár: The simulation of dimension accurate manufacturing of automotive iron castings
42nd Czech Foundry Days, Brno, Csehország, 2005.09.20
17. Molnár Dániel: Öntési feszültségek vizsgálata és modellezése
XVIII. Magyar Öntőnapok, Balatonfüred, 2005.10.9-11
18. Molnár Dániel: Szimuláció alkalmazása méretpontos öntvénygyártásnál
XVIII. Magyar Öntőnapok, Balatonfüred, 2005.10.9-11
19. Dániel Molnár: The Application of Finite Element Simulation at Foundry Technology Construction
MicroCAD 2006 international scientific conference, Miskolc, 2006.03.16-17
20. Dániel Molnár, Dr. Jenő Dúl: Finite Element Simulation of Automotive Iron Castings
13. Internationaler Studententag der Metallurgie, Leoben, Ausztria, 2006.03.30
21. Dániel Molnár: Modelling and verification of casting deformation during cooling
Internationaler Wincast User Meeting, Roetgen, Németország, 2006.04.6-7
22. Molnár Dániel: Véges elemes szimuláció alkalmazása járműipari alkatrészek tervezésében
Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Sepsiszentgyörgy, Románia 2006.04.6-9
23. Molnár Dániel: Öntészeti folyamatok szimulációja
OMBKE, Öntészeti Szakosztály, Öntödei Múzeum, 2006.05.25, Budapest
24. Dániel Molnár: Simulation at foundry research & development
43rd Czech Foundry Days, Brno, Csehország, 2006.10.14-15
25. Molnár Dániel, Szabó Richárd: Öntészeti szimuláció alkalmazása
MEAKKK, Mechatronikai és Anyagtudományi Kooperációs Kutatóközpont Információs Napok, Miskolc-Egyetemváros, 2007.02.15-16
26. Molnár Dániel: Finite element Simulation of foundry processes
MicroCAD 2007, Miskolc, 2007.03.22-23
27. Molnár Dániel, Dúl Jenő: Járműipari öntvény gyártásának szimulációja
IX. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Buziásfürdő, Románia 2007.03.29-04.01
28. Molnár Dániel, Jenő Dúl, Sándor Lukács: Temperature measurement and simulation of HPDC mould
Cast Products And Mould Designer Skills at the European Context, Konferencia, Miskolc 2007.10.1-3
29. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő, Mende Tamás: Járműipari öntvénygyártási folyamatok végeselemes szimulációja
VI. Országos Anyagtudományi Konferencia, Siófok, 2007.10.14-16
30. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Gömbgrafitos vasöntvény méretváltozásának és méretpontos gyártásának szimulációja
XIX. Magyar Öntőnapok, Lillafüred, 2007.10.14-16
31. Molnár Dániel: Simualtion of casting deformation
45th. Czech Foundry Days, Brno, 2007.10.16-18
32. Daniel Molnar, Jeno Dul: Simulation as a tool of process optimzization
15th Students Dayt of Metallurgy, Frieberg, 2008.03.13-15.
33. Molnár Dániel, Dr. Dúl Jenő: Véges elemes szimuláció alkalmazása az öntészetben
X. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyszeben, 2008.04.3-6.
34. Daniel, Molnar: Research & development with finite element simulation
45th Foundry Days, Brno, 2008.05.13-15

35. Daniel Molnar, Jeno Dul: Influence of the solidification process to the stress field of iron castings
5th International Conference on Solidification and Gravity, Miskolc-Lillafüred, 2008.09.1-4.
36. Dániel Molnár, Jenő Dúl: Simulation of casting Processes: filling, Solidification, Residual stress calculation
World Technical Forum, 46. Czech Foundry Days, Brno, 2009.06.1-3
37. Dániel Molnár, Jenő Dúl: Simulation research & development at the University of Miskolc
RWP Usermeeting 2009, Roetgen, Németország, 2009.19-20

MELLÉKLETEK

1. Öntött próbatestek kémiai összetétele, mért- és származtatott értékei

1.1 GJL-150 adagok összetétele

1.2 GJL-150 adagok mért és származtatott értékei

1.3 GJL-200 adagok összetétele

1.4 GJL-200 adagok mért és származtatott értékei

1.5 GJL-250 adagok összetétele

1.6 GJL-250 adagok mért és származtatott értékei

1.7 GJL-300 adagok összetétele

1.8 GJL-300 adagok mért és származtatott értékei

2. Feszültségrács próbatest rúdjaiknak lehűlési görbéi

2.1 GJL-150 anyagminőség

2.2 GJL-200 anyagminőség

2.3 GJL-300 anyagminőség

3. Valós öntvény 3D letapogatásos méretellenőrzés eredményei

3.1 7817 geometria A.

3.2 7817 geometria B.

3.3 7817 geometria C.

3.4 7818 geometria A.

3.5 7818 geometria B.

4. Valós öntvény mért és szimulációval számított átlag értékei

1.1 GJL-150 adagok összetétele

Jel	Adag	Kémiai összetétel					Telítési szám	Grafitosodási hajlam
		C	Si	Mn	S	P	Sc	K
		%	%	%	%	%	-	-
51	nagy tisztaságú hematit nyersvas	3,5	1,64	0,66	0,03	0,08	0,92	1,29
64	100% öntészeti nyersvas	3,46	2,42	0,59	0,017	0,09	0,98	1,97
52	Acélnyersvas	3,7	1,3	0,7	0,05	0,16	0,94	1,03
65	100% öntészeti nyersvas + FeSi75	3,4	2,67	0,58	0,017	0,088	0,98	2,18

1.2 GJL-150 adagok mért és származtatott értékei

Jel	Szakító szilárdság	Visszamaradó fesz.	Keménység	Rugalmasági modulus	Relatív keménység	Relatív szilárdság	Minőségi index	Rel.fesz.
	R _m	σ_v	HB	E ₀	RH	RG	Q _i	(σ_v /R _m)
	N/mm ²	N/mm ²	-	*10 ⁵ N/mm ²	%	%		
51	185	58,4	162	1,142	0,9	0,71	0,79	0,32
64	189	66,2	177	1,068	0,98	0,89	0,91	0,35
52	195	88	215	0,907	1,17	0,80	0,68	0,45
65	198	61,3	167	1,186	0,9	0,94	1,04	0,31

1.3 GJL-200 adagok összetétele

Jel	adag	Kémiai összetétel					Telítési szám	Grafitosodási hajlam
		C	Si	Mn	S	P	Sc	K
		%	%	%	%	%	-	-
66	100% öntészeti nyersvas + BaCaSiMg	3,4	2,58	0,58	0,016	0,088	0,97	2,09
74	100% öntészeti nyersvas	3,42	2,52	0,53	0,012	0,134	0,97	2,05
23	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
27	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
31	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
21	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva, alapvas	3,42	2,1	0,6	0,128	0,19	0,95	1,67
22	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
24	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
25	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
28	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
29	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
33	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
34	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
26	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
32	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
94	50% öntészeti + 50% acélnyersvas	3,42	2,51	0,6	0,019	0,13	0,97	2,04
30	repedésre érzékeny géptöredék indukciós kemencében olvasztva	3,36	1,6	1,02	0,096	0,129	0,88	1,22
15	30% csapágyhull, 10% acélhull, 40% acélnyersvas, 20% hematit nyersvas	3,44	1,97	0,73	0,043	0,093	0,94	1,56
17	30% csapágyhull, 10% acélhull, 60% acélnyersvas, 0% hematit nyersvas	3,5	2,39	0,68	0,05	0,066	0,99	1,95

Jel	adag	Kémiai összetétel					Telítési szám	Grafitosodási hajlam
		C	Si	Mn	S	P	Sc	K
		%	%	%	%	%	-	-
75	100% öntészeti nyersvas + FeSi76	3,36	2,76	0,53	0,012	0,13	0,97	2,25
41	Alapvas (43% hematit nyersvas + 53% géptöredék)	3,43	1,97	0,54	0,05	0,06	0,93	1,56
14	30% csapágyhull, 10% acélhull, 30% acélnyersvas, 30% hematit nyersvas	3,41	1,84	0,73	0,052	0,082	0,92	1,44
61	100% öntészeti nyersvas	3,42	1,85	0,54	0,019	0,088	0,92	1,45
12	30% csapágyhull, 10% acélhull, 10% acélnyersvas, 50% hematit nyersvas	3,35	2,28	0,74	0,056	0,094	0,94	1,81
53	acélnyersvas + 30% géptöredék	3,6	1,6	0,7	0,08	0,16	0,94	1,27
71	100% öntészeti nyersvas	3,4	2,04	0,56	0,015	0,134	0,92	1,61
16	30% csapágyhull, 10% acélhull, 50% acélnyersvas, 10% hematit nyersvas	3,6	2,46	0,71	0,053	0,087	1,03	2,04
76	100% öntészeti nyersvas + BaCaSiMg	3,38	2,69	0,53	0,012	0,13	0,97	2,19
13	30% csapágyhull, 10% acélhull, 20% acélnyersvas, 40% hematit nyersvas	3,39	2,05	0,7	0,062	0,089	0,93	1,61
84	100% acél-nyersvas	3,45	2,44	0,57	0,021	0,138	0,97	1,98
95	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeSi76	3,36	2,72	0,6	0,02	0,13	0,97	2,21
62	100% öntészeti nyersvas + FeSi75	3,36	2,12	0,54	0,022	0,08	0,92	1,67
113	FCMg 5, 0%	3,12	1,98	0,56	0,09	0,1	0,85	1,48
101	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeS	3,44	1,94	0,58	0,079	0,14	0,93	1,53
91	50% öntészeti + 50% acélnyersvas	3,43	1,92	0,62	0,02	0,13	0,92	1,51
96	50% öntészeti + 50% acélnyersvas BaCaSiMg	3,36	2,64	0,61	0,017	0,126	0,96	2,14
85	100% acél-nyersvas FeSi76	3,39	2,67	0,56	0,018	0,136	0,97	2,17
72	100% hazai öntészeti nyersvas FeSi75	3,36	2,29	0,56	0,015	0,134	0,93	1,82
105	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeS, BaCaSiMg	3,4	2,05	0,61	0,157	0,134	0,93	1,62

1.4 GJL-200 adagok mért és származtatott értékei

Jel	Szakító szilárdság	Visszamaradó fesz.	Keménység	Rugalmassági modulus	Relatív keménység	Relatív szilárdság	Minőségi index	Rel.fesz.
	Rm	σ_v	HB	E0	RH	RG	Qi	(σ_v/R_m)
	N/mm ²	N/mm ²	-	*10 ⁵ N/mm ²	%	%		
66	209	62,2	185	1,130	0,97	0,95	0,98	0,3
74	209	84,3	197	1,061	1,04	0,95	0,91	0,4
23	212	80,4	212	1,000	1,11	0,72	0,65	0,4
27	212	75,8	221	0,959	1,16	0,72	0,62	0,4
31	212	87,2	219	0,968	1,15	0,72	0,63	0,4
21	214	83,0	218	0,982	1,14	0,91	0,79	0,4
22	214	86,0	216	0,991	1,12	0,73	0,65	0,4
24	214	84,0	221	0,968	1,15	0,73	0,63	0,4
25	214	83,5	212	1,009	1,1	0,73	0,66	0,4
28	214	70,2	210	1,019	1,09	0,73	0,67	0,3
29	214	84,0	221	0,968	1,15	0,73	0,63	0,4
33	214	78,6	215	0,995	1,12	0,73	0,65	0,4
34	214	76,4	215	0,992	1,12	0,73	0,65	0,4
26	216	83,0	218	0,991	1,13	0,73	0,65	0,4
32	216	83,4	215	1,005	1,11	0,73	0,66	0,4
94	217	92,1	207	1,048	1,07	0,99	0,92	0,4
30	218	83,6	210	1,038	1,08	0,74	0,69	0,4
15	220	71,6	191	1,152	0,98	0,90	0,92	0,3
75	220	76,8	193	1,140	0,99	1,00	1,01	0,3
41	224	81,0	192	1,167	0,98	0,89	0,90	0,4
14	225	71,1	195	1,154	0,99	0,86	0,87	0,3
17	225	71,0	193	1,166	0,98	1,11	1,13	0,3
61	229	84,9	197	1,162	0,99	0,88	0,89	0,4
12	230	71,3	204	1,127	1,03	0,94	0,91	0,3
53	230	102,0	196	1,173	0,99	0,94	0,95	0,4
71	230	98,2	211	1,090	1,06	0,88	0,83	0,4
16	231	74,2	195	1,185	0,98	1,36	1,38	0,3
76	231	78,7	187	1,235	0,94	1,05	1,12	0,3

Jel	Szakító szilárdság	Visszamaradó fesz.	Keménység	Rugalmassági modulus	Relatív keménység	Relatív szilárdság	Minőségi index	Rel.fesz.
	Rm	σ_v	HB	E0	RH	RG	Qi	(σ_v/R_m)
	N/mm ²	N/mm ²	-	*10 ⁵ N/mm ²	%	%		
13	232	68,0	185	1,254	0,93	0,92	0,99	0,3
84	232	106,4	227	1,022	1,14	1,06	0,93	0,5
95	234	88,0	203	1,153	1,01	1,06	1,05	0,4
62	239	75,9	192	1,245	0,95	0,92	0,96	0,3
113	240	101,0	220	1,091	1,08	0,75	0,70	0,4
101	241	109,3	241	1,000	1,18	0,95	0,81	0,5
91	243	108,0	221	1,100	1,08	0,93	0,86	0,4
96	244	84,2	201	1,214	0,98	1,07	1,09	0,3
85	246	94,4	221	1,113	1,07	1,12	1,05	0,4
72	248	93,1	207	1,198	1	0,98	0,98	0,4
105	248	123,2	245	1,012	1,19	0,98	0,82	0,5

1.5 GJL-250 adagok összetétele

Jel	adag	Kémiai összetétel					Telítési szám	Grafi-tosodási hajlam
		C	Si	Mn	S	P		
		%	%	%	%	%	-	-
92	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeSi75	3,4	2,2	0,6	0,019	0,14	0,94	1,75
102	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeS, BaCaSiMg	3,44	2,11	0,59	0,071	0,136	0,94	1,68
63	100% szovjet öntészeti nyersvas + BaCaSiMg	3,4	2,04	0,54	0,018	0,08	0,93	1,61
93	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + BaCaSiMg	3,36	2,13	0,59	0,018	0,134	0,92	1,68
86	100% acél-nyersvas + BaCaSiMg	3,38	2,63	0,56	0,016	0,136	0,97	2,13
81	100% acél-nyersvas	3,49	1,86	0,59	0,018	0,138	0,93	1,47
73	100% hazai öntészeti nyersvas + BaCaSiMg	3,3	2,2	0,56	0,015	0,142	0,91	1,72
82	100% acél-nyersvas + FeSi75	3,47	2,11	0,61	0,016	0,134	0,95	1,69
		3,1	1,41	0,86	0,026	0,046	0,81	1
114	FCMg5, 0,3%	3,12	1,98	0,56	0,09	0,1	0,85	1,48
	kupolóban olvasztott + Superseed + FeSi75	3,12	1,45	0,71	0,023	0,048	0,81	1,04
	kupolóban olvasztott + Superseed + FeSi75	3,07	1,3	0,76	0,019	0,05	0,79	0,91
83	100% acél-nyersvas BaCaSiMg	3,49	2,06	0,61	0,016	0,134	0,95	1,65
103	50% öntészeti + 50% acélnyersvas + FeS, CeMM + BaCaSiMg	3,43	2,07	0,58	0,032	0,134	0,93	1,64

1.6 GJL-250 adagok mért és származtatott értékei

Jel	Szakító szilárdság	Visszamaradó fesz.	Keménység	Rugalmassági modulus	Relatív keménység	Relatív szilárdság	Minőségi index	Rel.fesz.
	Rm	σ_v	HB	E0	RH	RG	Qi	(σ_v/R_m)
	N/mm ²	N/mm ²	-	*10 ⁵ N/mm ²	%	%		
92	251	98	217	1,157	1,04	1,03	0,99	0,4
102	254	113	237	1,072	1,13	1,04	0,92	0,4
63	256	80	199	1,286	0,95	1,01	1,07	0,3
93	259	93	211	1,227	1	0,99	0,99	0,4
86	261	99	237	1,101	1,12	1,19	1,06	0,4
81	262	130	235	1,115	1,11	1,04	0,93	0,5
73	267	94	211	1,265	0,98	0,99	1,01	0,4
82	282	119	227	1,242	1,03	1,19	1,16	0,4
	284	111	222,5	1,276	1	0,81	0,81	0,4
114	285	95	220	1,295	0,99	0,89	0,90	0,3
	286	131	230	1,245	1,03	0,81	0,79	0,5
	287	93	210	1,367	0,94	0,78	0,83	0,3
83	289	116	231	1,251	1,03	1,22	1,19	0,4
103	298	96	197	1,513	0,86	1,18	1,37	0,3

1.7 GJL-300 adagok összetétele

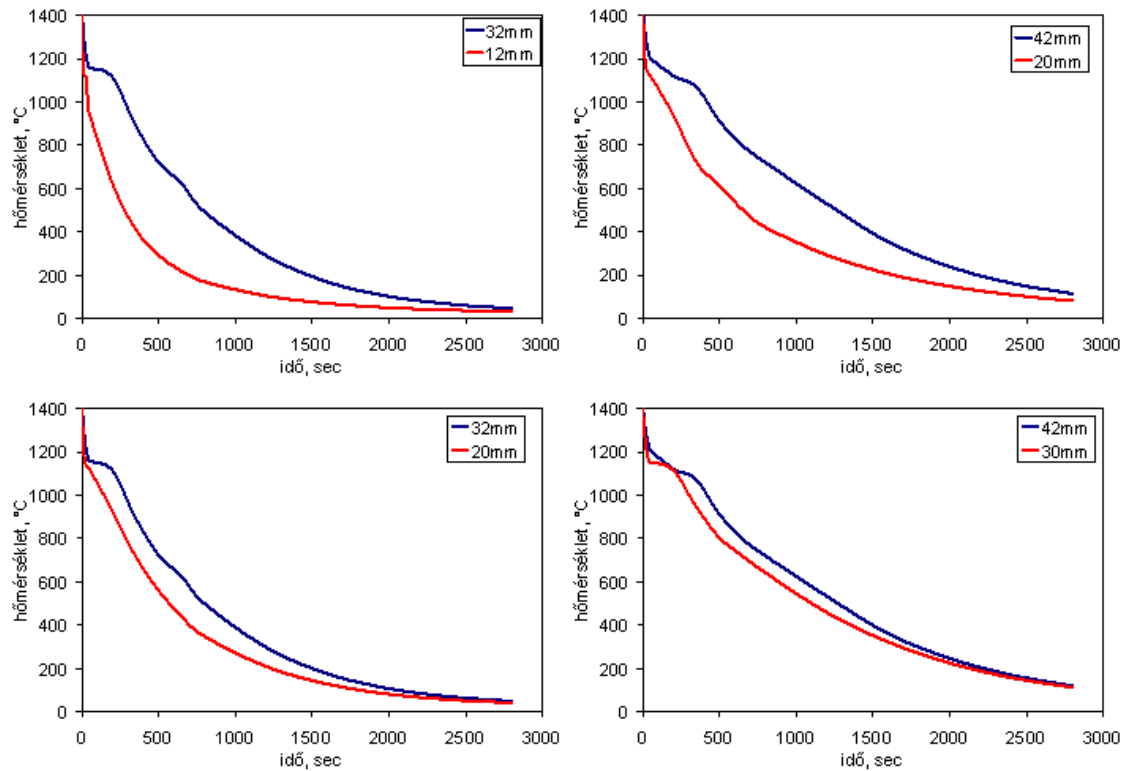
Jel	adag	Kémiai összetétel					Telítési szám	Grafitosodási hajlam
		C	Si	Mn	S	P		
		%	%	%	%	%		
	kupolóban olvasztott + Superseed + FeSi75	3	1,27	0,78	0,029	0,049	0,77	0,87
	kupolóban olvasztott + Superseed + FeSi75	3,06	1,31	0,77	0,025	0,051	0,79	0,91
34	S%: 0,047	3,15	1,76	1,02	0,047	0,129	0,84	1,3
45	Alapvas + 0,72%Cr + 0,47% Mo + 0,1% P	3,43	1,97	0,54	0,05	0,06	0,93	1,56
44	Alapvas + 0,67%Cr + 0,52% Mo	3,43	1,97	0,54	0,05	0,06	0,93	1,56

1.8 GJL-300 adagok mért és származtatott értékei

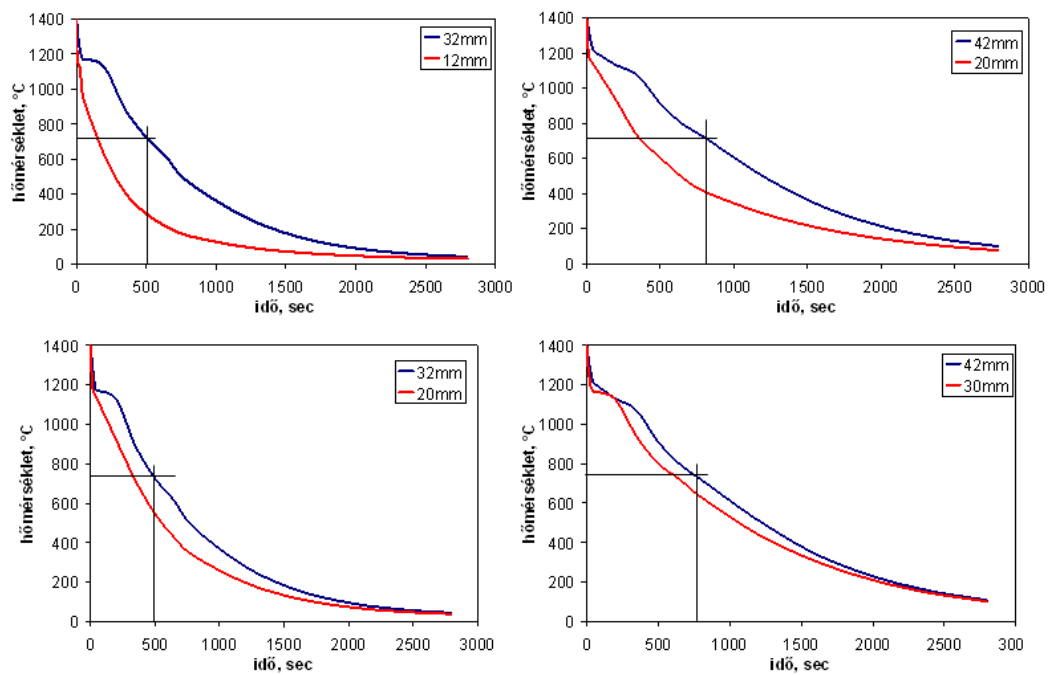
Jel	Szakító szilárdság	Visszamaradó fesz.	Keménység	Rugalmassági modulus	Relatív keménység	Relatív szilárdság	Minőségi index	Rel.fesz.
	Rm	σ_v	HB	E0	RH	RG	Qi	(σ_v/R_m)
	N/mm ²	N/mm ²	-	*10 ⁵ N/mm ²	%	%		
	324	123	235	1,380	0,98	0,84	0,86	0,4
	319	128	246	1,297	1,04	0,87	0,83	0,4
34	330	130	254	1,299	1,05	1,01	0,96	0,4
45	314	139	236	1,331	1			0,4
44	312	142	274	1,139	1,17			0,5

2. Feszültséggrács próbatest rúdjaknak lehűlési görbéi

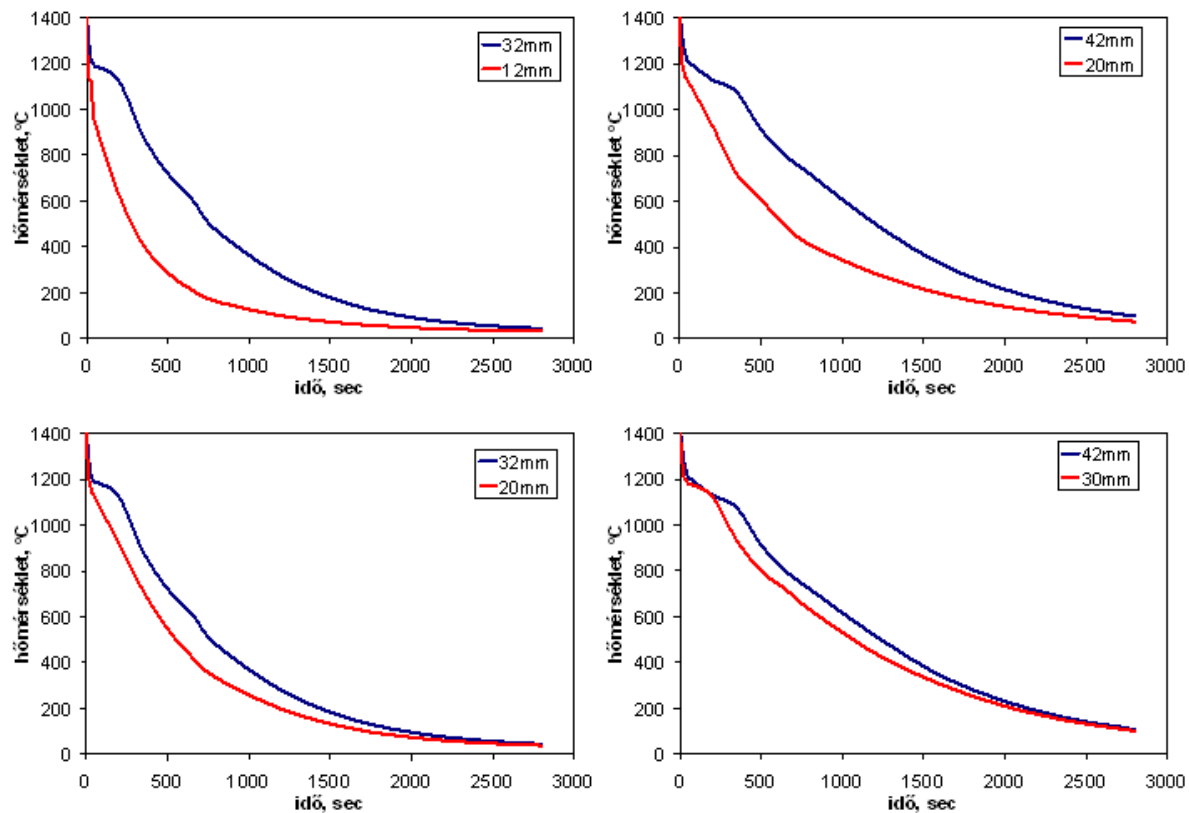
2.1 GJL-150 anyagminőség



2.2 GJL-200 anyagminőség



2.3 GJL-300 anyagminőség



3. Valós öntvény 3D letapogatásos méretellenőrzés eredményei

3.1 7817 geometria A.

Pozíció	Előírt méret	Felső tűrés	Alsó tűrés	X	S	X _{min}	X _{max}
SC 1	17,200	0,850	-0,850	17,92933	0,19277	17,625	18,295
SC 2	107,800	1,200	-1,200	107,94367	0,08924	107,773	108,097
3	30,000	1,000	-1,000	30,46980	0,11409	30,308	30,647
4	8,150	0,850	-0,850	8,30733	0,17598	8,010	8,664
5	20,200	0,950	-0,950	21,50460	0,20858	21,156	21,750
6	24,000	0,950	-0,950	24,67633	0,03385	24,622	24,743
7	9,800	0,850	-0,850	10,05053	0,04651	9,944	10,115
8	67,350	1,100	-1,100	67,48487	0,05898	67,410	67,602
9	50,000	1,100	-1,100	50,11140	0,03687	50,027	50,173
10	25,600	0,950	-0,950	26,03293	0,05440	25,949	26,138
11	158,500	1,300	-1,300	158,67960	0,20002	158,439	158,986
12	19,600	0,950	-0,950	20,11253	0,26541	19,771	20,559
SC 13	2,000	0,850	-0,850	2,64027	0,04565	2,527	2,709
14	23,000	1,000	-1,000	23,89313	0,16003	23,642	24,170
15	23,800	1,000	-1,000	24,19527	0,04608	24,129	24,281
16	45,000	1,000	-1,000	45,64420	0,12769	45,405	45,800
17	83,000	1,200	-1,200	83,09487	0,17856	82,806	83,380
18	23,800	1,000	-1,000	24,18060	0,05191	24,056	24,277
19	45,000	1,000	-1,000	44,43780	0,14633	44,275	44,703
20	83,000	1,200	-1,200	83,36167	0,11826	83,145	83,551
21	9,000	0,850	-0,850	10,58653	0,19075	10,312	10,839
22	9,000	0,850	-0,850	10,68860	0,23926	10,294	11,078
23	17,000	0,850	-0,850	16,54533	0,17614	16,282	16,819
24	17,000	0,850	-0,850	16,45320	0,18546	16,180	16,746
SC 25	11,000	0,850	-0,850	10,88400	0,15450	10,609	11,115
26	11,000	0,850	-0,850	10,81000	0,17693	10,566	11,129
27	32,000	1,000	-1,000	32,72053	0,35430	32,389	33,533
28	137,700	1,300	-1,300	137,93220	0,12428	137,767	138,181
29	17,500	0,850	-0,850	17,65013	0,25848	17,374	18,250

3.2 7817 geometria B.

Pozíció	Előírt méret	Felső tűrés	Alsó tűrés	X	S	$X_{\min}$	$X_{\max}$
30	34,000	0,950	-0,950	35,16420	0,27780	34,828	35,957
31	0,000	1,300	-1,300	0,94333	0,22237	0,505	1,404
32	0,000	1,000	-1,000	1,57380	0,14082	1,291	1,783
33	5,500	0,850	-0,850	5,59453	0,16415	5,426	5,952
34	5,500	0,850	-0,850	5,49707	0,16375	5,301	5,843
35	5,500	0,850	-0,850	5,57187	0,15368	5,419	5,905
36	5,500	0,850	-0,850	5,69073	0,18560	5,455	6,044
37	20,500	0,950	-0,950	19,57313	0,16228	19,246	19,933
38	20,500	0,950	-0,950	19,56673	0,13502	19,310	19,829
39	20,500	0,950	-0,950	19,90793	0,15482	19,557	20,259
40	20,500	0,950	-0,950	19,75000	0,15786	19,432	20,139
41	0,000	0,850	-0,850	0,83340	0,09577	0,617	0,970
42	0,000	0,850	-0,850	0,76667	0,11316	0,523	0,923
43	0,000	0,850	-0,850	0,68833	0,11280	0,475	0,867
44	0,000	0,850	-0,850	0,70307	0,07258	0,574	0,845
45	24,000	10,000	-10,000	23,81767	0,14806	23,498	24,039
46	24,000	10,000	-10,000	23,82933	0,10394	23,617	23,977
47	24,000	10,000	-10,000	23,89967	0,04017	23,830	23,975
48	24,000	10,000	-10,000	23,70407	0,11395	23,552	23,942
49	30,000	1,000	-1,000	29,41627	0,13168	29,207	29,625
50	30,000	1,000	-1,000	29,53667	0,05668	29,452	29,621
51	30,000	1,000	-1,000	29,64487	0,04497	29,577	29,727
52	30,000	1,000	-1,000	29,54007	0,08837	29,387	29,663
53	38,000	1,000	-1,000	38,85600	0,16835	38,651	39,163
54	78,500	1,200	-1,200	80,33073	0,16109	80,116	80,574
55	91,500	1,200	-1,200	91,04847	0,17049	90,763	91,286
56	12,500	0,850	-0,850	13,00200	0,15701	12,800	13,267

3.3 7817 geometria C.

Pozíció	Előírt méret	Felső tűrés	Alsó tűrés	X	S	$X_{\min}$	$X_{\max}$
57	0,000	0,850	-0,850	0,86173	0,16780	0,565	1,073
58	5,500	0,850	-0,850	9,22680	0,20385	8,974	9,724
59	20,500	0,950	-0,950	20,51173	0,09798	20,367	20,666
60	90,000	1,200	-1,200	89,74920	0,04014	89,670	89,801
61	2,500	0,850	-0,850	1,44359	0,16615	1,119	1,667
62	2,500	0,850	-0,850	1,70933	0,36277	1,409	2,074
63	2,500	0,850	-0,850	1,46613	0,18289	1,232	1,874
64	2,500	0,850	-0,850	1,68600	0,14097	1,448	1,909
65	78,700	1,200	-1,200	79,22580	0,07993	79,137	79,393

3.4 7818 geometria A.

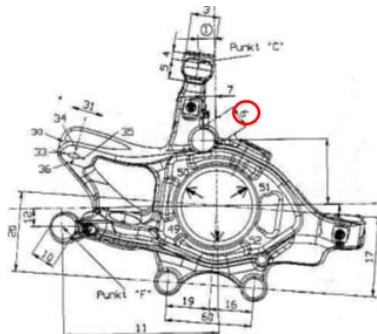
Pozíció	Előírt méret	Felső tűrés	Alsó tűrés	X	S	$X_{\min}$	$X_{\max}$
SC 1	17,200	0,850	-0,850	17,93213	0,27440	17,550	18,474
SC 2	107,800	1,200	-1,200	107,94433	0,14086	107,767	108,224
3	30,000	1,000	-1,000	30,45547	0,15356	30,277	30,787
4	8,150	0,850	-0,850	8,26107	0,19865	7,866	8,616
5	20,200	0,950	-0,950	21,56593	0,37297	21,039	22,317
6	24,000	0,950	-0,950	24,72140	0,06226	24,653	24,906
7	9,800	0,850	-0,850	10,07460	0,09993	9,942	10,331
8	67,350	1,100	-1,100	67,48860	0,08266	67,348	67,629
9	50,000	1,100	-1,100	50,13027	0,05069	50,041	50,227
10	25,600	0,950	-0,950	26,07167	0,06479	25,965	26,182
11	158,500	1,300	-1,300	158,69987	0,20439	158,450	158,997
12	19,600	0,950	-0,950	20,17047	0,25156	19,830	20,541
SC 13	2,000	0,850	-0,850	2,62974	0,03815	2,526	2,695
14	23,000	1,000	-1,000	23,89267	0,10753	23,695	24,035
15	23,800	1,000	-1,000	24,20407	0,04608	24,095	24,280
16	45,000	1,000	-1,000	45,56913	0,16479	45,332	45,868
17	83,000	1,200	-1,200	83,07233	0,09943	82,929	83,316
18	23,800	1,000	-1,000	24,19040	0,04039	24,107	24,266
19	45,000	1,000	-1,000	44,49487	0,20609	44,169	44,793
20	83,000	1,200	-1,200	83,33600	0,17013	83,075	83,692
21	9,000	0,850	-0,850	10,58453	0,14096	10,343	10,772
22	9,000	0,850	-0,850	10,69080	0,17401	10,402	10,930
23	17,000	0,850	-0,850	16,53940	0,16086	16,262	16,713
24	17,000	0,850	-0,850	16,47680	0,15390	16,197	16,656
SC 25	11,000	0,850	-0,850	10,90453	0,13047	10,712	11,052
26	11,000	0,850	-0,850	10,80180	0,11333	10,546	10,938
27	32,000	1,000	-1,000	32,78253	0,27678	32,414	33,427
28	137,700	1,300	-1,300	137,83433	0,13181	137,648	138,016
29	17,500	0,850	-0,850	17,69153	0,17884	17,372	18,120
30	34,000	0,950	-0,950	35,23613	0,35383	34,768	35,878
31	0,000	1,300	-1,300	-0,96953	0,18852	-1,488	-0,725
32	0,000	1,000	-1,000	1,59200	0,18127	1,377	1,990
33	5,500	0,850	-0,850	5,59487	0,22975	5,208	5,937

3.5 7818 geometria B.

Pozíció	Előírt méret	Felső tűrés	Alsó tűrés	X	S	$X_{\min}$	$X_{\max}$
34	5,500	0,850	-0,850	5,48340	0,21974	5,112	5,785
35	5,500	0,850	-0,850	5,56187	0,18459	5,260	5,844
36	5,500	0,850	-0,850	5,67600	0,20643	5,366	6,034
37	20,500	0,950	-0,950	19,60467	0,29685	19,186	20,103
38	20,500	0,950	-0,950	19,58280	0,29195	19,128	20,039
39	20,500	0,950	-0,950	19,92353	0,26097	19,601	20,345
40	20,500	0,950	-0,950	19,78233	0,24480	19,444	20,185
41	0,000	0,850	-0,850	0,86713	0,22210	0,593	1,342
42	0,000	0,850	-0,850	0,77620	0,20871	0,507	1,156
43	0,000	0,850	-0,850	0,69327	0,25480	0,339	1,156
44	0,000	0,850	-0,850	0,69713	0,20659	0,446	1,104
45	24,000	10,000	-10,000	23,80867	0,18041	23,568	24,095
46	24,000	10,000	-10,000	23,80180	0,14018	23,591	24,014
47	24,000	10,000	-10,000	23,90701	0,09646	23,761	24,037
48	24,000	10,000	-10,000	23,68613	0,11710	23,512	23,838
49	30,000	1,000	-1,000	29,41527	0,08628	29,264	29,545
50	30,000	1,000	-1,000	29,56373	0,04699	29,479	29,649
51	30,000	1,000	-1,000	29,64327	0,06481	29,517	29,742
52	30,000	1,000	-1,000	29,56187	0,07103	29,407	29,665
53	38,000	1,000	-1,000	38,82393	0,14062	38,598	39,038
54	78,500	1,200	-1,200	80,33927	0,15572	80,129	80,633
55	91,500	1,200	-1,200	91,10060	0,16078	90,788	91,379
56	12,500	0,850	-0,850	12,94847	0,14818	12,719	13,168
57	0,000	0,850	-0,850	0,86667	0,13510	0,691	1,193
58	5,500	0,850	-0,850	9,22727	0,14826	9,038	9,671
59	20,500	0,950	-0,950	20,45373	0,07999	20,330	20,621
60	90,000	1,200	-1,200	89,73080	0,05430	89,647	89,807
61	2,500	0,850	-0,850	1,38800	0,15895	1,218	1,686
62	2,500	0,850	-0,850	1,66713	0,18765	1,330	1,928
63	2,500	0,850	-0,850	1,38647	0,15561	1,183	1,652
64	2,500	0,850	-0,850	1,62080	0,11727	1,471	1,858
65	78,700	1,200	-1,200	79,28273	0,06191	79,151	79,402

4. Valós öntvény méreteinek mért és szimulációval számított átlag értékei

6. méret



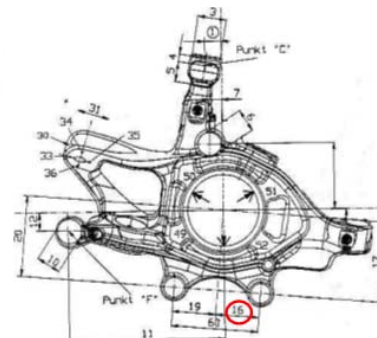
Átlagos szimulált méret: 24,5733mm

Átlagos mért érték: 24,731mm

Az eltérés: -0,1577mm

A tolerancia értéke $\pm 0,95$ mm.

16. méret



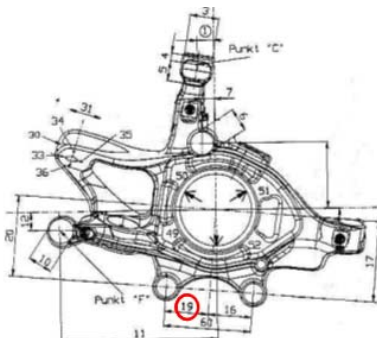
Átlagos szimulált méret: 44,89mm

Átlagos mért érték: 45,6013mm

Az eltérés: -0,71125mm

A tolerancia értéke ± 1 mm.

19. méret



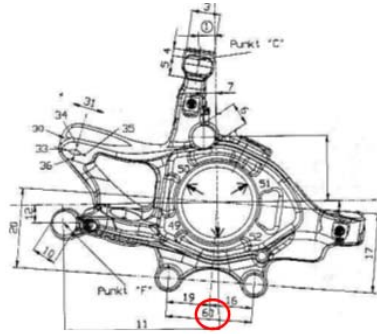
Átlagos szimulált méret: 45,27mm

Átlagos mért érték: 44,485mm

Az eltérés: 0,785mm

A tolerancia értéke ± 1 mm.

60. méret



A 60 méret átlag értékei:

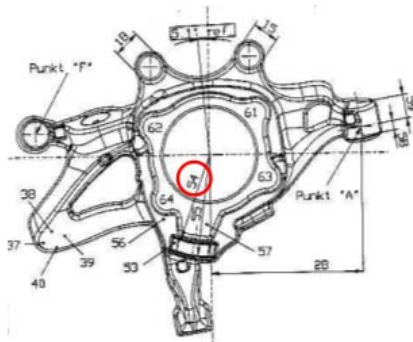
Átlagos szimulált méret: 90,16mm

Átlagos mért érték: 89,7313mm

Az eltérés: 0,4287mm

A tolerancia értéke $\pm 1,2\text{mm}$

54. méret



Az 54 méret átlag értékei:

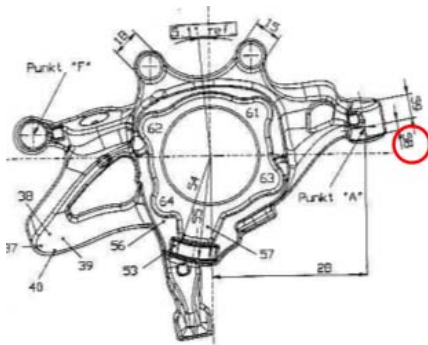
Átlagos szimulált méret: 80,22mm

Átlagos mért érték: 80,363mm

Az eltérés: -0,143mm

A tolerancia értéke $\pm 1,2\text{mm}$.

58. méret



Az 58 méret átlag értékei:

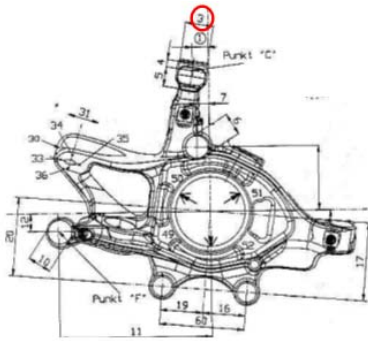
Átlagos szimulált méret: 9,246mm

Átlagos mért érték: 9,35175mm

Az eltérés: -0,10575mm

A tolerancia értéke $\pm 0,85\text{mm}$.

3. méret



A 3 méret átlag értékei:

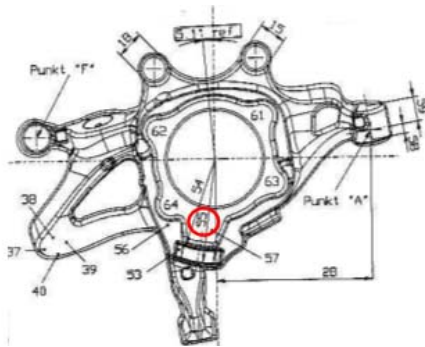
Átlagos szimulált méret: 30,63mm

Átlagos mért érték: 30,532mm

Az eltérés: 0,098mm

A tolerancia értéke ± 1 mm.

55. méret



Az 55 méret átlag értékei:

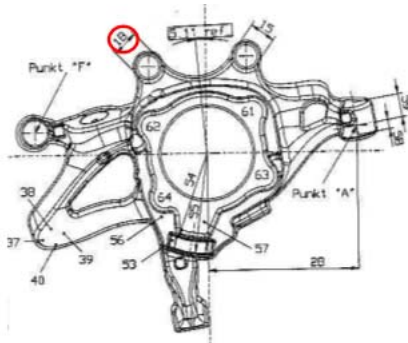
Átlagos szimulált méret: 91,08333mm

Átlagos mért érték: 91,054mm

Az eltérés: 0,02933mm

A tolerancia értéke $\pm 1,2$ mm.

18. méret



A 18 méret átlag értékei:

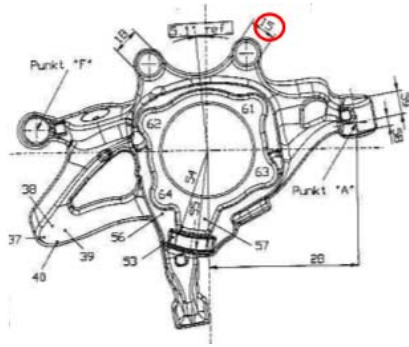
Átlagos szimulált méret: 24,02667mm

Átlagos mért érték: 24,1765mm

Az eltérés: -0,14983mm

A tolerancia értéke ± 1 mm.

15. méret



A 15 méret átlag értékei:

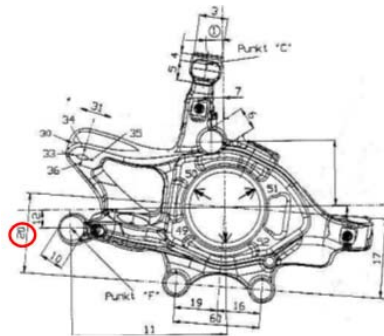
Átlagos szimulált méret: 23,96667mm

Átlagos mért érték: 24,19625mm

Az eltérés: -0,22958mm

A tolerancia értéke ± 1 mm

20. méret



A 20 méret átlag értékei:

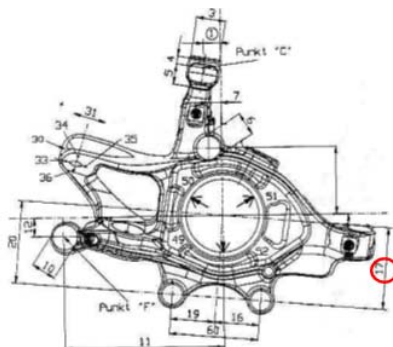
Átlagos szimulált méret: 83,12mm

Átlagos mért érték: 83,36575mm

Az eltérés: -0,24575mm

A tolerancia értéke $\pm 1,2$ mm.

17. méret



A 17 méret átlag értékei:

Átlagos szimulált méret: 83,00667mm

Átlagos mért érték: 83,10775mm

Az eltérés: -0,10108mm

A tolerancia értéke $\pm 1,2$ mm.