

**MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR**



**ÖNTÉSTECHNIKAI ÉS HŐTECHNIKAI PARAMÉTEREK
HATÁSA AZ ALUMÍNIUM NYOMÁSOS ÖNTVÉNY
SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGAIRA**

PhD-értekezés

Készítette:
SZABÓ RICHÁRD
okleveles kohómérnök

**KERPÉLY ANTAL ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA**

Vezetője:
Dr. Roósz András
akadémikus, egyetemi tanár

Tudományos vezető:
Dr. Dúl Jenő
egyetemi docens

Miskolc
2012

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	3
1. BEVEZETÉS	5
2. A NYOMÁSOS ÖNTVÉNYEK TULAJDONSÁGAIT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK HATÁSA	7
2.1. Nyomásos öntészeti ötvözetek	12
2.2. Nyomásos öntészeti technológiák	18
2.3. Hőmérséklet-viszonyok	27
2.4. A stroncium hatása az AlSi-ötvözetek szilárdsági tulajdonságaira	43
3. ELŐÍRT SZILÁRDSÁGÚ NYOMÁSOS ÖNTVÉNY TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA	47
3.1. A problémakör bemutatása, kísérleti célkitűzés	47
3.2. A vizsgált öntvény és az előírt követelmények	48
3.3. Az öntvény megfelelőségének vizsgálata	49
3.4. Öntéstechnikai és hőtechnikai tervezés, szimuláció	52
3.5. A gyártási körülmények bemutatása	65
3.6. Kísérleti program	67
4. AZ ÖNTÉSTECHNIKAI ÉS HŐTECHNIKAI PARAMÉTEREK HATÁSA A SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGOKRA	69
4.1. Gépbeállítási paraméterek hatásának vizsgálata	69
4.2. A hőmérséklet-viszonyok hatásának vizsgálata	75
4.3. A stroncium hatásának vizsgálata	79
4.3. Az oxidhártya olvadékba keveredésének hatása	84
5. ÖSSZEFOGLALÁS	88
SUMMARY	89
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	90
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	92
SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK	93
AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBŐL MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK ...	95

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A_f	szétfeszítő felület	$[m^2]$
g	gravitációs gyorsulás	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
C	fajhő	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
F_{max}	töréshez tartozó szakító erő	$[kN]$
c_e	párolgáshő	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
d	átmérő	$[m]$
E	hűtőfurat távolsága a formakontúrtól	$[m]$
α	hőátadási tényező	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
λ	hővezetési tényező	$\left[\frac{W}{mK}\right]$
k	dermedési időállandó	$\left[\frac{s}{cm^2}\right]$
$\dot{\Phi}$	hőáram	$\left[\frac{W}{m^2 s}\right]$
Q	hőmennyiség	$[J]$
M	redukált falvastagság	$[cm]$
L	látens hő	$[J/kg]$
m	tömeg	$[kg]$
P	teljesítmény	$[W]$
p	nyomás	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$
S	alaktényező	
r	sugár	$[m]$
$\dot{V}$	térfogatáram	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
t_z	ciklusidő	$[s]$
T	hőmérséklet	$[^{\circ}C]$
t	idő	$[s]$
A_m	megvágás (bekötő csatorna) keresztmetszete	$[m^2]$
V	térfogat	$[m^3]$
v	sebesség	$\left[\frac{m}{s}\right]$
v_{d1}	dugattyú sebessége az 1. fázisban (kamratöltés)	$\left[\frac{m}{s}\right]$
v_{d2}	dugattyú sebessége a 2. fázisban (formatöltés)	$\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ	sűrűség	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
F_g	töltöttségi fok az öntőkamrában	[%]
FEM	véges elemes geometria felosztási módszer	
ε	emissziós tényező	$\left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$
CAD	számítógéppel támogatott tervezés	
FDM	véges térfogatelemes geometria felosztási módszer	
STL	felületmodell (stereolithography)	
σ	Stefan-Boltzmann-állandó	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a rohamosan fejlődő iparban az egyik legdinamikusabban fejlődő iparág a nyomásos öntészet.

Az öntészet ezen ágát régóta alkalmazzák elsősorban vékonyfalú, kiváló felületi minőséget és szilárdságot követelő, méretpontos, nyomástömör – jellemzően alumíniumból készült – öntvények sorozatgyártásánál, mivel a könnyű szerkezettel energiát és költséget lehet megtakarítani. Ez a technológia mondható legmodernebbnek mind közül, ezért a legdrágább is. Nagy gyakorlati tapasztalat szükséges az előírt tulajdonságokkal rendelkező nyomásos öntvények optimális és gazdaságos gyártásához..

A magyar nyomásos öntő iparág nagyrészt a nyugat-európai autóiipari beszállító cégek számára készít termékeket. Nyomásos öntéssel cink, ólom, ón, magnézium, réz és alumínium ötvözeteket lehet önteni. Nemzetközi szinten az utóbbi években a darabnagyságot tekintve egyre nagyobb a szerepe a magnézium ötvözeteknek, azonban még mindig magasan vezetnek e téren az alumínium ötvözetek.

Az autógyártók törekvése, hogy a lehető legkisebb költség mellett a legtöbb funkciót megvalósító alkatrészek, berendezések, alkalmazások épüljenek be végtermékeikbe.

A költségcsökkentés egyik fontos eleme az alkatrészek tömegének csökkentése, amely következésképpen az előírt szilárdsági követelmények növelésével jár együtt. Napjainkban a korszerű termékeknél alkalmazott anyagminőségek tulajdonságait maximálisan kihasználják. Ennek egyik nagyon jó példája a gépjárművekbe beépített felcsévélő orsó nevű nyomásos öntvény.

A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény az autók biztonsági öv rendszerének egyik eleme, ún. fékeződobja. Biztonsági elem lévén szigorú követelményrendszernek kell megfelelnie.

A gépjárművekben a biztonsági öv a hirtelen lassításoknál, fékezéseknél megakadályozza a jármű vezetőjének és utasainak a jármű ülésétől való elszakadást, a jármű részeivel való ütközést, ezáltal életet menthet. Az öv egyik vége a dobhoz van kapcsolva, így az általa kifejtett fékezőerő átadódik a dobra, ez a hatás húzóerőként szimulálható, amelynek maximum értékénél a darabnak az öv rögzítésére szolgáló része eltörik.

A szerelhetőség által kívánt méretpontosságon felül tehát egy funkcionális tulajdonság is előtérbe kerül, amelyet egy ún. beépített állapotbeli igénybevétellel

vizsgálunk és a felcsévelt öv által kifejtett erőnek a töréshez tartozó értékével jellemezzük. A különböző típusú és geometriájú öntvényekhez más-más előírt szakítóerő tartozik (9 kN, 12 kN, 15kN).

A nyomásos öntéssel gyártott öntvények szilárdsága jelentősen függ az ötvözettől, ezen belül a fémkezelés és nemesítés folyamatától, a 3D geometriától (falvastagság, ferdeségek, rádiuszok nagysága), az öntéstechnológiai és hőtechnikai paraméterektől.

Az öntés során ellenőrző vizsgálatokat végeztem az anyagminőség, a fémhőmérséklet, a méretek, az öntvény szakítószilárdság, a hidegfolyás, a kifolyási hibák, a lunker- és sérülésmentesség megállapítására. Az öntvény szakítószilárdságának mérésére egy, az öntvényhez kialakított befogókkal rendelkező gép szolgál, amely a valóságban történő terhelést szimulálja.

Doktori értekezésemben összefoglalom a hidegkamrás nyomásos öntés technológiáját és azt a járműipar számára készített biztonsági alkatrész (biztonsági öv fékeződob) szilárdsági tulajdonságainak vizsgálatára vonatkozó kutatási, fejlesztési tevékenységet, melynek eredményei más hasonló geometriájú és követelmény szerint gyártott öntvényeknél általánosan hasznosíthatók.

2. A NYOMÁSOS ÖNTVÉNYEK TULAJDONSÁGAIT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK HATÁSA

Nyomásos öntvények tulajdonságai

Az öntészeti, és ezen belül különösképpen a nyomásos öntészeti, eljárás az egyik legfontosabb gyártási technológia könnyűfém ötvözetekből (alumínium- és magnéziumötvözetek, a jövőben szálerősítésű fémek kompozitanyagok is) készült könnyűszerkezetes műszaki elemek előállítására. A nyomásos öntés során a folyékony fém rendkívül rövid idő alatt (a formatöltési szakasz időtartama 10–60 ms) nagy sebességgel (a formatöltés közben a megvágásban 20–80 m/s) juttatják az általában hőálló acélból készült szerszám üregébe (a legtöbb esetben gyakorlatilag porlasztják). Az eljárás a nevét a formatöltést követően, az öntvény megszilárdulása közben, a levegő bezáródások összepréselésére és részlegesen a zsugorodási üregek csökkentésére a fémre ható nagy nyomás (hidegkamrás eljárásnál 500–1500 bar) után kapta.

A nyomásos öntészeti eljárás lehetővé teszi összetett funkciójú, bonyolult geometriájú és vékony falú alkatrészek gazdaságos gyártását nagy méretpontossággal és kis felületi érdességgel. Az így előállított, magas minőségi igények kielégítésére alkalmas, utólagos megmunkálást alig igénylő öntvények részben vagy teljesen azonnal felhasználhatók. Az eljárás sokféle alkatrész gyártására alkalmas, mert viszonylag nagy szabadságot enged az öntvény konstrukciója és a választható fémötvözet terén. Ezek az előnyök különösen nagy darabszámban gyártott, igényes, homogén minőségű öntvények esetén szembetűnőek. Nem meglepő tehát, hogy a nyomásos öntődék a járműiparban érdekelt vállalatok fontos beszállítói.

A termék- és szerszámtervezés a (széria)gyártást megelőző fejlesztés legköltségesebb és legidőigényesebb szakasza, amely még néhány évvel ezelőtt is szinte kizárólag hosszú idő alatt szerzett gyakorlati ismereteken alapult. A tapasztalati tudás jelentősége ma sem csökken, a fejlesztők azonban egyre inkább támaszkodhatnak számítógéppel segített számítások, méretezések eredményeire. A gyakorlati tapasztalat különösen szimulációs eszközökkel párosítva biztosít jelentős előrelépést.

A fejlesztési munka egyes részterületei – mint például az alkatrészek terhelés során fellépő deformációjának és a kialakuló feszültségeknek a számítása, vagy az öntési folyamatok esetében a formatöltés során a folyékony, szabad felülettel rendelkező fémolvadék mozgásának előrejelzése – ma már nem nélkülözhetik

szimulációs szoftver (és hardver) alkalmazását. Használatukkal a költség- és időigényes kísérleti szakasz vizsgálatai egy minimumra csökkenthetők.

Helyes tervezés és gyártástechnológia esetén azonban az öntvények mechanikai tulajdonságai messze meghaladhatják a szabvány által az adott ötvözetre előírt minimum értékeket. Ebben az esetben az alkatrész (helyileg) túldimenzionált lehet, a szükségtelen biztonság ára tömegnövekedés, felesleges anyag- és energiafelhasználás. Ugyanakkor az ellenkezője is igaz lehet. Valós öntvényekben egy anyagjellemző értéke sem konstans, hanem egy adott ötvözet esetében nagyrészt a helyi geometria és a gyártási paraméterek függvénye, és a kialakuló szövetszerkezetnek megfelelően lokálisan változó. Ezen felül a konstrukciótól és a valós gyártási körülményektől függő egyéb tényezők, mint anyagfolytonossági hiány (gáz- és levegőbezáródás, szívódási üreg), felületi és térfogati hiba (hidegfolyás, inhomogén bezáródások), öntést követő előnytelen feszültségi állapot, helyileg jelentősen gyengíthetik az öntött darabot, az adott alkatrész esetleges tönkremenetelét okozva. Egy öntvényen belül mindkét nemkívánatos jelleg előfordulhat.

Különösen nyomásos és kokillaöntvények esetében figyelhető meg egy alapján véve ismert, jellegzetes kapcsolat a helyi dermedési idő és a kialakult szövetszerkezet (ezzel együtt pedig a mechanikai jellemzők) között. Minél rövidebb a dermedési idő, és ezzel együtt minél finomabb a szövetszerkezet, annál nagyobbak a helyi szilárdsági értékek. Mivel a dermedés helyi időszükséglete a fő befolyásoló tényezők közül adott öntési mód és normál gyártási körülmények mellett a geometriai jellemzőktől nagyobb mértékben függ, mint a szerszám esetleg helyileg jelentősen eltérő hőmérsékletviszonyaitól, ezért általánosságban megfigyelhető, hogy egy öntvény vékony falú részei nagyobb fajlagos szilárdsági értékekkel rendelkeznek, mint a vastagabb falúak.

Konstruktőrök számára egy alkatrész tervezésekor a várt igénybevétellel szembeni viselkedés rendkívül fontos, különösen a biztonsági berendezések öntvényei esetében. Ez a szerkezeti szilárdság a geometria mellett a választott anyag tulajdonságaitól függ. Meg kell jegyezni, hogy a szabvány megfelelő értékeivel való összehasonlítás csak abban az esetben helyénvaló, ha a vizsgálati körülmények is egyeznek. Az egyes tulajdonságok a próbatest geometriájától, a mérési hosszától, a hőmérséklettől, a terhelés fajtájától és időbeli lefolyásától nem függetlenek.

Tapasztalat, hogy a valós alumíniumöntvényekből származó próbatesteken mért értékek jelentős eltéréseket mutatnak. Azonos kiindulási feltételek (ötvözet összetétele,

olvadékkezelés) mellett ugyanis a gyártási körülmények határozzák meg a kialakuló szilárdsági tulajdonságokat. Különösen igaz mindez a nyomásos öntvényekre, amelyek általában a legjobb szilárdsági értékekkel rendelkeznek, azonban a legnagyobb szórást is (az egyes öntvények között, de egy öntvényen belül is) mutathatják. A jó mechanikai tulajdonságok a finom szövetszerkezet kialakulását lehetővé tevő kedvező gyártási körülmények, váltakozásuk (akár váratlanul felbukkanó, súlyos hiányosságot jelentő szélsőértékként is) a helyi (pl. termikus) viszonyok különbözősége és az öntvényen belüli hibák eredménye.

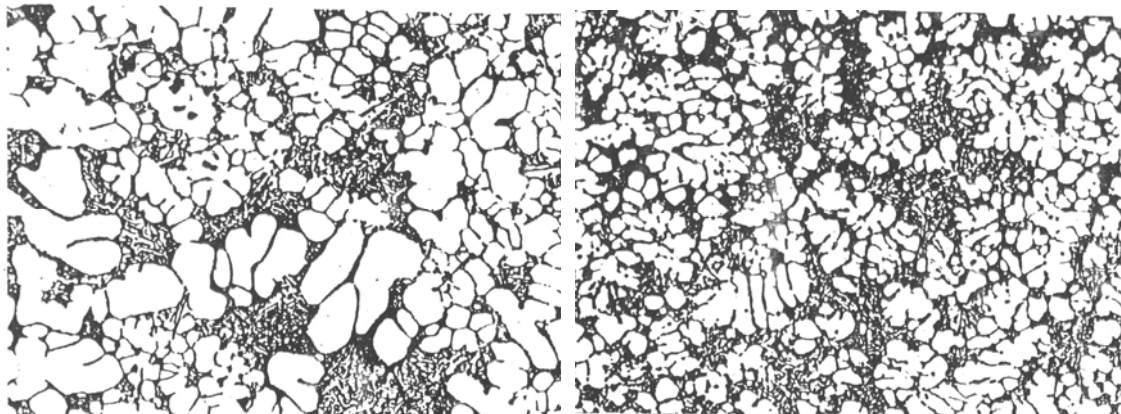
A nyomásos öntvények szinte elkerülhetetlen velejárói a kisebb-nagyobb belső hibák (szívódási üreg, pórusok bezárt levegő vagy öntési gázok eredményeként, a leválasztóanyag hőre történő bomlásából származó maradványok, oxidbezáródások, repedések, egyéb folytonossági hiányok és inhomogenitások), amelyek közül azonban nem szükségképpen jelenti mindegyik, hogy a környezetében a mechanikai tulajdonságok minden körülmények között jelentősen változnának (csökkennének). Ezen felül az öntvény gyártás utáni belső feszültségei is kedvezőtlenül hathatnak egy adott igénybevétel esetén, az egyes öntvényrészeket mintegy előre megterhelve [1, 2].

Alumínium nyomásos öntvények szilárdsági tulajdonságai

A nyomásos öntvények kokilla- és homoköntvényekkel szemben rendszerint előnyösebb mechanikai tulajdonságainak oka tehát a rendkívül finom szövetszerkezet, amely a gyors lehűlést segítő gyártási körülményekre vezethető vissza. A szerszámbetétként leggyakrabban használt hőálló acél homokformához képest lényegesen kedvezőbb hővezető képessége, az olvadék áramlásának nagyobb sebessége és a nagyságrendekkel nagyobb fémre ható nyomás (utánnyomás) intenzívebb hőátadást eredményez a folyékony fém és a vele érintkező szerszámfelület (kontúrfelület) között. Az olvadék hűlési sebességével együtt nő annak kristályosodási képessége (időegység alatt az egységnyi térfogatban keletkező kristálycsírák száma) és a túlhűlés mértéke. A túlhűlés mértékével arányosan pedig a kristályosodási sebesség is nő. Ez az oka a helyi dermedési idő, a szövetszerkezet és a szilárdsági értékek szoros kapcsolatának, valamint ezzel magyarázható az a tapasztalati tény is, hogy a különböző mechanikai tulajdonságok mérhető értékei együtt változnak, azaz azon öntvényrészek nyúlása nagy, amelyeknek a szakítószilárdsága ill. folyáshatára is nagy.

Hasonló öntési viszonyok között a szövetszerkezet rendszerint a kontúrfelülettől való távolság függvényében változik. Minél vastagabb az öntvény falvastagsága, annál durvább szövetszerkezeti elemek figyelhetők meg az öntvény belső részein. Az 1 ábra

egy 10x4 mm keresztmetszetű lapos próbatest (anyaga GD- AlSi9Cu3) csiszolatának különböző helyein készített felvételeket mutatja azonos nagyítás mellett. A fehér színű dendritek a primer módon kivált α -vegyeskristályok, a szürke területek az eutektikus szövetet (α -fázis és szilíciumkristályok) mutatják.



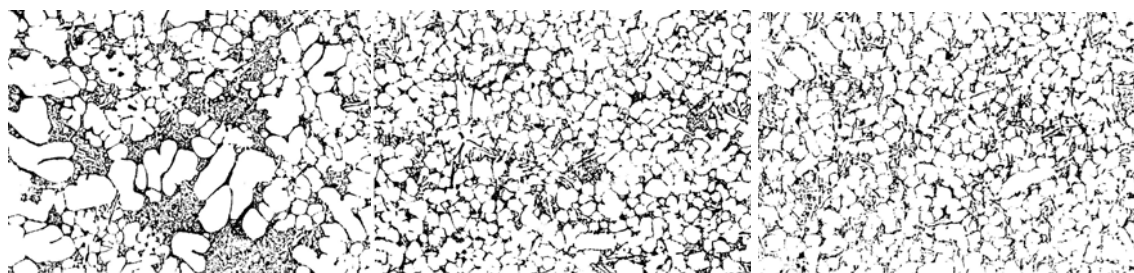
Az öntvény közepe

N=100x

Az öntvény felülethez közeli része N=100x

1. ábra. Eltérő hűlési viszonyok hatása az GD- AlSi9Cu3 ötvözet szövetére

Az öntési viszonyoknak a teljes, ill. a helyi dermedési időre gyakorolt hatása természetesen közvetett módon a szövetszerkezet kialakulását is meghatározza. Nagy befolyást mutat például az áramlási sebesség nagysága. Amennyiben a kontúrfelülettel érintkező fémolvadék sebessége nagyobb, úgy a hőátadás is intenzívebb, a hely és idő függvényében változó hőátadási tényező átlagos értéke is nő. A 2. ábrán a fent említett próbatest szövetszerkezete látható különböző formatöltési sebességek (átlagos sebesség a megvágásban) esetén. A formatöltés sebességével általában együtt nő a maximális szakítószilárdság, a szövetszerkezet finomodik. A fémolvadék helyi sebessége ugyanakkor – egyebek mellett – erősen függ az öntvénygeometriától, ezért a próbatest öntése során szerzett tapasztalatok teljesen nem általánosíthatók. Az intenzívebb kontúrfelületi hőátadás sem csökkenti azonban egy bizonyos határon túl a dermedési időt, emellett más tényezők hatása is érvényesül, a szakítószilárdság értéke (a formatöltés sebességének függvényében) egy maximum után csökken.



$v_m=11$ m/s

$v_m=41$ m/s

$v_m=68$ m/s

2. ábra. A fém megvágásban mért áramlási sebességének hatása a kristályosodásra

Valós öntvények optimális gyártási paramétereinek meghatározásához a kísérleti darabok során nyert eredmények csak irányértékeket (várható legjobb tartomány) szolgáltatnak. Tapasztalati tudással párosítva, ismert vagy helyesen becsült kezdeti és peremfeltételek esetén, az öntési folyamat szimulációja által pontosabb előrejelzés adható.

Az előbbiek értelmében az alkalmazott alumínium ötvözet anyagának hatása a szilárdsági tulajdonságokra csak akkor vizsgálható megbízhatóan, ha az összehasonlítás alapjául szolgáló próbatestek (öntvényrészek) is hasonló alakúak, falvastagságúak, a gyártási körülmények ismertek és nem, vagy nem jelentősen eltérőek. Az alumíniumöntvények gyártásához használt ötvözet kiválasztásakor az öntési folyamat tervezői ennek megfelelően leginkább más elvárásokhoz igazodnak (pl. korrózióállóság, jó formatöltő képesség). A leggyakrabban használt nyomásos alumínium ötvözetek az $AlSi9Cu3$, az $AlSi12$ rézmentes eutektikus ötvözet, és az $AlSi10Mg$, amelyet a jobb nyúlás miatt egyre elterjedtebben használnak. Ezen felül az utóbbi ötvözet jól hőkezelhető.

A csíráképződést, és ezáltal a szemcseméretet, idegen anyagok bevitelével; a finomabb szövetszerkezeti elemek kialakulását bizonyos adalékanyagok olvadékhoz való adagolásával is kedvező irányban lehet befolyásolni. Az öntés utáni állapothoz képest az egyes mechanikai jellemzőket adott esetben célzottan is lehet javítani, példának okáért hőkezeléssel. Nyomásos öntvényeknél azonban nagyon fontos szempont a gazdaságosság, ezért gyártástervezéskor a cél az öntvénnel szemben támasztott elvárások lehetőleg öntött állapotban való teljesítése a legegyszerűbb gyártástechnológia mellett.

A nyomásos öntvények szilárdsági tulajdonságai helyileg eltérőek, az öntvény külső (szerszámmal érintkező) felületi rétegben sokkal nagyobbak, mint a belső, inhomogenitásokat tartalmazó részekben. Ezért gyártják a nyomásos öntvényeket minimális megmunkálási ráhagyással.

A nyomásos öntvények szilárdsági jellemzőit nagy mértékben befolyásolják a gyártási, gépbeállítási paraméterek. A fém megvágásban kialakuló áramlási sebessége pl. maximumos görbe szerint változtatja meg a szakítószilárdságot.

Ezért alumíniumötvözetek esetében a maximumhoz tartozó, jellemzően 40 m/s formatöltési sebességnek megfelelően tervezik a szerszámot. A fémre ható nagy nyomás (jellemzően 1000 bar) a levegőbezáródások összepréseléséhez szükséges, ugyanakkor a nagyobb nyomás nagyobb belső feszültséget hoz létre. Nagyobb nyomás alkalmazása

csökkenti a belső üregek méreteit, ugyanakkor csökkenti a maradó alakváltozó-képességet is [2, 3, 4, 5] .

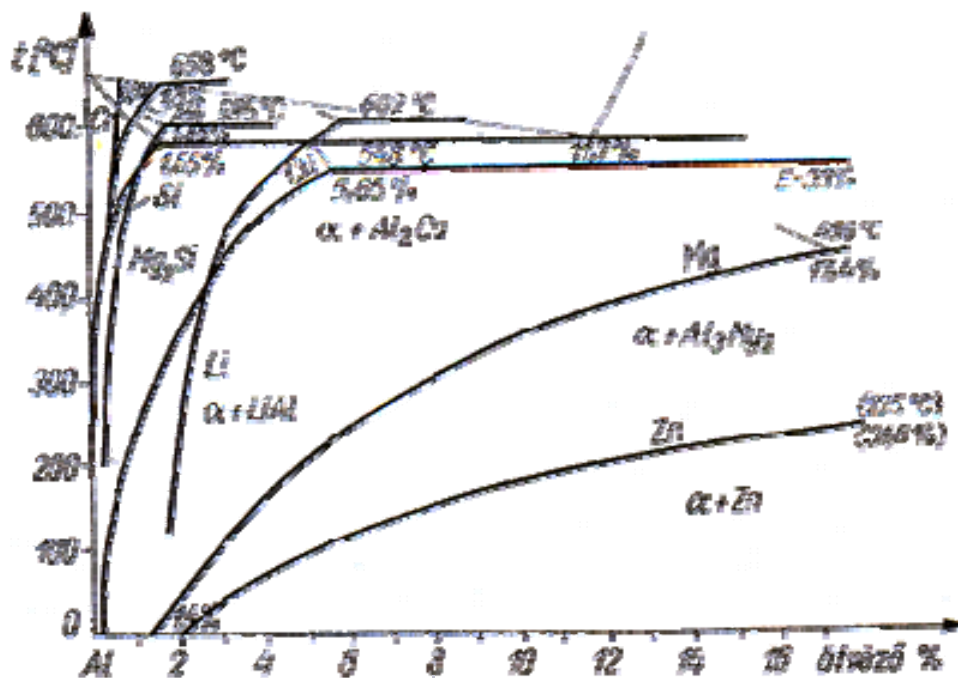
2.1. Nyomásos öntészeti ötvözetek

A nyomásos öntéssel gyártott öntvények szabványos nyomásos öntészeti ötvözeite fő alkotójuk alapján csoportosítjuk cink-, magnézium-, alumínium és rézötövezetekre. A cinkbázisú ötvözeteket melegkamrás, a magnézium-bázisú ötvözeteket meleg- és hidegkamrás, az alumínium- és a rézbázisú ötvözeteket hidegkamrás öntési eljárással gyártott öntvényekhez használják.

A nyomásos öntészeti ötvözetek alapfémének és fő ötvözőinek fizikai tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

Alumínium nyomásos öntészeti ötvözetek

A színalumíniumnak, mint általában minden színfémnek, a mechanikai tulajdonságai gyengék. Az ötvözés lényegesen javítja az alumínium mechanikai tulajdonságait. Szilárd állapotban korlátlan oldhatóságú ötvözője az alumíniumnak nincs. Az alumínium ötvözeite két nagy csoportra, az alakítható (sajtolható) és az öntészeti (önthető) ötvözetek csoportjára oszthatók. Az öntészeti ötvözetekben található ötvözők egyensúlyi diagramra gyakorolt hatását a 3. ábra mutatja.



3. ábra. Az alumínium különböző ötvözőkkel alkotott egyensúlyi fázisdiagramjának részletei

1. táblázat. Nyomásos öntészeti ötvözetek alapelemeinek fizikai tulajdonságai [4]

Tulajdonság	Mérték- egység	Elem			
		Al	Mg	Cu	Zn
Olvasási hőmérséklet	°C	660	650	1083	420
Sűrűség 20 °C-on	kg/m ³	2686	1745	8920	7140
olvadásponton szilárd állapotban		2557	1622	8410	6835
olvadásponton folyékony állapotban		2382	1575	7960	6560
Fajlagos hőkapacitás 20 °C-on	J/(kg·K)	900	1030	386	387
olvadásponton szilárd állapotban		1080	1200	480	444
olvadásponton folyékony állapotban		1100	1360	495	481
Hővezető-képesség 20 °C-on	W/(m·K)	230	156	392	1 14
olvadásponton szilárd állapotban		200	135	313	96
olvadásponton folyékony állapotban		94	78	166	50
Olvasáshő	kJ/kg	387	370	212	102
Lineáris hőtágulási együttható	10 ⁻⁶ /K	23,6	25,5	16,5	30,3
20–100 °C között		28,9	29,5	22,7	37,4
20 °C és az olvasáspont között					
Lineáris zsugorodás a megszilárdulás után szobahőmérsékletig	%	1,74	1,82	2,13	1,43
Rugalmassági modulus 20 °C-on	GPa	72	45	131	94
olvadáspont közelében		40	25	45	52
Nyírószilárdság 20 °C-on	GPa	27	17	48	42
Poisson-szám	-	0,33	0,32	0,36	0,25
Felületi feszültség	N/m	0,92	0,58	1,35	0,78
az olvasásponton folyékony állapotban					
Dinamikus viszkozitás	m·Pa·s	1,23	1,32	4,1	3,8
az olvasásponton folyékony állapotban					

Az alumíniumolvadéokban való oldhatóság szempontjából az elemek három csoportra oszthatók:

- az olvaszt alumíniumban nem, vagy csak igen kismértékben oldódó elemek: C, N, O, S, Cl, nemesgázok;
- az olvaszt alumíniumban korlátozottan oldódó elemek: H, Na, Bi, Cd, Pb. (A hidrogén csak kis mértékben oldódik.);
- az olvaszt alumíniumban korlátlanul oldódó elemek: Si, Mg, Cu, Zn, Li.

A szilárd (kristályos) alumíniumban való oldhatóság alapján az elemek négy csoportra oszthatók. A gyakorlati alumíniumötvözetek legfontosabb 25 eleme a következőképpen oszlik meg az egyes csoportok között:

- a szilárd alumíniumban nem oldódó, vagy csak igen kis mértékben oldódó elemek (a maximális oldhatóság $\leq 0,05\%$): H, B, Na, Co, Ni, Sn, Ce;
- a szilárd alumíniumban kismértékben oldódó elemek (a maximális oldhatóság 0,05% és 1,2 % között van): Be, Ti, Cr, V, Fe, Zr, Mo, Cd, Au, Pb, Bi;
- a szilárd alumíniumban közepes mértékben oldódó elemek (a maximális oldhatóság 1,2 % és 5 % között van): Li, Si, Mn;
- a szilárd alumíniumban nagymértékben oldódó elemek (a maximális oldhatóság 5 %-nál nagyobb): Mg, Cu, Zn, Ag.

Alumíniumötvözetekben előforduló elemek hatása a nyomásos öntvények tulajdonságaira

A kívánt tulajdonságok biztosítása érdekében az alumíniumot ötvözni kell, néhány elem pedig az alumíniumban a gyártástól függetlenül szennyezőként szerepel. A főbb ötvözőelemeket, mennyiségüket és hatásukat az alábbiakban foglaljuk össze:

A **szilícium** (Si) a legfontosabb ötvöző. Általában 7–12% között változik a mennyisége. Csökkenti az olvadási hőmérsékletet, növeli az olvadék folyékonyságát és formakitöltő-képességét, keménységét és szilárdságát. A szilíciumtartalom 8,5–9,5% közötti értéke ideális öntési és szerszámüreg-kitöltési tulajdonságokat biztosít.

A **réz** (Cu) minden, hulladékból készült ötvözetben előfordul szennyezőként. Egyes esetekben külön adagolják a keménység és a megmunkálhatóság növelése miatt. A nyomásos öntészeti ötvözetek 3–4% rézet tartalmaznak. A réz csökkenti a korrózióállóságot, de növeli a keménységet és a szilárdságot, néhány ötvözet esetén a hőkezelés szilárdságnövelő hatásához szükséges.

A **magnéziumot** (Mg) általában AlSi-ötvözetekhez adagolják 0,65–10% közötti mennyiségben. Növeli a keménységet, szilárdságot és korrózióállóságot, csökkenti az olvadék folyékonyságát.

A **vas** (Fe) általában az alumínium szennyezője. A nyomásos öntészeti ötvözetekben max. 1,2% mennyiségben szükséges, hogy csökkentse a fém feltapadási hajlamát a szerszámban. Csökkenti a korrózióállóságot. Nagy mennyiségben káros intermetallikus fázisokat képez és ez csökkenti az anyag szívósságát.

A **mangán** (Mn) a vas káros hatását csökkenti azáltal, hogy intermetallikus vegyületet képez vele. Így a vásra jellemző tűszerű kiválások helyett kedvezőbb alakú kiválások lesznek a szövetszerkezetben, aminek következtében javulnak a mechanikai tulajdonságok.

Az egyéb elemek közül a **cink** (Zn) szennyezőként akár 1,2%-ban is előfordulhat. Növeli a keménységet és szilárdságot, de csökkenti a korrózióállóságot. 4–5%-ban adagolva önöregbítő hatású.

A **nikkel** (Ni) max. 0,05% mennyiségben az alumínium szennyezője.

A vasból, mangánból és krómból keletkező, különböző összetételű, nagy sűrűségű intermetallikus fázisok lerakódnak a kemence alján, és fémiszapot képeznek. Ha ezek az iszaprészek az öntvénybe kerülnek, olyan kemény zárványokat alkotnak, amelyek nem csak az öntvények megmunkálhatóságát nehezítik meg, de selejtet is okoznak.

Hatásuk az iszapfaktorról jellemezhető:

$$\text{Iszapfaktor, \%} = \text{Fe\%} + 2 \cdot \text{Mn\%} + 3 \cdot \text{Cr\%}$$

Az iszapfaktor megengedhető mennyisége a folyékony fém hőmérsékletétől függ. A GD- AlSi9Cu3 jelű ötvözet esetén pl. 660°C -os fürdőhőmérsékletnél még elfogadható 1,8% iszapfaktor, de egy magasabb hőmérsékleten ez az érték már iszapképződéshez vezet.

A legelterjedtebb nyomásos öntészeti alumíniumötvözetek

Az alumíniumötvözeteket tartalmazó két európai szabványban – az EN 1706 és az EN 1676 –, összesen 37 öntészeti ötvözet van felsorolva. Ami a nyomásos öntészeti ötvözeteket alapvetően megkülönbözteti a homok- és kokillaöntészetben használt ötvözetektől az az, hogy max. 1,2% vasat tartalmaznak.

AlSi-ötvözetek: közepes mértékű a szilárdságuk, jó a korrózióállóságuk. Alkalmasak tagolt, bonyolult, vékonyfalú és nyomástömör öntvények előállítására. Nagyon jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A legfontosabb ötvözet ebben a csoportban az eutektikus AlSi12 . A kisebb szilíciumtartalommal rendelkező ötvözetek tömörebb, nagyobb szilárdságú öntvényt eredményeznek.

AlSiCu-ötvözetek: a hozzáadott réz növeli a szilárdságot, keménységet és a megmunkálhatóságot. Jól önthető ötvözetek, alapesetben hőkezelés nélkül is megfelelő tulajdonságúak. Ebből az ötvözetsorozatból készült öntvények jól megmunkálhatók és széles körben alkalmazhatók. Ezek a legolcsóbb alumíniumötvözetek.

AlMg-ötvözetek: különösen sósvízes környezetben rendelkeznek jó korrózióállósággal. Jó polírozhatóságuk miatt a hajóiparban alkalmazott armatúrákat, csőfittingeket és vegyiparban használt öntvényeket gyártanak belőlük. A magnéziumtartalom növekedésével nő a szilárdságuk.

Speciális ötvözetek: bár jó tulajdonságokkal rendelkeznek, ezeket az ötvözeteket csak szűk körben alkalmazzák, mert nehezen önthetők és repedésre hajlamosak. Ide tartoznak bizonyos AlMg-ötvözetek, melyek jó korrózióállósággal rendelkeznek. AlZnMg-ötvözetek, melyek öregedésre képesek és néhány hét alatt szobahőmérsékleten optimális szilárdságot érnek el. Az AlCuTi(Mg)-ötvözetek kifejezetten nagy szilárdságúak. Az AlSiCuNiMg-ötvözeteknek nagy a hőelnyelő képességük és jó kopásállóságúak [6].

A leggyakoribb öntészeti alumíniumötvözetek jelölését és összetételét a 2. táblázat tartalmazza.

A 3. táblázat a nyomásos öntészetben használt alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságait tartalmazza.

A mechanikai tulajdonságok hőmérséklettől való függését a 4. táblázat mutatja.

2. táblázat. A legfontosabb nyomásos öntészeti alumíniumötvözetek jelölése és összetétele [9]

Jel	Ötvözet	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Ni, %	Zn, %	Ti, %	EN
226D	AlSi9Cu3(Fe)	8,0-11,0	0,6-1,1	2,0-4,0	0,55	0,15-0,55	0,55	1,2	0,2	AB 46000
230D	AlSi12(Fe)	12,5-13,5	0,45-1,0	0,08	0,55			0,15	0,15	AB 44300
231D	AlSi12Cu1(Fe)	12,5-13,5	0,6-1,1	0,7-1,2	0,55	0,35	0,30	0,55	0,15	AB 47100
239D	AlSi10Mg(Fe)	9,0-11,0	0,45-0,9	0,08	0,55	0,25-0,50	0,15	0,15	0,15	AB 43400

3. táblázat. Szabványos nyomásos öntészeti alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságai [9]

Ötvözet-csoport	Az ötvözet megnevezése		Szakító-szilárdság	Folyáshatár	Nyúlás	Brinell-keménység
	Számjel	Összetétel	R _{m-min} , MPa	R _{p0,2-min} , MPa	A _{5-min} , %	HB _{min}
AlSi10Mg	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	240	140	1	70
AlSi	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)	240	130	1	60
	EN AC-44400	EN AC-AlSi9	220	120	2	55
AlSi9Cu	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)	240	140	<1	80
	EN AC-46100	EN AC-AlSi11Cu2(Fe)	240	140	<1	80
	EN AC-46200	EN AC-AlSi8Cu3	240	140	1	80
	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	240	140	<1	80
AlSi(Cu)	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)	240	140	1	70
AlMg	EN AC-51200	EN AC-AlMg9	200	130	1	70

4. táblázat. A rugalmassági határ ($R_{p0,2}$) és a szakítószilárdság (R_m) változása a hőmérséklet függvényében [7, 8]

Jelölés		Szilárdság MPa	Hőmérséklet, °C								
			24	100	150	205	260	315	370	427	527
360.0	AlSi10Mg	Rp _{0,2}	172	172	165	96	52	31	21		
		Rm	324	303	241	152	83	48	31		
380.0	AlSi9Cu3	Rp _{0,2}	165	165	158	110	55	28	17		
		Rm	331	310	234	165	90	42	28		
384.0	AlSi11Cu3	Rp _{0,2}	172	172	165	124	62	28	17		
		Rm	324	317	262	179	96	48	31		
413.0	AlSi12Cu	Rp _{0,2}	145	138	131	103	62	31	17		
		Rm	296	255	221	165	90	41	31		
518.0	AlMg8	Rp _{0,2}	186	172	145	103	62	31	17		
		Rm	310	276	221	145	90	59	34		
Al 99,9		Rp _{0,2}	25	21	19	18	17	15	13	10	5
		Rm	50	42	38	36	33	28	24	20	10

A táblázatok adatai azt mutatják, hogy a nyomásos öntéssel gyártott öntvények nagyobb szakítószilárdsággal és kisebb nyúlással rendelkeznek, mint a hasonló összetételű, más eljárással öntött alkatrészek. Ez az eltérés a nyomásos öntés hatására kialakuló belső feszültségcök hatására, s amely kisebb szennyezőtartalom és különleges nyomásos öntési technológia alkalmazásával (pl. vákuumos nyomásos öntés) csökkenthető.

2.2. Nyomásos öntészeti technológiák

Nyomásos öntés alatt olyan eljárást értünk, amelynél folyékony állapotú fémet nagy sebességgel osztott, tartós fémformába (nyomásos öntőszerszámba) juttatnak, és megszilárdulás közben nagy nyomás hat rá. A szerszámüreg kitöltése ily módon lényegében már nem függ a nehézségi erőtől, mint a homok- vagy kokillaöntésnél, hanem az a folyékony fémre ható nyomásenergia kinetikai energiává való átalakításán alapszik. Ezáltal az öntés folyamán a nyomásos öntőszerszámban nagy áramlási sebesség alakul ki, míg végül a szerszámüreg kitöltését követően a mozgásban lévő tömeg kinetikai energiája nyomás- és hőenergiává alakul át.

Nyomásos öntésnél a folyékony fém nagy sebességgel préselődik a szerszám üregébe. A nyomóhatás, amely alatt a folyékony fém a szűkebb keresztmetszetekbe is beáramlik és kitölti a szerszámüreget, mérvadó a kontúrhoz hű alak megvalósításhoz, amely a nyomásos öntés különleges előnyeire sorolható. Ezáltal lehetővé válik mindenekelőtt vékonyfalú, méretpontos, nagyon jó felületi minőségű öntvények gyártása. Az öntvény túlméretezése elkerülhető, ezzel fémet és energiát takarítanak meg. A nyomásos öntés ennek következtében technikai és gazdasági szempontból tekintélyes előnyöket kínál, minthogy nem csak nagy termelékenységet tesz lehetővé, hanem a legrövidebb utat is jelenti a nyersanyag és a késztermék között [10].

Nyomásos öntési eljárások

A nyomásos öntési eljárások hideg- vagy melegkamrás rendszerűek lehetnek. Ha alacsony olvadáspontú fémet öntenek, és az nem oldja meg az öntőkamra anyagát, akkor az a fémfördőbe meríthető (melegkamrás rendszer). Ellenben, ha a kamra anyagának jelentős az oldhatósága a fémolvadékban, akkor azt nem szabad a fémfördőbe meríteni (hidegkamrás rendszer). A cink- és magnéziumöntvényeket főleg melegkamrás nyomásos öntőgépen, az alumíniumöntvényeket azonban kizárólag hidegkamrás nyomásos öntőgépen öntik.

A különleges rendeltetésű öntőgépeket is beleértve, amelyeket különleges célra szánt öntvények gyártására használnak, a nyomásos öntőgépek nagy részét négy fő csoportba lehet osztani:

- melegkamrás gépek;
- függőleges hidegkamrás gépek;
- vízszintes hidegkamrás gépek;
- különleges rendeltetésű gépek.

A hideg- és a melegkamrás öntőgépek a legismertebbek a nyomásos öntőiparban. Mindegyik típus vízszintes vagy függőleges szerszámzáró egységgel, hidraulikus energiaforrással, öntőegységgel és számos biztonsági berendezéssel – mint pl. mozgó védőrács, védőburok, mechanikus biztonsági reteszelés és egyéb – van felszerelve. A különböző típusok más-más öntőegységgel vannak ellátva.

Hidegkamrás gépeket (4. ábra) bármilyen alacsony olvadáspontú fémhez, mint pl. alumínium-, magnézium-, réz-, cink-, ólom- és ónbázisú ötvözetekhez lehet használni. A hidegkamrás gépek használata esetén az olvadt fémot manuálisan vagy gépi adagolóberendezéssel a töltőnyíláson keresztül juttatják be a öntőkamrába az öntődugattyú elé.

Melegkamrás gépeknél az öntőkamra és a dugattyú a fémfürdőbe merül, így szükségtelen egy külön adagoló egység. [11]

Vízszintes hidegkamrás nyomásos öntési eljárás

A vízszintes hidegkamrás öntési eljárás a leggyakrabban alkalmazott nyomásos öntő módszer. A vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgépeket – egy szerszámacélból készült, a hidraulikus öntődugattyú vonalába elhelyezett – öntőkamra jellemzi. Az öntődugattyú az öntőkamrából juttatja a felhevített fémolvadékot a szerszámüregbe. Az öntőkamrát a szerszámüreggel egy csatornarendszer köti össze, amelyet beömlőrendszernek neveznek. A beömlőrendszer az elosztóból és a bekötőcsatornából áll, ezek keresztmetszete kisebb a kamráénál, ezért a fém sebessége megnő, ahogy átjut a beömlőn.

A gépek öntőkamrája fűtetlen, azt a kézzel vagy különféle adagolóval betöltött fémolvadék melegíti fel. Az öntődugattyút vízzel hűtik a túlmelegedés ellen, ennek következtében a hőmérséklete nem éri el az 50 °C-ot.

Az egy lövéshez szükséges öntendő fém mennyisége határozza meg az öntőkamra, az öntődugattyú és a gép méretét. A gép nyomókamrája nincs teljesen megtöltve fémrel, így a benne található levegő öntés közben a szerszámba jut. Ha az öntőkamra túlságosan kicsi, akkor fémolvadék kidobódás, azaz kifröcskölés történhet a töltőnyíláson keresztül.

Hidegkamrás nyomásos öntőgépeknél az öntőgarnitúra minden szerkezeti eleme a folyékony fémen kívül helyezkedik el. Az öntökemence a gép mellett áll és nem része annak, csupán az öntésre alkalmas fém melegen tartására szolgál. Minden öntési ciklusnál ki kell emelni a szükséges fémmennyiséget az öntökemencéből, és a gép

öntőkamrájába kell tölteni. Ez vagy kézzel történik (kisebb gépeknél) öntőkanál segítségével, vagy gépi úton (automata adagolással bármely nagyságú gépen).



4. ábra. Vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgép [13]

Hidegkamrás öntőgépekkel az összes nyomásos öntéssel önthető fémek feldolgozhatók, de általában alumínium-, magnézium- és rézötvözetek öntésére használják őket. Előnyük, hogy az öntőkamra viszonylag mentes a fémolvadék agressziójától, valamint az, hogy 500–2000 bar nagyságú tömörítő nyomások is használhatók [12].

Az öntőgép fő részei

Az alábbi felsorolás a nyomásos öntőgép fő szerkezeti elemeit tartalmazza:

- **gép vagy gépkeret:** a nyomásos öntőgép részeinek rögzítésére szolgál, általában hegesztett szerkezet;
 - **hajtókompresszor:** a hidraulikus rendszer energiaellátását biztosítja. Rendszerint fogaskerék kompresszor/szivattyú, a térfogatkiszorítás elve alapján működik. Kiszorító elemei egymáson legördülő fogaskerekek. A folyadékot a fogárok szállítják a szívótérből a nyomótérbe, majd a nyomótéren át a működtetendő hidraulikus egységekhez. A hidraulika folyadékot a gépalapon elhelyezett nagyméretű tartály tartalmazza. A kompresszor – szűrőkön keresztül – innen szívja fel, és a szükséges műveletek után ide is kerül vissza. A hidraulika folyadék általában víz-glykol keverék. A hidraulikus rendszer működése során a folyadék felmelegszik, ezért beépített hőcserélő segítségével hűtővízzel kell hűteni.
 - **formázó egység:** a mozgó szerszámfelfogó lapot mozgatja, zárja, zárva tartva biztosítja a záróerőt. A mozgató hidromechanikus rendszer végzi azáltal, hogy a hidraulikus mozgatódugattyú működésbe hoz egy könyökemelő zárómechanizmust.
- A zárómechanizmus csatlakozik a mozgó szerszámfelfogó laphoz, amely a rászerezelt mozgó szerszámfelet az álló szerszámfelfogó lapra szerelt álló szerszámfélhez zárja, és az előírt záróerővel összetartja. A mozgó szerszámfelfogó lap hordozza még az öntvénykilökő rendszert. Az álló szerszámfelfogó laphoz csatlakozik az öntőkamra.
- **öntőegység:** a folyékony fém az öntőkamrából a nyomásos öntőszerszámba juttatja, és biztosítja, hogy az öntvény a dermedés során az előírt nyomáson maradjon.

Az öntőegység (5. ábra) három fő részből áll: az öntőkamra, az öntődugattyú és az öntődugattyút mozgó szerkezet [11].



5. ábra. Hidegkamrás nyomásos öntőgép öntőegysége

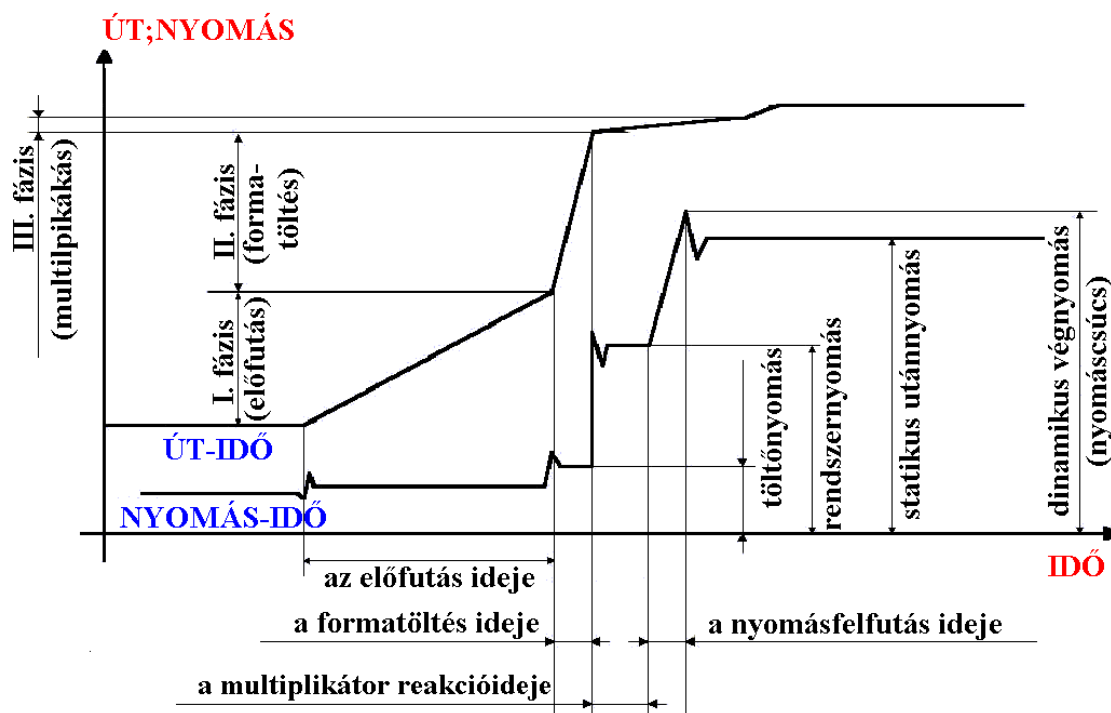
A nyomásos öntés részfolyamatai

A nyomásos öntés részfolyamatait az alábbi felsorolás tartalmazza:

- szerszámfelek zárása;
- folyékony fém öntőkamrába adagolása;
- kamratöltés (előfutás), I. fázis;
- formatöltés, II fázis;
- utánnyomás (multiplikálás), III. fázis;
- szerszámfelek nyitása;
- öntvény kilökése, elszedése;
- formafelek tisztítása, kenése.

A szerszám nyitása és zárása kézi működtetésű vagy automatikus lehet. A szerszám zárásakor a dugattyú visszahúzott helyzetben van.

A 6. ábrán egy vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgép út-idő és nyomás-idő görbéje látható.



6. ábra. Vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgép út-idő és nyomás-idő diagramjának elvi felépítése

Az öntési folyamat idő- és nyomásadataihoz az alábbi magyarázat szolgál:

- **kamratöltési (előfutási) idő:** az öntődugattyú mozgásának megindulásától a formatöltés elindulásáig tart. Az öntőkamra teljes keresztmetszetének fémmezzel való feltöltődésével kell egybeesnie;
- **formatöltési idő:** az öntődugattyú felgyorsításának kezdetétől a szerszámüreg megtöltéséig tart.
- **a multiplikátor reakcióideje:** a szerszámüreg megteltétől a multiplikálás (nyomásfokozás) megkezdéséig eltelt idő;
- **a nyomásfelfutás ideje:** a multiplikálás megkezdésétől a statikus utánnomás nagyságának eléréséig tart;
- **töltőnyomás:** az a nyomás, amely a szerszámüreg megtöltéséhez, az olvadáknak a bekötő csatornákon (megvágáson) keresztül juttatásához szükséges.
- **rendszer nyomás:** az akkumulátor-tartályban levő nitrogéngáz nyomása.
- **statikus utánnomás:** fokozott (multiplikált) nyomás, amely a szerszámüreg megtöltése (formatöltés) után hat, feladata az öntvénybe zárt levegőbuborékok összepréselése és az öntvény részleges kitáplálása [13] .

A továbbiakban vizsgáljuk a lövés részfolyamataiban lejátszódó eseményeket.

1. fázis (kamratöltés vagy előfutás)

Az öntődugattyú mozgását hidraulikus rendszer végzi, amelyet hidraulikus kompresszor lát el energiával. A rendszer a gyors, dinamikus műveletekhez gázzal vagy olajjal működő nyomástárak, akkumulátorok segítségével szolgáltatja a többletenergiát. Az 1. fázis időtartama függ az öntőkamra hosszától, átmérőjétől, és az öntőkamrába öntött fémolvadék térfogatától. E fontos paraméterek jelentős hatást gyakorolnak az öntvény minőségére. Ha a kamratöltési idő a szükségesnél hosszabb, akkor az olvadék egy része kis sebességgel áramlik a szerszámüregbe, ott lehül, és a 2. fázisban akadályozhatja a szerszámüreg megtöltését.

Ha a szükségesnél rövidebb a kamratöltési idő, akkor a folyékony fémmel együtt levegő kerül a szerszámüregbe és az öntvény gázhólyagos lesz, mert formatöltés előtt az öntőkamra teljes keresztmetszete nem töltődik fel folyékony fémmel.

Vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgépeknél a dugattyú – az öntőkamrában való előre haladása közben – a homlokfelületén torlópulást alakít ki. Ha az öntődugattyú sebessége kicsi, nem képez elég magas pulást, a torlópulást elszakad a dugattyú homlokfelületétől, előrefut az öntőkamra végénél levő nyíláshoz, és elzárja a levegő eltávoztása előtt az utat.

Ideális esetben a dugattyú a kritikus sebességgel halad, amelynél a torlópulást kitölti az öntőkamra teljes keresztmetszetét, míg abban az esetben, amikor az öntődugattyú sebessége nagyobb a kritikus értéknél, átcsapó pulást keletkeztet, amely a levegő egy részét bezárja. Az így bezárt levegő az olvadékkal együtt a szerszámüregbe kerül, és növeli az öntvényben levő pórusok számát.

A dugattyú mozgása az 1. fázisban lehet:

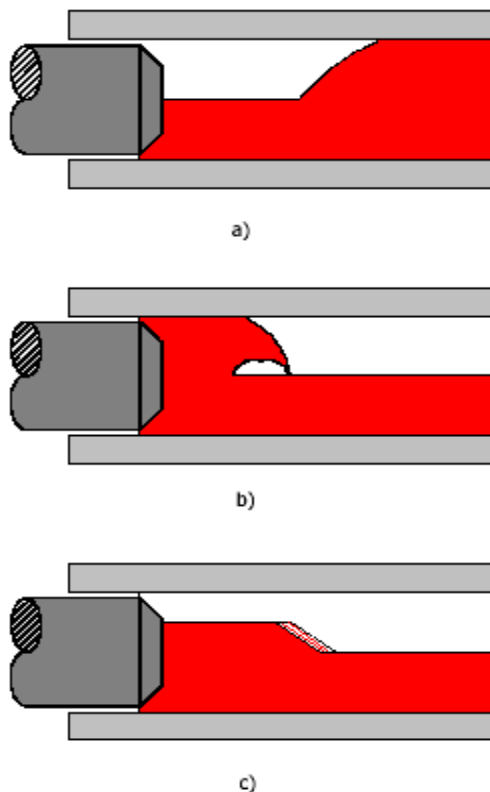
- állandó sebességű;
- lépcsőzetesen növekvő;
- állandó gyorsulású.

Állandó sebességű mozgásnál a dugattyú homlokfelületétől elválhat a pulást, előreszalad, visszaverődik a végfalról, majd a dugattyú mozgásával ellentétesen halad és visszatér a dugattyú homlokfelületéhez. Ebben az esetben a nem megfelelően választott dugattyúsebesség következtében a páros számú pulást, ami levegőbezáródást okozhat (7. ábra).

Ha a dugattyúmozgás lépcsőzetesen növekvő sebességű, akkor a dugattyú kezdősebessége által keltett pulásra minden sebességváltásnál újabb pulást épül, amíg

a kamra teljes keresztmetszetében fel nem töltődik. Így nem történik visszaverődés a végfalról és átcsapás sem.

Állandó gyorsulású mozgás esetében a hullám együtt halad a dugattyúval, a dugattyú homlokfelületéről nem szakad le. A kamra tetejéig folyamatosan nő a hullám magassága. Ezzel a beállítással jelentősen csökkenteni lehet az öntvénybe bezárt levegő mennyiségét.



7. ábra. Levegőbezáródási hibák. a) előresiető hullám, b) hullám-átcsapás, c) felületi habképződés

2. fázis (formatöltés vagy a szerszámüreg megtöltése)

A nyomásos öntvények minősége jelentős mértékben függ attól, hogy a formatöltés közben mekkora a megvágásban a fém sebessége. A 2. fázist akkor kell indítani, amikor az öntőkamra már teljes keresztmetszetében feltöltődött, és az olvadék a megvágásokat is megközelítette. Az öntődugattyú sebességét, s így a formatöltési idő nagyságát minden öntvényhez külön határozzák meg. A korszerű nyomásos öntőgépek dugattyúsebessége formatöltés közben a 4–5 m/s-ot is eléri.

Az öntődugattyút ebben a fázisban az akkumulátorból nagy sebességgel áramló olaj mozgatja. A nyomás-idő diagramon látható nyomásnövekedés akkora, amennyi az éppen használt viszkozitású fémolvadéknak az adott megvágás-keresztmetszeten adott idő alatti átjutásához szükséges. Ez az öntőnyomás rendszerint jóval kisebb, mint a

rendszer nyomás, különösen vastag falú öntvények esetén, amelyeket többnyire nagyobb keresztmetszetű és vastagabb megvágásokkal kell készíteni.

3. fázis (utánnyomás vagy multiplikálás)

Feladata a folyékony fém utánnyomása a formaüregbe a dermedés közbeni térfogatcsökkenés pótlására, valamint a bezáródott levegőbuborékok összepréselése. Mivel a megvágás vastagsága rendszerint jóval kisebb, mint az öntvény falvastagsága, az abban levő fém gyorsabban megdermed, mint a táplálendő öntvény. Fontos tehát, hogy a szerszámüreg megtöltése után a multiplikátor késlekedés nélkül bekapcsoljon, vagyis a multiplikátor reakcióidejét és a nyomásfelfutás idejét egyaránt rövidre lehessen szabályozni.

A formatöltés végén fellépő statikus utánnyomást (multiplikálást) meg kell különböztetni a dinamikus végnyomástól, más szóval a nyomáscsúcsától. A nyomáscsúcsot a nagy tömegek (multiplikátor dugattyú, dugattyúszár, öntődugattyú) mozgási energiájának megsemmisülése okozza a formatöltés befejeződésének pillanatában. A mozgási energia a mozgó alkatrészek sebességének növekedésével nő, így a vékony falú, nagy felületű öntvények gyártásakor (mivel ezeket nagyobb dugattyúsebességgel, rövidebb idő alatt kell önteni) nagyobb nyomáscsúcsokkal kell számolni [10].

A szerszám nyitása

Miután a fémolvadék megdermedt és lehűlt az öntvény kívánt kilökési hőmérsékletére, a szerszámfeleket szétnyitják. A szerszám nyitása történhet program alapján, illetve kézi működtetéssel.

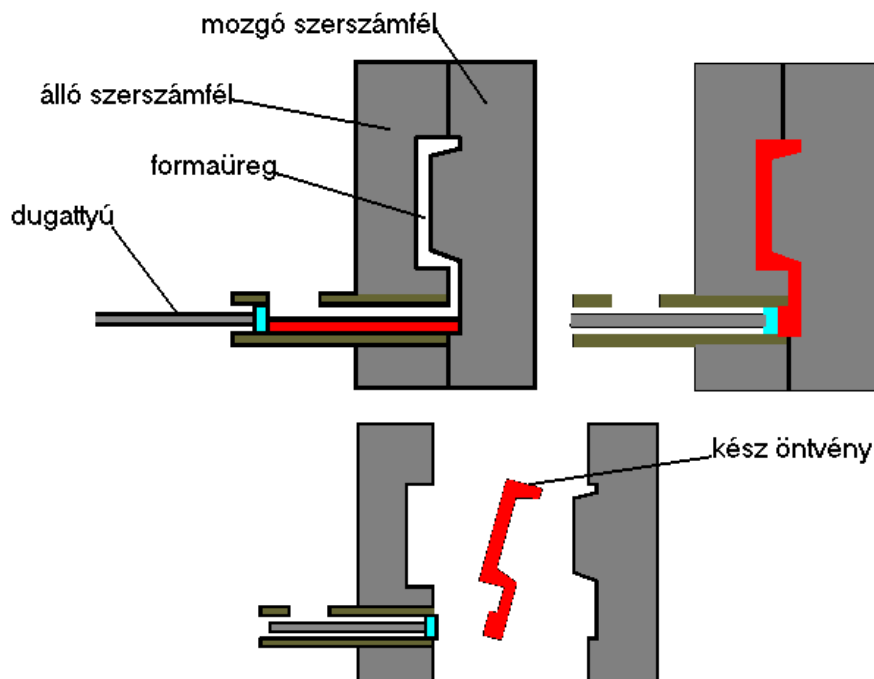
Az öntvény eltávolítása a formaüregből

Az öntvényt, miután a szerszámfeleket szétnyitották és a magokat – ha szükséges – kihúzták, kilövik. Az öntvénycsokor kivétele történhet kézzel vagy különböző elszedő berendezésekkel, ipari robotokkal.

A nyomásos öntőszerszámokat integrált, hidraulikus működtetésű kilökörendszerrel tervezik, ezek rendszerint egy kilökö felfogólapból és több kilököcsapból állnak.

Formafelek tisztítása, lefújása

A nyomásos öntőgép szerszámaint minden egyes öntési ciklus után kenőanyaggal kell kezelni. Ez az öntvénycsokor eltávolítása után történik. A formaüreget megtisztítják, felületére választóanyagot visznek fel sűrített levegővel való fúvatással, majd zárják a szerszámot (8. ábra).



8. ábra. A nyomásos öntés részfolyamatai

2.3. Hőmérséklet-viszonyok

Egy nyomásos öntőszerszám termikus viszonyai meghatározzák az öntvény minőségi tulajdonságait, a termelékenységet, az utólagos munkálási költségeket és nem utolsósorban a nyomásos öntőforma élettartamát. A következőkben az öntőszerszám termikus viszonyait befolyásoló tényezőket elemezzük.

A szerszám hőmérsékleteloszlása

Minden nyomásos öntőszerszámot az öntőgépen – üzembe helyezés előtt – üzemi hőmérsékletre kell előmelegíteni. Semmiképpen sem szabad az öntést hideg vagy nem kellőképpen előmelegített szerszámmal elkezdni, mert nagy hőfeszültségek keletkezhetnek a szerszám felületén, amelyeket már nem lehet többé leépíteni. Az így kialakuló hőfeszültség idő előtti repedések kialakulásához, a szerszám tönkremeneteléhez vezethet. A melegítés hőmérséklete meg kell, hogy feleljen az

öntéshez szükséges közepes hőmérsékletnek. Az ajánlott szerszámbetét-hőmérsékletek az 5. táblázatban találhatók.

5. táblázat. Ajánlott szerszámhőmérsékletek - a szerszámüreg felületének hőmérséklete

Ötvözetek	Szerszámhőmérséklet, °C
Ónötözetek	70–20
Ólomötözetek	80–60
Horganyötözetek	180–20
Magnéziumötözetek	260–90
Alumíniumötözetek	200–50
Rézötözetek	280–50

Általánosan érvényesnek mondható, hogy a szerszám kímélhető, és élettartama jelentősen meghosszabbítható, ha az ajánlott szerszámhőmérséklet felső határa közelében üzemeltetjük, mert ekkor az öntési és a szerszámhőmérséklet közti különbség a legkisebb. Jelentős hőmérsékletcsökkenés hatására a szerszámban mechanikai erők lépnek fel. A szerszám felületén húzó-, a szerszám belsejében pedig nyomófeszültségek ébrednek. Amennyiben ezek az erők nincsenek egyensúlyban, akkor a szerszám felületén repedések keletkeznek. Másfelől azonban arra is ügyelni kell, hogy a táblázatban megjelölt legmagasabb értékeket sem az előmelegítéskor, sem pedig öntő üzemben ne lépjük túl.

A felmelegítéshez fűtőberendezéseket önmagukban vagy hűtőkészülékkel kombinálva alkalmaznak. Nem alkalmasak a gázégők, mert a kiálló szerszámelemeket, vékony magokat, kilököcsapokat erősebben felmelegítik, mint a vastag falú szerszámrészeket. Ezeknél a hőkezelt szerszám anyagának helyi túlhevülése alakulhat ki, amely utólagos hőkezelésként hat és csökkentheti a szerszám anyagának szilárdságát. Alkalmasabbak az infrasugárzók vagy kerámia gázsugárzók, amelyek viszonylag egyenletes hőeloszlást tesznek lehetővé. Az ilyen készülékek keret- vagy dobozformában készülnek, és a nyitott szerszámfelek közé vannak függesztve. De itt is ügyelni kell arra, hogy a szerszám bizonyos helyei ne hevüljenek túl.

A szerszám temperálása

Szerszámtemperáló készülékek (fűtő- és hűtőkészülékek) nemcsak a szerszám öntés előtti felmelegítésre szolgálnak, hanem annak hűtésére is, és ezzel a szerszám hőmérsékletének állandó, szűk határon belül való tartására. Még a gyors fszerszámváltó készülékek alkalmazása mellett is előnyös a temperáló berendezés használata, mert a felfogandó szerszámfelek már az öntőgépre szerelés előtt üzemi hőfokra melegíthetők és a felfogás után azonnal üzembe foghatók. A temperáló készülékek keringetett hőtároló folyadékkal üzemelnek. A folyadék szükség szerint elektromosan is felfűthető, ill. szivattyú révén a szerszám csatornáin átkeringetett hűtővízzel le is hűthető. Ennek a szabályozható folyadékkeringtetésnek a segítségével a szerszám előre meghatározott üzemi hőmérsékletre hozható, ill. öntőüzem közben ezen is tartható. A fűtő- és hűtőberendezés, valamint a szivattyú és a szabályozó elemek be vannak építve a temperáló készülékbe.

Hőtároló folyadékként olajok szolgálnak, amelyek kb. 350 °C-ig fűthetők. Az ilyen módon való felmelegítés üzemi hőfokra gyorsan és kíméletesen elérhető, és a forma biztonságos hűtését is lehetővé teszi [14] .

Nyomásos öntőszerszám hőmérsékletének szabályozása

Minden öntőciklusnál bizonyos mennyiségű hő kerül át az öntőszerszámba a forró fém felületéből. Az öntvényt csak akkor vehetjük ki a szerszámból, ha megdermedt és elérte a kilökési hőmérsékletet. Ez azt jelenti, hogy az öntőszerszámnak tekintélyes mennyiségű hőt kell felvennie és leadnia azért, hogy az öntvény a kívánt módon hűljön le. A szerszám anyagának termikus tulajdonságai ezt a hőelvételt lehetővé teszik, de ezt a hőt magának az öntőszerszámnak kell elvezetnie. Ez utóbbi a szerszámhűtés feladata.

A viszonylag kisméretű vagy nagyon vékonyfalú öntvényeknél megengedhető a szerszámhűtést teljes egészében mellőzni, amennyiben a lövések által szállított hőmennyiség nem nagyobb, mint amit a szerszám sugárzás, vezetés vagy konvekció útján optimálisan le tud adni. Ez természetesen vonatkozik a viszonylag alacsony olvadáspontú ötvözetekből való öntésre is, mint pl. az ólom- és horganyöntvények öntése, ha azok kisméretűek és vékonyfalúak. A vékonyfalú horganyöntvényeknél sem szükséges a szerszámhűtés, viszont a gyors üzemű melegkamrás öntőautomatáknál szükséges lehet.

A szerszám hűtésére a szerszámban lévő hűtőcsatornák szolgálnak, amelyeket átjár a hűtőfolyadék. A hűtőcsatornákat az öntvénykontúr közeli szerszámrészekben vezetik ott, ahol a hő áramlása az öntvénytől a szerszám belseje felé elkezdődik. Ha a

szerszámlapnak nincsen betétje, akkor a hűtőcsatornákat a szerszámlapba fűrik bele, és úgy csatlakoztatják a hűtőkörre.

Ha a betét a szerszámlapba van beépítve, akkor azt kell hűteni, ilyenkor a szerszámlap külső oldalától csatlakozó csavarokat csavarnak be a betét hűtőfurataiba. Mivel az öntőszerszámoknál a hűtőrendszer tömítettsége nagyon fontos, az olyan külön elemek, mint a formabetét, a fix mag, a beönt hüvelyek vagy az elosztócsapok, a hűtőrendszerre mindig becsavarozható csövekkel kell, hogy csatlakozzanak. A hűtőcsatornák a hűtendő szerszámrészen belül tetszőlegesen helyezhetők el. A csatorna vezetését úgy kell megválasztani, hogy mindenek előtt a szerszámüreg mögötti teret lehessen hatásosan hűteni.

A csatornák egyenes vonalúan vezessenek át a szerszámon, de lehetségesek elterelések és a forma kontúrjához való illesztések alkalmazása is.

A hűtőcsatornák optimális elrendezése nagyon sok gyakorlati tapasztalatot követel. Vannak ugyan számítási eljárások a szükséges hatásos hűtőberendezések meghatározására, de ez végül is mindig a tervezőre van bízva, hogy hogyan rendezi el a csatornákat.

0A fém hőmérsékletének mérése a nyomásos öntőszerszámban gyakorlatilag a forma-fém érintkező felületen történhet. A mérés nehézségét az okozza, hogy a dermedési idő általában igen rövid ($70\mu\text{s}$ – 2s), tehát csak olyan hőelem alkalmazható, amelynek inkubációs ideje néhány milliszekundum csupán. A termoelem érzékelő pontjának szabadon kell maradnia. Az ilyen mérésekből következtetni lehet az öntvény dermedési viszonyaira az idő és a hely függvényében.

A hűtés történhet a szerszámban lévő hűtőcsatornákon keresztül, valamint bizonyos esetekben a szerszám egyes, nehezen hozzáférhető részein, az oda beépített zárt rendszerű hűtőbetétekkel.

A gép mellé telepíthető hűtő-fűtő berendezések kettős feladatot látnak el: egyrészt a segítségükkel fel lehet fűteni a szerszámot az előírt üzemi hőmérsékletre, másrészt üzemelés közben biztosítják a szerszám hűtését. Az előmelegített szerszám növeli a termelékenységét és a szerszám élettartamát is.

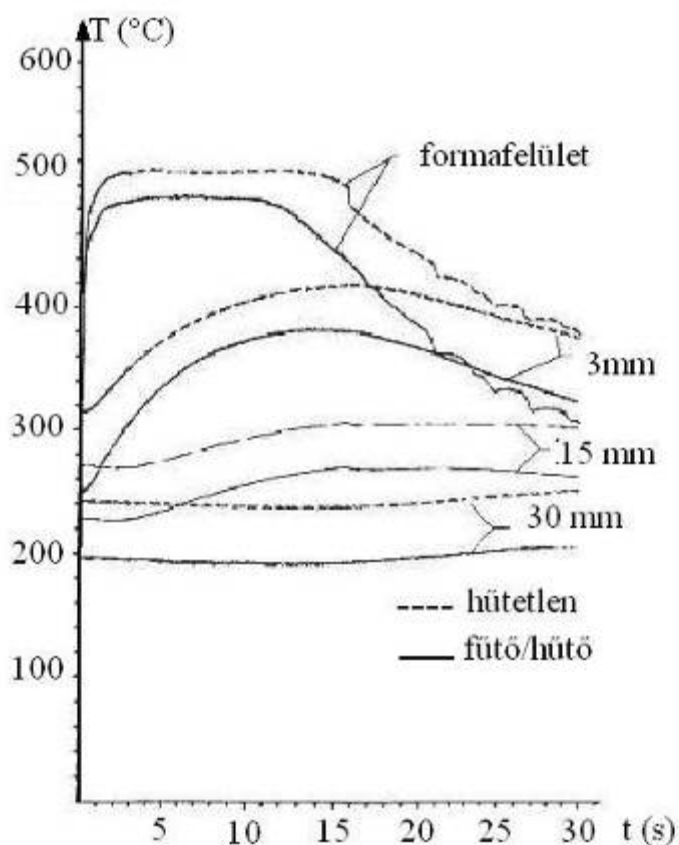
A hűtő-fűtő berendezések általában egy vagy két hűtő-fűtő körrel rendelkeznek, a hűtő-fűtő közeg rendszerint hőálló olaj. A szerszám temperált, amennyiben van legalább egy hűtő-fűtő köre. A hőcserélő folyadékokkal (termikus olajok hevíthetősége általában $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$) működő szerszámhőmérséklet szabályozások legtöbbször kielégítően szabályozott szerszámhőmérsékletet biztosítanak. A berendezés nagy kapacitású elektromos fűtőket és hatékony hőcserélőket egyesít. A hőcserélő folyadékot

a hűtőcsatornáknak a 2–4 m/s áramlási sebesség fenntartásához elegendő teljesítményű szivattyúval keringtetik.

A hőelemek a folyadék hőmérsékletét ellenőrzik, és hűtésre vagy fűtésre kapcsolnak, ahogy a beprogramozott szerszámhőmérséklet fenntartása megkívánja.

A hűtőfolyadék lehet víz vagy olaj. A fűtő-hűtő körök távolsága a formát adó felülettől olaj esetén kb. 15–20 mm, míg víz esetén kb. 20–25 mm, mivel a víznek az olajhoz képest jobb a hűtőhatása. A szerszám – a hőmérsékletét szabályzó rendszer és a folyékony fém által leadott hő miatt – a folyékony fém és a környezet közötti hőmérsékleten van.

A 9. és 10. ábrákon a nyomásos öntőszerszám hőmérséklet-viszonyai láthatók (öntés közben) a forma felszínétől különböző távolságokban [15] .

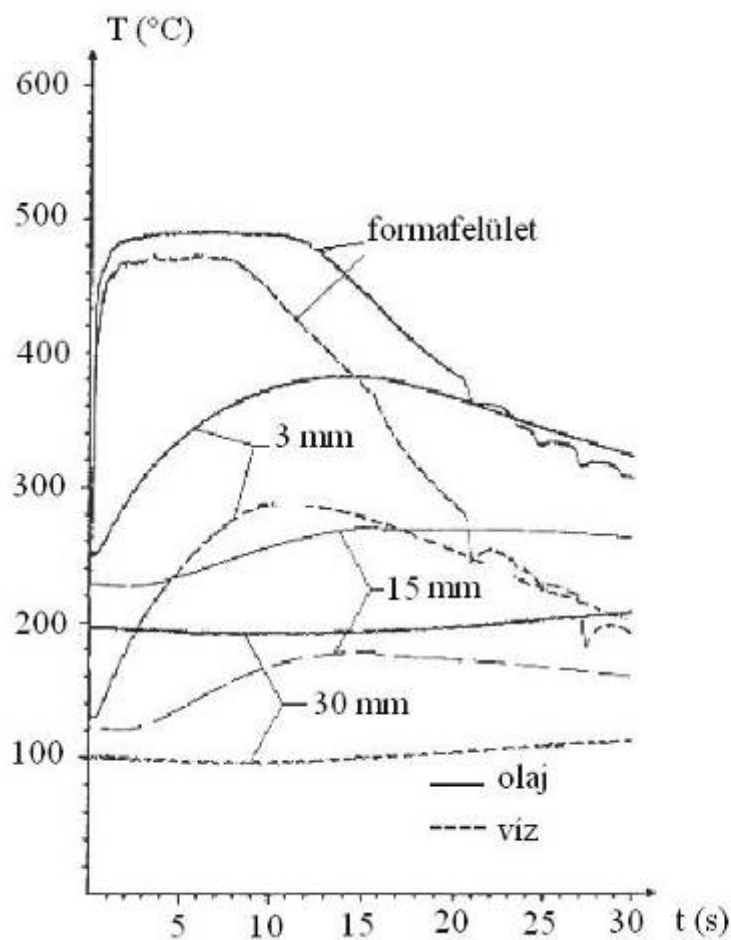


9. ábra. Hőmérsékletváltozás az idő függvényében hűtetlen és hőhordozó olajjal hűtött szerszámban

A 9. ábra egy hűtetlen és egy hőhordozó olajjal (150 °C) hűtött szerszám hőmérséklet-idő folyamatait, a 10. ábra pedig a víz és a hőhordozó olajok hűtőhatásának összehasonlítását mutatja.

A 10. ábráról egyértelműen leolvasható, hogy a víz hűtőhatása jelentősen nagyobb. A diagramokon látszik, hogy a hőmérséklet változások legjobban a szerszám

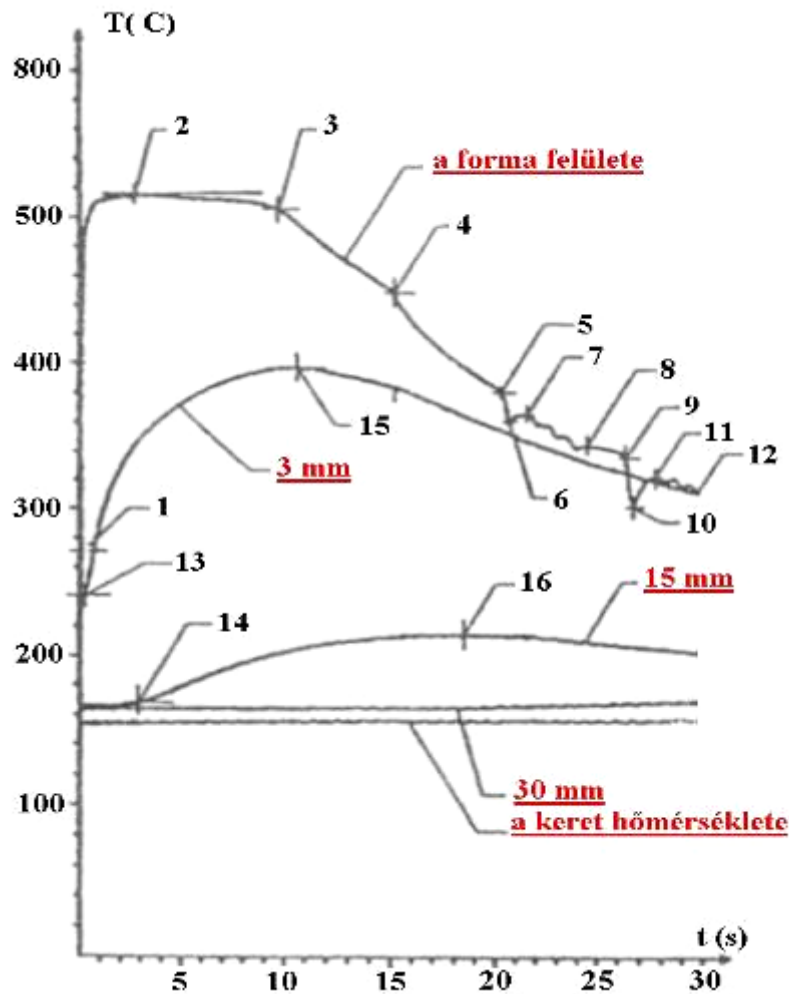
felületén követhetők. Látható hőmérséklet emelkedés a forma felszíne alatt 15 mm-rel csak kb. 3 másodperc múlva kezdődik a szerszámüreg feltöltése után. Ez alatt az idő alatt az olvadék az összes hőjének már kb. kétharmad részét leadta a szerszámnak. Ez azt jelenti, hogy az ötvözet által leadott hőmennyiség legnagyobb része a szerszám anyagának rossz hővezetőképessége miatt eleinte a szerszám felszínén egy vékony rétegben tárolódik és azután a következő öntési ciklus kezdetéig vezetődik tovább a mélyebb szerszámrészekre [15].



10. ábra. A víz és olaj hatásának összehasonlítása

A szerszámüreg felszínétől mérve növekvő távolsággal egyre kisebb lesz a hőmérséklet ingadozások amplitúdója, vagyis a hőáramlás mind egyenletesebbé válik. A felszín alatt 30 mm-rel gyakorlatilag már nincsenek hőmérséklet változások, és a hőáramlás az egész öntési ciklus alatt állandó marad.

Egy öntési ciklus során a szerszám különböző mélységeiben bekövetkező hőmérséklet változások a 11. ábrán láthatók.



11. ábra. A hőmérséklet változása a forma különböző mélységeiben

Az ábrához tartozó pontok magyarázata a következő:

- 1 – a formatöltés kezdete, amelynél a szerszám felületi hőmérséklete ~265°C;
- 2 – közvetlen öntés utáni hőmérséklet, amelynél a szerszám felületi hőmérséklete ~ 518°C;
- 3 – dermedés vége (2–3 az öntvény felületi rétegének a megdermedését mutatja);
- 4 – a szerszámnyitása és az öntvény kilökése;
- 4–5 – a szerszám felületének hűlése nyugvó levegőn és a további hűtadás szerszám belseje felé;
- 5–9 – a szerszám felületének hőmérséklete, a felület tisztítása a leválasztó anyag felhordása előtt,
- 6–10 – a szerszám felületének hőmérséklete, a tisztítás és a leválasztó anyag felhordása után;
- 7–11 – a felület utólagos felmelegedése a mélyebb rétegek felőli hőáram útján;
- 7–8–10–12 – a szerszám felületének hűlése mozgó levegőn;
- 13–14 – a hőmérséklet emelkedésének kezdete a mélyebben fekvő zónákban;
- 15–16 – a maximális hőmérséklet elérése a mélyebben fekvő zónákban.

A hőmérséklet a szerszámfelülettől 3, 15 és 30 mm-re, valamint a szerszámkeret vonalán volt mérve. A diagramon jól látható a szerszám hőmérséklet-eloszlása az öntési ciklus során. A hőmérséklet változások a szerszám felületén követhetők a legjobban, majd ahogy fokozatosan haladunk a szerszámkeret irányába, annál inkább válnak a görbék egyenessé. A maximumok kisímulnak és későbbi időpontban következnek be, nincsenek hirtelen hőmérséklet változások [15].

Adott öntvénygeometria, szerszámgeometria és fémminőség mellett a szerszám hőmérsékletét a következő paraméterek befolyásolhatják:

- ciklusidő;
- a szerszám zárvatartásának ideje;
- a forma temperálása (hőntartása) és
- a lefúvóanyag minősége, mennyisége.

A szerszámhőmérséklet jelentősége

Alumíniumötvözetekből készült öntvények gyártásakor a szerszám átlagos, beállt hőmérséklete 180–220 °C, nagyobb öntvényeknél 240–260 °C. A felület hőmérséklete elérheti az 500–520 °C-ot is. Alacsony olvadáspontú ötvözeteknél (Zn-ötvözetek) ezek az értékek arányosan kisebbek, rézötvözetek esetén nagyobbak. A szerszám hőtágulása befolyásolja az öntvény méretét. Tehát nem csak az öntvény saját zsugorodása, hanem a szerszám hőtágulása is szerepet játszik. Ideális esetben mindig azonosnak kellene lenni az öntési hőmérsékletnek és a szerszám hőmérséklet-változásának az egymást követő ciklusokban. A valóságban azonban ez legfeljebb határértékek között tartható. Nem temperált szerszámok esetén az öntvény és a szerszám hőmérséklete az öntvény kivételekor ciklusonként eltérő és néha jelentős szórást mutat. Ez a hőmérséklet-ingadozás, és vele együtt az öntvény méreteinek ingadozása nő, ha kézi lefújópisztolyt alkalmaznak, mert ennek helyi hűtési intenzitása változó, időtartama ciklusonként eltérő. Ehhez a hatáshoz hozzájárul vagy növelő vagy csökkenő előjellel a kézzel öntött fém hőmérsékletének ingadozása is. Mivel ezek a határok gyengítik vagy erősítik egymást, nő a gyártási bizonytalanság.

A szerszám hőmérsékletének nemcsak az öntvény méreteire van jelentős hatása, hanem a felületi minőségre, illetve épségére is.

A fentiekben vázoltak alapján igen fontos, hogy a szerszám hőmérséklet-viszonyait a technológiával megadott határok között tartsuk!

Általában megállapíthatjuk, hogy az egyenletes, csekély selejtszázalékkal történő öntvénygyártáshoz elengedhetetlen az öntvényminőséget befolyásoló tényezők minél szűkebb határértékek között tartása.

A nyomásos öntőszerszám hőmérséklet-viszonyainak hatása az öntvény minőségére és a szerszám élettartamára

A nyomásos öntőszerszám a formába nagy sebességgel beáramló fém ütközése miatt igen erős dinamikus erőnek van kitéve, de nagy igénybevételt jelent a hőhatás is. A gyakran ismétlődő lövések pillanatában a szerszám felmelegszik, majd lehül. A hőigénybevétel a szerszám felületén a legnagyobb, ahol a szerszám a folyékony fémrel közvetlenül érintkezik. Alumíniumötvözetek nyomásos öntésekor a szerszámtöltés pillanatában kb. 500–520 °C-ig melegszik fel a szerszámüreg felülete, majd a formatöltések közötti időben 250–300 °C-ig hűl le. A szerszám a távolabbi részeken nem melegszik fel ennyire. Ez a hőmérséklet-különbség állandóan változó, nagy feszültséget ébreszt a szerszámban, amely végül is a hőkifáradás jelensége révén a szerszám alakváltozását és repedését váltja ki. Mindezekhez hozzájárul a fémsugár eróziós hatása is. Ezek a jelenségek együttevén a szerszámüreg felületén hajszálrepedések hálózatait okozzák, amelyek fokozatosan szélesednek és mélyülnek, míg végül a szerszámot használhatatlanná teszik. Ezek a hibák ugyanis az öntvények felületén tükröződnek, az öntvények erősebben tapadnak, végső esetben pedig be is ragadhatnak a szerszámba. A feszültségek megfelelően tervezett hűtőrendszer alkalmazásával csökkenthetők.

A szerszám élettartamát az előbbieken túlmenően javítja:

- ha az áramlási sebesség a formaüregben kisebb;
- ha olyan a beömlőrendszer, amely a fémsugár eróziós hatását csökkenti;
- ha a szerszám hőmérsékletét lehetőleg állandó értéken tartják, ami a szerszámfelek temperálásával valósítható meg.

A 6. táblázat szemlélteti a nyomásos öntvények leggyakoribb hibáit, a hibaforrások valamint az azok eredete közötti összefüggéseket [16].

6. táblázat. Szerszámfüggő paraméterek

Kölcsönös kapcsolat a nyomásos öntészet folyamatában		Szerszámfüggő paraméterek															Olvadék-függő paraméterek		
		Szerszám hőmérséklet	Szerszám levál.anyag fajtái	Levál. anyag mennyiség	Levál. anyag higítási foka	Szerszám felületi állapota	Rávágás helyzete	Rávágás geometriája	Rávágás vastagsága	Rávágás keresztmetszete	Fészekszám	Levegőzők fajtái és keresztmetszetei	Hűtő-fűtő rendszerek fajtái és száma	Hűtő-fűtő közeg áramlása és hőmérséklete	Szerszámméret pontosság	Szerszámfelek párhuzamossága	Olvadék hőmérséklet	Olvadék összetétel	Olvadék szennyezettsége
Mérethibák	Hiányos formatöltés	x	>	>	>	>	#	o	>	>	>	x	x	x	>	>	x	x	>
	Fáncképződés	x	>	>	>	o	>	>	>	>	o	>	o	x	>	#	x		>
	Deformáció	o	x	x	x	x	>	>	>	>	o	>	o	o	>	>	>		>
	Horpadások	o	>	>	>	>	>	>			o	>	x	o	>	>	x	x	>
	Térfogat eltérés	x	>	>	>	>			>	>	>	>	o	o	x	#	o	x	>
	Méret egyenetlenség	x	>	>	>	>			>	>	>	>	x	o	#	#	o	x	>
Térfogathibák	Gázporozitás	x	x	#	x	>	#	x	#	x	>	#	x	x	>	>	>	x	x
	Gázhólyagok	x	x	#	x	>	x	x	x	x	>	#	x	x	>	>	>		x
	Szívódási porozitás	x	>	>	>	>	#		#		>	>	x	x	>	>	o	x	>
	Repedések	x	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	x	x	>	>	x	x	>
	Kemény zárványok	>	x	x	x	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	x	x	x
	Oxidzárványok	>	>	>	>	>	o	o	>	>	>	>			>	>	x	x	x
Felületehibák	Hőkezelés utáni dudorok	o	x	x	o	>	x	o			>	x	o		>	>			x
	Hólyagok	x	x	x	x	>	x	x			>	x	o		>	>	x		o
	Forradások, hegedések	x	#	#	x	#	x	x	x	o	>	>	o	>	>	>	x	x	>
	Kifolyás vonalak	o	o	o	>	>	x	x	o	o	>	>	x	x	>	>			>
	Foltos felület	o	#	#	x	>	x	x	>	>	>	>	>	>	>	>			>
	Hidegfolyás	x	>	>	>	>	#	o	>	>	>	>	x	x	>	>	x	x	>
	Felületi hajszálrepedések	>	>	>	>	#	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>		>
	Kilököcsap nyomok	o	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>		>
	Húzási vonalak	x	x	x	x	x	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	o	>
	Oxid zárványok	>	>	>	>	>	o	o	>	>	>				>	>	x	x	x
Mechanikai hibák	Szakító szilárdság	x	o	x	o	o	x	o				o	o	o	>	>	o	x	x
	Folyáshatár	x				o	x	o				o	o	o	>	>	o	x	x
	Szakadási nyúlás	x				o	x	x				o	o	o	>	>	o	x	x
	Kifáradási szilárdság		o	x	o	x	x	o				o	o	o	>	>	o	x	x
	Felületi keménység	x		o		>	x						o	o	>	>	o	x	x
	Sűrűség	x	x	x	o	>	x	x	x	o		x	x	x	>	>	o	x	x

– nagy hatást gyakorol, x – hatást gyakorol, o – feltételezett összefüggés,
> – nincs lényegi összefüggés

A nyomásos öntőszerszám hő- és energiamérlege

Az öntőszerszám hőháztartása a nyomásos öntés legkevésbé kutatott területe. A számítások alapja az, hogy mindig fennáll a fém által leadott hőmennyiség és a formából a környezetnek átadott hőmennyiség egyensúlya. A fém megszilárdulása és lehűlése közben a szerszámnak leadott hő közvetlenül, illetve a nyomásos öntőgép más részein keresztül a környezetbe távozik. Ha egy nyomásos öntőgépnek saját hűtőrendszere van, akkor a hő jelentős részét a hűtőközeg vezeti el a szerszámból. A hő elvezetésének szabályozása az egyik leglényegesebb gyártástechnológiai paraméter.

Ahhoz, hogy a nyomásos öntőszerszám hőmérsékleti viszonyai stabilak legyenek, a következő feltételnek kell teljesülnie:

$$Q_{be}=Q_{ki} \quad [J]$$

Ez az jelenti, hogy a formából egy ciklusban annyi hőt kell elvezetni (Q_{ki}), mint amennyit a szerszámnak egy ciklus alatt átadunk (Q_{be}).

A szerszámnak átadott hőmennyiséget a következőképpen tudjuk elvezetni:

- hűtőrendszerrel;
- formabevonó anyaggal;
- sugárzással és
- konvekcióval.

Egy nyomásos öntőszerszám termikus viszonyai meghatározzák:

- az öntvény minőségi tulajdonságait;
- a termelékenységet;
- az utólagos munkálási költségeket és
- a nyomásos öntőszerszám élettartamát.

A folyékony fémmel az öntőszerszámba ciklusonként bevitt hőmennyiség

Az olvadékból a ciklusonként bevezetett hőmennyiséget felveszi

- az öntődugattyú;
- az öntőkamra és
- a formabetétek.

Az olvadék hőleadása az öntvény kivételéig:

$$Q_{be,össz}=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 \quad [J],$$

ahol

Q_1 – a megdermedésig átadott hőmennyiség;

- Q_2 – dermedési hő;
 Q_3 – az öntvény kivételi hőmérsékletének eléréséig átadott hőmennyiség;
 Q_4 – az a hőmennyiség, amely a szerszámüreg töltése folyamán a súrlódásból és az olvadék kinetikai energiájának átalakulásából keletkezik, értéke nagyon csekély, ezért elhanyagolható.

$$Q_1 = c_{pfl} \cdot m \cdot (T_G - T_E) \quad [\text{J}],$$

$$Q_2 = L \cdot m \quad [\text{J}],$$

$$Q_3 = c_{pf} \cdot m \cdot (T_E - T_A) \quad [\text{J}],$$

ahol T_G – az olvadék hőmérséklete;

T_E – a dermedési hőmérséklet;

T_A – a darab kivételi hőmérséklete;

c_{pfl}, c_{pf} – az ötvözet folyékony, valamint szilárd állapotbeli fajhője,

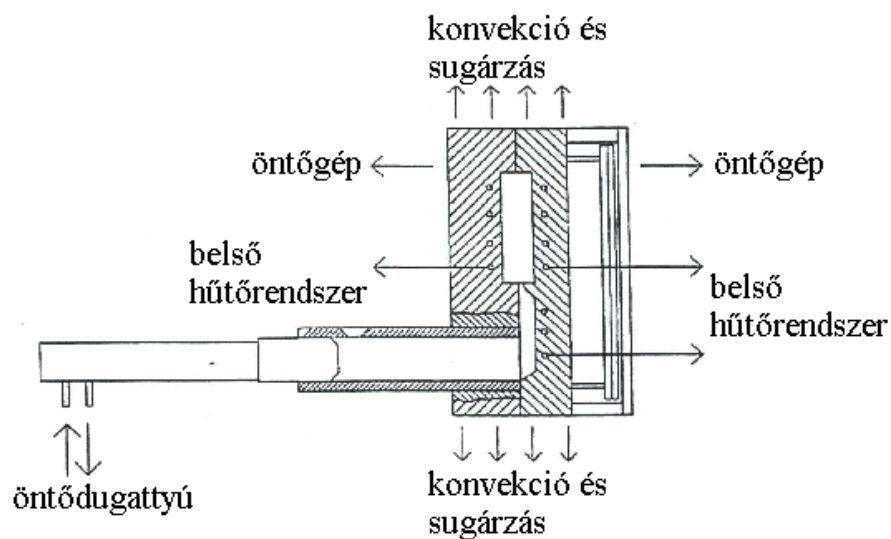
L – az ötvözet dermedési hője és

m – a formába öntött fém tömege [18].

A szerszámból ciklusonként elvezetett hő mennyisége

Az öntődugattyúról, az öntőkamráról és a szerszámbetétekről átadott hőmennyiség a

- a hűtőközegeken (belső hűtőrendszeren);
- a környezeten (konvekció és sugárzás);
- a nyomásos öntőgép oszlopain és szerszámfelfogó lapjain keresztül távozik, azaz „elvezetődik” (12. ábra).



12. ábra. Az olvadék által bevitt hőmennyiség elvezetése

Hidegkamrás öntőgépeknél számottevő a hőmennyiségnek az a része, amely az öntőkamrán és az öntődugattyún át vezetődik el. A szerszámbetéteken leadott hőmennyiséget a belső hűtőrendszer részben az alkalmazott hűtőközegen keresztül (Q_H), részben az öntőgépen át, részben az öntőforma felületén (Q_G) át vezeti el a környező levegőbe. A nyomásos öntőgépből konvekció (Q_K), sugárzás (Q_S) és a forma felületére felvitt leválasztó anyag elpárolgása révén (Q_B) is távozik el hő [19].

A sugárzással elvezetett hőmennyiség

$$Q_S = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_F^4 - T_U^4) \cdot t_Z \quad [\text{J}],$$

ahol $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$, sugárzási konstans, a Stefan-Boltzmann állandó;
 $\varepsilon = 0,70-0,99$, a sugárzó felület (acél) emissziós tényezője;
 A – a sugárzási felület [m^2];
 T_F, T_U – a sugárzó felület és a környezet hőmérséklete [K];
 t_Z – ciklusidő [s].

Konvekció által elvezetett hőmennyiség:

Konvekción értjük a hőátadást áramló folyadékokon vagy gázokon.

$$Q_K = \alpha \cdot A \cdot (T_F - T_U) \cdot t_Z \quad [\text{J}],$$

ahol α – konvektív hőátadási tényező [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$];
 A – hőátadó felület [m^2];
 ΔT – a szerszám (acél) külső felülete és a környezeti hőmérséklet közötti hőmérséklet-különbség [K].

A forma- vagy szerszámbevonó anyag elpárolgásán keresztül elvezetett hőmennyiség:

$$Q_B = M \cdot (c_e + c_p \cdot \Delta T) \quad [\text{J}],$$

ahol M – a felvitt kenőanyag mennyisége ciklusonként [kg];
 c_e – a szerszámbevonó anyag párolgási hője [J/kg];
 ΔT – a szerszámbevonó anyag forrás- és felszórás hőmérsékletének különbsége [$^{\circ}\text{C}$].

A belső hűtőrendszerek által elvezetett hőmennyiség:

A víz és olaj hűtőközegeken át ciklusonként elvezetett hőmennyiségeket a be- és kilépés közötti hőmérséklet-különbség, valamint a hűtőközeg térfogatáramának mérésével lehet meghatározni.

$$Q_H = \frac{V}{60} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \cdot t_Z \quad [\text{J}],$$

- ahol V – a hűtőközeg térfogatárama, (időegység alatt átfolyó tömeg egy körfolyamaton át) [m^3/s];
 t_Z – ciklusidő [s];
 c_p – a hűtőközeg fajhője (hőmérséklettől függő) [$\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$];
 ρ – a hűtőközeg sűrűsége (hőmérséklettől függő) [kg/m^3],
 $T_2 - T_1$ – a hűtőközeg kilépési és belépési hőmérséklete közötti különbség [$^\circ\text{C}$].

Az egy hűtési körfolyamat alatti hőelvezetést ezen kívül a következő tényezők befolyásolják:

- a formabetét szerkezeti anyaga (hőálló acél);
- a hűtőközeg fajtája;
- a hűtőközeg áramlási sebessége;
- a hűtőfuratok átmérője;
- a furat hossza a kontúradó felszín alatt;
- a hűtőfurat távolsága a kontúradó felszíntől.

Egy öntési ciklus alatt a szerszámról elvezetett összes hőmennyiség:

$$Q_{ki,össz} = Q_S + Q_K + Q_B + Q_H + Q_G \quad [\text{J}],$$

ahol Q_G – a nyomásos öntőgépnek átadott hőmennyiség [J];

Q_H – a belső hűtőrendszeren keresztül elvezetett hőmennyiség [J].

A termikus egyensúly állapotában minden egyes öntési ciklusban a szerszámban ugyanakkora hőmérséklet-eloszlásnak kell uralkodnia:

$$Q_{be,össz} = Q_{ki,össz} \quad [\text{J}].$$

Ebből számolható a szükséges hűtőtéljesítmény:

$$P_{össz} = (Q_{be,össz} - Q_S - Q_K - Q_B - Q_G) / t_Z \quad [\text{W}].$$

A szerszámról elvezetett összes hőmennyiség megközelítőleg 10%-át alkotja a konvekció és sugárzás által elvezetett és az öntőgépen eltávozó mennyiség. A szerszámkenő anyaggal eltávozó hőmennyiséget minimális értéken kell tartani, tehát a hűtőközegeken elvezetett hőmennyiség közel 90% [20].

A hűtőcsatornák jellemzői, számításának alapjai

Ma már hatékony hűtőrendszer tervezése számítógépek alkalmazása nélkül szinte lehetetlen. Rendelkezésre állnak olyan hardverek és szoftverek, amelyek állandóan regisztrálják a hűtő-fűtő folyadék belépő és kilépő hőmérséklet közötti különbséget és időszakosan a térfogatáramot.

A tervezés megkezdése előtt fel kell osztani a szerszámot az öntvény alakjától és falvastagságától függő hőmérsékleti zónákra, és annak alapján kell megtervezni a hűtőcsatornák méretét, felszíntől való távolságát, hogy mennyi az a hőmennyiség, amelyet el kell arról a területről vezetni.

A tervezés során kerülni kell a túl kicsi furatkeresztmetszeteket, a keresztmetszet-változásokat és az éles irányváltásokat, mivel ezek megnövelik az áramlási ellenállást. Az áramlási ellenállás növekedése által pedig csökkenhet az átfolyási teljesítmény.

A nagy hűtőcsatorna-keresztmetszetek csökkentik az átfolyási sebességet, ami rontja a hűtőadást a formáról a hőhordozó közegbe. A hűtött felület nagysága a csatorna felületről való távolságától és átmérőjétől függ.

Hőmérleg a hűtőcsatorna környezetében

A formaüreg felületéről a hűtőközegre átmenő hőáram két komponensre osztható:

Φ_F – hőáram a formaüreg felületéről a hűtőcsatorna falára;

Φ_K – hőáram a hűtőcsatorna faláról a hűtőközegbe.

A termikus egyensúly állapotában a bevitt hőmennyiség egyenlő a hűtőtelteljesítménnyel, azaz az elvezetett hőmennyiséggel.

A hűtőtelteljesítmény egyenlő a szerszámüreg felületéről a hűtőcsatornák felületéig tartó közepes hőárammal, és egyenlő a hűtőcsatornák felületéről a hűtőközegig tartó hőárammal: $\Phi_F = \Phi_K = P$.

Összefüggések a hőáramra vonatkozóan

Hőáram a kontúrt adó formafelület és a csatorna fala között:

$$\Phi_F = \lambda \cdot S \cdot (T_{FM} - T_{KW}) \left[\frac{W}{m^2s} \right],$$

ahol λ – a forma hővezető képessége [$W/m \cdot K$];

S – alaktényező vagy formatényező [m];

T_{FM} – a formafelület közepes hőmérséklete [K].

Hőáram a hűtőfolyadék és a csatorna fala között:

$$\Phi_K = \alpha \cdot A \cdot (T_{KW} - T_{Fl}) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{s}} \right],$$

ahol α – hőátadási tényező a hűtőcsatorna fala és az áramló közeg között $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$;

A – a hűtőcsatorna hatásos felülete $[\text{m}^2]$;

$A = L \cdot D \cdot \pi$, ahol L a hatásos hossz,

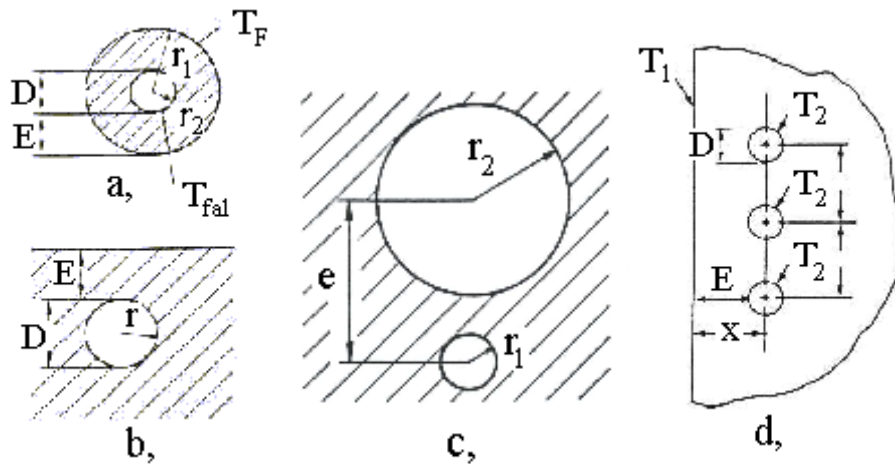
T_{KW} – a hűtőcsatorna falának közepes hőmérséklete $[\text{K}]$,

T_{Fl} – a hűtőfolyadék közepes hőmérséklete $[\text{K}]$.

Az S alaktényező olyan jellemző, amelyet egyedül a szerszám és a hűtőcsatornák geometriája határoz meg. Sok egyszerű geometriára ismertek S -re vonatkozó képletek, bonyolult geometriák esetén az alaktényezőt nem lehet analitikusan meghatározni.

A temperálás szegmensenkénti meghatározásához a bonyolult alkatrészek is felbonthatók egyszerűbb alakzatokká.

A 13. ábra egy összeállítást tartalmaz néhány egyszerű geometria esetén az alaktényezőkre. Itt adottak az $S_L = S/L$ értékek is, vagyis a hűtőcsatorna hosszegységére eső formatényezők [21].



13. ábra. Formatényezők

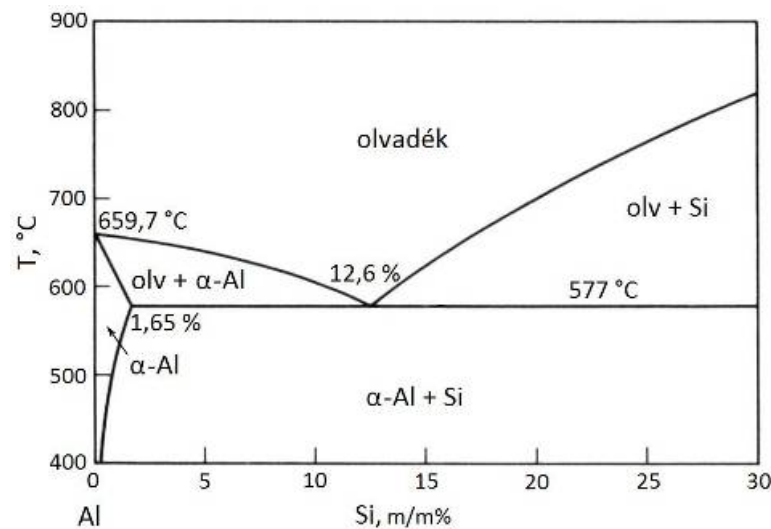
- a) hűtőcsatornával koncentrikus hengeres felület: $S = 2\pi L / \ln(2E/D + 1)$
- b) hűtőcsatornával párhuzamos sík felület: $S = 2\pi L / \arccos(2E/D + 1)$
- c) hűtőcsatornán kívüli hengeres felület: $S = 2\pi L / \arccos((e^2 - r_1^2 - r_2^2) / (2r_1 r_2))$
- d) több hűtőcsatornával párhuzamos sík felület: $S = 2\pi L / \ln(2d / (\pi D) \sinh(2\pi X/d))$
 $X = E + D/2$

2.4 A stroncium hatása az AlSi-ötvözetek szilárdsági tulajdonságaira

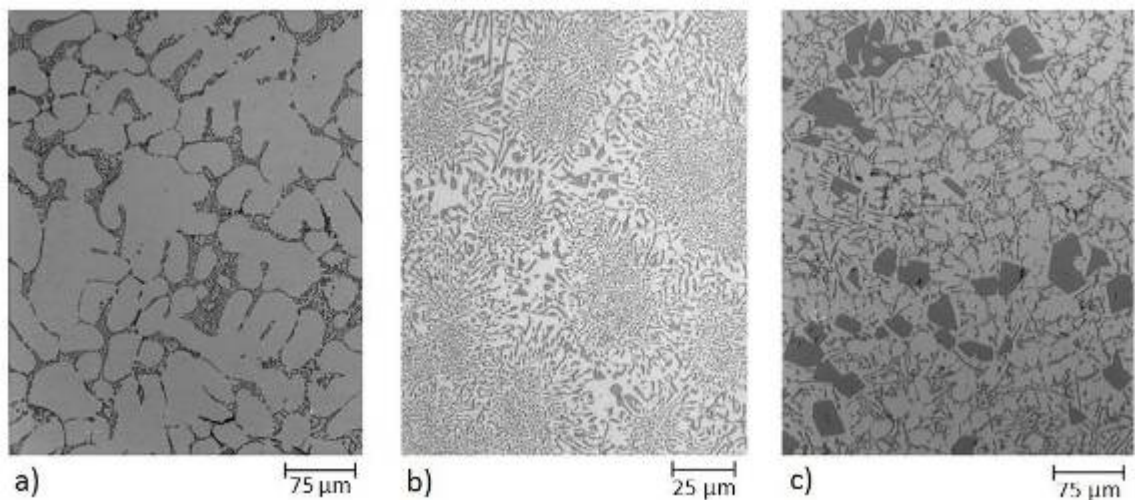
Stronciumot rendszerint gravitációs öntésnél adagolnak a kristályosodáskor kialakuló szemcseszerkezet finomítására. Nyomásos öntésnél a gyors megszilárdulás miatt eleve finom szilíciumkristályok képződnek, ezért célkitűzésem volt annak vizsgálata, hogy az adott ötvénynél a stroncium adagolása hatásos-e, és ha igen, milyen mértékben eredményezi a szakítóerő növekedését.

Az Al-Si kétalkotós rendszer

A szilíciumtartalom a szabványos Al-Si öntészeti ötvözetekben 5–23% között változik, így összetételüktől függően az adott ötvözet lehet hipoeutektikus, eutektikus vagy hipereutektikus, ahogy a 14. és 15. ábrán is látható [26].



14. ábra. Az Al-Si kétalkotós rendszer egyensúlyi fázisdiagramjának Al felőli részlete



15. ábra. A különböző összetételekhez tartozó jellemző szövetképek.

- (a) hipoeutektikus ötvözet (5–12,6 % Si), (b) eutektikus ötvözet (12,6 % Si),
(c) hipereutektikus ötvözet (> 12,6 % Si) [26]

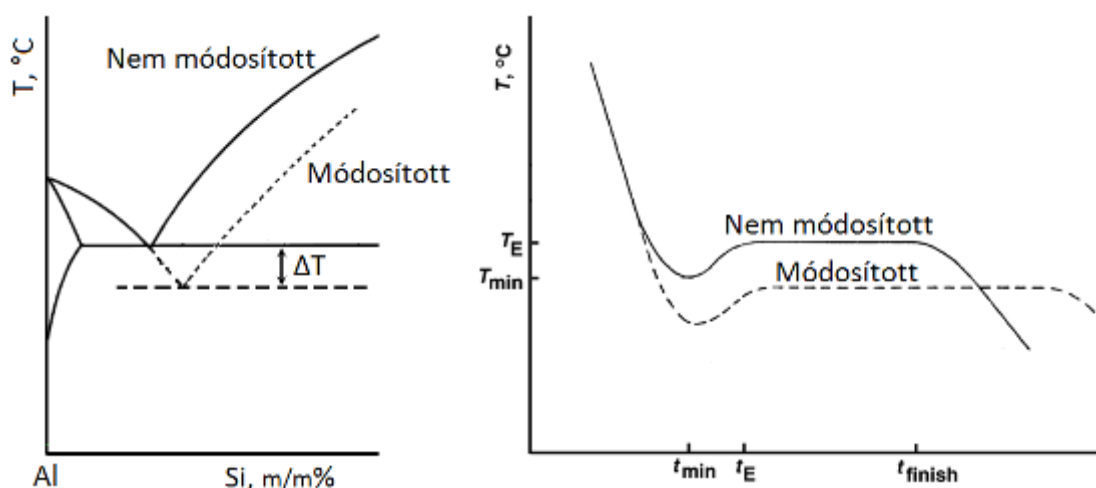
Abban az esetben, ha a módosító elemektől eltekintünk, a szilícium szemcsék finomodása akkor is bekövetkezhet, ha például nagy hűtési sebességet alkalmazunk. Azonban teljes módosítás nem hozható létre csak a hűtési sebesség növelésével, így szükség van a módosító anyagok adagolására is. Ezeket az anyagokat az ötvözethez általában folyékony állapotban, megfelelő mennyiségű ún. mesterötvözetek formájában adják a jól módosított szerkezet elérése érdekében.

Az Al-Si eutektikum módosításának jellemzése

Az Al-Si öntészeti ötvözetek eutektikumának módosítása általánosan elfogadott és használt eljárás, elsősorban a mechanikai tulajdonságok javítása érdekében azért, hogy elősegíti az eredendően durva, lemezes szilíciumfázis szerkezeti finomodását.

A módosító elemek közül a nátrium rendelkezik a legerősebb módosító potenciállal, de ez a hatás rövid ideig tart a gyors oxidáció miatt, ezért az iparban áttértek a stronciumos kezelésre, melynek módosító hatása hosszabb, azonban lassú hűlési sebesség esetén kevésbé hatékony.

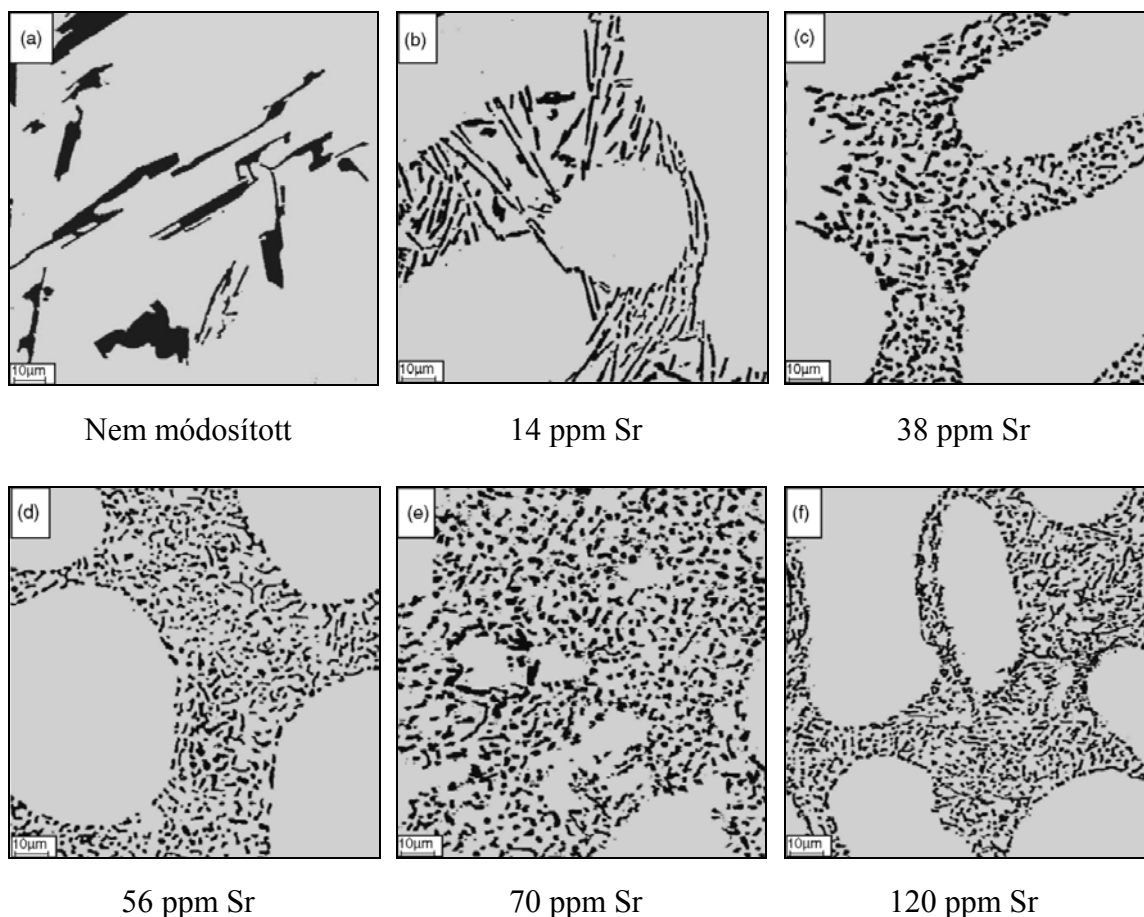
A módosító kezelés során alkalmazott stroncium csökkenti az Al-Si rendszer eutektikus hőmérsékletét, az eutektikus pontot pedig a nagyobb szilíciumtartalom felé tolja el, ahogy az a 16. ábrán is látható. Ebből következően a lehűlési görbék között is eltérés figyelhető meg, melyből megállapítható az eutektikum túlhűlésének mértéke, abból pedig következtethetünk a módosítottság mértékére. A lehűlési görbék felvételéhez termikus analízist alkalmaznak [29,30].



16. ábra. A stroncium Al-Si fázisdiagramra gyakorolt hatása, ill. a lehűlési görbék közötti eltérés nem módosított és módosított Al-Si ötvözet esetén [27,28, 31]

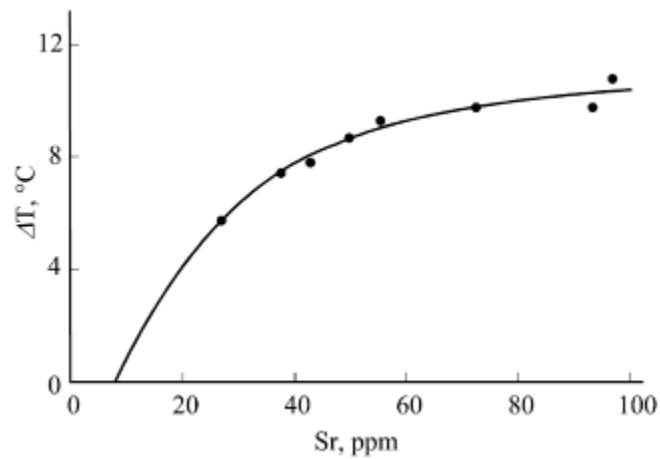
A 17. ábra jól szemlélteti a stroncium Al-Si eutektikumra gyakorolt hatását. Nem módosított ötvözet esetén a szilícium durva, lemezes formában jelenik meg,

viszont már 14 ppm stroncium adagolásával jelentős változás érhető el, az eutektikum finomabb, de még mindig lemezes szerkezetű marad. Tovább növelve a stronciumtartalmat az eutektikum is egyre finomabb lesz, és gyakorlatilag már 56 ppm esetén egy nagyon finom eutektikus szerkezet érhető el. Az is megfigyelhető, hogy 56 ppm stronciumtartalom felett már jelentős különbség nem tapasztalható az eutektikum szerkezetében, valamint 70 és 120 ppm stronciumtartalomnál is hasonló a módosító hatás [29].



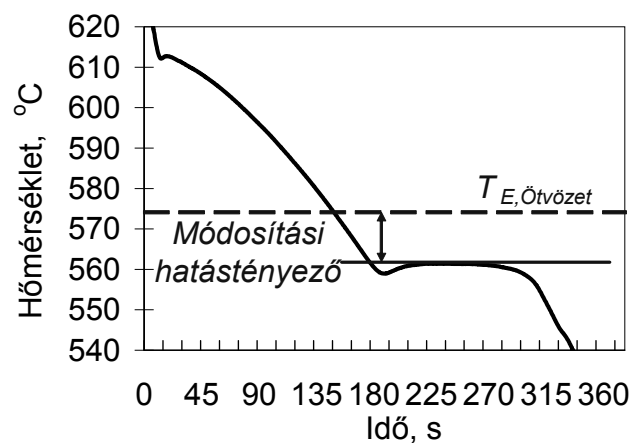
17. ábra. Az AlSi7 ötvözet eutektikumának mikroszerkezete nem módosított és stronciummal módosított esetekben [29, 32]

A 18. ábra a stroncium hatására bekövetkező túlhűlést szemlélteti, amelyből látható, hogy a stronciumtartalom növekedésével a túlhűlés mértéke is nő, azaz csökken az eutektikus hőmérséklet. Azonban ez a növekedés 100 ppm stronciumtartalomnál már jelentősen lecsökken [28].



18. ábra. A stronciumtartalom túlhűlésre gyakorolt hatása [28]

A módosítás sikerességét az öntészeti gyakorlatban a termikus analízis során meghatározott módosítási hatástényező alapján, ill. etalonképekkel történő összehasonlítással végzik. A módosítási hatástényező („Veredelung-V”) az eutektikum tényleges megszilárdulási maximum hőmérsékletéből és az adott ($T_{E,Ötvözet}$) ötvözetre számolt eutektikus hőmérsékletből számítható (19. ábra) [25].



19. ábra. A módosítási hatástényező értelmezése

Módosítottnak, azaz megfelelőnek minősítenek egy öntvényt, ha a módosítási hatástényező nagyobb vagy egyenlő nyolcnál.

3. ELŐÍRT SZILÁRDSÁGÚ NYOMÁSOS ÖNTVÉNY TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

3.1. *A problémakör bemutatása, kísérleti célkitűzés*

A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény – és fajtái – az autók biztonsági öv rendszerének egyik eleme, ún. fékeződobja. Biztonsági elem lévén, szigorú szilárdsági követelményrendszernek kell megfelelnie.

A gépjárművekben a biztonsági öv a hirtelen lassításoknál, fékezéseknél megakadályozza a jármű vezetőjének és utasainak a járműüléstől való elszakadását, a jármű részeivel való ütközését, ezáltal életeket menthet. Az öv egyik vége a dobhoz van kapcsolva, így az általa kifejtett fékezőerő átadódik a dobra, ez a hatás húzóerőként szimulálható, amely maximum értékénél (F_{max}) a darabnak az öv rögzítésére szolgáló része eltörik.

A szerelhetőség által kívánt méretpontosságon felül tehát egy funkcionális tulajdonság is előtérbe kerül, amelyet egy ún. beépített állapotbeli igénybevétellel vizsgálunk, és az F_{max} értékkel jellemzünk. Ahhoz, hogy gazdaságosan, biztonsággal teljesíteni tudjuk a vevő által előírt szigorú szilárdsági értékeket (12 kN szakító erő), egy átfogó, részletes technológiai folyamat-optimalizálását végeztem el a következő szempontok szerint:

- 3 D geometria optimalizálása (vevővel történt egyeztetés szerint);
- megfelelő szabvány szerinti alapanyag kiválasztása;
- öntéstechnológiai és hőtechnikai számítások végzése, formatöltés- és dermedés-szimuláció, a nyomásos öntőszerszám optimális kialakítása;
- gépbeállítási paraméterek meghatározása;
- nyomásos öntőszerszám hőmérséklet viszonyainak és az öntőszerszámba belépő hűtő-fűtő közeg optimális hőmérsékletének vizsgálata;
- az eutektikum módosítottságának befolyásolása stroncium adagolásával különböző szerszámhőmérsékletek esetén;
- az oxidhártya olvadékba keveredésének hatása.

Doktori értekezésem célja a járműipar számára öntött biztonsági öv alkatrész gyártására vonatkozó kutatási-fejlesztési tevékenység végzése, amellyel egyrészt az adott öntvényenél előírt szilárdsági követelmények biztonsággal teljesíthetők, másrészt a hasonló öntvények gyártáselőkészítésére és gyártására vonatkozó tapasztalatok általánosíthatók.

3.2. A vizsgált öntvény és az előírt követelmények

A biztonsági öv alkatrész kísérleti öntvényét a 20. ábra mutatja. A vizsgált öntvény anyagát tekintve D 231-es szabványos nyomásos Al ötvözet. Az ötvözet kémiai összetételét a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat. A D231 jelű nyomásos alumíniumötvözet kémiai összetétele, %

Jel	Ötvözet	Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Ni, %	Zn, %	Ti, %	EN
231D	AlSi12Cu1(Fe)	12,5-13,5	0,6-1,1	0,7-1,2	0,55	0,35	0,30	0,55	0,15	AB 47100



20. ábra. A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény

Az öntés során több ellenőrzési műveletet végzünk. Műszakonként ellenőrizni kell az anyagminőséget, a fém hőmérsékletét, a funkcionális méreteket az öntvény szakítószilárdságát (a töréshez tartozó szakítóerőt), valamint a darab jóságát, nem lehet húzás, feltapadás, hidegfolyás, kifolyási hiba, a darab legyen jól kiöntött, ép, lunker-, porozitás- és sérülésmentes.

A szakítóerőt szériaindításkor, majd négyóránként kétszer kettő öntvénycsokor minden öntvényén kell ellenőrizni. Amennyiben valamelyik öntvényhez tartozó szakítóerő értéke nem éri el az előírtat, akkor az előző ellenőrzés óta gyártott termékeket selejtnek minősítjük (fészkenként elkülönítve).

A különböző fajtájú öntvényekhez más-más előírt szakítóerő tartozik (9 kN, 12 kN, 15 kN). Az általam vizsgált öntvénnel szemben előírt követelmény szerint a min. szakítóerő 12 kN.

3.3. Az öntvény megfelelőségének vizsgálata

Kísérleteim során az $F_{\max}$ szakítóerő mérésére egy, az öntvényhez kialakított speciális befogókkal rendelkező szakítógép állt rendelkezésre, amely a valóságban előforduló erők szimulálására képes. A 21. ábra a szakítógépet mutatja a befogó rendszerrel együtt.



21. ábra. A szakítógép a befogott darabbal

A vizsgálni kívánt Welle öntvényt a fogazott egységgel, a rugóval és a biztosító lemezzel összeszereljük, majd a házba tesszük. A darabba behúzzuk az övet és az övcsatot úgy, hogy a nagyobb övnyílás felől a keskenyebb övnyílás felé haladjon az öv.

The technical drawing on the left shows a cross-section of a mechanical component, likely a valve or a pump. It features a central circular element with a cross-shaped internal structure. A vertical arrow labeled 'F' points upwards from the top of the component, indicating a force or flow direction. The drawing includes various hatching patterns to represent different materials or sections.

The photograph on the right shows a physical component, which appears to be a valve or a pump, mounted in a metal housing. The component has a complex, multi-faceted shape with a central circular opening. The housing is made of dark metal and has several mounting holes. The component is secured by a bolt or screw in the center.

Az övet fel kell tekerni az övfeltekerőre és rögzíteni kell a csappal. Az övfeltekerőt mindig úgy (abba az irányba) kell tekerni, hogy az öv függőlegesen álljon (ne álljon keresztbe), a vizsgálókészülék és az övfeltekerő között 200–250 mm szabad övhosszúság legyen.

El kell indítani a terhelést a megfelelő gomb megnyomásával. Meg kell várni, amíg a gép elvégzi a műveletet és kijelzi a szakítási értéket. A kijelzett értéket fel kell jegyezni. A darab akkor felel meg az előírásnak, ha teljesíti a vizsgálati tervben előírt terhelési értéket.

A szakítóvizsgálatok során az adatokat számítógépen rögzítettem. A vizsgálatokat megkönnyítette, hogy a számítógéppel vezérelt szakítóberendezés akár nyomtatható jegyzőkönyv formátumban is külön leolvashatóvá teszi a szakadási érték maximumát a diagramtól függetlenül (23. *ábra*).

Druck Datum: 2012. 08. 17.
Prüfungsdatum: 2012. 08. 17. 1

Prüfprotokoll

Flendelés :
Mérés :
Típus : 6621 FNS

[P1]:

Ergebnis: max. Kraft: 12994,633 N



23. ábra. A szakítóerő kiértékelésére használt dokumentum

3.4. Öntéstechnikai és hőtechnikai tervezés, szimuláció

A gyártási lehetőségek vizsgálatokor négyfészes öntőszerszám készítése mellett döntöttem. Tervezésekor figyelembe vettem a nyomásos öntőgép adatait, a formabetéteket a gép kapacitásának megfelelően alakítottam ki. A szerszámüregek és a rávágások 50–50%-ban a mozgó és az álló szerszámfelekben, a beömlőrendszer pedig teljes egészében az álló szerszámfélben lett kimunkálva (nyolckulisszás öntőszerszám esetében a beömlőcsatorna elvezetése nem egyszerű feladat, ilyenkor a beömlőrendszert részben vagy teljes egészében az állórészben kell kialakítani).

Az öntőszerszám számításokkal meghatározható paraméterei

A biztonsági öv felcsévlő orsó öntvény öntéstechnikai tervezésének kiinduló adatai és számítási eredményei a 8. táblázatban láthatók.

8. táblázat. Öntéstechnológiai tervezés adatai és eredményei

Az öntvény neve:		felcsévlő orsó
Anyaga:		D231 - AlSi12Cu1(Fe)
Sűrűsége folyékony állapotban:	[g/cm ³]	2,45
Az öntéstechnikai tervezés kiinduló adatai		
Legkisebb falvastagság:	s [cm]	0,29
Az öntvény tömege:	m _ö [g]	123
A túlfolyók tömege egy öntvényen:	m _{tl} [g]	12,75
Az öntvények száma a szerszámban:	n _ö [db]	4
A túlfolyók száma a szerszámban:	n _t [db]	4
A megvágás szélessége:	m [cm]	4,4
A megvágás magassága:	h [cm]	0,22
Az elosztócsatorna magassága:	h _e [cm]	1,7
Az elosztócsatorna szélessége, alul:	m _{ele} [cm]	2,2
felül:	m _{efe} [cm]	1,5
átlag:	m _{éatl} [cm]	1,85
Az elosztócsatorna hossza:	l [cm]	43,6
Pogácsavastagság:	L _{pog} [cm]	2,7
Az öntőkamra átmérője:	d _k [cm]	5,5
Az öntőkamra hossza:	L _k [cm]	36
Rendszernyomás:	p _{sys} [bar]	125
Ellennyomás:	p _{geg} [bar]	50
A hidraulikus dugattyú átmérője:	d _{hydr} [cm]	11,5
A multiplikátor dugattyú átmérője:	d _{multi} [cm]	17,5
A szerszám nyomott felülete:	A _t [cm ²]	282
	[m ²]	0,0282
Multiplikálási hányados:	M	3,67

Az öntéstechnikai tervezés számított eredményei		
Az öntvény térfogata:	$V_{\text{ö}} [\text{cm}^3]$	50,2
A túlfolyók térfogata egy öntvényen:	$V_{\text{tl}} [\text{cm}^3]$	5,2
A megvágás keresztmetszete:	$A_{\text{a}} [\text{cm}^2]$	0,88
Az elosztócsatorna keresztmetszete:	$A_{\text{e}} [\text{cm}^2]$	3,1
Az elosztócsatorna térfogata:	$V_{\text{e}} [\text{cm}^3]$	137
A töltőkamra keresztmetszete:	$A_{\text{k}} [\text{cm}^2]$	23,7
A pogácsa térfogata:	$V_{\text{pog}} [\text{cm}^3]$	64,11
Öntött össztérfogat:	$\Sigma V [\text{cm}^3]$	422,7
Az öntvény modulja:	$M [\text{cm}]$	0,145
Dermedési állandó:	c_1	10
Dermedési idő:	$t_{\text{der}} [\text{s}]$	0,21
Öntési idő:	$t_{\text{ö}} [\text{s}]$	0,021
Alkalmazott öntési idő:	$t'_{\text{ö}} [\text{ms}]$	21
Térfogatáram:	$V' [\text{cm}^3/\text{s}]$	2635,35
Áramlási sebesség a megvágásban:	$v_{\text{a}} [\text{m/s}]$	29,95
Áramlási sebesség az elosztó csatornában:	$v_{\text{e}} [\text{m/s}]$	8,4
Az öntőkamra térfogata:	$V_{\text{k}} [\text{cm}^3]$	807,37
Töltöttségi fok:	$F_{\text{g}} [\%]$	49,5
Az öntődugattyú sebessége a 2. fázisban:	$v_{\text{d2}} [\text{m/s}]$	4,46
A kapcsolópont helye:	$L_{\text{F1}} [\text{cm}]$	230
A dugattyúút a 2. fázisban:	$L_2 [\text{cm}]$	9,3
A fém magassága a kamrában:	$h_0 [\text{cm}]$	2,75
Az öntődugattyú sebessége az 1. fázisban:		
egy hullám esetén	$v_{\text{d1-1}} [\text{m/s}]$	0,41
három hullám esetén	$v_{\text{d1}} [\text{m/s}]$	0,24
A hidraulikus dugattyú keresztmetszete:	$A_{\text{hydr}} [\text{cm}^2]$	103,8
Hidraulikus dugattyúnyomás:	$p_{\text{hydr}} [\text{bar}]$	275,25
A fémre ható nyomás dermedés közben	$p_{\text{der}} [\text{bar}]$	1203,23
A formafalra ható erő a 3. fázisban:	$F [\text{kN}]$	3393,49
Záróerő:	$F_{\text{z}} [\text{kN}]$	3732,84
Az öntőgép típusa:		Italpress 400SC

Az öntéstechnikai tervezés eredménye a beömlő rendszer méreteinek olyan optimalizálása, melynek keretében a megvágás keresztmetszete, méretei és az áramlási sebességek optimális értékeit határoztam meg az öntvénnel szemben támasztott követelmények alapján. A végleges adatok meghatározásához felhasználtam az áramlástani és hőtani szimulációk eredményeit.

A biztonsági öv felcsévlő orsó öntvény hőtechnikai tervezésének kiinduló adatai és számítási eredményei a 9. táblázatban láthatók.

9. táblázat. A nyomásos öntőszerszám hőtechnikai tervezésének adatai és eredményei

Az öntvények és a beömlőrendszer tömege:	m [kg]	1,12
Az olvadék hőmérséklete az öntőkamrában:	T_G [°C]	630
A darab kivételi hőmérséklete:	T_A [°C]	335
A forma hőmérséklete:	T_A [°C]	270
Az öntőszerszám mérete:	$a;b;c$ [m]	0,68 ; 0,4 ; 0,38
Ciklusidő:	t_z [s]	58
Az öntőszerszám alapanyaga		2343
1. hűtő-fűtő kör (mozgó belső fészek) - olaj		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_1 [l/perc]	9
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{11} [°C]	230
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{12} [°C]	232,36
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,16
Helyi hőmérséklet:	T_{1f} [°C]	300
Az elvezetett hőáram:	P_{1h} [W]	725,7
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától:	[m]	0,017
2. hűtő-fűtő kör (mozgó külső fészek) - olaj		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_2 [l/perc]	9
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{21} [°C]	250
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{22} [°C]	251,74
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,16
Helyi hőmérséklet:	T_{3f} [°C]	285
Az elvezetett hőáram	P_{2h} [W]	554
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától:	[m]	0,0169
3. hűtő-fűtő kör (álló belső fészek) - olaj		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_3 [l/perc]	9
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{31} [°C]	230
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{32} [°C]	232,52
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,16
Helyi hőmérséklet:	T_{3f} [°C]	310
Az elvezetett hőáram:	P_{3h} [W]	774,4
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától:	[m]	0,0171
4. hűtő-fűtő kör (álló külső fészek) - olaj		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_4 [l/perc]	9
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{41} [°C]	245
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{42} [°C]	247,057
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,16
Helyi hőmérséklet	T_{4f} [°C]	295
Az elvezetett hőáram	P_{4h} [W]	639,3
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától	[m]	0,0167

5. hűtőkör - (pogácsa)- víz		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_5 [l/perc]	7
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{51} [°C]	22
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{52} [°C]	25,4
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,13
Helyi hőmérséklet:	T_{5f} [°C]	349
Az elvezetett hőáram:	P_{5h} [W]	1 680
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától	[m]	0,0199
6. hűtőkör - (kulisszák)- víz		
A hűtőközeg térfogatárama:	V_6 [l/perc]	7
A hűtőközeg belépési hőmérséklete:	T_{61} [°C]	22
A hűtőközeg kilépési hőmérséklete:	T_{62} [°C]	23,2
A hűtő-fűtő furatok átmérője:	[m]	0,01
A hűtő-fűtő furatok hatásos hossza:	[m]	0,05
Helyi hőmérséklet:	T_{6f} [°C]	265
Az elvezetett hőáram:	P_{6h} [W]	475
A furatok távolsága a szerszámüreg kontúrjától:	[m]	0,02
Összes olvadékkal bevitt hőáram:	P_{be} [W]	15 636
Sugárzással és konvekcióval elvezetett hőáram:	P_{sk} [W]	1 570
A belső hűtőrendszerrel elvezethető hőáram:	P_h [W]	13 666
1. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{1h} [W]	2 x 725
2. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{2h} [W]	2 x 553
3. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{3h} [W]	2 x 774,4
4. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{4h} [W]	2 x 639,1
5. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{5h} [W]	1 680
6. hűtőkör által elvezethető hőáram:	P_{6h} [W]	4 x 475
Összes elvezetett hőáram:	$P_{ki,össz}$ [W]	8 963
Leválasztó anyaggal elvitt hőáram:	P_k [W]	4 703

A hőtechnikai tervezés eredménye a szerszám hűtőrendszerének kialakításához szükséges méretek meghatározása, melynek számított adatai alapján az öntési folyamat közben a hőegyensúly fenntartható az öntvénnel szemben támasztott követelmények biztosítása, valamint a szerszám élettartamának megőrzése és a gazdaságos gyártás fenntartása mellett.

A hűtőrendszer kialakításához felhasználtam a hőtani szimulációk eredményeit is.

A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény áramlástani és hőtechnikai szimulációja

Az öntési folyamatok numerikus szimulálása alatt az öntéskor végbemenő áramlási és hőtechnikai folyamatok, a dermedés és lehűlés, a zsugorodás és az öntési feszültségek leírására szolgáló differenciálegyenleteknek a teljes geometriára és a folyamat egészére történő megoldását és kiértékelését értjük. A differenciálegyenletek megoldására a szimulálásnál a *véges elemek módszerét* (FEM) vagy a *véges különbségek módszerét* (FDM) és az utóbbi módosított változatát, a *szabályozott térfogatú véges differenciák módszerét* (CV/FDM) alkalmazzák.

A FEM előnye, hogy bonyolult testeket kevesebb elemmel lehet leírni, így a számítás teljes ideje rövidebb, az FDM-mel viszont lényegesen lecsökken az egy elemre jutó számítási idő. A FEM hálózat generálásához szükséges időigény az utóbbi időben bekövetkezett grafikus alkalmazási fejlesztések következtében jelentősen lecsökkent. Az alkatrész geometriájából CAD rendszerben készítik el az öntvénygeometriát az alakmódosításokkal, a beömlő- és táplálórendszerrel, vagy a hűtőcsatornák kialakításával együtt. Az öntvény és a szerszám CAD adataiból elemi háromszögek segítségével származtatott STL (Stereolithography) típusú felületmodellje alapján a véges elemes geometria automatikusan generálható.

A FEM és az FDM típusú geometria és számítási módszer egymás mellett fejlődik. Mindkettőnek vannak előnyei a másikkal szemben a számítási eredmények körét illetően. A FEM előnye pl. az öntési feszültségek pontosabb meghatározása, az FDM-nek pedig az anyagtranszport folyamatok kedvezőbb megoldása. A FEM további előnye a gyors prototípusgyártással RPT (Rapid Prototyping) megegyező geometria alkalmazása, ami jelentősen lerövidíti az alkatrészfejlesztés időigényét.

A szimulációs programokkal szemben támasztott követelmények függenek az öntési eljárástól, az anyagminőségektől és az alkatrész bonyolultságától. Az alapvető követelmények a következők:

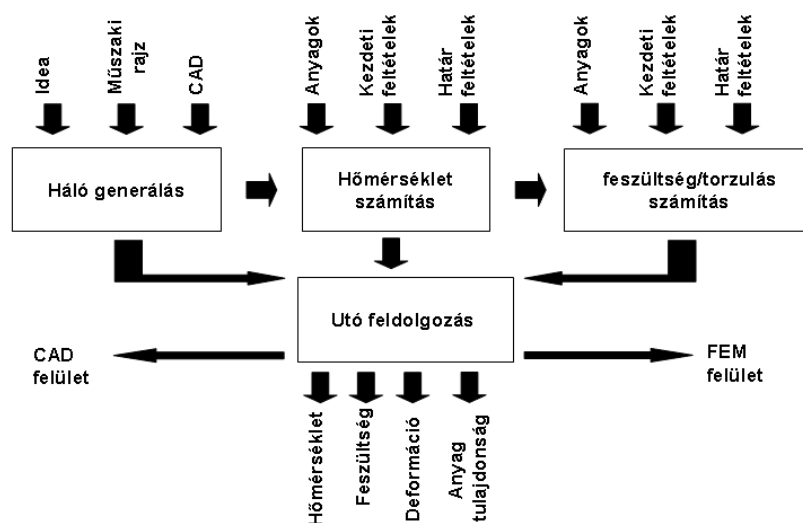
- a számítás alapjait a folyamatot leíró fizikai egyenletek képezzék;
- az öntéstechnikai jellemzők (pl. öntési idő) figyelembevétele;
- a folyamatban részt vevő valamennyi anyag (fém, szerszám stb.) termofizikai tulajdonságainak figyelembevétele és definiálhatósága;
- a folyamat modellezhetősége, vagyis a folyamat körülményeinek és a peremfeltételeknek a megváltoztathatósága;
- az öntéstechnikailag fontos kritériumok bevitelére a szimuláláshoz;
- lehetőség a CAD-rendszerből adódó geometria átvételére és bevitelére a geometria kiegészítésére és megváltoztatására;
- más programok bevitelére megfelelő csomópontok legyenek;

- a rendszer felhasználóbarát legyen, és a számítás időtartama ne haladjon meg egy elfogadható értéket [33].

A szoftvercégek folyamatos fejlesztőmunkájának köszönhetően ezeknek a követelményeknek és igényeknek a FEM és FDM rendszerű öntészeti szimulációs programok egyre jobban megfelelnek, és hatékonyan segítik az öntvénygyártókat és az öntvényfelhasználókat a fokozódó követelmények kielégítésében.

A szimulációs programok rendszerint három fő részből állnak (24. ábra):

1. Előkészítő feladatokhoz szükséges modul (Pre-Processing), amely biztosítja a CAD adatok átvételét és az automatikus 3D-geometria kialakítását.
2. Számítások elvégzésére szolgáló modulok (Main-Processing), amelyek segítségével megoldhatók a differenciálegyenletek
 - a formatöltés;
 - a dermedés és lehülés;
 - a visszamaradó öntési feszültségek;
 - a zsugorodás;
 - a szilárdsági tulajdonságok és
 - a szövetszerkezet kialakulása térbeni és időbeni folyamatainak a meghatározására.
3. A számítási eredmények kiértékelésére szolgáló modul (Post-Processing), amely lehetővé teszi a dokumentálást is:
 - színes 2D és 3D képeken történő ábrázolással és
 - a speciális, ötvözetől függő kritériumfunkciók számításával és bemutatásával



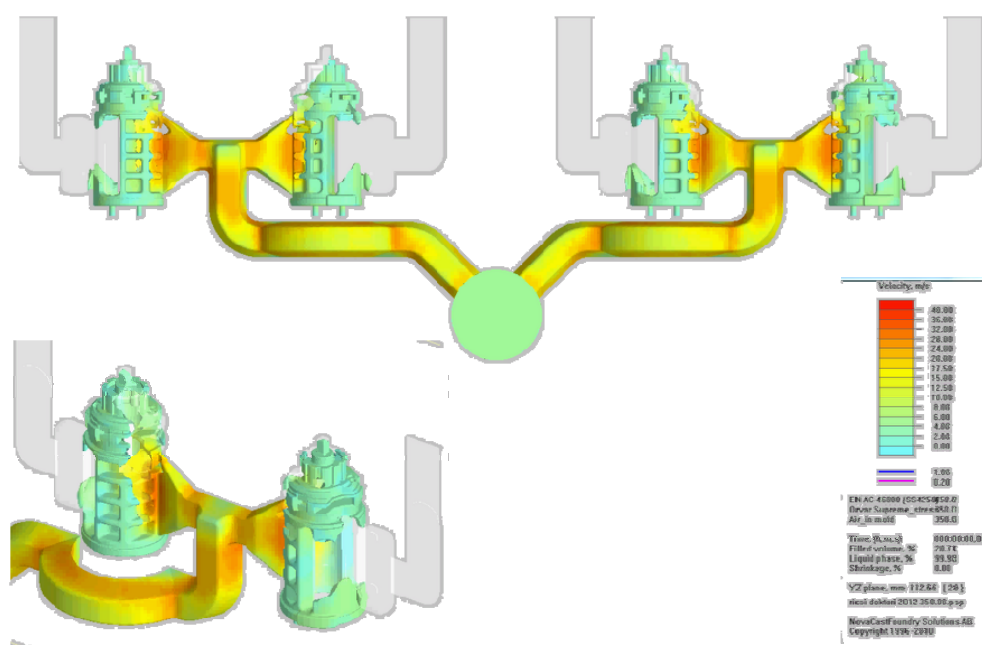
24. ábra. A szimuláció logikai rendszere [34]

A különböző programok által nyújtott szolgáltatások a számítási módszertől függően eltérnek egymástól. A szimulációs programok fejlesztésére vonatkozóan korábban két eltérő koncepció alakult ki:

- a bonyolult, nagy gépi kapacitást és felhasználói ismeretet igénylő programokat mérnökirodákban, kutatóhelyeken és felsőoktatási intézményekben telepítik, és az ezekben dolgozó öntészeti, számítógépes és CAD ismeretekkel rendelkező mérnökök teljesítik az öntvénygyártók és felhasználók igényeit;
- az egyszerű, felhasználóbarát programokat az öntödékben kell telepíteni és a technológus a feladatát a szimulálás alkalmazásával oldja meg.

A két fejlesztési stratégia közül az utóbbi válik általánossá a korábbi, bonyolult programok felhasználóbaráttá alakításával. Ez a szimulációt vállalkozásban végzők munkáját meggyorsítja és szélesebb körű felhasználását teszi lehetővé [35, 36].

Az öntészeti szimulációt a Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Intézet Öntészeti Tanszékén végeztük. A szimuláció célja a formatöltés közben fellépő levegőbezáródások kialakulásának és a zárványok besodródásának tanulmányozása mellett különböző bekötőcsatorna keresztmetszetek esetén az utántáplálás hatásos idejének vizsgálata volt. A szimulációs eredményeket a 25–29. ábrák mutatják.

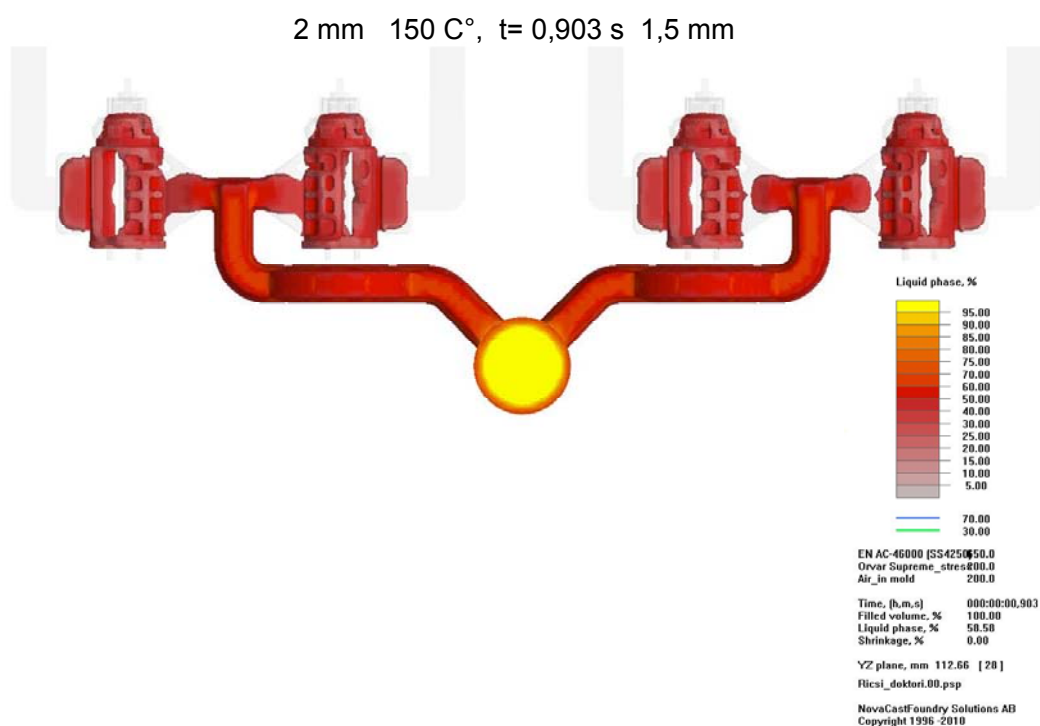


25. ábra. A négyfészkés öntőszerszám formatöltési szimulációja

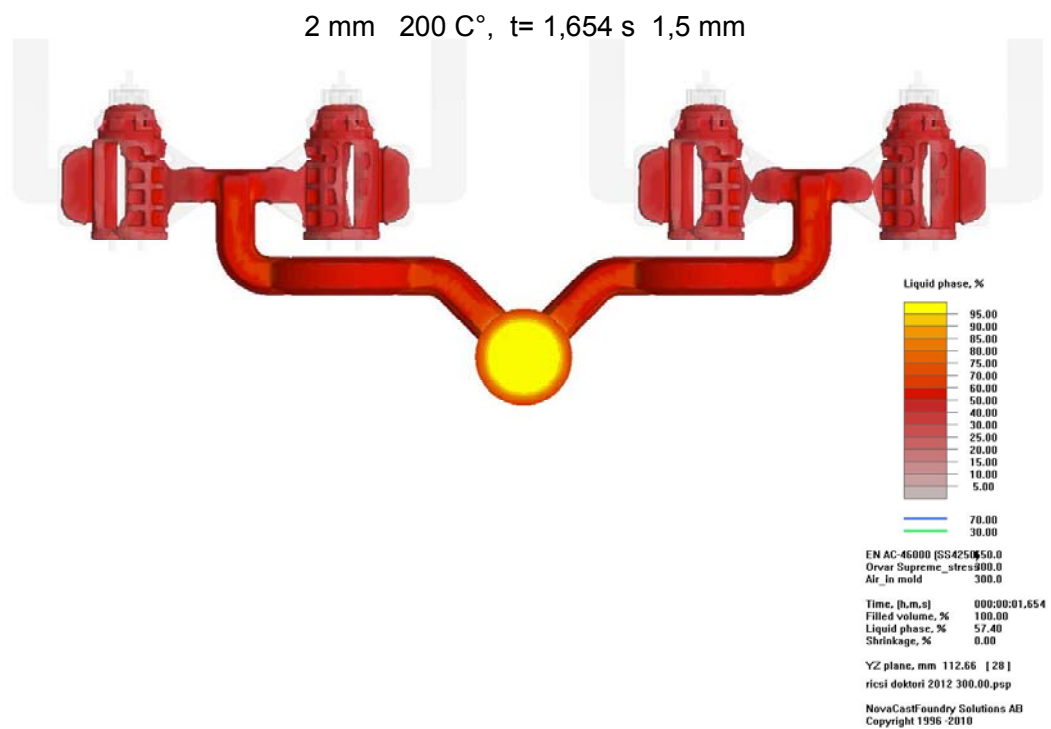
A beömlőrendszer tervezésekor nagyon fontos szerepe van a szimulációnak, mert segítségével tökéletesen megállapítható, hogy a szerszámüreg melyik része töltődik fel utoljára, ahova a túlfolyók és levegőző rendszer elhelyezése szükséges. A megvágás geometriája (hossza, vastagsága) és helye meghatározza az optimális szerszámtöltést és a szerszámüregbe zárt levegő elvezetését, amely nagymértékben befolyásolja az öntvény minőségét és szilárdsági tulajdonságait.

A formatöltés áramlástan szimulációja igazolta, hogy a tagolt palástú, hengeres öntvény esetén a paláستtal azonos hosszúságú, legyező alakú bekötő csatorna kialakítás biztosítja az egyenletes formatöltést. 25. ábrán látható, hogy a fémfront előrehaladásával a formaüregben található levegő jelentős része a túlfolyón és a kilevegőző csatorna rendszeren keresztül eltávolítható.

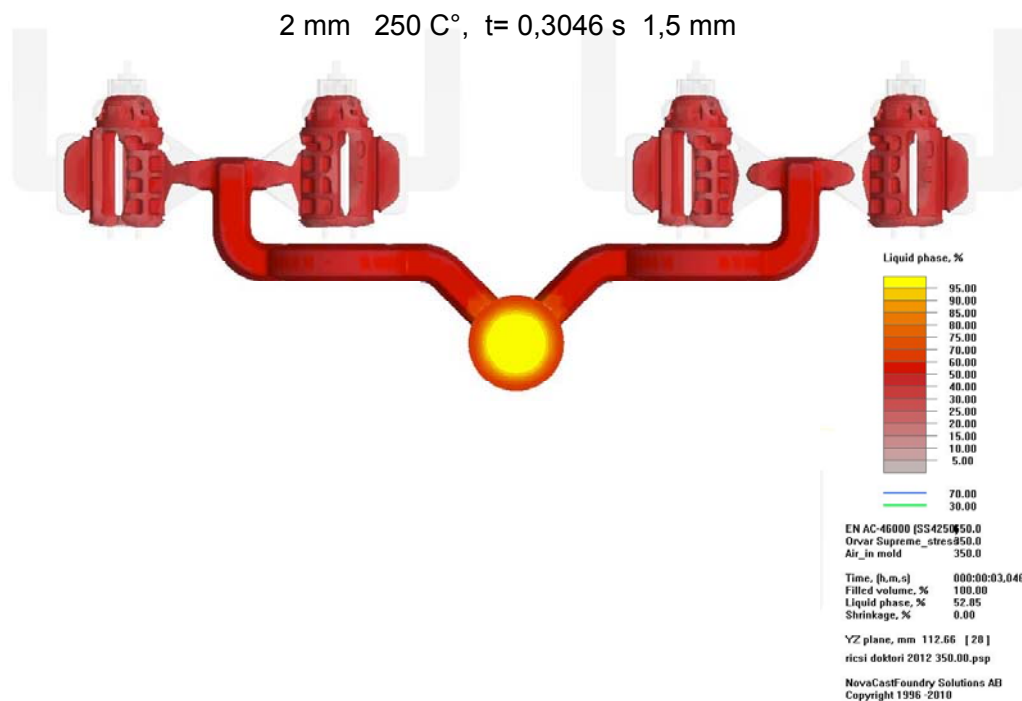
A beömlőrendszer optimális méreteinek (elsősorban a megvágás vastagságának) a meghatározására különböző megvágás-keresztmetszeteket (vastagság) állítottam be az öntvényhez tartozó beömlő rendszer 3D-s modelljén. A négyfészkés csokor modellen a baloldali két fészekhez 2 mm-es, a jobboldali két fészekhez 1,5 mm-es megvágásvastagságot állítottam be. Majd szimulációkat végeztem különböző szerszámhőmérsékleteknél a megvágások megdermedési idejének meghatározására. A kapott eredményeket a 26–29. ábrák mutatják.



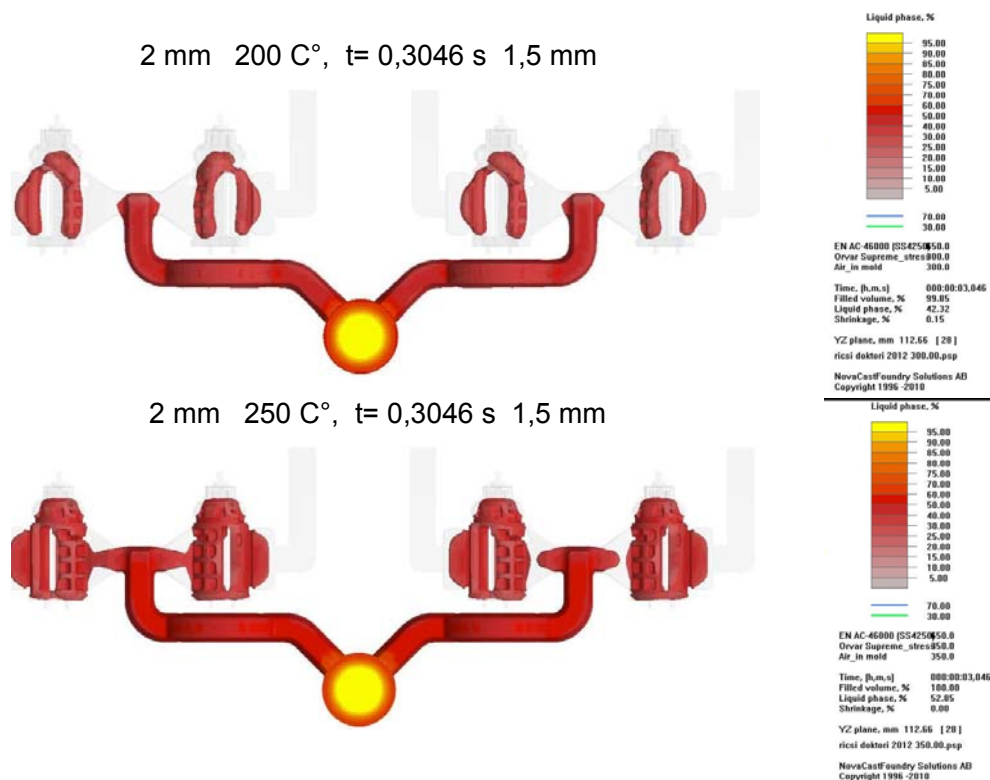
26. ábra. Az 1,5 és 2 mm-es vastagságú megvágás megdermedésének időpontja 150 °C-os belépő olajhőmérsékletnél



27. ábra. Az 1,5 és 2mm-es vastagságú megvágás megdermedésének időpontja 200 °C-os belépő olajhőmérsékletnél



28. ábra. Az 1,5 és 2mm-es vastagságú megvágás megdermedésének időpontja 250 °C-os belépő olajhőmérsékletnél



29. ábra. A folyékony fázis mennyisége azonos időpontban ($t=0,3046$ s-nál), 200 és 250 °C-os belépő olaj hőmérsékletnél, különböző megvágásvastagságok esetén

Megállapítottam, hogy 250 °C-os belépő olajhőmérsékletnél a 2 mm vastag megvágás megdermedésének ideje a legnagyobb, amelynél a 3. fázisban az utántáplálás lehetősége a leghosszabb ideig biztosítható. A megvágáshoz tartozó dermedési idő nagymértékben befolyásolja az öntvényben keletkező lunkerek, porozítások mértékét és nagyságát, ezáltal az öntvény szilárdsági tulajdonságait. A szimuláció alapján meghatározott eredményeket a 10. táblázat tartalmazza.

10. táblázat. A megvágások megdermedési ideje a különböző hőmérsékleteknél

A belépő olaj hőmérséklete, T [°C]	150	200	250
Az 1,5 mm-es rávágás elfagyásának időpontja, t [s]	0,903	1,654	3,046
A 2 mm-es rávágás elfagyásának időpontja, t [s]	1,235	2,27	3,298

Az elvégzett öntéstechnikai tervezés és hőtechnikai méretezés alapján meghatároztam a nyomásos öntés szerszámának legyártásához szükséges geometriai adatokat és a gyártási, gépbeállítási paraméteket.

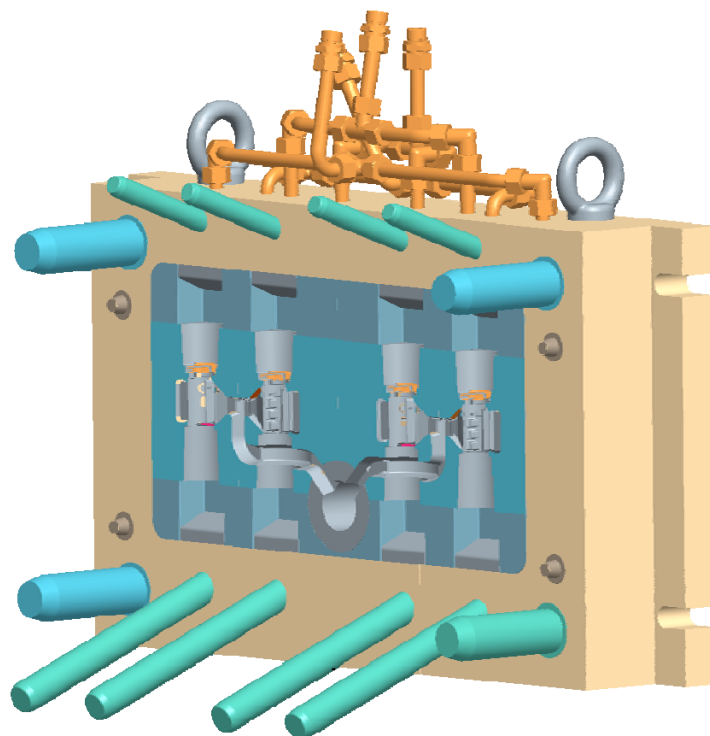
Megállapítottam, hogy az 1-es fázisban a dugattyúsebesség optimális értéke állandó sebességű dugattyúmozgatásnál a Garbel formula alapján a három hullámmal történő feltöltéshez tartozó 0,24 m/s. Az egy hullámmal történő feltöltés esetén 0,41 m/s jelentős habosodás várható. A saját kísérletek tervezésénél ezeket a dugattyúsebességeket alkalmaztam.

A szakirodalmi eredményekből kiindulva, a szilárdsági követelmények legnagyobb értékét a bekötő csatornában kialakuló 40 m/s áramlási sebesség biztosítja. Ezt a fémsebességet az alkalmazott öntőgépen beállítható legnagyobb dugattyúsebesség és a kiválasztott kamraátmérő esetén kisebb bekötő csatorna keresztmetszettel, 1,5 mm-es megvágás vastagsággal lehetne elérni, ami azért hátrányos mert a 3. fázisban az utántáplálás lehetőségét akadályozza. A dermedési szimuláció eredményei azt mutatják, hogy a 2 mm vastagságú bekötő csatorna biztosítja az öntvény dermedési idejét megközelítő ideig tartó utántáplálást. A kiválasztott öntőgépen a 2. fázisban a dugattyúsebesség 4,5 m/s értékénél a megvágásban kialakuló áramlási sebesség 30 m/s. A szakirodalmi eredményekből kiindulva, a szilárdsági követelmények legnagyobb értékét a megszilárdulás közben kialakuló fémre ható nyomás 1000-1200 bar közötti értéke biztosítja. Az öntéstechnikai tervezés alapján kiválasztott kamraméret az alkalmazott öntőgépen 1150 bar fémre ható nyomás létrehozását teszi lehetővé. A saját kísérletek tervezésénél ezeket a dugattyúsebességeket alkalmaztam.

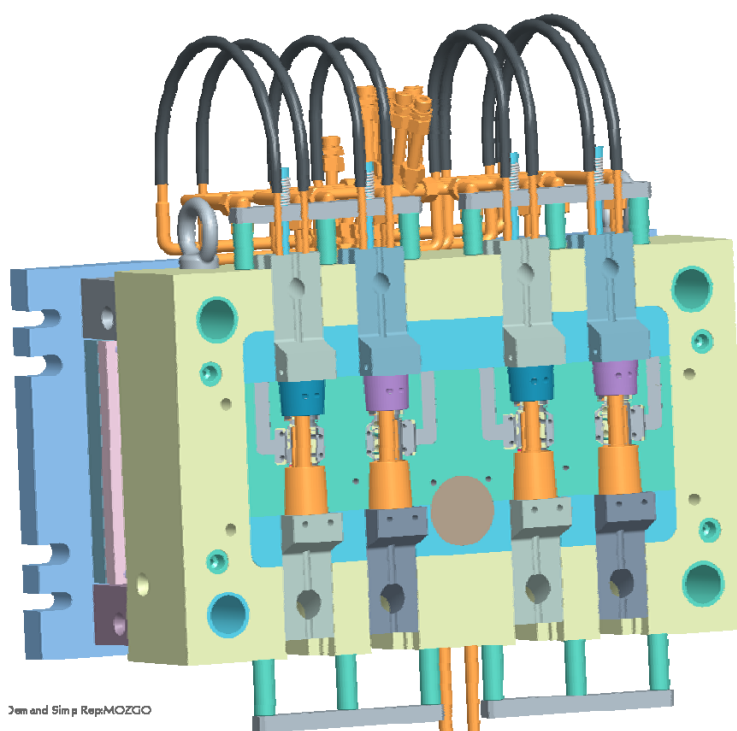
A hőtechnikai tervezés eredményei alapján meghatározott hűtőkörökkel és hűtési paraméterekkel a szerszámba bevitt hőmennyiség 70%-át lehet elvonni. Ezzel a leválasztó anyaggal elvont hőmennyiség aránya 25% alatt tartható, ezáltal elkerülhető a felületi hősokk kialakulása, ami a szerszám élettartamának növelését segíti elő.

Az elvégzett öntéstechnikai és hőtechnikai tervezés és szimuláció alapján megterveztem a nyomásos öntő szerszámot, melyet a Prec-Cast Öntödei Kft. szerszámüzemében legyártottak. A szerszám CAD-geometriáját a 30-33. ábrán mutatom be.

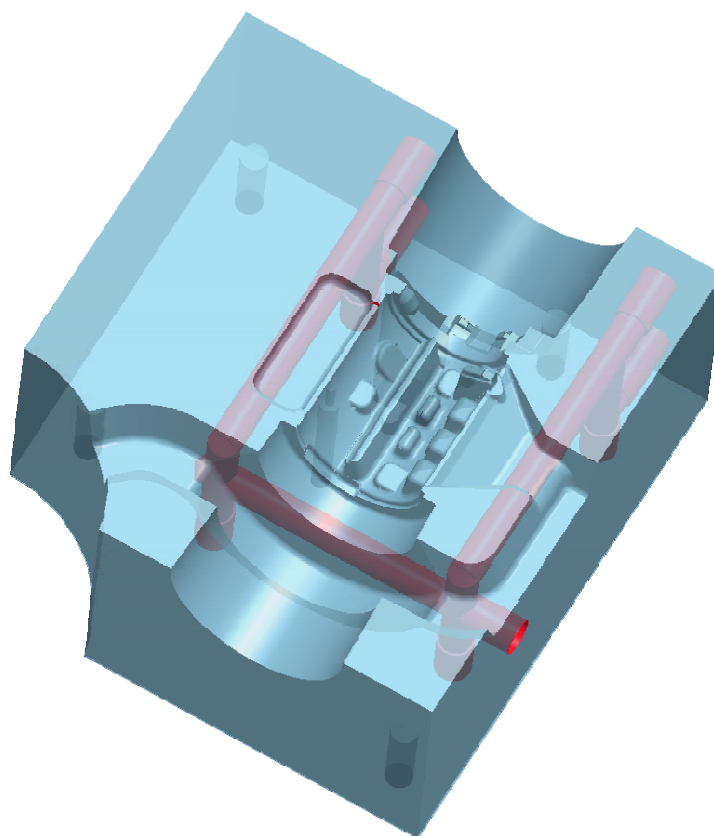
A kísérleteket a legyártott szerszámmal a gépbeállítási és a hűtéstechnikai paraméterek változtatásával végeztem el.



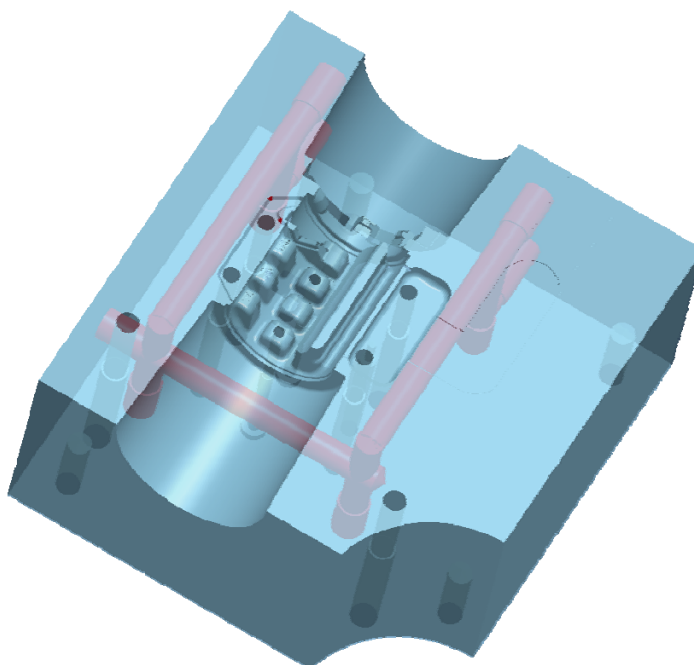
30. ábra. A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény szerszámának álló oldala



31. ábra. A biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény szerszámának mozgó oldala



32. ábra. Az álló szerszámfél egy formabetétjének CAD-rajza hűtő-fűtő furatokkal



33. ábra. A mozgó szerszámfél egy formabetétjének CAD-rajza hűtő-fűtő furatokkal

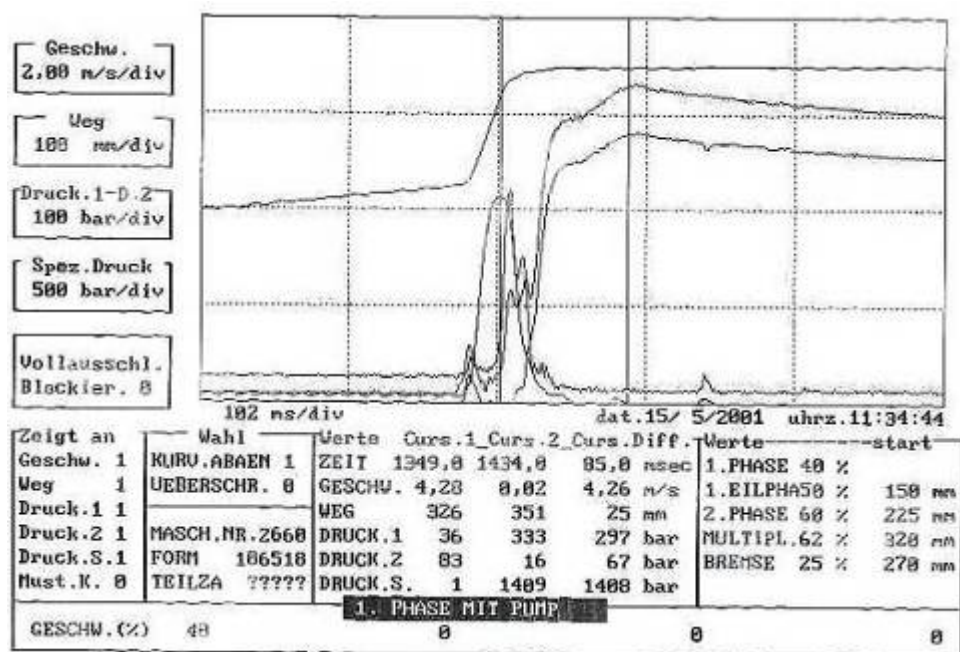
3.5. A gyártási körülmények bemutatása

A kísérleti öntvények AlSi12Cu1(Fe) alumíniumötvözetből készültek, amelynek megolvasztása ZPF típusú, kettérű falazott olvasztókemencében történt. Az olvadék előállításához 50% friss tömbalapanyagot és 50 % visszajaratott alumíniumhulladékot használtunk. Az olvasztókemencében az alumíniumolvadékot salakösszehúzó sóval kezeltük, majd csapolás előtt salaktalanítottuk. Az olvadékot ezt követően egy habkerámia szűrőbetéttel ellátott szűrőkemencén keresztül a kihordóüstbe csapoltuk. A szállítóüst tartalmát (400 kg folyékony alumíniumötvözet) rotoros, nitrogénes gáztalanítás után az öntőgép melletti hőntartó, Striko-Westofen típusú automatikus adagolókemencébe töltöttük.

Az öntés a már ismertetett négyfészkés öntőszerszámba történt Italpresse 400 SC típusú vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgéppel (34. ábra). A nyomásos öntőgép beállítási paramétereirez tartozó öntési diagramot a 35. ábra mutatja. A négyfészkés, optimalizált kísérleti nyomásos öntőszerszám a beépített hőelemekkel együtt a 36. ábrán látható.



34. ábra. Italpresse 400 SC típusú öntőgép



35. ábra. Az IP 400 SC öntőgép öntési diagramja



36. ábra Négyfészkös öntőszerszám a beépített hőelemekkel

3.6. Kísérleti program

A változtatható paraméterek kiválasztása és tartományai

Vizsgálataimat az öntvény tulajdonságait leginkább befolyásoló paraméterek – technológiai határértékek között változtatható – értékeinek alkalmazásával, üzemi körülmények között végeztem. A kísérleti terv összeállításához felhasználtam az öntéstechnológiai és hőtechnikai méretezés, valamint a számítógépes szimuláció korszerű ismereteit. A kísérleti programot az alábbi fő befolyásoló tényezőkre dolgoztam ki:

- a gépbeállítási paraméterekre (a lövés 1. és 2. fázisában a dugattyú sebessége, 3. fázisában az utánnyomás nagysága);
- a szerszám hőmérsékleti viszonyaira (az öntőszerszámba belépő hűtő-fűtő közeg hőmérséklete);
- az olvadékkezelésre (az eutektikum stronciummal való nemesítésének, az eutektikum módosítottságának hatása különböző szerszámhőmérsékletek esetén);
- az olvadék tisztaságára (az oxidhártya bekeveredésének hatása).

A kísérleti tervben szereplő mérések elvégzéséhez egy – konkrét vevői megrendelésre készített – négyfészkés öntőszerszámot használtam (36. ábra). A nyomásos öntőszerszám tervezéséhez öntéstechnológiai és hőtechnikai számításokat végeztem, majd formatöltési és dermedési szimulációkat készítettem. A kapott eredmények figyelembe vételével meghatároztam, optimalizáltam az öntőszerszám fontosabb öntéstechnológiai és hőtechnikai paramétereit.

A kísérleti öntvényeket egy 400 tonna záróerejű Italpresse öntőgéppel gyártottam. Az öntés során változtattam a gépbeállítási paramétereket, nevezetesen a dugattyú sebességét a kamratöltés (1. fázis) és a szerszámtöltés (2. fázis) közben, továbbá az utánnyomás nagyságát az öntvény megszilárdulása (3. fázis) közben. Mértem továbbá a szerszám hőmérsékletének változását a szerszámüreg felületétől 12 mm-re a hűtő-fűtő körökben áramoltatott olaj hőmérsékletének változtatása közben.

További kísérleteket végeztem különböző stronciumtartalmú alumíniumolvadékból gyártott öntvények esetén – különböző szerszámtemperálási hőmérséklet beállításokkal – az optimalizált gépbeállítási paraméterek mellett. Minden kísérletnél fészkenként 10 öntvényt vizsgáltam és a fészkenkénti átlagértékeket rögzítettem.

Az elvégzett vizsgálatokhoz tartozó kísérleti beállításokat a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat. A kísérleti programban alkalmazott paraméter kombinációk

Szériák	V _{d1} , [m/s]	V _{d2} , [m/s]	P _{multi} , [bar]	T _{belépő olaj} , [°C]	Sr-tartalom, [ppm]
1. beállítás	0,12	4,5	180	200	12
2. beállítás	0,24	4,5	180	200	12
3. beállítás	0,36	4,5	180	200	12
4. beállítás	0,24	2	180	200	12
5. beállítás	0,24	3,5	180	200	12
6. beállítás	0,24	4,5	120	200	12
7. beállítás	0,24	4,5	280	200	12
8. beállítás	0,24	4,5	280	150	12
9. beállítás	0,24	4,5	280	250	12
10. beállítás	0,24	4,5	280	150	52
11. beállítás	0,24	4,5	280	150	92
12. beállítás	0,24	4,5	280	200	52
13. beállítás	0,24	4,5	280	200	92
14. beállítás	0,24	4,5	280	250	52
15. beállítás	0,24	4,5	280	250	92

Vastagon jelölve a változtatott kísérleti paraméterek.

4. AZ ÖNTÉSTECHNIKAI ÉS HŐTECHNIKAI PARAMÉTEREK HATÁSA A SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGOKRA

4.1. Gépbeállítási paraméterek hatásának vizsgálata

A vizsgálat során az első és a második fázishoz tartozó dugattyúsebességet és az utánnyomás mértékét változtattam. A kísérlet során beállított értékeket és a hozzájuk tartozó szakítóerő átlagértékeit a 12–14. táblázat tartalmazza.

12. táblázat. Szakítóerő átlagértékek az 1. fázis különböző dugattyúsebességeinek értékeinél

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{belépő} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A dugattyúsebesség változtatása az 1. fázisban</i>									
1. beállítás	0,12	4,5	180	200	12	11,39	11,46	11,29	11,22
2. beállítás	0,24	4,5	180	200	12	11,65	12,03	11,88	11,51
3. beállítás	0,36	4,5	180	200	12	11,19	11,36	11,23	10,92

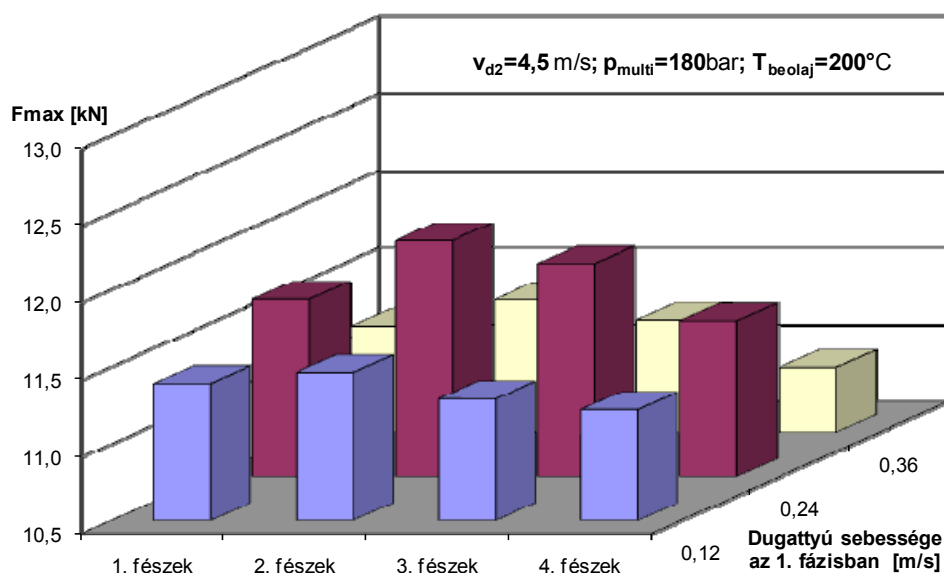
13. táblázat. Szakítóerő átlagértékek az 2. fázis különböző dugattyúsebességeinek értékeinél

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{belépő} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A dugattyúsebesség változtatása a 2. fázisban</i>									
4. beállítás	0,24	2,0	180	200	12	10,98	11,15	11,26	11,18
5. beállítás	0,24	3,5	180	200	12	11,23	11,55	11,42	11,29
2. beállítás	0,24	4,5	180	200	12	11,65	12,03	11,88	11,51

14. táblázat. Szakítóerő átlagértékek az utánnyomás különböző értékeinél

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{beolaj} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A multiplikált nyomás változtatása az 3. fázisban</i>									
6. beállítás	0,24	4,5	120	200	12	11,13	11,55	11,35	11,49
2. beállítás	0,24	4,5	180	200	12	11,65	12,03	11,88	11,51
7. beállítás	0,24	4,5	280	200	12	12,46	12,79	12,51	12,37

Az öntéstechnikai méretezés részeként meghatározott dugattyúsebesség optimális értéke az 1. fázisban állandó sebességű dugattyúmozgatásnál, egy hullámmal történő feltöltés esetén 0,41 m/s, három hullámmal 0,24 m/s. Az alkalmazott dugattyúsebesség értékek közül a középső a számított optimális érték. Az üzemi gyakorlatban elterjedt a minél kisebb dugattyúsebesség alkalmazása a kamratöltés közben. Ez a törekvés a kamrában kialakuló hullámmozgás csökkentésén alapul. Ezért alkalmaztam a 0,12 m/s dugattyúsebességet. Az 1. fázisban alkalmazott dugattyúsebesség változtatásának hatását a szakító erőre a 37. ábra mutatja.



37. ábra. F_{max} változása (átlagértékek fészkenként) az 1. fázis dugattyúsebesség függvényében

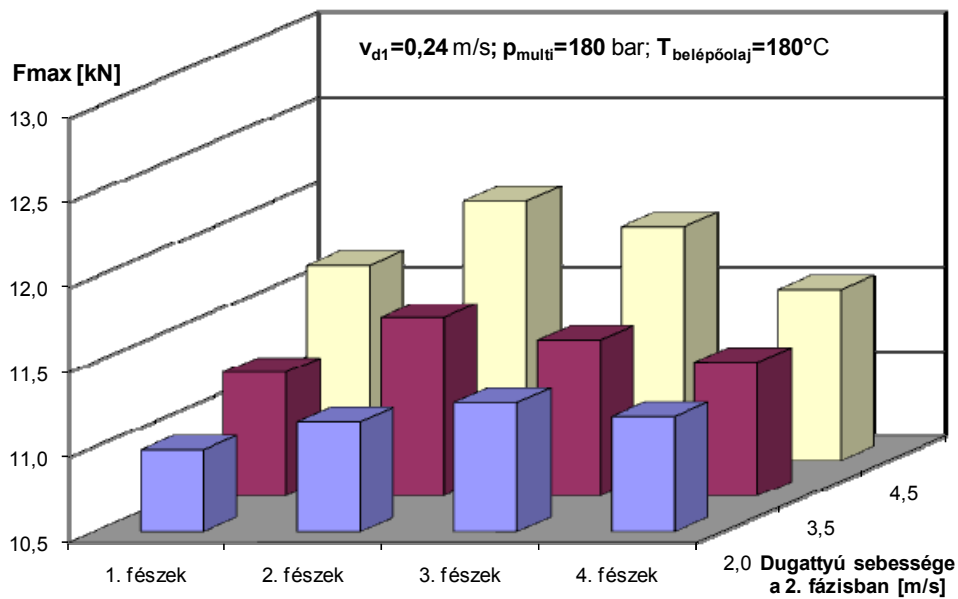
A vizsgálati eredmények szerint a 0,24 m/s (három hullámmal történő kamratöltés) dugattyúsebességhez tartozó gyártmányok $F_{\max}$ értéke a legnagyobb. Az optimális kamratöltés mindig a páratlan számú hullámfeltöltődések esetében valósul meg a kamrában található levegőmennyiség tökéletes elvezetésével. 0,12 m/s-nél nagyon hosszú a kamratöltési idő, ezáltal lehetővé teszi a fém részleges megszilárdulását a kamra felületén és a beömlő rendszerben, ami oxidzárványos, kifolyáshibás öntvényeket eredményez és rontja a nyomásos öntvény szilárdsági tulajdonságait. A 0,36 m/s dugattyúsebesség következménye a páros számú hullám kialakulása, ami már a kamratöltés közben nagyobb mennyiségű levegőbezáródást eredményez. Ez a formatöltés közben a formaüregbe kerülve növeli a bezárt levegő mennyiségét és a nyomásos öntvény szilárdsági tulajdonságainak csökkenéséhez vezet.

Megállapítottam, hogy a 3 hullámhoz tartozó értéktől nagyobb és kisebb dugattyúsebességek esetén a szakítószilárdság értéke csökken a kamrában kialakuló levegőbezáródások miatt, amelyek a formatöltési 2. fázis alatt a formaüregbe kerülnek.

Az 1. fázishoz tartozó dugattyúsebesség vizsgálati eredményei indokolják a helyes beállítás fontosságát.

A 2. fázis dugattyúsebességével változtathatjuk a megvágásban az áramlási sebességet. A kísérletekhez választott 2,0 m/s, 3,5 m/s és 4,5 m/s dugattyúsebesség értékekhez tartozó fémsebességek a megvágásban 14 m/s, 23,6 m/s és 30 m/s. Ezek a megvágásban kialakuló fémsebesség értékek kisebbek a maximális szakítószilárdságot biztosító – a szakirodalom szerinti 40 m/s – sebesség értékénél. Az üzemi gyártási körülmények között nagyobb dugattyúsebességet nem lehet elérni, mert az öntőgép és az öntőszerszám technológiai korlátja nem engedi. A megvágásban nagyobb áramlási sebességet kisebb bekötőcsatorna keresztmetszettel lehetne elérni, ami azért hátrányos, mert a rövid megszilárdulási idő miatt a 3. fázisban az utántáplálás lehetőségét akadályozza.

A 38. ábra mutatja, hogy a 2. fázis dugattyúsebességének növelésével az öntvény töréséhez tartozó szakító erő – $F_{\max}$ – nő. Ezért a 2. fázis dugattyúsebességének optimális értéke a technológiában elérhető maximális érték, ami 4,5 m/s.



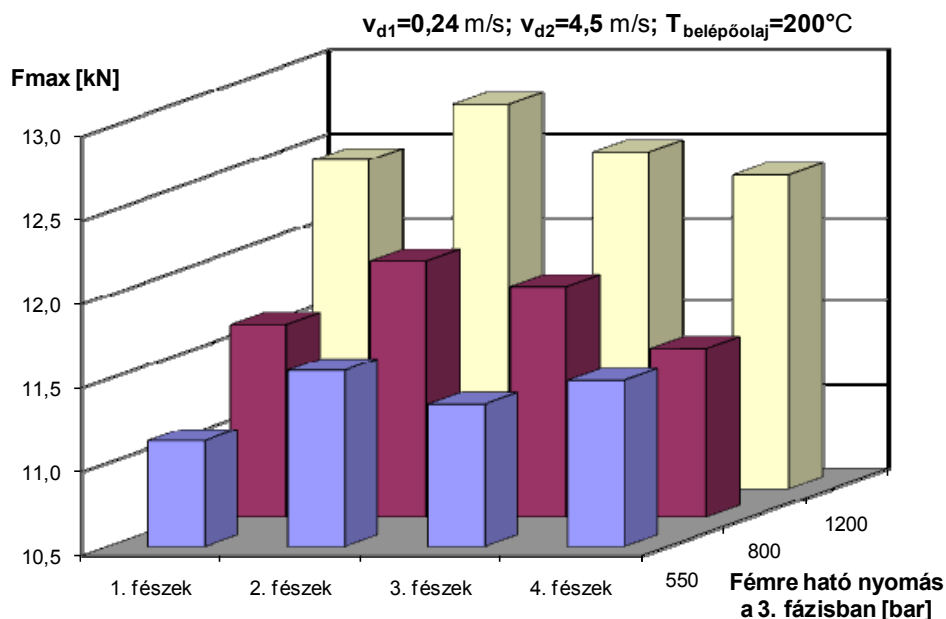
38. ábra. Az $F_{\max}$ változása (átlagértékek fészkenként) a 2. fázis dugattyúsebesség függvényében

Megállapítottam, hogy ettől kisebb sebességértékek az öntvény töréséhez tartozó szakítóerő értékeit a formatöltés közben kialakuló áramlási viszonyok megváltozása miatt csökkentik.

A formatöltés sebességét az üzemi értékhez képest nagyobb méretű öntőkamra alkalmazásával nem célszerű tovább növelni, mert azzal csökkentjük a fémre ható nyomás elérhető értékét, továbbá a nagyobb fémsebesség a szerszám erőteljesebb kopásához és erős sorjaképződéshez vezet.

Megvizsgáltam a fémre ható nyomás változtatásának a hatását az öntvény töréséhez tartozó erő értékére. A 3. fázisban alkalmazott hidraulikus rendszer nyomása a technológiában (öntvénygeometriától és öntőszerszámtól függő) elérhető legnagyobb érték. A kísérletekhez alkalmazott értékeket az ellennyomás (multiplikált nyomás) változtatásával állítottam be.

A kísérletekhez beállított 120 bar, 180 bar és 280 bar multiplikált nyomás értékekhez tartozó fémre ható nyomás értékek esetén 550 bar, 800 bar és 1200 bar. A 39. ábrán látható hogy a 3. fázisban a fémre ható nyomás növelésével az öntvény töréséhez tartozó szakítóerő nő.

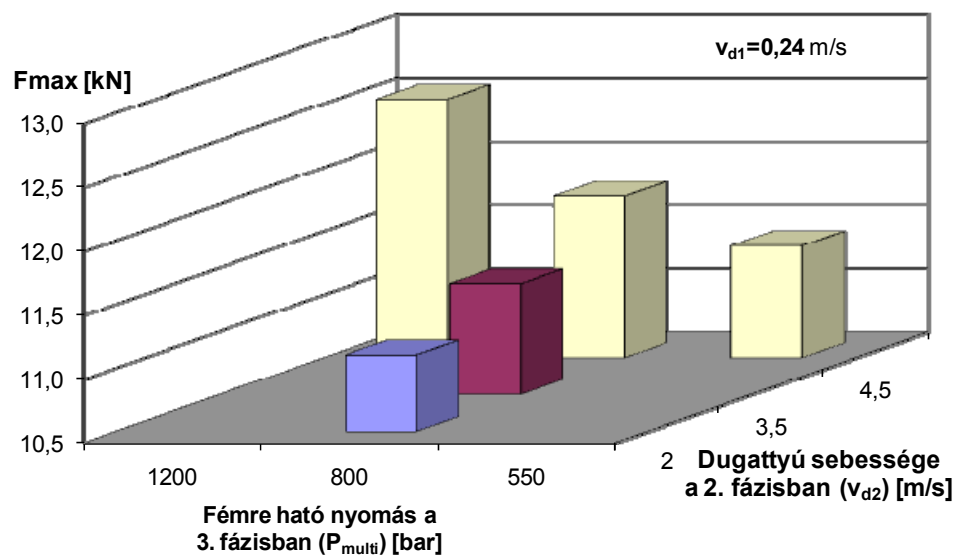


39. ábra. Az F_{max} változása (átlagértékek fészkenként) az utánnnyomás függvényében

A vizsgálati eredmények alapján megállapítottam, hogy a fémre ható nyomás függvényében (550 bar→800 bar→1200 bar) az öntvény szilárdsági tulajdonságai monoton nőnek. A legnagyobb szakítóértékeket az 1200 bar fémre ható nyomás eredményezi.

A fémre ható nyomás növelésével a dermedés közben az anyaghalmozódási helyeken keletkező zsugorodási üregek (lunkerek és a formatöltés közben bezáródott levegőbuborékok) mérete nagymértékben csökkenthető. Mivel a megvágás vastagsága rendszerint jóval kisebb, mint az öntvény falvastagsága, az abban levő fém gyorsabban megdermed, mint az öntvény legvastagabb része. Ezért nagyon fontos, hogy a formatöltés után a multiplikátor a megfelelő időben és a megfelelő értékkel kapcsoljon be, amivel biztosítani lehet az öntvénnel szemben elvárt minőségi követelményeket. Az utánnnyomás értékét az üzemi érték, 280 bar fölé nem célszerű emelni, mert az öntvény méretpontosságának csökkenését eredményezi (az előírt szűk mérettűrések nem tarthatók).

A 40. ábrán az egyes fészkekhez tartozó értékek átlagának változása látható. Megállapítható, hogy a technológia által adott korlátok között a 3. fázisban a fémre ható nyomás változtatása nagyobb mértékben befolyásolja az öntvény töréséhez tartozó erő nagyságát, mint a 2. fázisban a formatöltési sebesség értékének a növelése.



40. ábra. Az F_{max} alakulása a 2. fázis dugattyúsebessége és az utánnnyomás függvényében

Megállapítottam, hogy a fémre ható nyomás növelésével nagyobb szilárdsági értékek érhetők el, mint a megvágásban lévő fémsebesség növelésével a technológia által adott korlátok között.

4.2. A hőmérséklet-viszonyok hatásának vizsgálata

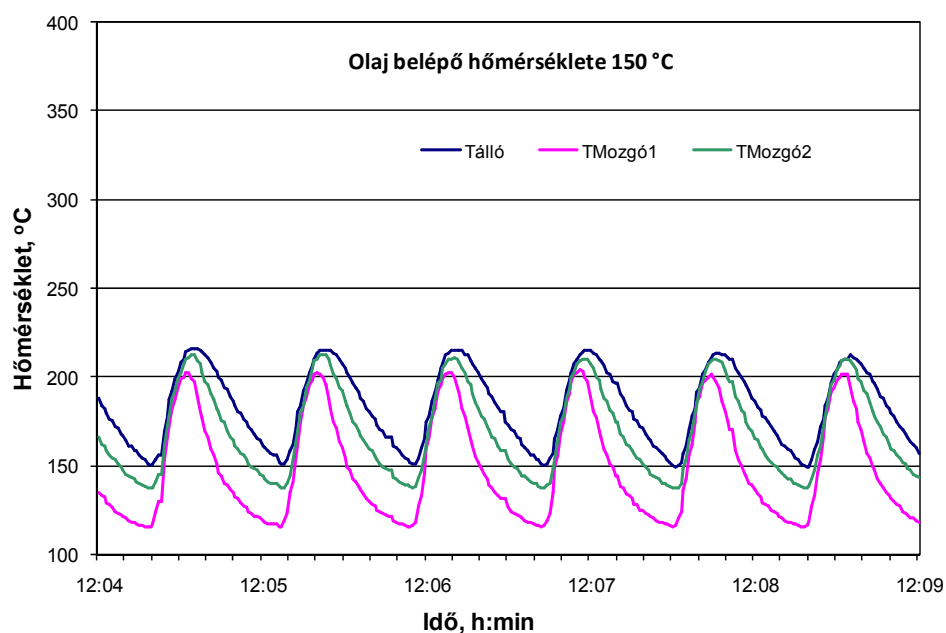
A kísérletek során konkrét üzemi gépparaméterekkel gyártott öntvények F_{max} értékeit vizsgáltam három különböző – a szerszámba belépő – olaj hőmérsékletnél. A különböző szerszámhőmérsékleteket (150 °C, 200 °C és 250 °C) a temperáló berendezés olajhőmérsékletének változtatásával értem el, ami a nyomásos öntőszerszám hőháztartását szabályozza öntés közben.

A forma hőmérsékletét az álló és a mozgó szerszámfélben a kontúrtól 12 mm-re elhelyezett hőelemekkel (NiCr-Ni) mértem és másodpercenként rögzítettem az üzemben alkalmazott ADVANTECH számítógépes rendszer segítségével.

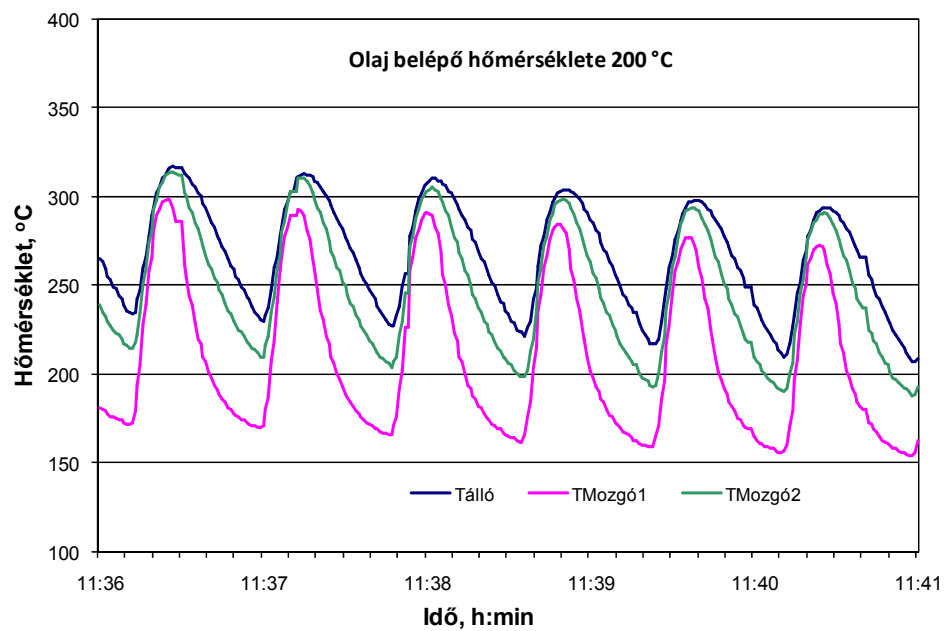
A szerszám hőmérsékletének változtatását a belépő hűtőközeg hőmérsékletének módosításával végeztem. A szerszám hőmérséklete T_{szer} csak késve követi a hűtőközeg hőmérsékletének változását. A hőelemek a szerszám belsejében lévő hőmérsékletet mérik. A hőmérséklet ingadozása és annak mértéke a szerszámüreg kontúrjától a szerszám belseje felé távolodva egyre kisebb lesz. Az álló szerszámfélbe egy $T_{álló}$, a mozgó szerszámfélbe két hőelemet T_{mozg1} és T_{mozg2} helyeztem.

A $T_{álló}$ a T_{mozg2} -vel szemben helyezkedik el, a T_{mozg2} a szerszám peremétől távolabb, míg a T_{mozg1} a szerszám pereméhez közelebb van.

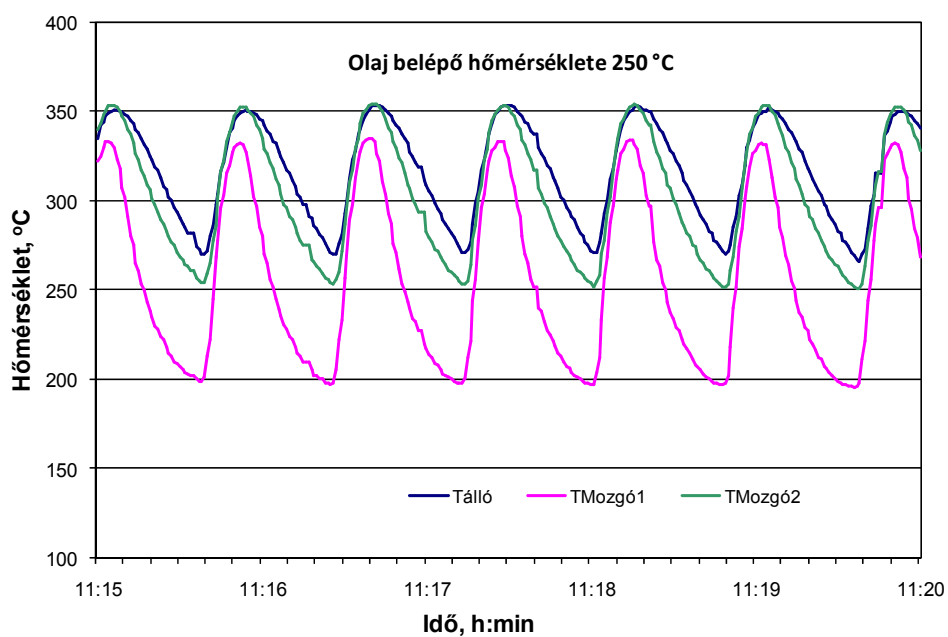
A különböző belépő olajhőmérsékletekhez tartozó szerszámhőmérsékleteket a 41-43. ábra mutatja.



41. ábra. A szerszámhőmérséklet változása 150 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél



42. ábra. A szerszámhőmérséklet változása 200 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél



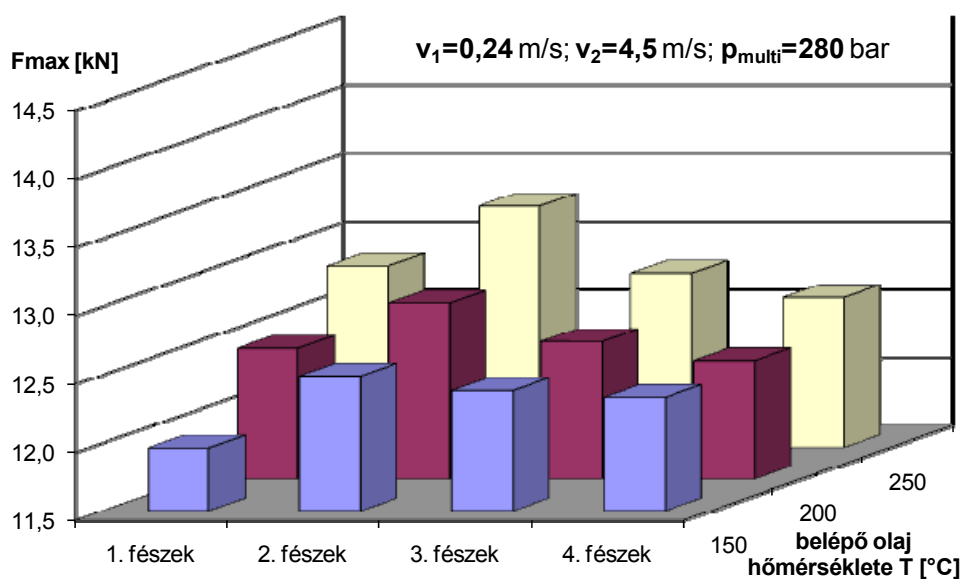
43. ábra. A szerszámhőmérséklet változása 250 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél

A kísérlet során beállított értékeket és a hozzájuk tartozó szakítóértékek átlagát a 15. táblázat tartalmazza.

15. táblázat. Szakítóerő átlagértékek a belépő olaj hőmérsékletének függvényében

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V_{d1} (m/s)	V_{d2} (m/s)	P_{multi} (bar)	olaj $T_{belépő}$ [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A szerszámba belépő olaj hőmérsékletének változtatása</i>									
8. beállítás	0,24	4,5	280	150	12	11,96	12,49	12,38	12,33
7. beállítás	0,24	4,5	280	200	12	12,46	12,79	12,51	12,37
9. beállítás	0,24	4,5	280	250	12	12,83	13,27	12,78	12,6

A 44. ábra mutatja, hogy az öntvény töréséhez tartozó szakítóerő értékek a szerszámhőmérséklet csökkenésével csökkentek.



44. ábra. Üzemi gépbeállítási paraméterekkel gyártott öntvények F_{max} értékei (átlagértékek fészkenként) a szerszámba lépő olaj hőmérsékletének függvényében

A hűtőrendszerben alkalmazott belépő olajhőmérséklet csökkentése 150 °C-ra több, változó nagyságú hidegfolyási hiba megjelenéséhez vezetett, az így gyártott öntvények a előírt minőségi követelményeknek nem feleltek meg.

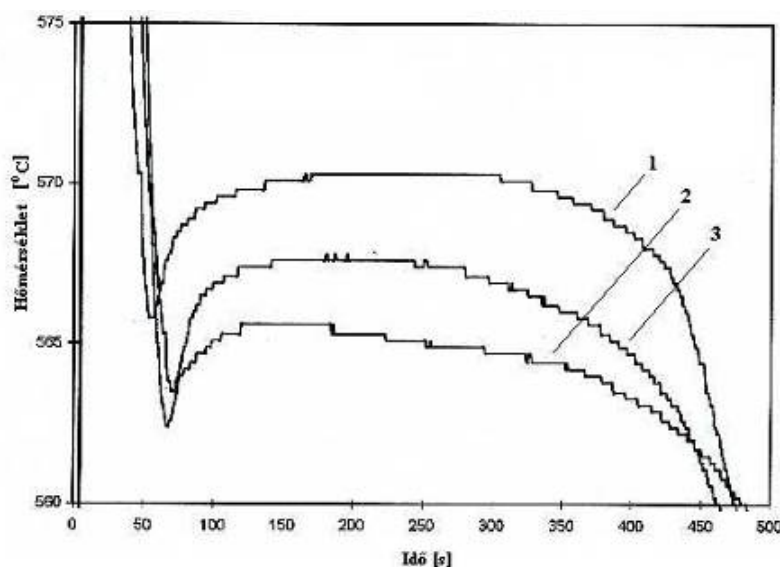
A szerszámhőmérséklet változtatása az öntvény helyi dermedési idejét befolyásolja. A kedvezőbb szilárdsági tulajdonságok elérését általában a kisebb szerszámhőmérséklet, és az ezáltal elért rövidebb megszilárdulási idő hatására kialakuló finomabb szövetszerkezet biztosítja. A vizsgált biztonsági öv felcsévélő orsó öntvény esetében alkalmazott technológia határok között megvalósítható belépő olajhőmérséklet értékek (150 °C, 200 °C, 250 °C) az öntvény szakítóerő értékét csak kis mértékben befolyásolják (3–5%), a nagyobb hőmérséklethez nagyobb szakadási erő értékek tartoznak. Ennek a szakirodalmi eredményektől eltérő változásnak az az oka, hogy nagyobb szerszámhőmérséklet esetén az utánnyomás hatásos időtartama hosszabb lesz, és a tömörre táplálás lehetősége jelentősen javul.

Megállapítottam, hogy a nagyobb szerszámhőmérséklet értékek (150 °C→200 °C→250 °C) az öntvényhez tartozó szakítóerőt a harmadik fázisban kialakuló utántáplálási lehetőség javulása által növelik.

4.3. A stroncium hatásának vizsgálata

Stronciumot szinte kizárólag gravitációs öntésnél alkalmaznak a tús szilíciumkristályok módosítására, nyomásos öntésnél a gyors megszilárdulás miatt ugyanis eleve „finom” szilíciumkristályok képződnek. Ezért célkitűzésem annak vizsgálata volt, hogy D 231-es ötvözet esetén az adott öntvénynél a stroncium adagolása hatásos-e, és ha igen, milyen mértékben eredményez szakítóerő növekedést.

A fémolvadékok vizsgálata lehülés közben történik, a vizsgálati eredmények a kristályosodó, átalakuló fázisokról, közvetve az ötvözet összetételéről és fontos öntészeti tulajdonságairól szolgáltatnak kvantitatív információkat. A lehülési görbe változását láthatjuk lassú hűtés esetén a 45. ábrán.



45. ábra. Az AlSi12Cu1(Fe) ötvözet termikus elemzése során kapott lehülési görbék
1 – nemesítetlen ötvözet 12 ppm stronciummal, 2 – 52 ppm stronciummal nemesített ötvözet, 3 – 92 ppm stronciummal nemesített ötvözet

A nemesítés hatásának vizsgálatához különböző stronciumtartalmaknál három hőmérsékleten (150 °C, 200 °C, 250 °C) végeztem a kísérleteket konkrét gépbeállítási paraméterek mellett. Az öntvényeket 12, 52 és 92 ppm stronciummal nemesített ötvözetből öntöttem.

A stronciumot AlSr10 mesterötvözet formájában adagoltam csapolás után a kihordóüstbe, még az öntőgép mellett található hőtartó kemence töltés előtt.

A mintavételezés alatt fészkenkénti átlagértékeket rögzítettem, ezeket a 16–18. táblázat tartalmazza a kísérleti darabok deformálódásakor mért (R_m szakítószilárdsághoz tartozó) maximális terhelőerővel (F_{max}), fészkenként ábrázolva.

16. táblázat. Szakítóerő átlagértékek a vizsgált stroncium értékeknél 150 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{belépő} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A stronciumtartalom változtatása 150 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél</i>									
8. beállítás	0,24	4,5	280	150	12	11,96	12,49	12,38	12,33
10. beállítás	0,24	4,5	280	150	52	12,26	12,76	12,73	12,47
11. beállítás	0,24	4,5	280	150	92	12,59	12,81	13,12	12,71

A 46. ábra mutatja, hogy különböző mennyiségű stroncium adagolása 150 °C-os belépő olajhőmérsékletnél az öntvény szilárdsági tulajdonságait csak kismértékben változtatta meg.

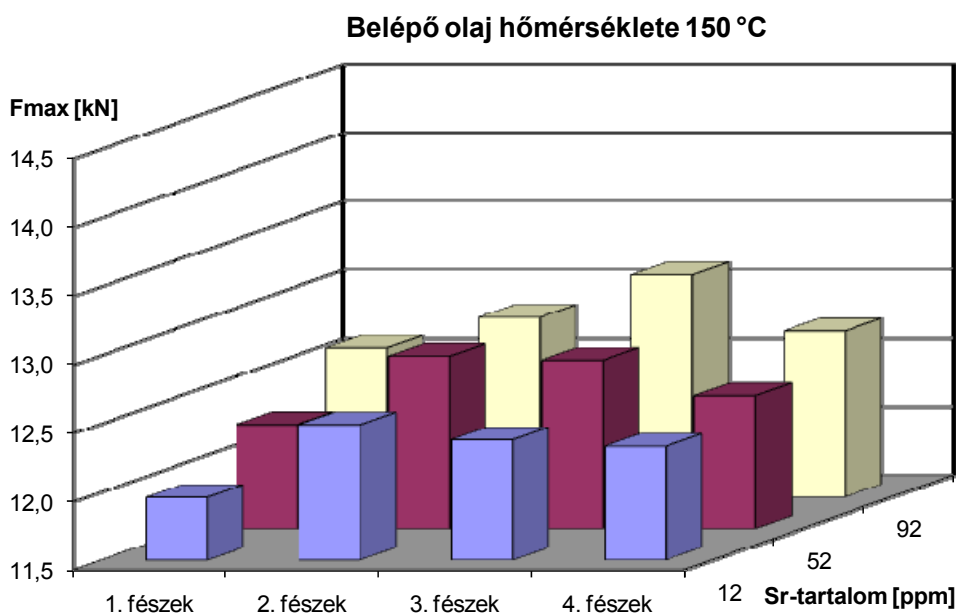
17. táblázat. Szakítóerő átlagértékek a vizsgált stroncium értékeknél 200 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{belépő} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A stronciumtartalom változtatása 200 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél</i>									
7. beállítás	0,24	4,5	280	200	12	11,96	12,49	12,38	12,33
12. beállítás	0,24	4,5	280	200	52	12,26	12,76	12,73	12,47
13. beállítás	0,24	4,5	280	200	92	12,59	12,81	13,12	12,71

A 46. ábra mutatja, hogy különböző mennyiségű stroncium adagolása 150 °C-os belépő olajhőmérsékletnél az öntvény szilárdsági tulajdonságait csak kismértékben változtatta meg.

18. táblázat. Szakítóerő átlagértékek a vizsgált stroncium értékeknél 250 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

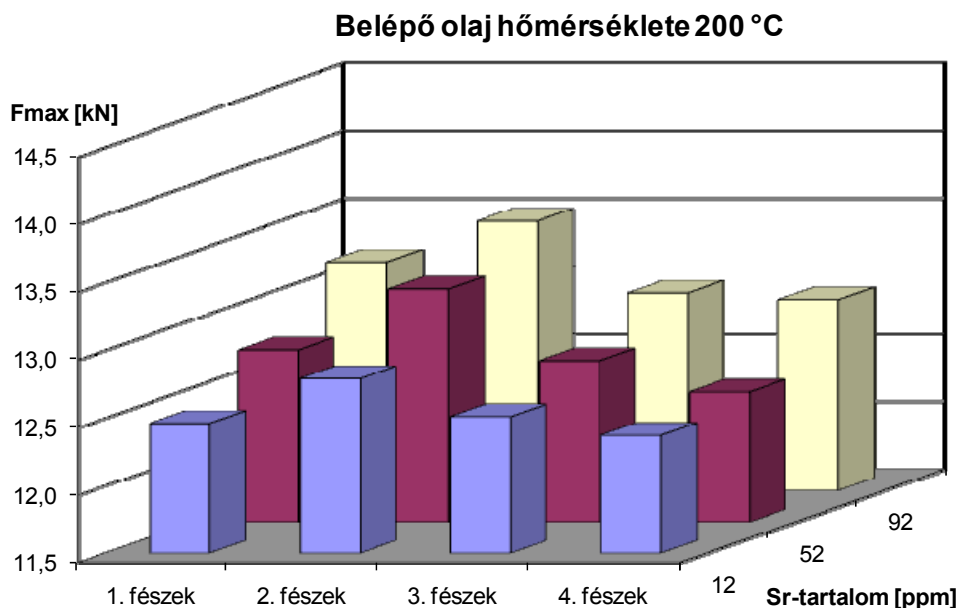
Kísérlet	Öntési paraméterek					Szakítóerő átlagértékek (kN)			
	V _{d1} (m/s)	V _{d2} (m/s)	P _{multi} (bar)	olaj T _{belépő} [°C]	Sr [ppm]	1. fészek	2. fészek	3. fészek	4. fészek
<i>A stronciumtartalom változtatása 250 °C-os szerszámba lépő olajhőmérsékletnél</i>									
9. beállítás	0,24	4,5	280	250	12	11,96	12,49	12,38	12,33
14. beállítás	0,24	4,5	280	250	52	12,26	12,76	12,73	12,47
15. beállítás	0,24	4,5	280	250	92	12,59	12,81	13,12	12,71



46. ábra. F_{max} változása (átlagértékek fészekenként) a stronciumtartalom függvényében 150 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

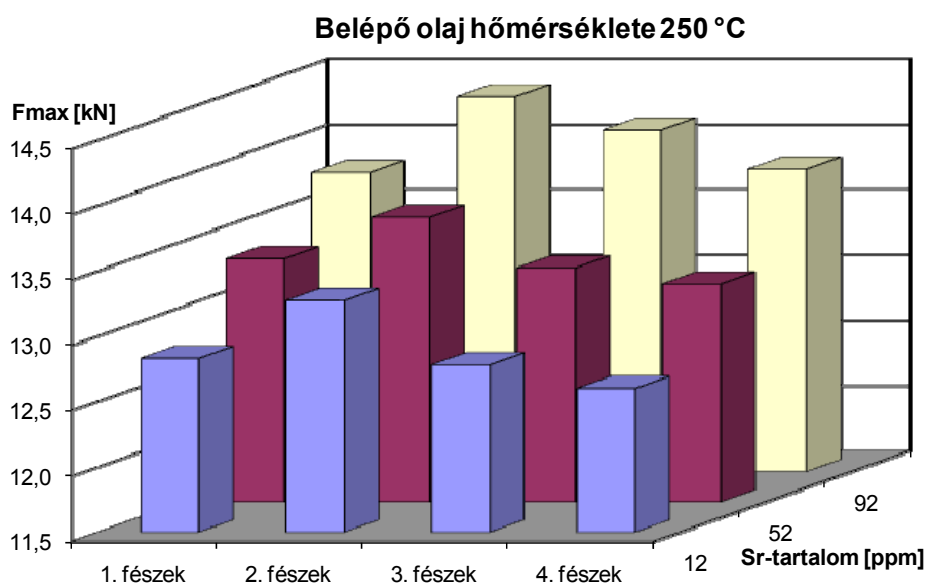
52 és 92 ppm stronciumtartalomnál az öntvényekhez tartozó szakítóerő értékek csekély emelkedést mutatnak. A 150 °C-os belépő olajhőmérséklettel történő temperálás esetén kialakuló szerszámhőmérséklet viszonyok a gyártott kísérleti öntvényeken változó nagyságú felületi öntvényhibákat (kifolyáshibák, kenőanyagfoltok, márványos felület) eredményeztek, ezáltal az öntvények a vevő által támasztott követelményeknek nem feleltek meg. A kísérleti öntvényekben kialakuló hibák, az előfordulás helyétől függően, jelentős mértékben befolyásolják a töréshez tartozó szakítóerő értékét.

A 47. ábrán látható, hogy 200 °C-os belépő olajhőmérsékletnél történő, különböző mennyiségű stroncium adagolásánál az öntvény töréséhez tartozó szakítóerő értékek növekvő tendenciát mutatnak.



47. ábra. $F_{\max}$ változása (átlagértékek fészekenként) a stronciumtartalom függvényében 200 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

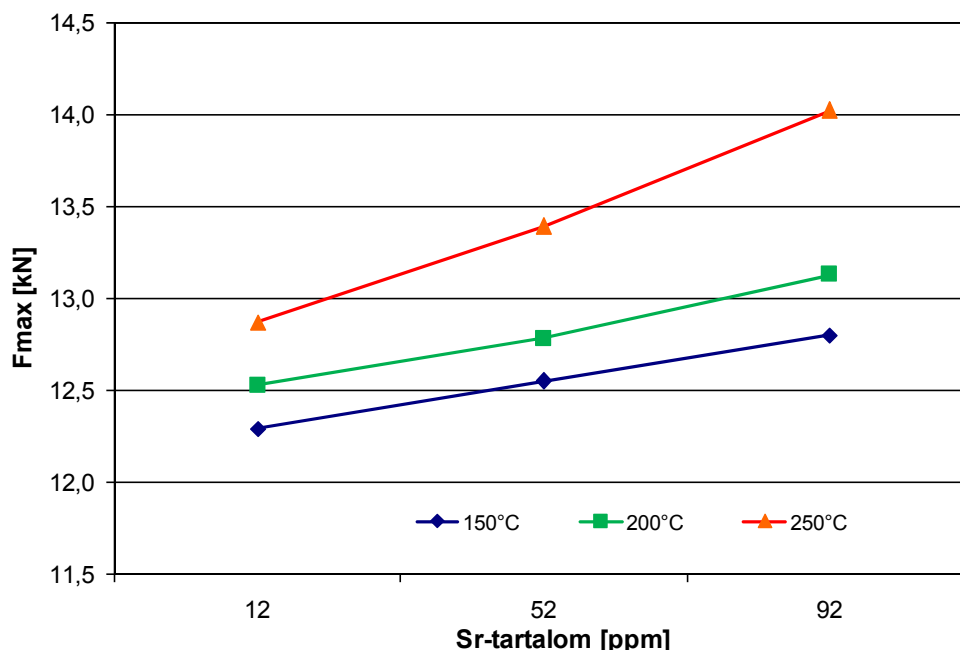
A 48. ábrán látható, hogy a 250 °C-os belépő olaj hőmérsékletnél a Sr tartalom növekedésével az öntvény töréséhez tartozó szakító erők értékei jelentősen megnövekedtek.



48. ábra. $F_{\max}$ változása (átlagértékek fészekenként) a stronciumtartalom függvényében 250 °C-os belépő olajhőmérsékletnél

A 49. ábra az $F_{\max}$ (1–4. fészkek átlagértékei) változását mutatja a stronciumtartalom függvényében, különböző (150 °C, 200 °C, 250 °C) belépő olajhőmérsékletek esetén.

Látható, hogy a legnagyobb szakítóerő értéket – 250 °C-os belépő olajhőmérsékletnél – a 92 ppm stronciumtartalom eredményezi.



49. ábra. $F_{\max}$ változása (1–4. fészkek átlagértékei) a stronciumtartalom függvényében 150, 200 és 250 °C-os belépő olajhőmérsékleteknél

Az AlSi-ötvözetből gyártott nyomásos öntvényeknél a rendkívül gyors megszilárdulási idő miatt az eutektikus szilíciumfázis finom szemcseméretű, ezért nemesítő (az eutektikum kristályosodását módosító) adalékot (Sr, Na, Sb) általában nem adagolnak.

Megállapítottam, hogy nyomásos öntvények gyártásánál a technológiai korlátok által adott magas szerszámhőmérséklet esetén (250 °C-os belépő olajhőmérséklet) adottak a feltételek a stroncium módosító hatásának érvényre juttatásához. Az öntvény dermedési idejének megnövelését kiváltó nagyobb szerszámhőmérséklet alkalmazása mellett a stroncium adagolása növeli a szilárdsági tulajdonságokat (szakítóerő növekedést idéz elő).

4.3. Az oxidhártya olvadékba keveredésének hatása

A biztonsági öv felcsévéelő orsó öntvények üzemi gyártási folyamatában az előírásnak nem megfelelő öntvények esetén gyakran találtunk oxidos felületet a töreten. Fontos volt annak a megállapítása, hogy az alkalmazott olvadékkezelési eljárás mellett honnan származik az oxidos inhomogenitás, hogyan küszöbölhető ki a megbízható gyártástechnológia kialakítása érdekében. A nyomásos öntészeti technológiában az olvadék kamrába adagolásának robotos megoldása nyitott olvadékfelszínű hőntartó kemencéből kanalas rendszerrel, a zárt terű, túlnyomásos adagolású hőntartó kemencéknél csatornában ferdepályán áramoltatással történik. Az olvadékadagolás gyakori kísérő jelensége a fém kiöntése után az adagoló kanál, vagy csatorna felületén megtapadó oxidhártya, melyet eltávolítási művelet nélkül a következő öntéshez tartozó olvadék magába kever. Ennek megakadályozására a fémadagoló eszközökre olvadéktaszító bevonatot (fekecsot) visznek fel, vagy az öntéseket követően kialakuló oxidhárttyákat eltávolítják (pl. sűrített levegővel kifújják). A ferdecatornás adagolásnál az oxidhártya eltávolítását általában a gépkezelő végzi.

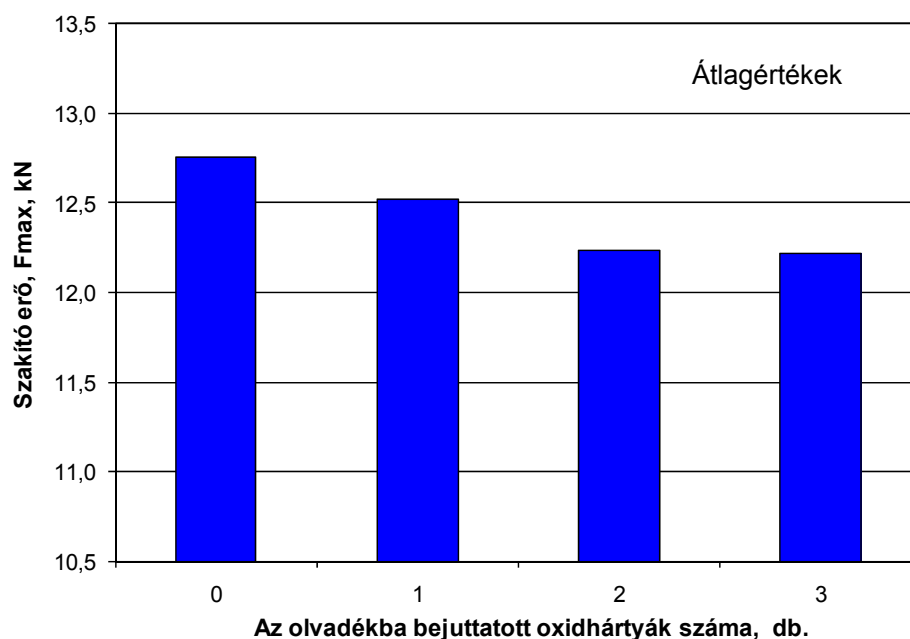
A kísérleti öntvények gyártását úgy végeztem, hogy a hőntartó kemence és a töltőkamra között található összekötő ferdecatornából kiszedtem és összegyűjtöttem az olvadék adagolása után visszamaradt alumíniumoxid hárttyákat. Az első sorozatot a csatorna oxidhárttyától mentes tiszta állapotában öntöttem. A következő sorozatnál az olvadékadagolás közben képződött oxidhárttyát a csatornában hagytam, a következő sorozatokban ehhez további egy, majd kettő db. korábbi öntésnél kivett oxidhárttyát helyeztem a csatornába. Összesen négy sorozatot öntöttem a **7. beállítás** (17. táblázat) szerinti gépbeállítási paraméterekkel, majd az öntvények töréséhez tartozó erőt mértem és a kapott eredményeket kiértékeltem.

A töréshez tartozó szakítóerő értékeket a *19. táblázat* tartalmazza, az átlagértékek változását az *50. ábra* mutatja. A táblázatban megjelöltem az előírt határérték alatti öntvényeket.

Az *50. ábrán* látható, hogy a töréshez tartozó $F_{\max}$ szakítóerők átlagértékei az oxidhárttyák számának növekedésével csökkenő tendenciát mutatnak. A tiszta összekötő ferdecatorna használata mellett öntött próbatestek esetén a legnagyobb a szakítóerő értéke, ami az egy, ill. kettő darab oxidhárttyát tartalmazó próbatestek esetén jelentősen romlik.

19. táblázat. $F_{\max}$ szakítóerők értékei az oxidhártyák számának függvényében

Öntvények száma	Oxidhártya száma, db			
	0	1	2	3
1	12,71	12,14	12,07	11,78
2	12,93	12,21	11,70	12,65
3	12,52	12,47	12,47	12,11
4	13,21	12,45	12,53	12,79
5	12,34	11,74	12,34	11,51
6	13,42	12,37	12,66	12,31
7	13,11	13,02	12,02	12,83
8	12,78	12,78	11,68	11,64
9	12,19	13,12	12,45	12,13
10	12,88	12,33	12,32	12,87
11	12,84	12,92	12,44	11,43
12	12,23	12,73	11,93	11,69
13	12,51	12,09	11,59	12,76
14	13,23	13,37	12,62	12,13
15	12,29	12,11	12,49	13,14
16	12,98	12,48	12,57	11,81
Átlag, kN	12,76	12,52	12,24	12,22



50. ábra. $F_{\max}$ átlagértékei az oxidhártyák számának függvényében

Három oxidhártya esetén jelentős eltérés nem tapasztalható a két oxidhártyát tartalmazó öntvények átlagértékeihez képest, viszont a vizsgált öntvények közül itt található a legtöbb 12 kN-nál kisebb szakítóerő érték.

Azoknál az öntvényeknél, amelyekhez a legkisebb szakítóerők tartoznak, a szakadási felületen oxidos öntvényhibákat találtam. Az 51. ábrán az öntvények törésfelületein található oxidhártyák jellegzetes kialakulása láthatók.



51. ábra. Oxidhártya mentén kialakuló törési felület

Az 52. és 53. ábrákon élben lehet látni az oxid mentén végighaladó repedést. A mikroszkópos felvétel 200x-os nagyításban készült.



52. ábra.
Törésfelület
Repedés és oxidhártya mentén keletkezett szakadás



53. ábra.
Mikroszkópos felvétel

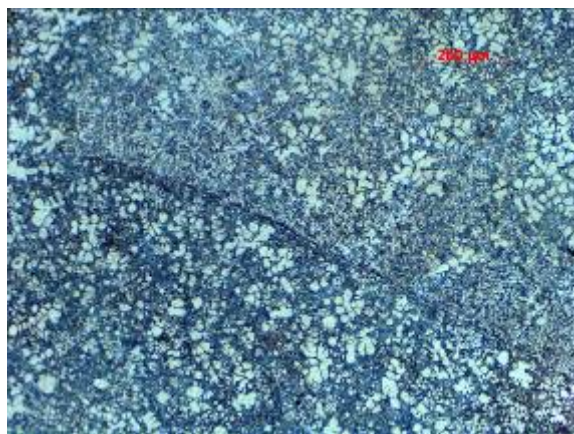
Az 54. és 55. ábrákon a törésfelületen és a mikroszkópos felvételen jól látható az oxidhártya. A mikroszkópos felvétel 100x-os nagyításban készült.



54. ábra.

Törésfelület

Az oxidhártya élben látszódik, egyik oldalán finom, a másik oldalán durva kristályszerkezettel



55. ábra.

Mikroszkópos felvétel

Megállapítható, hogy az oxidhárttyák olvadékba keveredésének esetén az öntvények töréséhez tartozó szakítóerő értékek csökkennek és nagyobb arányban fordulnak elő hibás öntvények. A vizsgálatok eredményei rámutatnak arra is, hogy az öntési ciklusok során megismétlődően képződő egyetlen oxidhártya kialakulásának megelőzése, vagy eltávolítása jelentősen növeli az üzemi gyártás biztonságát.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori értekezésem elsődleges célkitűzése a járműipar számára nagy szériában és különböző geometriai változatokkal gyártott biztonsági öv fékeződob nyomásos öntvény alkatrész – beépítési körülményekkel megegyező terhelése közben mérhető – töréséhez tartozó erő, és az öntéstechnológiai, valamint a hőtechnikai gyártási paraméterek összefüggéseinek vizsgálata volt. A vizsgálat sorozat eredményeként olyan paraméter kombinációt dolgoztam ki, amellyel az alkatrészre előírt követelmények teljesíthetők.

Az értekezés első részében ismertettem a korszerű nyomásos öntvénygyártás technológiáját, összefoglaltam a nyomásos öntvények szilárdsági tulajdonságait befolyásoló tényezők hatását tartalmazó szakirodalmi ismereteket, különösen a nyomásos öntészeti ötvözet tulajdonságai, a nyomásos öntőszerszám hőmérsékletviszonyai és az olvadékkezelés alkalmazása által figyelembe vehető lehetőségeket.

A saját kísérletekhez egy konkrét vevői megrendelésre gyártott négyfészkés nyomásos öntőszerszámot használtam. Az öntőszerszám tervezéséhez öntéstechnológiai és hőtechnikai számításokat végeztem, majd formatöltési és dermedési szimulációkat készítettem. Az öntéstechnikai tervezés és az öntészeti szimuláció eredményei alapján meghatároztam a vizsgált öntvény teljes beömlőrendszerének optimális méreteit.

A vizsgálatokat az öntvény tulajdonságait legjobban befolyásoló paraméterek technológiai határértékek közötti változtatásával, üzemi körülmények között végeztem. Változtattam a gépbeállítási paraméterek közül az öntési folyamat 1. és 2. fázisában az öntődugattyú sebességét és a megszilárdulás közben a fémre ható nyomást.

A kísérleti öntvények töréséhez tartozó roncsolásos vizsgálatával meghatároztam a szakítóerő és a hidegkamrás nyomásos öntőgép működtetési paraméterei közötti összefüggéseket AlSi12Cu1 ötvözetből történő gyártás esetén.

Megállapítottam, hogy az előírt követelmények a befolyásoló paraméterek optimális értékeivel teljesíthetők. Kimutattam, hogy a szerszám hőmérsékletviszonyainak stabilizálására szolgáló kényszerkeringtetett hűtő-fűtő folyadék hőmérsékletének magasabb értékével létrehozott nagyobb szerszámhőmérséklet elősegíti az utántáplálás megvalósítását, ezáltal a töréshez tartozó szakítóerő értékét növeli és lehetővé teszi a stronciumos olvadékkezelés hatékony alkalmazását.

SUMMARY

Nowadays a great deal of safety belts are produced in the vehicle industry building in high-pressure die casting break drum. The vital aim of my PhD research to examine the coordination of the measurable fracture power and casting technology as well as the parameters of heat technology among the charging. I elaborated a parameter combination in which the performance specifications for mountings can be accomplished.

In the first part of my dissertation the high-pressure die casting technology is reviewed. Then I consolidated the knowledge of literature of stir castings in connection with static characteristics. In particular to take into account options of high pressuring moulding alloys temperatures.

Pressure die casting tools were used for my own experiment. For these tools planning I finished casting and heat technology calculations then I did solidification and formfilling simulations. I determined the optimal measures of the inlet systems and anchors in the light of the results.

The examinations were done under operation conditions in which the limit values of the castings parameters were changed. I have changed the speed of casting piston in the first and second phase of the moulding process affecting the pressure of the metal under the solidification.

Associations between the parameters of cold chamber casting machines and the breaking load were determined with destructive testing in the case of producing from alloy A1Si12Cu1.

I have noted that the performance specifications can be accomplished with optimal value. In addition I evinced that the higher tool temperature creating cooling liquid temperature facilitates after-feeding to grow tensile strength as well as it makes is possible to apply strontium melt treatment.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Az öntéstechnikai tervezés és a hőtechnikai méretezés, valamint az öntészeti szimuláció eredményei alapján meghatároztam a vizsgált öntvény beömlőrendszerének, ezen belül bekötőcsatornájának optimális geometriáját, amely más hasonló öntvénygeometriák esetén is alkalmazható.

A tagolt palástú hengeres, előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő nyomásos öntvények öntése esetén **a palást teljes hosszával azonos szélességű bekötőcsatorna biztosítja az optimális áramlási viszonyokat a formatöltés közben. A bekötőcsatorna – technológia által adott határok közötti – legnagyobb vastagságának választása az irányadó áramlási sebességnél kisebb értékek esetén is nagyobb öntvényzilárdságot biztosít** az utántáplálás lehetőségének hosszabb időtartama miatt.

2. Megvizsgáltam az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő nyomásos öntvény roncsolásos vizsgálatokor kapott szakítóerő és a hidegkamrás nyomásos öntőgép működtetési paraméterei közötti összefüggéseket AlSi12Cu1 ötvözetből történő gyártása esetén.

2.1 A tagolt palástú hengeres, előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő nyomásos öntvények öntése esetén **a kamra feltöltése közben alkalmazott állandó sebességű dugattyúmozgatásnál a szakirodalom alapján meghatározott három hullámmal történő feltöltéshez tartozó dugattyúsebesség értékénél kisebb, vagy annál nagyobb sebességek hatására a szakítóerő értéke csökken** a levegőbezáródások számának növekedése miatt.

(Alkalmazott paraméterek: $v_{d2}=4,5$ m/s, $p_{multi}=180$ bar, 200 °C-os belépő olajnál állandósult szerszámhőmérséklet, az eltérés 6–8%).

2.2. Az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlőrendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a 2. fázisban alkalmazott öntődugattyú-sebesség értékének növelése a töréshez tartozó szakítóerő értékét – a bekötőcsatornában kialakuló áramlási sebesség 40 m/s alatti tartományban – növeli.**

(Az alkalmazott paraméterek: $v_{d1}=0,24$ m/s, $p_{multi}=180$ bar, 200 °C-os belépő olajnál állandósult szerszám hőmérséklet, a változás 4–6%).

2.3. Az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlő rendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a fémre ható nyomás 1200 bar-ig történő növelése a töréshez tartozó szakítóerő értékét növeli. 1200 bar fölötti fémre ható nyomás a méretpontosságot rontja, ezért nem alkalmazható.**

(Az alkalmazott paraméterek: $v_{d1}=0,24$ m/s, $v_{d2}=4,5$ m/s, 200 °C-os belépő olajnál állandósult szerszám hőmérséklet, a változás 7–10%).

2.4. Az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlőrendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a technológiai határértékek között a fémre ható nyomás 1200 bar-ig történő növelésével nagyobb szilárdsági értékek érhetők el, mint a rávágásban kialakuló fémsebesség értékeinek növelésével a 40 m/s alatti tartományban.**

($P_3 = 550 \text{ bar} \rightarrow 1200 \text{ bar}$ esetén 10 % növekedés, a $v_{d2} = 2,0 \text{ m/s} \rightarrow 4,5 \text{ m/s}$ esetén 6 % növekedés).

3. Az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlőrendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a technológiai határértékek között a nagyobb szerszámhőmérséklet az öntvényhez tartozó szakítóerőt a 3. fázisban kialakuló utántáplálási lehetőség időtartamának növelése által növeli.**

4. Az öntészeti AlSi-ötvözetekből gyártott nyomásos öntvényeknél kialakuló rendkívül rövid dermedési idő az eutektikum szilícium fázisának finomszerkezetű kiválását biztosítja, ezért általában nem alkalmaznak stronciummal történő módosítást. Az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlőrendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a nagyobb szerszámtemperálási hőmérséklet az öntvény dermedési idejét növeli, ami biztosítja ~100 ppm stroncium adagolásának hatására az eutektikum szilícium fázisának finomodását, ezáltal a töréshez tartozó erő növelését.**

(250 °C-os szerszámtemperálási hőmérsékletnél 92 ppm stroncium adagolása a töréshez tartozó erőt 12 %-kal növelte a stronciumadagolás nélküli (12 ppm), 200 °C-os szerszámtemperálás viszonyaihoz képest.)

5. Megvizsgáltam az oxidhártya kialakulásának hatását a kiválasztott öntvény töréséhez tartozó szakítóerőre az adagolócsatornába történő oxidhártya behelyezés módszerével. Megállapítottam, hogy az előírt szilárdsági követelményeknek megfelelő, tagolt palástú hengeres, optimalizált beömlő rendszer geometriával kialakított nyomásos öntvények öntése esetén **a határértéknél kisebb szilárdsági eredmények kialakulását a törési felületen található oxidhártya okozza.**

Az oxidhártya az olvadék kamrába adagolására szolgáló csatorna (vagy kanál) falán képződik, és a folyékony fémbe bekeveredve, a szerszámüregbe bejutva csökkenti az öntvény helyi terhelhetőségét, ezáltal a töréshez tartozó erőt.

Az oxidhártyák bekeveredése jelentősen növeli a nem megfelelő szilárdsági tulajdonságú öntvények előfordulásának arányát.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezem ki köszönetemet tudományos vezetőmnek, dr. Dúl Jenőnek, aki munkámat mindvégig támogatta és a dolgozat megírásához nélkülözhetetlen segítséget nyújtott.

Köszönettel tartozom a Metallurgiai és Öntészeti Intézet Öntészeti Tanszék munkatársainak szakmai és emberi támogatásukért.

Köszönöm a Prec-Cast Öntödei Kft. tulajdonosának, Willhelm Ramboldnak és ügyvezető igazgatójának, dr. Bokodi Bélának a támogatását, az üzemi kísérletek elvégzéséhez és a kísérleti eredmények kiértékeléséhez adott lehetőségeket.

Köszönöm családom és barátaim támogatását.

SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] *Sellors, R.G.R. - B.G. Carver, - T. B. Smith*: Druckguss aus Eisenwerkstoffen. Giesserei- Praxis
- [2] Aluminium Taschenbuch. Düsseldorf, 1983.
- [3] *L. Wang - M. Makhlof - D. Apelian*: Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf Gefüge und Mechanischen Eigenschaften von AlSi9Cu3. Giesserei- Praxis (1997) S. 297-303
- [4] *Nogowizin, B.*: Druckgusslegierungen und ihre Eigenschaften. Druckguss-Praxis (2003) Nr. 4, S. 161-168
- [5] *Klein F.*: Überblick über die Festigkeitseigenschaften von Druckgusslegierungen. 25. Aalener Gießereisymposium (2004)
- [6] Hüttenaluminium Gusslegierungen. Aluminium Rheinfelden, 2003. (terméktájékoztató)
- [7] *Mondolfo, L. F.*: Aluminium Alloys, Structure and Properties. London-Boston, 1976
- [8] *Hatch, J.E.*: Aluminium. Properties and Physical Metallurgy. ASM, Ohio, 1984
- [9] European Standard: Aluminium and aluminium alloys – Castings– Chemical composition and mechanical properties. BS EN 1706
- [10] *V. Reimer*: Nyomásos öntés. Műszaki Kiadó, Budapest 1978
- [11] Nyomásos öntés II. Általános gép és szerszám ismeretek. Unifond Kft. Budapest 1998.
- [12] *Takács Benedek*: Nyomásos öntészet. Kézirat, Budapest 1996.
- [13] *Dr. Dúl Jenő*: Nyomásos öntészeti ismeretek. 2011. digitális tananyag.
- [14] *Ernst Brunhuber*: Praxis der Druckgussfertigung. Berlin, 1991
- [15] *F. Klein; H. Bawidamann; N. Niederle*: Urformtechnik III. Kézirat. Aalen, 1991/92
- [16] *F. Klein*: Alumínium nyomásos öntvények hibaatlasza. ARGE Metallguss, Aalen, 1998
- [17] *Barin, I. Knacke, O.*: Thermochemical properties of inorganic substances.
- [18] Wärmetechnische Auslegung von Druckgiessformen. ARGE Metallguss, Aalen, 1994.
- [19] *Szabó R. – Dúl J.*: A nyomásos öntőforma hőmérséklet eloszlásának vizsgálata. 15. Magyar Öntőnapok és XII. Fémöntészeti Napok, Székesfehérvár 1999. 09. 23-25.
- [20] *Dúl Jenő - Szabó Richárd – Juhász Borbála*: Nyomásos öntőszerszám hőtechnikai viszonyainak vizsgálata. XI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, 2009. április 2-5. Máramarosziget
- [21] *Matusz Dénes*: Nyomásos öntőszerszám hőháztartásának optimalizálása. Diplomamunka, 2006.
- [22] *Shahrooz Nafisi; Reza Ghomashchi*: Materials Science and Engineering A415, pp.273-285. 2006.

- [23] *S.S. Sreeja Kumari; R. M. Pillai; B. C. Pai*: Materials Science and Engineering A 460-461, pp.561-573. 2007.
- [24] *M. Lebyodkin; A. Deschamps; Y. Bréchet*: Materials Science and Engineering A 234-236, pp.481-484. 1997.
- [25] MK TA 100 Thermoanalyse-System: Thermocouple Test Certificate, www.mk-gmbh.de
- [26] *Małgorzata Warmuzek*: Aluminum-Silicon Casting Alloys; Atlas of Microfractographs. ASM International, (2004) p. 1-9.
- [27] *J. Gilbert Kaufman; Elwin L. Rooy*: Aluminum Alloy Castings, Properties, Processes and Applications. ASM International, (2004)
- [28] *Gergely Gréta*: A stroncium és az olvadékáramlás hatása a Si morfológiájára. Al7Si0,3Mg ötvözet esetén, PhD értekezés, Miskolci Egyetem (2008)
- [29] *Xiang Chen; Huiyuan Geng; Yanxiang Li*: Study on the eutectic modification level of Al–7Si Alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves, Materials Science and Engineering A 419, (2006), p. 283-289.
- [30] *L. Liu; A. M. Samuel; F. H. Samuel; H. W. Doty; S. Valtierra*: Characteristics of α -dendritic and eutectic structures in Sr-treated Al Si casting alloys. Journal of Materials Science 39, (2004), p 215–224.
- [31] *Dr. Jónás Pál*: Könnyűfém öntészeti ismeretek. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Metallurgiai és Öntészeti Intézeti Tanszék, (2011), p. 515-544.
- [32] *Gergely Gréta; Gácsi Zoltán*: A Si morfológiájának jellemzése a módosított Al-Si ötvözetekben.
- [33] *Kovács, L.*: A számítástechnika alkalmazása az öntészetben. BKL Kohászat, 128. évf. 1995 9. sz. p. 341-345.
- [34] *Dr. Molnár Dániel*: Visszamaradó öntési feszültség és méretváltozás mérése és szimulációja. PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2010
- [35] *Klein, F. – Pokora, E. – Dúl, J.*: A nyomásos cinköntvények dermedésének számítógépes szimulálása. BKL Kohászat, 129. évf. 1996 1. sz. p. 20-24.
- [36] *Schmid, M – Klein, F.*: A formatöltés folyamatának számítógépes szimulálása öntéskor. BKL Kohászat, 131. k. 1998. 1-2. sz. p. 22-26.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBŐL MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

Folyóiratcikkek

- [1] *Jenő, Dúl; Richárd, Szabó; Attila, Simcsák*: Effect of temperature on the properties of high pressure die casting. Materials Science Forum, 2010, vol. 649, pp. 473–479.
<http://www.scientific.net/MSF.649.473>
- [2] *Juhász Borbála; Dúl Jenő; Szabó Richárd*: Nyomásos öntőszerszám hűtéstechikai viszonyainak vizsgálata. BKL Kohászat, 2009. (142. évf.) 5. sz. 16–21. old.
- [3] *Dúl Jenő; Szabó Richárd; Simcsák Attila*: A szerszám hőmérsékleti viszonyok hatása a nyomásos öntvények tulajdonságaira. BKL Kohászat, 2007. (140. évf.) 6. sz. p. 22–25.
- [4] *Dániel, Molnár; Jenő, Dúl; Richárd, Szabó*: Simulation of High Pressure Die Casting Solidification. Materials Science Forum, 2006, vol. 508, pp. 555-560.
<http://www.scientific.net/MSF.508.555>
F3-c1. V. Bánhidi: Evaluation of microgravity heat conductivity measurements with FLUENT system. Materials Science Forum, 2008, vol. 589, pp. 287-292,
- [5] *Szabó Richárd; Dúl Jenő; Szecső Gusztáv*: Hőntartó kemencék hőmérsékletének felügyelete ADAM 4000 rendszerrel. BKL Kohászat, 2003. (136. évf.) 3. sz. p. 139-141.
http://www.ombkenet.hu/bkl/kohaszat/2003/bklkohaszat2003_3.pdf
- [6] *Szecső Gusztáv; Szabó Richárd; Dúl Jenő*: A fémolvadék hőmérsékletének mérése és felügyelete nagynyomású öntésnél. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek. 2002. (7. évf.) 1. sz. p. 8-10.

Konferencia kiadványok

- [1] *Dúl Jenő; Szabó Richárd; Juhász Borbála*: Nyomásos öntőszerszám hőtechnikai viszonyainak vizsgálata. XI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Máramarossziget, 2009. április 2-5.: EMT kiadvány, pp. 36-39.

Előadások

- [1] *Szabó Richárd; Csontos Lajos; Mudri Zoltán*: Közös fejlesztési tevékenység a Knorr-Bremse és a Prec-Cast Kft között. XX. Magyar Öntőnapok Tapolca, 2009.10. 11.
- [2] *Dr. Dúl Jenő; Szabó Richárd*: A Prec-Cast Kft és a Miskolci Egyetem közös fejlesztési projektjei a folyamatirányítás optimalizálására. Vevőtálalkozó Prec-Cast Kft Sátoraljaújhely, 2009.06.27.
- [3] *Dúl Jenő; Szabó Richárd; Juhász Borbála*: Nyomásos öntőszerszám hőtechnikai viszonyainak vizsgálata, XI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, 2009. április 2-5. Máramarossziget
- [4] *Jenő, Dúl; Richárd, Szabó; Attila, Simcsák; Borbála, Juhász*: Temperaturverhältnisse der Druckgussform und der Einfluss auf die Gussteileigenschaften. Ledebur Kolloquium, Freiberg, 2008.10.24. p.4

- [5] *J. Dúl; R. Szabó; A. Simcsák*: The influences of the temperature to the properties of high pressure die casting. Fifth International Conference on Solidification and Gravity Miskolc – Lillafüred Hungary, Sept. 1 to 4, 2008. p.6
- [6] *Dr. Dúl Jenő; Szabó Richárd; Simcsák Attila*: Folytonossági hibák kialakulása a nyomásos öntvények gyártásánál. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia Nagyszeben, 2008.04.05.
- [7] *Dr. Dúl Jenő; Szabó Richárd; Simcsák Attila*: Hőmérsékletviszonyok hatása a nyomásos öntvények tulajdonságaira. XIX. Magyar Öntőnapok Lillafüred, 2007. október 14-16.
- [8] *Dr. Dúl Jenő; Szabó Richárd; Simcsák Attila*: Hőmérsékletviszonyok hatása a nyomásos öntvények tulajdonságaira. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Buziásfürdő, 2007. március 31.
- [9] *Dúl Jenő; Szabó Richárd; Molnár Dániel; Lukács Sándor; Simcsák Attila; Tarnay Botond*: Nyomásos öntészeti technológiák fejlesztése a Miskolci Egyetemen. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyvárad, 2005. 03. 31. – 04. 03.
- [10] *Dúl Jenő; Szabó Richárd*: Nyomásos öntőszerszám hőegyensúlyának vizsgálata - 17. Magyar Öntőnapok, Miskolc–Lillafüred, 2003. október 05-07.
- [11] *Dúl Jenő; Szabó Richárd*: A gépbeállítási paraméterek hatása a nyomásos öntvények tulajdonságaira. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Zilah, 2003. április 11 - 13.
- [12] *Szabó Richárd; Dúl Jenő*: A nyomásos öntőforma hőmérséklet eloszlásának vizsgálata. 15. Magyar Öntőnapok és XII. Fémöntészeti Napok, Székesfehérvár 1999. szeptember 23-25.