

BAST, J.¹ – KADAUW, A.¹ – MALASCHKIN, A.²

Nyersformázó keverék optimális tömörítési paramétereinek beállítása és egy új, tömörítést mérő készülék³

A nyersformába öntött öntvények minősége erősen függ a formázóhomok tömörítésétől. A nyers homokkeverék formázási eljárásának a paraméterei közvetlenül hatnak az öntvény minőségére, az energiafogyasztásra és a ciklusidőre. Az elégtelen tömörítés durva öntvényfelülethez és töréshez vezethet. A túltömörítés több energiát igényelhet, öntvényhibákat okozhat a kis gázáteresztés következtében, és a minta és a berendezés fokozott kopását okozza. A tömörítési folyamatot 3D-s matematikai modellel szimulálták, és végeleges módszerrel számították. A sajtolási folyamat szimulációjához jelenleg fejlesztik a szoftvert, hogy a különböző tömörítési paramétereket térben modellezzék. A számított és a kísérleti adatok hitelesítéséhez számítógépes tomográfiai módszert használtak. Egy új érzékelőt használva vizsgálták a különféle formázási paraméterek hatását. Az eredmények lehetővé teszik, hogy az öntöde személyzete ellenőrizze, beállítsa és optimalizálja a formázási eljárást.

Bevezetés

Az agyagkötésű homokkal gyártott öntvények minősége erősen függ a formázóhomok tömörítésétől [1, 2, 3]. Amikor új öntvényt kezdenek gyártani, az öntödei szakembernek sok döntést kell hoznia. Sajnos, a tapasztalatok gazdagsága ellenére, a formázástechnológiát gyakran a próba-hiba módszerrel fejlesztik. Ez sok időt követel, és nagy költségeket generál. A formázástechnológia problémái a következők:

- nehéz formarészek emelése;
- távolság a minták között, ill. a minta és a szekrény falai között;
- a formázóhomok optimális tulajdonságainak a megválasztása;
- a formázószekrény megfelelő magasságának a megválasztása és
- a formázóhomok elégséges tömege.

Ezenfelül a korszerű formázógépek le-

hetővé teszik a formázóhomok különböző módszerekkel való tömörítését, ez lehet: sajtolás, air-impact (légütéses) sajtolás, ütés, előütés vagy sajtolással kombinált ütés.

Az öntő szakembernek itt is döntenie kell:

- az eljárások vagy eljárás-kombinációk helyes kiválasztásában;
- a hatékony tömörítési idő meghatározásában;
- a különböző folyamatok sorrendjének felállításában.

A fő kérdés a következő: Képesek lesznek-e a formák vagy a formarészek ellenállni a magok emelése, a formák átfordítása és szállítása, a magok behelyezése, a formák összerakása, az olvadék betöltése, az öntvény dermedése és hűlése során fellépő különböző terheléseknek? A jó minőségű öntvények gyártása céljából a for-

máknak ki kell elégíteniük mindezeket a technológiai követelményeket.

A szilárdság elméletében vagy az acélszerkezetek elméletében vannak biztonsági kritériumok az alkatrészek vagy az egész acélszerkezet használhatóságának a meghatározásához.

A gépészetben:

$$\frac{\sigma_{\text{act}}}{\sigma_{\text{per}}} \leq 1 \quad (1)$$

ahol σ_{act} – a tényleges feszültség,
 σ_{per} – a megengedett feszültség.

Az acélszerkezeteknél:

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (2)$$

ahol S_d – a hatás tervezett értéke,
 R_d – az ellenállás tervezett értéke.

Ha az (1) és (2) egyenlet értéke kisebb egynél, az alkatrész vagy az egész acélszerkezet minden roncsolódási veszély nélkül használható. A fent említett paraméterek összekapcsolásához meg kell határozni a formát, mint az öntvény egy építőkövét, és ellenőrizni kell a forma használhatóságát, a fenti viszony, azaz az (1) és (2) egyenlet arányainak egynél kisebb voltát.

Az 1. ábra mutatja a kapcsolatot a forma ellenállása, valamint a sűrűsége és a formázóhomok tulajdonságai között. Ha ezek a paraméterek, valamint a minták elhelyezése a mintalapokon megfelel a formázási és az öntési körülményeknek, meghatározhatók a forma használata alatt fellépő erők. Figyelembe véve a minta geometriáját, becsülhetjük a forma minden egyes részének a szilárdságát.

A forma szilárdsága és ellenállása közötti összehasonlítás információt ad a forma használhatóságáról. Ilyen módon lehetséges meghatározni a forma minőségét öntés előtt.

¹ Technische Universität Bergakademie, Freiberg

² Georg Fischer AG, Leipzig

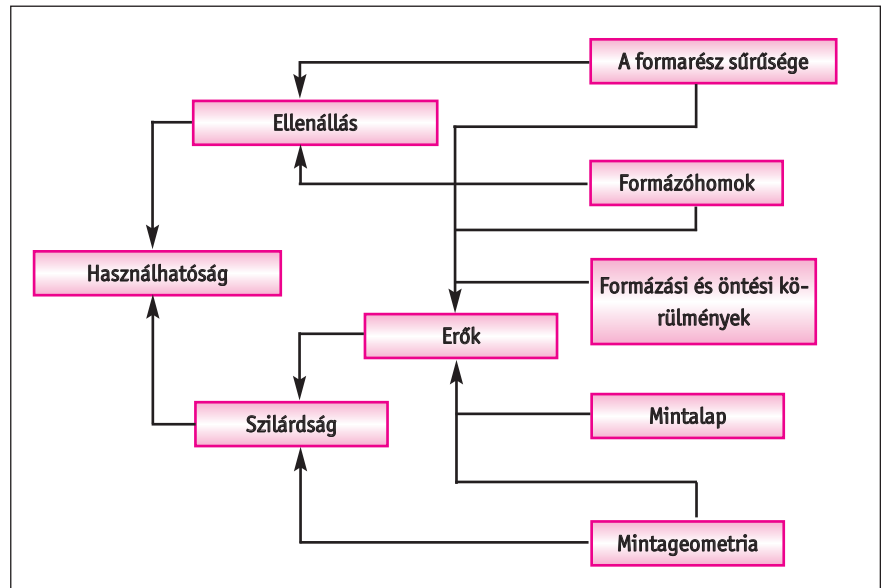
³ Ez a közlemény a szlovén öntőegyesület 48. portorozi konferenciájának előadásaként hangzott el, lapunk a szlovén egyesület engedélyével közli

Matematikai modellezés és szimuláció

A tömörítési eljárás optimális paramétereinek beállítása a formák gyártása során megköveteli a formázóhomok, a formázószekrény fala és a minta fala között kialakuló tapadási erők, valamint a kötőanyag által létrehozott kohéziós erő ismeretét. Ezek az erők hatnak a formázóhomok mozgására a formaszekrényben, különösen a mintához közeli zónákban és a minta zsákszerű részeiben. A tömörítési folyamat számítógépes szimulálása lehetővé teszi ezen erők hatásának a figyelembevételét [2].

Az öntészeti szakirodalomban a feszültség–feszültség és a sűrűség–sűrűség eloszlását illetően nem írták le kielégítően az agyagkötésű homokokat. A szemcsés közeg példái a homok, a por, a kavics vagy a szemcse. A szemcsés közeg különböző méretű, alakú és felületi tulajdonságú makroszkopikus részecskékből áll, ami specifikus tömörségi viselkedéshez vezet: a rendezetlen szerkezetek csak a rendszer részei reorganizációjával kapcsolatban teszik lehetővé a tömörítést. A súrlódás és a plasztikus deformáció következtében energia szóródik szét, így a szemcsés részecskék rendszere nincs egyensúlyban, és következésképpen a statisztikai fizika szabványos módszerei nem alkalmazhatók. Mint az öntészeti irodalom mutatja, a formázást különböző numerikus módszerek használatával tanulmányozzák [2, 8, 9]. A legáltalánosabb módszerek a kontinuum mechanikai megközelítésén [1, 4, 9] vagy a diszkontinuum mechanikai elvein [5, 6] alapulnak.

A diszkontinuum mechanikai elvei képezik az alapot a „disztinktelemes módszerhez” (DEM) vagy a „részecske módszerhez” [7, 8] abban, hogy az egyes részecskékre három erő hat: az érintkezési erő, a vonzóerő és a gravitációs erő. Ennek a módszernek az előnyei abban állnak, hogy számításba veszi a homok fizikai tulajdonságait (például a szemcse méretét, a szemcseméret szerinti eloszlást, a fajlagos felületet), vizsgálhatók a diszkontinuum mechanikai problémái, és a módszer a szemcseáramlásokhoz és a tömeg mozgásához is használható. A hátrány az, hogy a kohézió egyes formázóanyagok – amilyen a bentonit – fontos tulajdonsága, bonyolult folyamat és nem része ennek a modellnek [5]. Ezenkívül ezek a modellek hosszú számítási időket és



1. ábra. Paraméterek a forma használhatóságának a meghatározásához

időt rabló mintaépítést igényelnek.

A kontinuum mechanikus megközelítéséhez tartozó módszerek egy alternatívája a végeselemes módszer (finite element method – FEM). Ezek a modellek nagy rugalmasságot mutatnak a kontinuummechanikában, alkalmasak a nem-linearitásra, inhomogenitásokra és anizotrópiákra, valamint a csatolásra. Ezenkívül a számítási idők jelentősen rövidebbek a DEM módszerhez képest. Ennek a módszernek az a hátránya, hogy nem veszi számításba a homok fizikai tulajdonságait. A kohézív-súrlódó anyagokra alkalmazott kontinuummechanikai elvek alapján két fő „anyagmodell” határozható meg:

1. anyagmodell az elaszticitási elmélet szerint és
2. anyagmodell a plaszticitás szerint.

Az elasztoplaszticitás széles elterjedt koncepció a különböző műszaki anyagok mechanikai viselkedésének a modellezéséhez. Gyakran talajokhoz is alkalmazzák, és a különböző bonyolultságú elasztoplasztikus talajmodellek széles választéka létezik. Az elasztoplaszticitás alapelve az, hogy a feszültségi és a deformációs arányokat a (3) egyenlet szerint elasztikus és plasztikus részekre osztják:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{\text{elas}} + \varepsilon_{ij}^{\text{plas}} \quad (3)$$

A formázóhomok feszültség alatt határozott nem-lineáris viselkedést mutat. Ez a nem-lineáris feszültségi-deformációs viselkedés a fejlettség különböző szintjein modellezhető, ahol a modellparaméterek száma a növekedő komplexitással nő. A

jól ismert Mohr–Coulomb-modell (MC-modell) (4) és a Drucker–Prager-modell úgy tekinthető mint a valós talaj, azaz az agyagkötésű formázóhomok viselkedésének első rendű megközelítése. Ez az elasztoplasztikus modell öt bemenő alparamétert igényel: az E Young-modulust; a ν Poisson-együtthatót, a c kohéziót, a φ súrlódási szöveget és a ψ tágulási képességet.

$$c + \sigma_m \tan \varphi - \tau = 0 \quad (4)$$

ahol a τ – nyírófeszültség és a σ_m – átlagos feszültség.

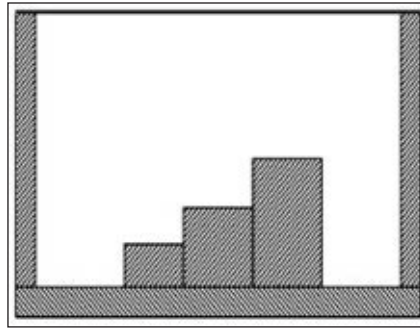
A formáknak rendszerint bonyolult geometriája, amely a tömörítés különböző fokait generálja, és így különböző sűrűségi értékekhez vezet. Az ilyen területek sűrűségének a meghatározásához a formát rendszerint szét kell roncsolni, ami kihat a mért sűrűségi értékekre. A formán belüli sűrűségeloszlás pontos adatainak felvételéhez egyik eszköz az ipari komputeres tomográfia (iCT = industrial computer tomography).

A kísérleti eredmények összehasonlítására és a szimulációs adatok érvényesítésére, a formák gyártásához formázószekrényt (100 mm x 70 mm x 80 mm) és mintát (2. ábra) készítettek [10]. A sűrűségeloszlás változásai a különböző mintageometriák következményei a formán belül, amelyek a formázóhomok elmozdulását is eredményezik. A formázóhomok tömörítés alatti elmozdulásának a megfigyelése céljából fémpor (kobaltpor: >8,0 g/mm³) rétegeket helyeztek el a formázáskor. A fémpor és a formázóhomok közötti sűrűségkülönbség következtében világosan

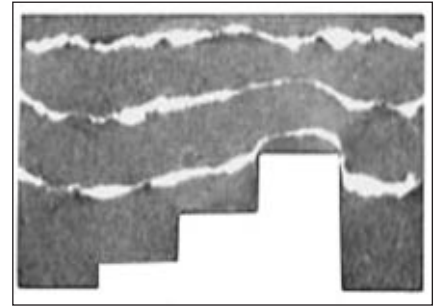
megkülönböztethető a formázóhomok elmozdulása a különböző zónákban (3. ábra). A formaszekrény fala és a formázóhomok közötti külső súrlódás hatása is megfigyelhető a rétegek kis elmozdulásai révén a forma szélénél.

A felső részben, egy helyen a formázóhomok nagyobb sűrűségét észlelték, mint a 4. ábra és az 1. táblázat mutatja. Ez azért lép fel, mert a formázóhomok folyását a minta meggátolja, ami a sűrűség növekedéséhez vezet. A forma alsó részében a sűrűség kisebb. Mivel a formaszekrény nem szimmetrikus, a formázóhomok folyása a formaszekrény szélesebb részeiben jobb, mint a szűkebb részekben, ami különböző sűrűségi profilokhoz vezet a forma alsóbb részében.

A feszültségeloszlás FEM-szimulációját a fentebb bemutatott mintával azért futtatták, hogy lehetővé tegyék az elméletileg meghatározott formasűrűség és feszültség összehasonlítását a valós mérésekkel (5. ábra). A szimuláció peremfeltételei ebben a példában: formaszekrény (100 mm x 70 mm x 80 mm), nyomás: 1 MPa és felette, kohézió: 0,070 N/mm², belső súrlódási szög: 220, tágulóképességi szög: 70.



2. ábra. Formaszekrény a mintával



3. ábra. A forma központi iCT keresztmetszete és a fémporréteg függőleges elmozdulása

1. táblázat

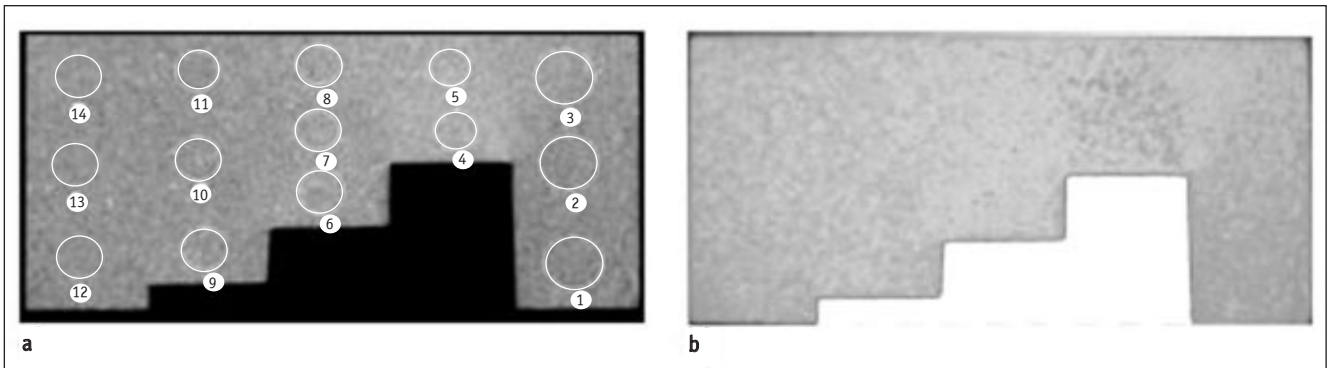
Mérési pontok	1	2	3	4	5	6	7
Valódi sűrűség (g/cm ³)	1,4	1,44	1,53	1,61	1,62	1,55	1,55
Mérési pontok	8	9	10	11	12	13	14
Valódi sűrűség (g/cm ³)	1,56	1,49	1,48	1,48	1,45	1,46	1,48

Új mérőkészülékek

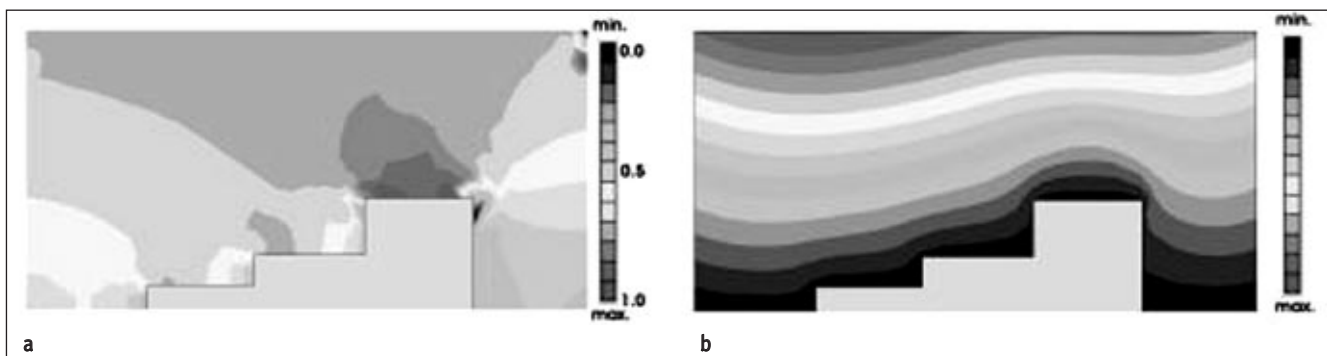
Az újonnan kifejlesztett érzékelőket a 6. ábra mutatja. Az érzékelési eljárás működési elvét a szabadalomban [11] írták le. Az SP-P érzékelő csak a sajtoló- vagy a fúvó-sajtoló eljárásban használható. Viszonylag kicsi, és DISAMATIC gépekben alkalmazható. Ez a nagyon kompakt érzékelő a 6a. ábrán látható. A mérete

Ø22x23 mm. Az LP-I érzékelőnek egyetemesebb a konstrukciója, ütő- és air-impact sajtolásnál is használható a sajtoláson és a fúvó sajtoláson kívül. Az átalakító kompenzálni tudja a légnyomás hatását az érzékelőre a fúvó vagy az ütő formázás során. Az LP-I érzékelő azonban valamivel nagyobb, mint az SP-P. Ez Ø22x27 mm-es, és a 6b. ábrán látható.

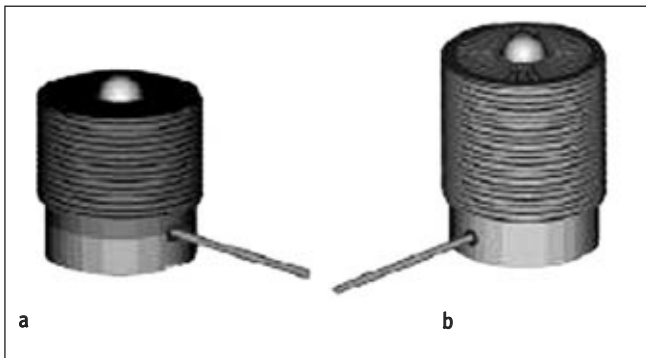
A 7. ábra mutatja az érzékelő mintalap-



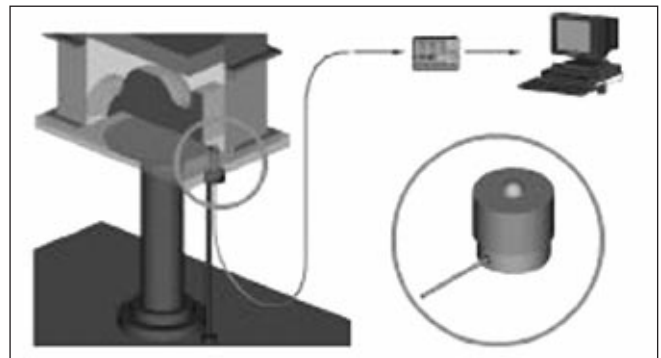
4. ábra. iCT keresztmetszet (a) és a sűrűségeloszlás utáni képfeldolgozás (b) a formában



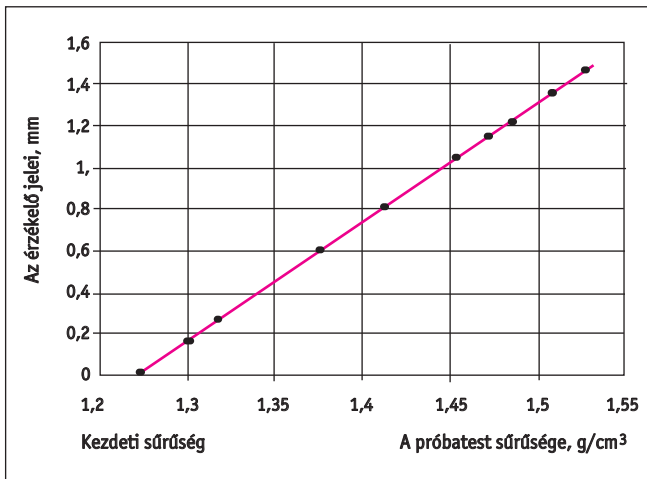
5. ábra. A formázóhomok feszültség- és sűrűségeloszlásának a szimulációja a – a sűrűség eloszlása, b – a formázórészecskek függőleges elmozdulása



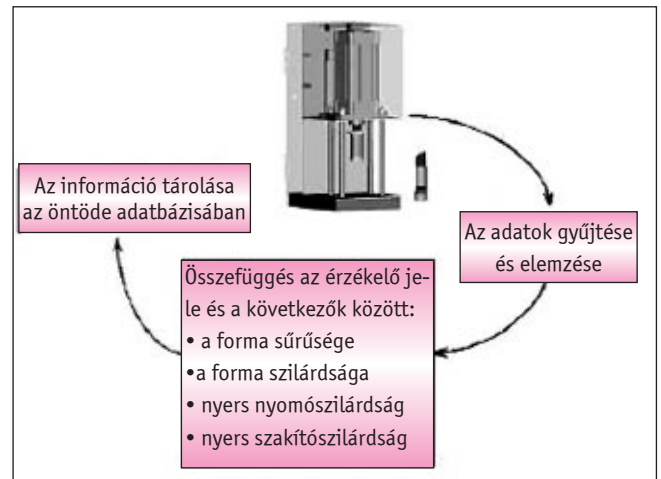
■ 6. ábra. Új mérőkészülékek. a – SP-P érzékelő, b – LP-I érzékelő



■ 7. ábra. Vázlat az érzékelő mintalapba való szereléséről



■ 8. ábra. Az érzékelő jelei a forma sűrűségének a függvényében



■ 9. ábra. A kalibrálási műveletek vázolata

ba szerelésének és a megfigyelő készülékeknek a vázlatát.

Erre a célra különleges átalakítókat fejlesztettek ki. Ezeket a mintalapba integrálják úgy, hogy a lap felületéből csak az érzékelő gömbje áll ki. A forma tömörítése során a mozgó formázóhomok által eredményezett erőt az adatgyűjtő rendszer rögzíti. Az érzékelő eredeti jele egyenértékű a gömb alakú érzékelő elmozdulásával a tömörítés alatt. A mérésekhez a gyártásban lévő homokból vett, 38,8%-os tömöríthetőségű, szabványos nyersformázó próbatesteket használtak. A próbatesteket a laza formázóhomok egyenlő mennyiségeiből készítették. A tömörítő nyomást 0,25 MPa-ról 2,00 MPa-ra növelték, 0,25 MPa-s lépésekben. Az érzékelt értékek és a próbatest sűrűsége között lineáris összefüggés van (8. ábra).

Kalibrálás

Ha az új módszerrel különböző formatulajdonságokat kell mérni, ismerni kell a kölcsönhatásokat e tulajdonságok és a jel között. Az érzékelőt ezért kalibrálni kell.

Az érzékelő kalibrálásához vizsgálati próbatesteket kell készíteni az adott formázóanyagból. Ezeken a próbatesteken méri az érzékelő jelzéseit és a forma tulajdonságait. A kalibrálási eljárás vázlatát mutatja a 9. ábra. Az összegyűjtött adatokat számítógépi szoftver felhasználásával dolgozzák fel. Az eredményeket az adott formázóanyaghoz viszonyítják, és adatbázist építenek fel. Az adatátvitel kábellel vagy telemetrikus rendszerrel valósítható meg.

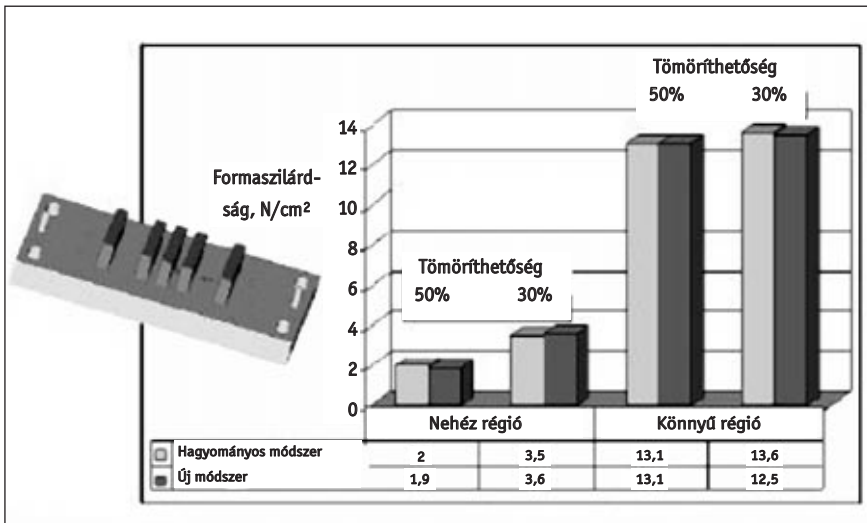
Az érzékelőket az öntődékben különböző célokra lehet használni:

- a formázógépek optimális beállítása állandó minőségű termék előállítására,
- a formaminőség folyamatos ellenőrzésére a tanúsításhoz,
- a mintalap és a szekrény közötti kiemelési eljárás vizsgálatára,
- a formázó eljárás és a minőségbiztosítás folyamatos tökéletesítésére.

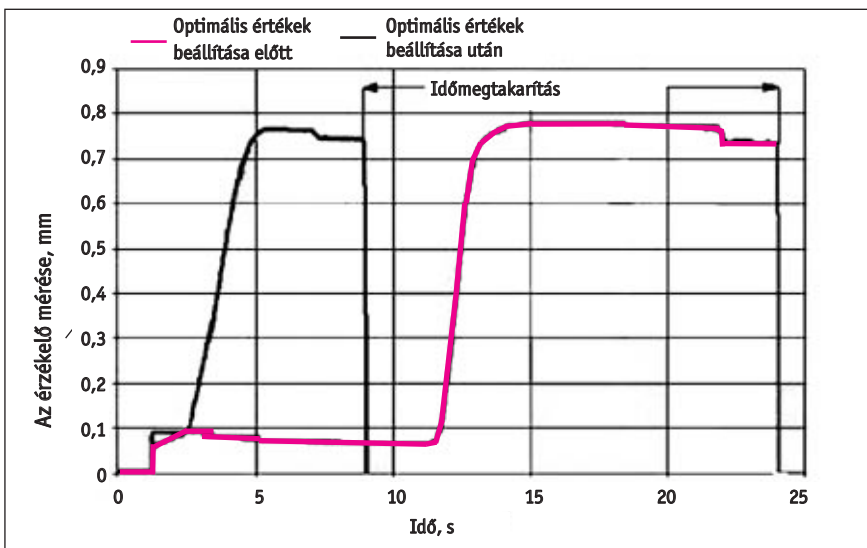
A szabványos próbatestekkel nyert kalibrálási eredmények érvényességét valós formákra a tényleges formagyártás során, különböző formázó eljárásokkal, többször vizsgálták. Bizonyították, hogy a próbatesteken kapott eredmények alkal-

mazhatók a tényleges formázó eljárásokra. A 10. ábra az ilyen kísérletek egyikét mutatja. A mérésekhez a gyártás nyersformázó keverékét használták. A mérések előtt az érzékelőket megfelelően kalibrálták. Az érzékelőket a mintalapra szerelték a formázás számára különböző nehézségi fokú helyeken. A mélység és a szélesség aránya az első helyen 3:1 volt (nagyon nehéz), míg a másodikon 1:1 (mérsékelt nehéz).

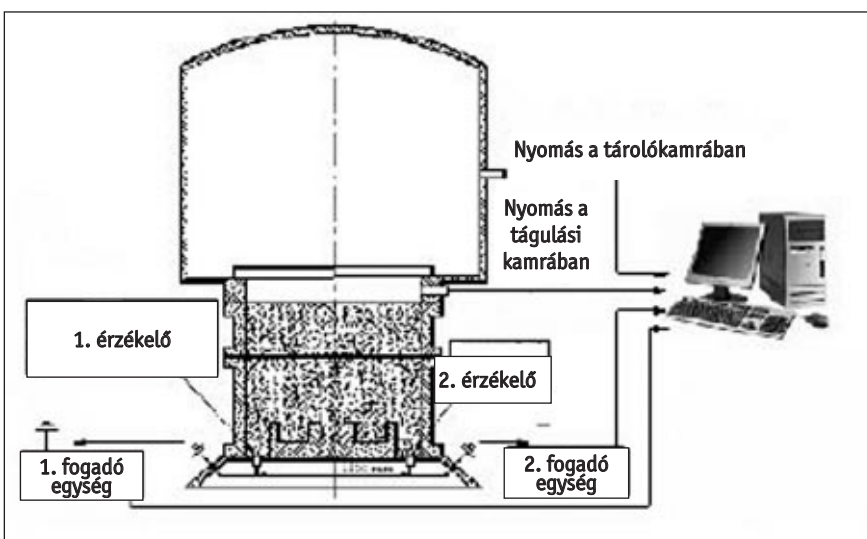
50 és 30%-os tömöríthetőségi értékeknél végeztek méréseket. A tömöríthetőségi értékeket manuálisan vitték be az adatgyűjtési csomagba. Formákat állítottak elő sajtolással. Az érzékelők által adott értékek kettős ellenőrzése céljából a formaszilárdságot manuálisan is mérték ugyanott, formázóhomok-vizsgáló műszerrel. A két módszerrel mért adatok jól egyeztek. Levonható tehát a következtetés, hogy a szabványos próbatestekkel nyert kalibrációs értékek gyártó környezetben is hasznosíthatók. Hasonló kísérleteket ismételték meg más formázási technológiákkal is, ugyanilyen jó eredményekkel.



■ 10. ábra. A formaszilárdság mérése közvetlenül a formán



■ 11. ábra. A fűvás és a sajtolás idejének optimalizálása a tömörítés alatt (időmegtakarítás: 15 s/forma)



■ 12. ábra. Ütveformázógép kísérleti elrendezésének vázlata

Optimalizálás Air-impact és sajtoló formázógép

Air-impact és sajtolás művelet sorát alkalmazó formázógép tömörítési paramétereit optimalizálták. Air-impact formatömörítést végeztek 6 bar nyomású tárolókamrával, a szelepet 0,6 sec-ig tartották nyitva. Ezt követően a formát sajtolással, 1 MPa nyomással tömörítették.

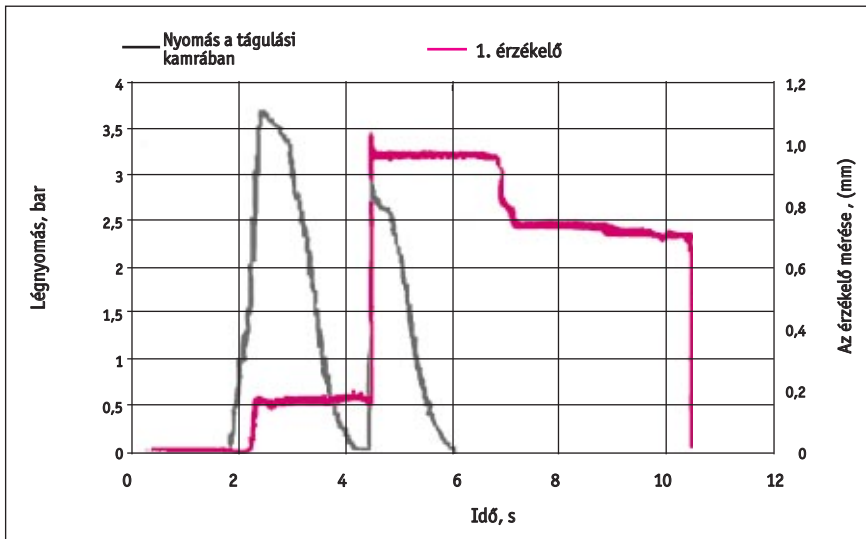
A 11. ábra a formázóhomok sűrűségének a mérését mutatja (piros görbe), a formázógép alapbeállításával. A mérést a forma elég nehezen tömöríthető helyen végezték. Ezen a helyen a mélység/szélesség arány 2,5:1 volt.

Ez a mérés érdekes jelenséget tár fel: A tömörödés nagy részét nem a fűvás, hanem a sajtolás eredményezi. A rövid tömörödési idő a fűvás alatt azt jelenti, hogy a formázóhomok azonnal nagy mértékben tömörödött. Ez egyensúlyt eredményezett a homokszemcsékre ható erők és a formázóanyag tömörítéssel szembeni ellenállása között, még mielőtt a nyomás a tágulási kamrában elérte volna a maximumát. A szelep zárása utáni légáram nem okozott semmilyen mérhető tömörödést, így a sajtolós tömörödés dominált. Ezen felül arról számoltak be, hogy a sajtolás 10 s után kezdődött (lásd: bordó görbe). A termelékenység növelése céljából a tömörítést 1,5 s-mal korábban kezdték (fekete görbe). A sajtoló tömörítés utáni idő is csökkenthető, így egy forma gyártási ideje 9 s-ra csökkenthető. A formák minősége változatlan marad.

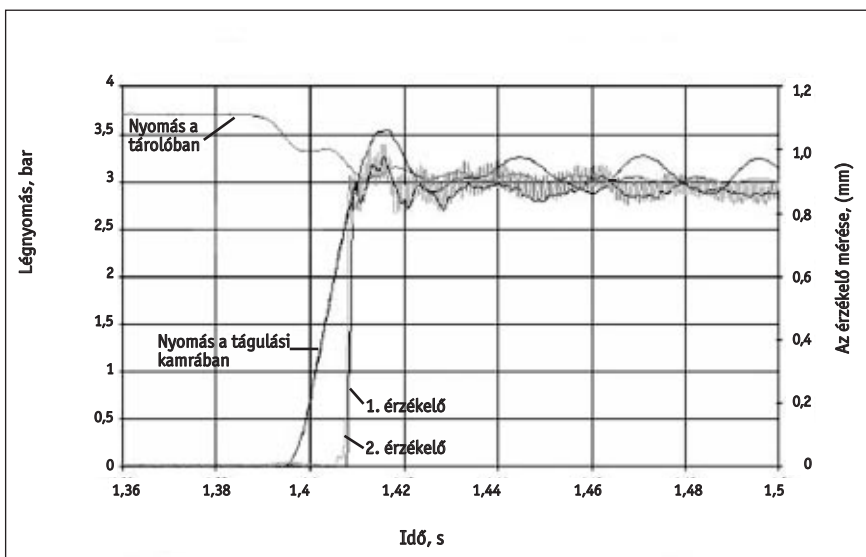
Ütveformázógép

Az érzékelőket az ütveformázó technológia optimális paramétereinek beállítására is használták. A 12. ábra mutatja a kísérleti elrendezést. A szimmetrikus mintalapon két szimmetrikusan elhelyezett szenzor (1 és 2) rögzítette a homok mozgása által eredményezett erőket a tömörítés során. A mérések a tömörítő egységnek a formázószekrényhez való csatlakoztatásával kezdődtek, és 10 s-ig tartottak, ami magában foglalta az egész ciklust, a tömörítéssel és a kiemeléssel együtt. A sűrűség változásán kívül rögzítették a légnyomás értékeit is a tároló és a tágulási kamrában.

A formázóhomok tömörítését egymást követő előütéssel és a fő levegőütéssel hajtották végre. A 13. ábra bemutatja a



■ 13. ábra. Mérési felvétel a formázóhomok egymást követő levegő-előütéssel és fő levegőütés-sel végzett tömörítéséről



■ 14. ábra. Mérési felvétel a formázóhomok csak fő levegőütéssel végzett tömörítéséről

formázóhomok tömörítését és a légnyomás gradienseit a tágulási kamrában.

Nyilvánvaló, hogy az előütési gradiens nem elégséges a formázóhomok hatékony tömörítéséhez. A hatékony tömörítést csak a fő ütés hatása idézi elő.

Ez okból a tömörítés technológiáját megváltoztatták. Az előütést kikapcsolták, és a tömörítést csak a fő ütéssel érték el (14. ábra).

A szelep nyitása után a nyomás a tágulási kamrában gyorsan nő, a tárolókamrában enyhén csökken, míg a nyomások kiegyenlítődnek. A formázóanyag gyorsul a mintalap felé, és azután tömörödik a minta felületénél. Látható, hogy a tényle-

ges tömörödés gyorsan befejeződik. A nyomás oszcillációi a tágulási kamrában és a sűrűségi görbéken az ütés után azonnal lecsillapulnak. Ezek a lengések nem okoznak változást a formázóanyag sűrűségében. Látható, hogy mindkét érzékelőnél egyidejűleg lépnek fel. A formák minősége nem változik.

Összefoglalás

A fentebb leírt mérőkészülékekkel az öntödei személyzetnek először van lehetősége megfigyelni a nyersformázó homok tömörödését a formázás alatt. Ez lehetővé teszi a formázógép paramétereinek az

adott öntvényhez való pontos beállítását. A formázóberendezés optimális értékekre való beállítása segít csökkenteni az energia- és az anyagfelhasználást, növeli a termelékenységet, és ennek eredményeként csökkenti a gyártási költségeket.

Irodalom

- [1] E. Flemming – W. Tilch: Formstoffe und Formverfahren, p. 448, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.
- [2] J. Bast – A. Malaschkin – A. Kadauw: Gießerei 2005, 8, 23-27.
- [3] W. Tilch: Gießerei-Praxis 2004, 2, 53-62
- [4] A. Kadauw – J. Bast – T. Aydogmus: Statusbericht des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, 2006, 259-267
- [5] F. Zhou: No. 31, RWTH Aachen, 1997, 244.
- [6] R. Brinkgreve – B. Plaxis: Plaxis catalogue version 7, part 3: Material models manual. 1-1 – 4-11, 1998 Netherlands.
- [7] H. Makino, Y. Maeda – H. Nomura: CIATF Technical Forum Düsseldorf, 1999, 144-151.
- [8] P. A. Cundall: Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, France, 1970 Paper II-8.
- [9] Z. Yifei – W. Junjiao: J. of American Foundry Society 2003, 3, 1-4.
- [10] A. Kadauw – J. Bast – D. Fiedler – I. Betchvaia – H.C. Saewert: Computer simulation of squeeze moulding and validation of results using Industrial Computer Tomography (ICT), Archives of Metallurgy and Materials, ISSN 1733-490, Vol. 52, 3/2007 Polen.
- [11] DISA Industrie AG; J. Bast – Malaschkin, Andrej: Sensor zur Messung der von der Sandbewegung hervorgerufenen Kraft während der Verdichtung tongebundener Formstoffe bei der Herstellung von Gießformen, Europäisches Patentamt, 22.02.2003, Aktenzeichen: 03706557.0-2122-EP030-1820

(Fordítás: Szende Gy.)