

Lemezgrafitos vasöntvények visszamaradó öntési feszültségének mérése és véges elemes szimulációja

Dr. Molnár Dániel

*Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Metallurgiai és Öntészeti Intézet
daniel.molnar@uni-miskolc.hu*

BEVEZETÉS

A számítógépes szimuláció az utóbbi években a korszerű öntvénygyártás és tervezés egyre nagyobb mértékben alkalmazott segédeszközévé vált. A költséges kísérletsorozatok lerövidítése, illetve mellőzése, valamint a kialakuló hiba okok feltárása érdekében napjainkban már széles körben elterjedt a különféle öntészeti szimulációs programok alkalmazása.

Az öntés közben lejátszódó folyamatok fő jellemzőik alapján két részre oszthatóak: anyag-hőtranszport folyamatok. Ha ezeknek a folyamatoknak a vizsgálata a célunk, akkor a rendelkezésre álló szimulációs módszerek közül az alapján kell választanunk, hogy melyik részfolyamatot kívánjuk megfelelő pontossággal számítani. Jelen esetben az öntvényekben kialakuló visszamaradó öntészeti feszültségek számítási eredményeit kívánjuk bemutatni, ami inhomogén-, időben változó hőmérséklettérben kialakuló feszültségek számítását jelenti. Ezt a hőtranszport folyamatot olyan fizikai alapokon nyugvó szimulációs programmal számítjuk, mely a Fourier hőátadási egyenletet alkalmazza, háromdimenziós hőátadást feltételezve. 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. Dolgozatunkban bemutatjuk az öntvényekben kialakuló visszamaradó öntési feszültségek eredetét és okait, a laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatoknál alkalmazott próbatesteket, a véges elem rendszerek működését, a hőtani- és hőfeszültségi folyamat számításának módszerét, valamint a laboratóriumi- és a szimulációs számítások eredményeit.

Vizsgálataink során az RWP GmbH cég által fejlesztett SIMTEC / WinCast véges elemes szimulációs szoftverrendszert alkalmaztuk. A próbatesteket a Metallurgiai és Öntészeti Intézet műhelycsarnokában készítettük.

1. Az öntvényekben kialakuló öntési feszültségek

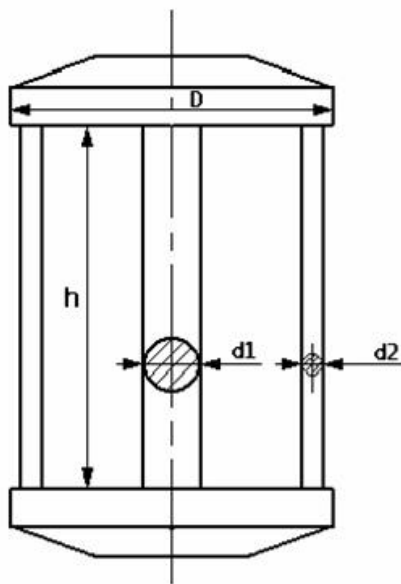
Az öntvényekben a megszilárdulás- és lehülés folyamán feszültségek keletkeznek. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy az öntvények zsugorodnak és bennük hőmérséklet különbségek alakulnak ki. Ha az ötvözet folyáshatáránál a keletkezett feszültségek nagyobbak, az öntvényben képlékeny alakváltozás jön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

Ha a lehülés 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

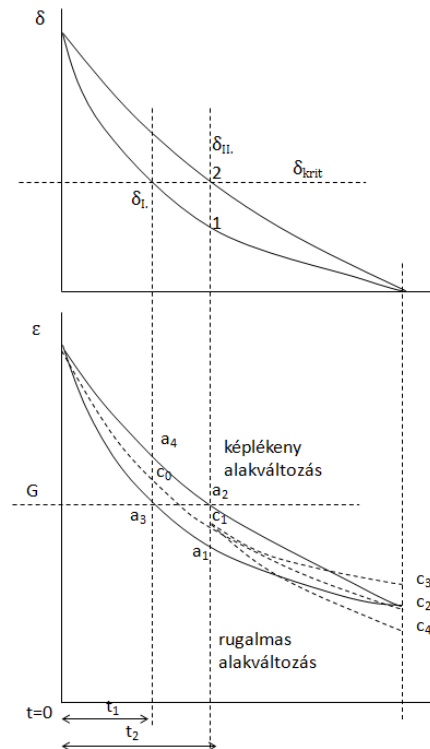
terhelés) a felhalmozódott rugalmas feszültségek elősegíthetik az öntvény törését valamint a feszültségekkel terhelt öntvények a megmunkálás során méretüket változtatják és bekövetkezhet az öntvények vetemedése, deformálódása. A felhalmozódott rugalmas feszültségek következtében az öntvények alakjukat 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.

1.1 Az öntési feszültségek meghatározása

Az öntvényekben visszamaradó feszültségek mérése bonyolult és nehezen kivitelezhető feladat, ezért a törvényszerűségek összefüggésének megállapítására egyszerű geometriájú próbatesteket alkalmaznak. A próbatestek segítségével összefüggéseket lehet keresni az ötvözetek összetételének függvényében a várható visszamaradó öntési feszültség, a rugalmas alakváltozás, a vetemedés és az alakváltozás okainak felderítésére. A leggyakrabban alkalmazott technológiai próbatest a különféle falvastagságú, szögletes, vagy kör keresztmetszetű rudakból álló szimmetrikus Bauer-Shipp-féle feszültséggrács, mely az 1. ábrán látható. A próbatest vastag és vékony rúdjának hőmérséklet- és zsugorodás változása az idő függvényében a 2. ábrán látható. [1,2]



1. ábra. Bauer-Shipp féle feszültséggrács próbatest



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

A 2. ábrán látható, hogy a vékony rúd t_1 időpontban éri el a rugalmas alakváltozás határát, ami alapján a lehűlési folyamat három szakaszra osztható:

1) A lehülés első szakaszában, a δ_{kr} hőmérséklet eléréséig a feszültségrács rúdjaik szabad zsugorodása nem mehet végbe akadálytalanul, ezért valójában a zsugorodási görbe alakját a c_0, c_1, c_2 szaggatott vonallal jelölt görbe mutatja. A vékony rúd $\overline{c_0 a_2}$ távolsággal arányosan, a vastag rúd pedig $\overline{c_0 a_4}$ távolsággal arányosan összenyomódott.

2) 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 $\overline{a_2 c_1 - a_4 c_0}$ távolsággal arányosan képlékenyen összenyomódott, míg a vékony rúd megnyúlása ($\overline{c_0 a_3 = c_1 a_1}$) változatlan maradt. A lehülés végén a vékony rúd $\overline{c_2 c_3}$ mértékben rugalmasan összenyomódott, a vastag rúd $\overline{c_2 c_4}$ arányban rugalmasan megnyúlt. A feszültségrács próbatest vastag rúdjában húzó- a vékony rúdjában nyomófeszültség keletkezik.

3) A hátralévő időben mindkét rúd a rugalmas alakváltozás tartományában van.

A próbatestben kialakuló öntési feszültség meghatározásának alapja az, hogy a vastagabb öntvényrészt a rugalmas húzófeszültség hatása alól felszabadítjuk. A próbatest középső rúdját a szimmetriatengely vonalában befűrészljük, ami egy bizonyos csökkent keresztmetszetenél a visszamaradó feszültségek hatására elszakad. A fűrészelt és a szakadt terület arányát meghatározzuk, majd a vastagabb rúdból kimunkálunk egy szabványos szakító próbatestet, melynek meghatározzuk a szakító szilárdságát.

Ha a visszamaradó feszültség hatására elszakadt keresztmetszetet F_1 -vel jelöljük, akkor a vastagabb rúdban az F_1 keresztmetszet elszakadását létrehozó erő az alábbi módon írható fel:

$$F = F_1 R_m \quad (1)$$

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

$$F = \sigma_m F_0 \quad (2)$$

Mivel a két erő egymással egyenlő, ezért felírható, hogy:

$$\sigma_m \cdot F_0 = F_1 R_m \quad (3)$$

Amiből kiszámítható a visszamaradó öntési feszültség:

$$\sigma_m = \sigma_B \frac{F_1}{F_0} \quad (4)$$

Ezzel a módszerrel az ún. szimmetrikus, kettőskeretű rácsok csoportjába tartozó feszültségrács próbatest jól használható a tényleges visszamaradó feszültség meghatározására és a különféle befolyásoló tényezők hatásának megállapítására.

A technológiai próbakon 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.

2. A véges elemes szimuláció

Folytonos közegek számítása esetén bármely változó (pl. hőmérséklet, 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 értékeit.

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 elem 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 elem módszer mindig egy többlépcsős számítási struktúrát követ, ami az alábbi lépésekből áll.

A kontinuum diszkretizációja, vagyis a megoldandó régió elemekre osztása különféle elemtípusok alkalmazásával.

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

Az elemek értékeinek meghatározása, vagyis az egyes elemek tulajdonságait leíró, mátrixban lévő egyenletek felírása direkt-, vagy variációs közelítéssel.

Az elemek értékeinek összesítése a rendszert leíró egyenletek felírásához. A vizsgált rendszer össztulajdonságainak meghatározásához összegezni kell az egyes elemek számított 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.

A peremfeltételek megadása, vagyis a rendszert leíró egyenletek módosítása oly módon, hogy figyelembe lehessen venni a peremfeltételeket.

A rendszert leíró egyenletek megoldása. Az összegzési folyamat több, szimultán megoldandó egyenletet eredményez, melyek 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

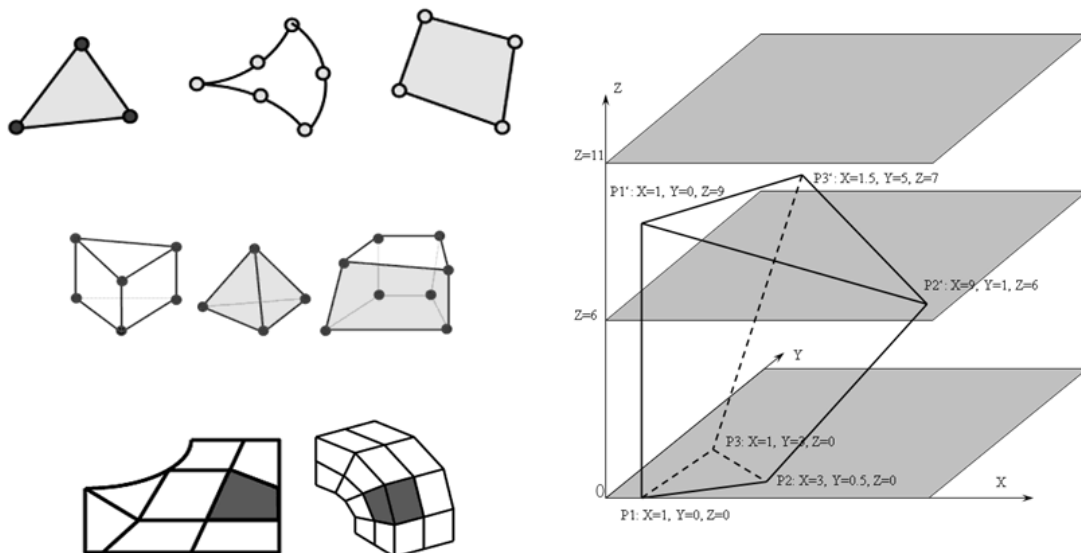
egyenletrendszert kell megoldanunk. Mindkét egyenletrendszer lehet lineáris, vagy nem lineáris.

További számítások elvégzése. Számos esetben a rendszert leíró egyenletek megoldásával előállt eredményeket további számítások bemenő paramétereiként alkalmazzuk. Esetünkben ekkor végezzük el az időben változó inhomogén hőmérsékletterben kialakuló visszamaradó öntési feszültségek számítását. [3]

2.1 A kontinuum diszkretizációja

A véges elem módszer működésének esetén láthattuk, hogy a megoldandó régió elemekre osztása különféle elemtípusok alkalmazásával lehetséges. Az öntvények, mint háromdimenziós testek hálózása, a legtöbb esetben bonyolult feladat, mivel általában komplex geometriájú, falvastagság átmenetekkel rendelkező testekről van szó. Az optimális hálózás kialakításához először a kétdimenziós hálót kell generálni, majd annak térbeli kifejtésével hozható létre a háromdimenziós háló. A kétdimenziós háló generálására különböző módszerek alkalmazhatóak, mint a konform leképezés, a geometriai partícionálás, az illesztett rács alapú közelítés, csatlakoztatott elem közelítés és a leggyakrabban alkalmazott módszer, a csomópont összekötő közelítés. Ennek során a hálót a geometria csomópontjainak összekötésével alakítjuk ki. Az így kapott elemek közvetlenül is alkalmazhatóak, de illeszteni is lehet őket az objektum határához.

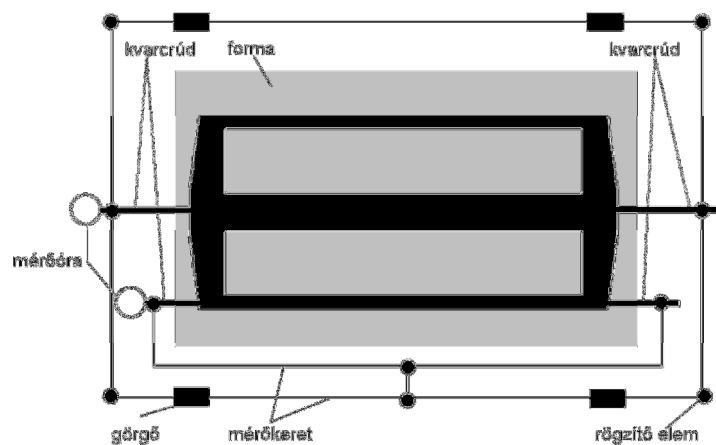
A véges elem hálózás során alkalmazható 2D és 3D elem- és hálótípusok a 3. ábra bal oldalán láthatóak. A szimulációs vizsgálataink során a 3. ábra jobb oldalán látható háromdimenziós pentahedron (prizma) elemet alkalmaztuk. [4-5]



3. **ábra.** A véges elem hálózás során alkalmazható elem- és hálótípusok és az alkalmazott prizma elem

3. Visszamaradó öntési feszültségek mérése

Kísérleteink során különböző átmérő aránnyal öntött feszültségrács próbatesteket vizsgáltunk. A középső és a szélső rudak átmérője rendre 32-12, 32-20, 42-20, ill. 42-30 mm volt. A próbatesteknek a kémiai összetételét, telítési számát, grafitosodási hajlamát, szakítószilárdságát, keménységét, visszamaradó öntési feszültségét, relatív feszültségét, rugalmassági modulusát, relatív keménységét és relatív szilárdságát mértük, ill. számítottuk. A kísérleti adagokat 50 kg befogadóképességű középfrekvenciás tégelyes indukciós kemencében olvasztottuk. A forma anyaga minden esetben bentonitos nyers formázókeverék volt. A próbatestek mérési elrendezése a 4. ábrán látható.



4. ábra. A visszamaradó öntési feszültségek mérésének elvi rajza

A saját kísérletek, szakirodalmi források és korábbi kutatómunkákhoz tartozó vizsgálatok eredményeinek feldolgozásával létrehoztam egy olyan adatbázist, amely alapján vizsgálom a feszültségrács próbatest mérési eredményei és a szimulációs eredmények közötti kapcsolatot. [6-9]

3.1 A visszamaradó öntési feszültség és a szilárdsági tulajdonságok kapcsolata

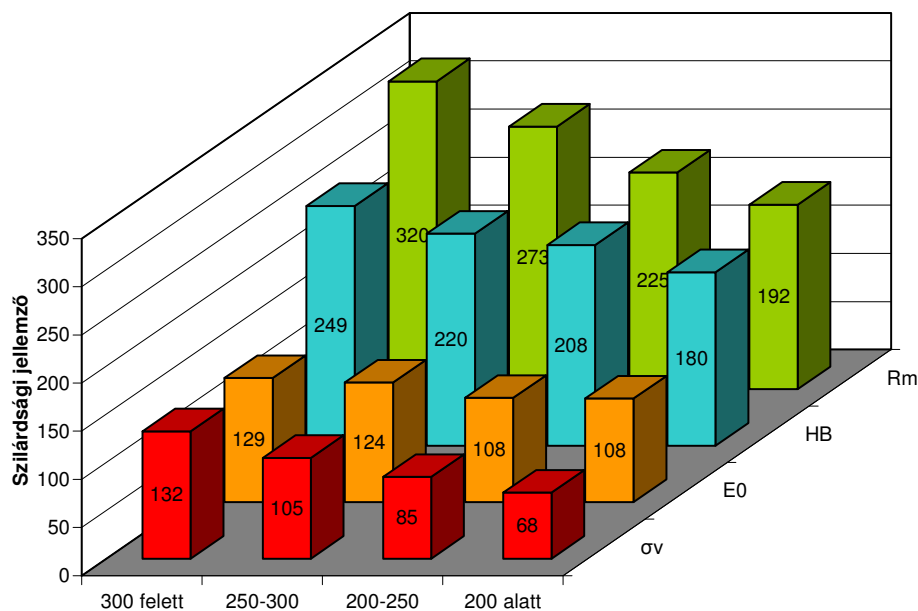
A visszamaradó öntési feszültség összefügg a lemezgrafitos öntöttvas mechanikai tulajdonságaival és a szövetszerkezetével. A lemezgrafitos öntöttvasak mechanikai tulajdonságainak vizsgált jellemzője a szakítószilárdság (R_m) és a Brinell keménység (HB). Ezekből származtatott jellemző a rugalmassági modulus (E_0). A visszamaradó öntési feszültség és a szilárdsági tulajdonságok kapcsolatát a szabványos szilárdsági kategóriák szerinti csoportokat képezve, a mérési eredmények átlagértékei alapján mutatom be. Az átmérő 32-12 mm geometriájú próbatestek mért és számított értékeinek átlaga az 1. táblázatban látható.

1. 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	Rm, N/mm ²	σ_v , N/mm ²	$(\sigma_v/Rm)^*$ 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

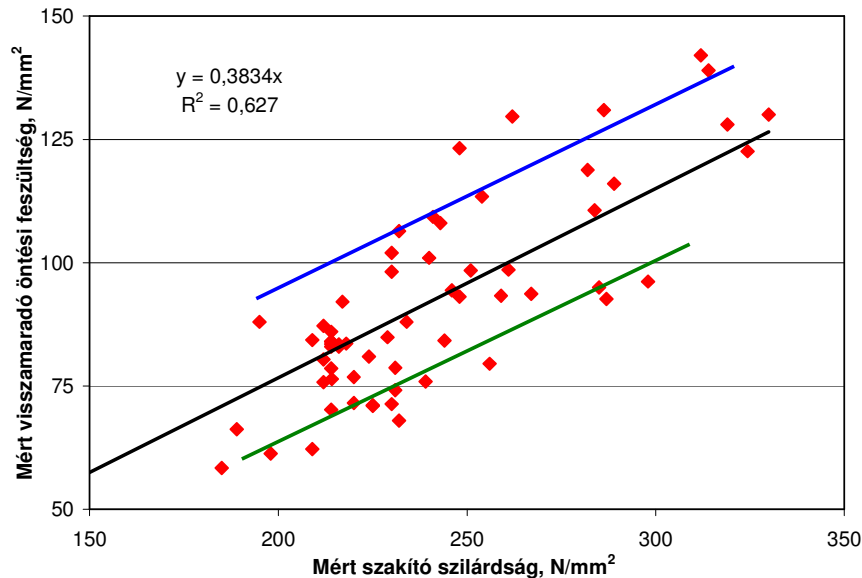
A visszamaradó öntési feszültség és szilárdsági tulajdonságok kapcsolatát az 5. ábra szemlélteti.



5. 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 6. ábra szemlélteti.



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

A 6. ábra trendvonalának egyenlete

$$\sigma = 0,3834 \cdot R_m \quad (5)$$

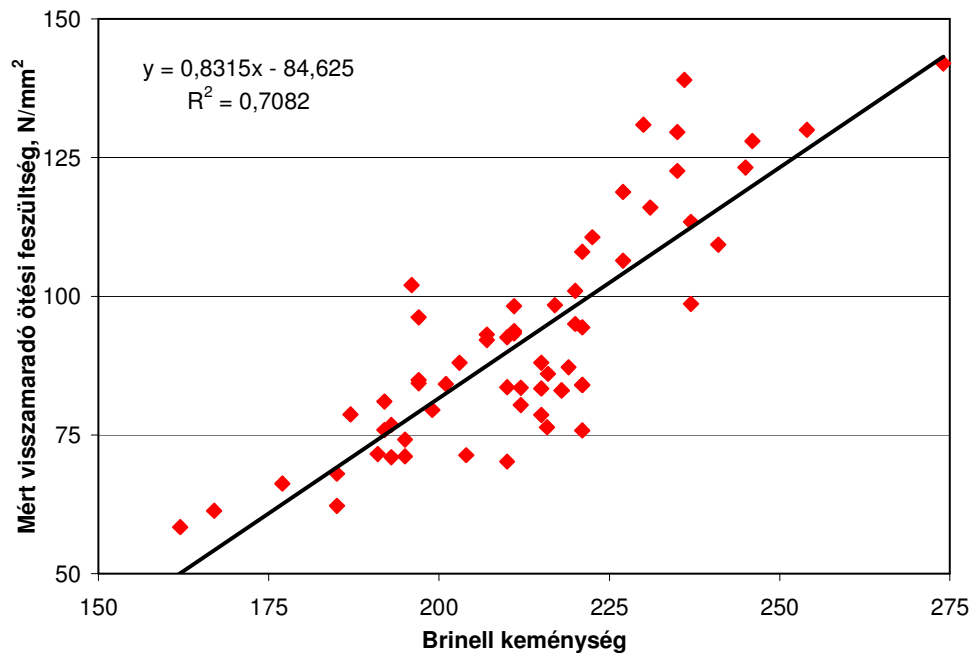
A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,63$

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

A különböző összetételű, különböző betétanyagból, különböző olvadékezeléssel előállított próbák mérési eredményei azt mutatják, hogy azonos szakítószilárdság esetén a visszamaradó öntési feszültség jelentős mértékben változik. A vizsgált próbák metallurgiai jellemzői alapján a közelítő összefüggéshez képest nagyobb feszültség értékeket a kedvezőtlen betétanyagból (öntöttvas töredék, forgács, acélhulladék), illetve a nem megfelelő olvadékezeléssel, 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 Brinell keménység (HB) értékeket használtam. A visszamaradó öntési feszültség és a Brinell keménység kapcsolatát a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra. A visszamaradó ötési feszültség és a Brinell keménység kapcsolata

A 7. ábra trendvonala, vagyis a mérési eredmények kapcsolata egyenes arányosságot feltételezve a

$$\sigma = 0,83 \cdot HB - 85 \quad (6)$$

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.

4. Visszamaradó ötési feszültségek szimulációja

A véges elem szimuláció során a feszültséggrác próbatetek CAD geometriájából kiindulva hoztam létre a véges elem hálót. A vizsgált modell hálózása során izotropikus hálózási elvet alkalmaztam, így alacsony elemszám mellett is megfelelő pontossággal tudtam leírni a vizsgált geometriát. Az előállt véges elem háló 830 csomópontból állt, a számítási tartományt (forma) leíró elemek száma 20196 volt.

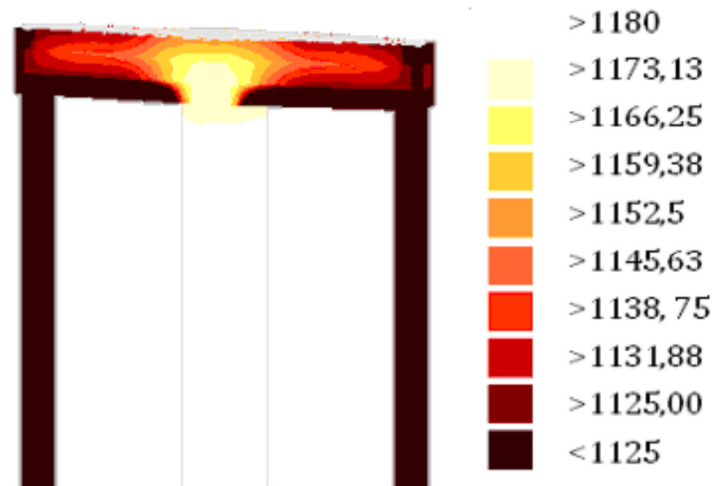
A kiindulási és peremfeltételek megadása során az alábbi bemenő paramétereket definiáltam:

- 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 szabadteszterű 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 szimuláció során ún. „Natural Erstarrung” kiindulási feltételt definiáltam, ami azt jelenti, hogy az adott geometriát a formatöltés elhanyagolásával vizsgálom. Ennek során feltételezem, hogy a számítás kezdeti időpontjában a formaüreg azonos hőmérsékletű olvadékkal van kitöltve és a teljes számítási tartományban homogén hőmérsékletű 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 $t=27,5\text{s}$ időpillanatban a 8. ábrán látható. szemlélteti. Skála: hőmérséklet. T_L-T_s : $1180-1125^\circ\text{C}$.

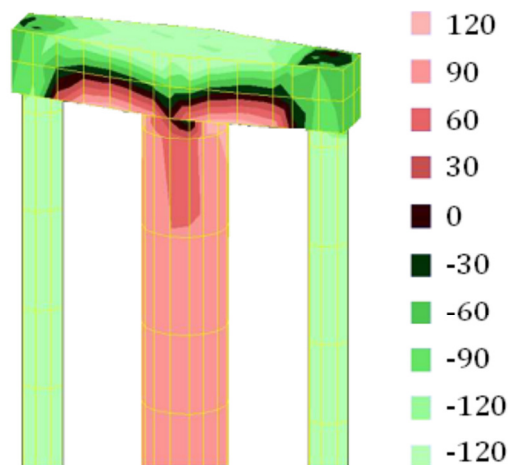


8. ábra. A próbatest dermedése

A

8. 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 9. ábra szemlélteti. Skála: visszamaradó öntési feszültség: $-120 - +120\text{N/mm}^2$. A középső rúdiban húzófeszültség, a szélső rudakban nyomófeszültség, az összekötő hármban hajlító nyomaték keletkezik.



9. ábra. Visszamaradó öntési feszültség

A különböző keresztmetszet arányú feszültségrács próbatesteken mért és szimulációval számított visszamaradó öntési feszültségek értéke az 2. táblázatban láthatóak.

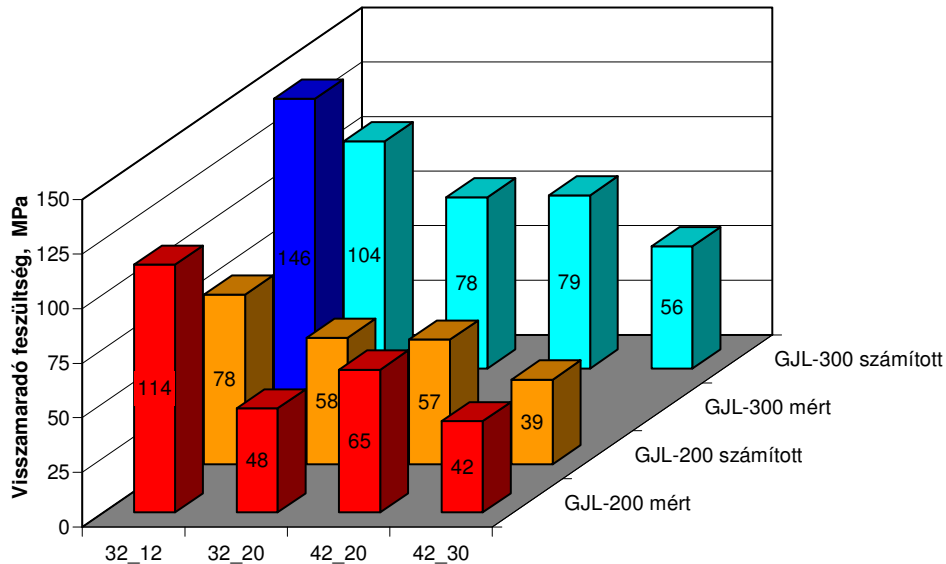
2. táblázat. A próbatesteken mért és szimulációval számított visszamaradó öntési feszültségek

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 10. ábra szemlélteti.

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.

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



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

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 szövetszerkezeti eltérését.

4.1 Az öntési feszültség és a lehülési viszonyok kapcsolata

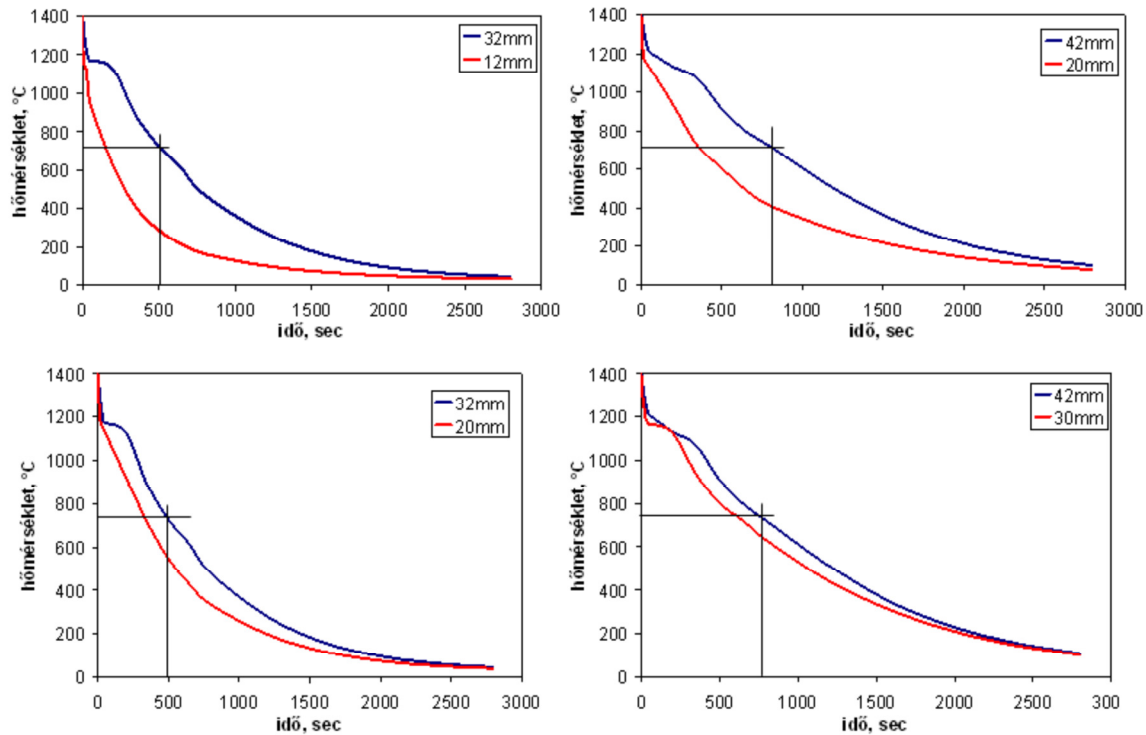
A feszültségrács próbatest hossz tengelyre merőleges szimmetria síkjában a középső és a szélső rúd középpontjában lehülési görbék adatát vizsgáltam a szimuláció eredményei alapján. A különböző keresztmetszet arányú próbatestek lehülési görbéit GJL-200 anyagminőség esetén a 11. ábra szemlélteti.

A lehülési görbék kezdőértéke (öntési hőmérséklet) és végső értéke (szobahőmérséklet) azonos, a két szélső időpont között változó hőmérséklet-különbséget mutatnak. A szakirodalmi adatok alapján kijelenthető, hogy 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 lehülési görbéken jelöltem az A1 átalakulás hőmérsékletét. Ahol ez az egyenes el metszi a vastag rúd lehülési görbéjét, ott az Y tengellyel párhuzamosan levetíték egy egyenest, ami metszi a vastag és a vékony rudak lehülési görbéjét 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 3. táblázatban láthatóak.



11. ábra. A feszültségrács próbatestek rúdjaik geometriai középpontjában felvett lehülési görbék GJL-200 anyagminőség esetén

3. táblázat. A hőmérséklet-különbség és a visszamaradó öntési feszültség kapcsolata

Átmérő, mm	GJL-150		GJL-200		GJL-300	
	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 a (7) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,956$.

$$\sigma_v = 0,0726 \cdot \Delta T_{A1} + 32,185 \quad (7)$$

GJL-200 anyagminőség esetén az összefüggés a (8) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,8633$.

$$\sigma_v = 0,0976 \cdot \Delta T_{A1} + 33,221 \quad (8)$$

GJL-300 anyagminőség esetén az összefüggés a (9) egyenlettel írható le. A korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,8811$.

$$\sigma_v = 0,1214 \cdot \Delta T_{A1} + 48,833 \quad (9)$$

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

$$\sigma_v = (0,0003 \cdot Rm + 0,0299) \cdot \Delta T_{A1} + (0,1178 \cdot Rm + 12,563) \quad (10)$$

5. Összefoglalás

Laboratóriumi körülmények között öntött feszültséggrács próbatestek segítségével megvizsgáltuk a visszamaradó öntési feszültség, valamint a mért és származtatott értékek közötti összefüggéseket. A mért és származtatott értékek közül kiemelten vizsgáltuk a visszamaradó öntési feszültség és a Brinell-keménység kapcsolatát, 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 elvégzett véges elemes szimulációs vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a visszamaradó öntési feszültség várható értéke meghatározható a próbatest vastag rúdjának A1 átalakulási hőmérsékletéhez tartozó, időpontban kialakuló vastag-vékony rúd hőmérsékletének különbsége alapján.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Köszönöm Dr. Dúl Jenő egyetemi docens, tanszékvezető segítségét.

Felhasznált irodalom

1. E. Gustafsson, M. Hofwing, N. Strömberg: Simulation and Measurement of Residual Stresses in a Stress Lattice; Linköping, Sweden 2007
2. Dr.-Ing. A. Egner-Walter, S. Olive: Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings; Metallurgical Science and Technology; volume 24 n.2
3. Kenneth H. Huebner: Finite element for engineers; John Wiley & Sons, Canada 2001
4. Kurutzné Kovács Márta, Scharle Péter: A végeelem-módszer egyszerű elemei és elemcsaládjai; Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
5. SIMTEC/WinCast User's Manual; Roetgen, Germany, 2003
6. Az olvasztástechnológia korszerűsítése, Zárójelentés; Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1977

7. Hazai acélnyersvasak átolvasztása indukciós tégelykemencében, Zárójelentés; Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1980
8. Vékonyfalú lemezes és gömbgrafitos öntvénygyártáshoz használható nagy hatékonyságú módosítóanyag előállítása, Zárójelentés; Miskolci Egyetem, Öntészeti Tanszék, 1989
9. W. Menk, S. Prukner, L. Kniewaller: Gussteile erobern das Hoheitsgebiet der Schmiedeteile; Giesserei, 2007/12