

Gáztömör öntvény impregnálásának modellezése

Modelling the impregnation of a pressure-tight casting

RÉGER MIHÁLY , HORVÁTH RICHÁRD , FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA , RÉTI TAMÁS 

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1034 Budapest
E-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Számos nyomásosan öntött alumíniumöntvény alkatrész esetében fontos a gáztömörség, de az így gyártott alumíniumöntvényekben kialakuló porozitás a megmunkálásoknak köszönhetően több öntvényfelületet összekötő átmenő üregrendszerre alakulhat. Az így létrejött potenciális szivárgási útvonal folytonossági hiányok sorozataként fogható fel, amelyek mérete tág határok között változik, és ahol különböző térfogatú üregeket kisebb keresztmetszetű csatornák kötnek össze. Bár a gáztömörség biztosítására alkalmazott vákuumimpregnálás robusztus technológia, az átmenő üregrendszerek az impregnálást követően is okozhatnak szivárgást. A dolgozat az összetett geometriájú folytonossági hiányok impregnálhatósági kérdéseivel foglalkozik. Az összetett üreggeometria elemi része egy üregből és egy kapilláriscsatornából áll. A kapilláriszakasz korlátozott áteresztőképességét a Hagen–Poiseuille-egyenletre épülő matematikai modellel becsültük. A számítási eredmények azt bizonyítják, hogy a kapillárisszakaszt is tartalmazó üreg feltöltésének mértéke alapvetően az üreg geometriai jellemzőinek, ezen belül is elsősorban a kapilláris sugarának függvénye. Ha az üregrendszer 28 μm alatti átmérőjű szakaszt is tartalmaz, akkor az impregnálás nem feltétlenül biztosítja az öntvény gáztömörségét. Egy adott térfogatú, a felülethez adott hosszúságú kapillárisszakaszon keresztül kapcsolódó üreg impregnálása a kapilláris sugara függvényében háromféle eredménnyel zárulhat: bizonyos kapillárisugár felett teljes telítés történik, egy adott határérték alatti kapillárisugárnál csak maga a kapilláris fog gyantát tartalmazni, a két határérték között pedig az üreg részleges impregnálódása várható a kapillárisszakasz kitöltése nélkül.

Kulcsszavak: gáztömörség, impregnálás, porozitás, kapilláris, Hagen–Poiseuille-egyenlet, modellezés

Pressure-tightness is important for many die-cast aluminium castings, but the interconnected porosity formed in the aluminum alloy high-pressure die castings (HPDC) can form a network connecting several surfaces of the casting, especially as a result of machining after casting. The resulting potential leakage path can be imagined as a series of discontinuities varying in size over wide limits, where voids of different volumes are connected by channels of smaller cross-section. Although vacuum impregnation is often used to ensure pressure-tightness is a robust technology, cavity systems through the casting can still cause leakage after impregnation. This study addresses the issues of the impregnation of discontinuities with a complex geometry. The elementary part of a complex cavity geometry consists of a cavity and a capillary channel. We estimated the limited permeability of the capillary section using a mathematical model based on the Hagen–Poiseuille equation. The calculation results prove that the degree of filling of the cavity with a capillary section is basically a function of the geometrical characteristics of the cavity, primarily the radius of the capillary. If the cavity system also contains a section with a diameter of less than 28 μm , impregnation does not necessarily ensure the gas tightness of the casting. Depending on the radius of the capillary, the impregnation of a cavity of a given volume and connected to the surface through a capillary section of a given length can produce three different results. Above a certain capillary radius, filling is complete, below a certain capillary radius only the capillary itself will contain resin, and between the two limit values, the partial impregnation of the cavity is expected but the capillary section is not filled.

Keywords: gas tightness, impregnation, porosity, capillary, Hagen–Poiseuille equation, modelling

1. Bevezetés

A szivárgást okozó üregrendszer jellemzői

Az alumíniumöntvények dermedése során a fajtérfogat és az alapfém gázoldó képességének csökkenése porozitást eredményez. Egy minőségi öntvény porozitása olvadékezelési és öntéstechnikai eljárásokkal 0,5–1% alatti értékre mérsékelhető [1–3]. Ezek a dermedés során kialakuló gázzárványok a későbbiekben a kész alkatrész számos tulajdonságára vannak kedvezőtlen hatással [4, 5].

A porozitás a gázzárványokra jellemző gömbszerű, valamint a zsugorodás eredményeként kialakuló szabálytalan geometriájú üregek halmazának tekinthető. A minőségi, például gáztömörségi követelménnyel gyártott öntvényekben a mikro-CT [6–10] és metallográfiai [11–14] vizsgálat alapján az egyedi üregek egyenértékű átmérője néhány μm és néhány tized mm között mozog. Egy 1 mm^3 -es térfogatrészben a mérések alapján esetenként 50–70 üreg is azonosítható. A folytonossági hiányok méreteloszlása lognormális jellegű függvénnyel írható le, a maximumérték, vagyis a legtöbb üreg a $10\ \mu\text{m}$ -es nagyságrendbe esik [9, 10, 15]. Az üregek lehetnek teljesen különállóak, de össze is kapcsolódhatnak. Az üregrendszerben a valós kapcsolódási hálózat felderítése mind roncsolásos, mind roncsolásmentes módszerrel problematikus, mivel kis keresztmetszetű, a CT-felbontás alatti méretű kapillárisjellegű csatornák bonyolult térbeli hálózatáról van szó [9, 11, 16]. Mindezek alapján a porozitási üregrendszer kisebb-nagyobb szeparált és egymással összefüggő folytonossági hiányok erősen változó keresztmetszetű bonyolult hálózatának tekinthető.

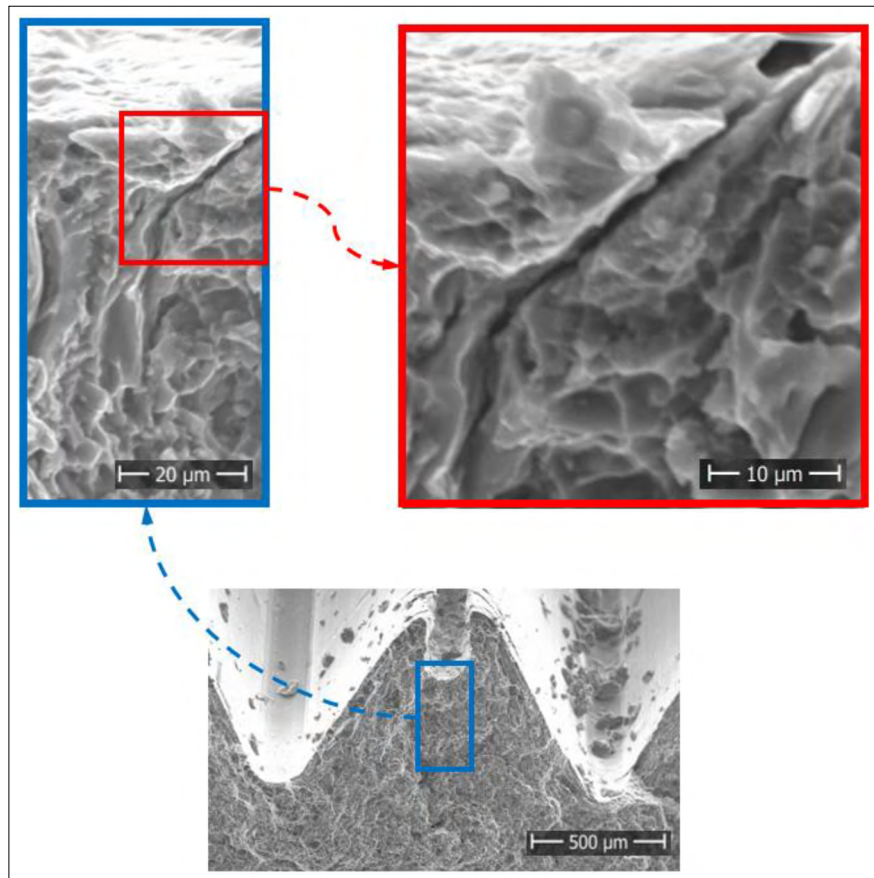
A zsugorodási üregek előfordulása a nagyobb falvastagságú szelvényekben valószínűbb, és általában itt adódnak a legnagyobb üregméretek is [17]. A porozitás szempontjából kritikus térfogatrészekben a tapasztalatok szerint előfordulhatnak néhány tized cm^3 térfogatú üregek is [18]. Az öntvény külső, az öntött felülethez közel eső része a gyors hűlés és nagy hőmérsékleti gradiens miatt általában tömörebb szerkezetű, így a zsugorodási üregek az öntött felszínre történő kifutá-

sa kevésbé valószínű. (A bifilm oxidhártyán keresztül történő szivárgási jelenséget ebben a tanulmányban nem vizsgáljuk.) Egy eredetileg zárt zsugorodási üreg elágazásai, nyúlványai elérhetnek az öntvényfelület közelébe, és a felület megmunkálását követően az üreg nyitottá válhat. A forgácsolással kimunkált furatok, menetek belső felületei elmenteszhetik a porozitási üregrendszerek nyomvonalait, ezért a szivárgás gyakran az anyagba később munkált furatokon keresztül valósul meg. A végső üreggeometriát befolyásolja a megmunkálás okozta képlékeny alakváltozás is, aminek eredményeképpen a csatornák alakja, jellemző átmérője megváltozik. A képlékeny alakváltozás, különösen az alumíniumöntvények esetében gyakran alkalmazott menetmángorlás, a felületközei vagy furatközei üregrész nyomvonalát és keresztmetszetét is erőteljesen befolyásolja.

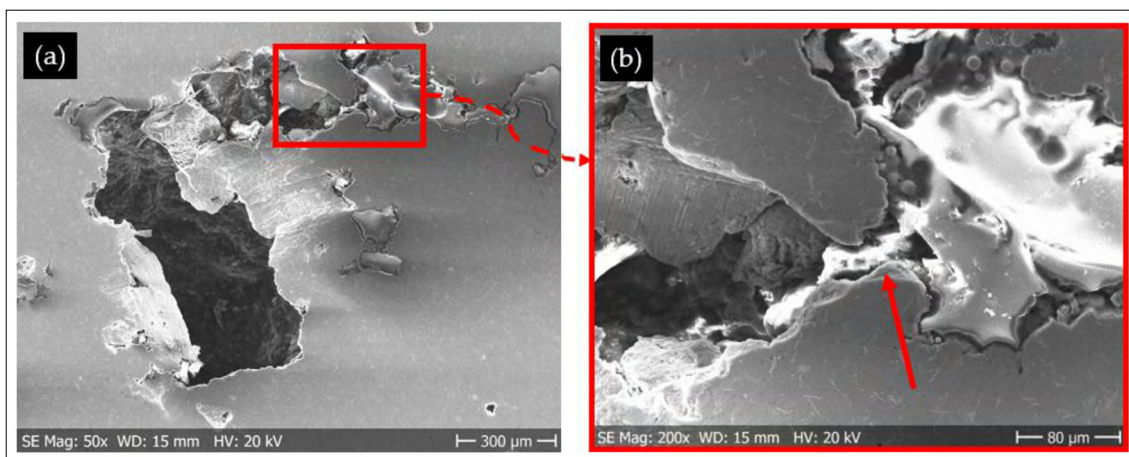
Erre mutat tipikus példát az 1. ábra, amelyen egy fúrással elvágott zárvány fut ki menetmángorolt profilra.

Az impregnálás célja és lépései

Az impregnálás hatékony, robusztus technológia, amelynek alkalmazásával az esetek döntő többségében az öntvények megfelelő gáztömörsege biztosítható. Ennek ellenére előfordulnak szivárgások, ezért



1. ábra. Fúrással elvágott zárvány a menetmángorolt profilon



2. ábra. Impregnáló gyantával részben feltöltött üreghendszer (a nagyított felvételen a jobb oldali üregrész telítődött, a bal oldali nem, a két üregrészt egy gyantával feltöltődött kapillárisjellegű csatorna köti össze)

a gáztömörégi követelménnyel gyártott szerkezetek (pl. nagy sorozatban gyártott nyomásosan öntött alumíniumalkatrészek) szerelősorán általában héliumos szivárgásellenőrzést végeznek a szivárgó öntvények kiszűrése érdekében.

Az impregnálás célja az öntvényfalban lévő nyitott üregek metakrilátalapú impregnálógyantával történő feltöltése, ezáltal az üreghendszer gáztömör lezárása. Az öntvényeket teljesen készremunkált állapotban autoklávban impregnálják. A folyamat főbb lépései a következők [19, 20]: 1. vákuumozás; 2. műgyantába bemerítés vákuum alatt; 3. légköri nyomás alkalmazása az impregnáló gyanta folyadékfelszínén; 4. kiemelés; 5. mosás hideg vízzel; 6. mosás forró vízzel, ez utóbbi közben megtörténik a gyanta kikeményedése is 90–95 °C környékén.

Az impregnálási folyamat vákuumozással kezdődik, amelynek célja a nedvesség és a nyitott üregekben lévő levegő eltávolítása, illetve nyomásának lecsökkentése. Ideális esetben a vákuumozás végén az üregben maradó gáz nyomása azonos a vákuumozás nyomásszintjével. Az üreghendszer geometriai jellemzői, áteresztőképessége és térfogata függvényében nem feltétlenül történik meg a nyomások kiegyenlítődése, a környezetinél nagyobb nyomás maradhat az üregben. A 3. lépés során az impregnáló gyantával való telítési folyamat sikerességének alapfeltétele a megfelelő vákuumszint elérése az 1. lépésben, mivel az üreg impregnálószerrel való kitöltésének hajtóereje – a kapilláriserőn kívül – a külső és az üregben létrehozott nyomás különbsége. Az üreghendszer gyantával való telítődése a nyomáskülönbség mellett a rendszer áteresztőképességétől is függ. A gyanta áramlásának lelassulását, vagyis az áramlási ellenállás növekedését leginkább az üreghendszerben lévő szűk keresztmetszetek okozhatják. A telítődés addig folytatódik, míg a külső és belső nyomások kiegyenlítődnek, vagy letelik a technológiában rendelkezésre álló idő és az öntvényt kiemelik a folyékony gyantából.

A komplex geometriájú üreghrendszerek impregnálási hatékonyságára vonatkozóan kevés a rendelkezésre álló, megbízható szakirodalom. Irányított pórusszerkezetű szinterelt fémötvözeteken végzett laboratóriumi impregnálási kísérletek szerint [21] az 500 µm alatti üregek nagy valószínűséggel, a 100 µm alatti méretű pórusok pedig minden esetben telítődnek gyantával. Valós öntvényekben a 100 µm alatti átmérővel jellemezhető üregeken keresztül is történhet szivárgás, éppen ezért szükséges az üzemi vizsgálatok során a fokozottan érzékeny, héliumdetektálás alapuló eljárás alkalmazása [22]. Hangsúlyozandó, hogy a fenti megközelítéstől eltérően a szivárgást okozó átmenő üreg általában nem jellemezhető egyetlen átmérőértékkel, mivel az üreg keresztmetszete a szivárgási útvonal mentén tag határok között változik.

Az impregnálás eredménye, vagyis hogy mennyire telítődtek gyantával az üregek, szintén problematikus az üreghendszer méretei és összetettsége miatt. Erre egy példa a 2. ábrán lévő, impregnáló gyantával részben feltöltött üreghendszer. A jobb oldali üreg telítődött, a bal oldali nem, feltehetően a nyílalt jelölt kapilláris kicsi áteresztőképessége miatt. Soga és munkatársai [18] az üreghendszert kitöltő impregnálógyanta kimutatását és vizsgálatát tűzték ki célul komputertomográfiával. Az eljárás az impregnálógyanta, az alumíniummátrix, valamint az üregekben lévő gázok okozta kontrasztkülönbség detektálásán alapul. A beszámoló szerint egyszerű geometriájú öntvényekben a nagyobb, több mm-es üregek gyantával való kitöltöttsége megítélhető, de a kisebb méretű (100 µm alatti) folytonossági hiányokban a gyanta jelenléte – a kicsi keresztmetszet és bonyolult térbeli geometria miatt – nem azonosítható. UV-megvilágítással végzett metallográfiai, valamint pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal az impregnált öntvény síkmetszetein a gyantát tartalmazó és kitöltetlen üregek feltárhatók, de nem dönthető el egyértelműen, hogy egy kitöltetlen üreg része-e a szivárgási útvonalnak vagy sem [23].

A jelen tanulmány arra keres választ, hogy egy adott nyitott vagy átmenő üregrendszer geometriája hogyan befolyásolja az impregnálási folyamat megvalósulását, sikerességét. Kritikus helyzet elsősorban a felülethez kis keresztmetszetű csatornával csatlakozó üregrendszerek esetében lehet, mivel a csatornarendszer geometriája lecsökkenti mind a vákuumozás, mind az impregnálószerezrel történő feltöltés hatékonyságát. Alapvető tisztázandó kérdés, hogy az üregrendszer mely geometriai paraméterei esetén kell elégtelen impregnálási eredményre számítani.

2. Az impregnálási folyamat modellje

Geometriai modell

Az impregnálás sikerességét, hatékonyságát leginkább az üregrendszerben lévő szűk keresztmetszetű szakaszok csökkenthetik le. Az egyenletesen kis keresztmetszetű csatornák kitöltése gyorsan megtörténik, de ha az öntvény belsejében nagyobb térfogatú üreg is van, akkor az impregnálásához szükséges anyagtranszportnak a korlátozott átteresztőképességű szakaszon keresztül kell megtörténnie. A vákuumozás és a folyékony állapotú gyantával való feltöltés időigényét a kis keresztmetszetű csatornában kialakuló áramlási ellenállás nagyban befolyásolja.

Az előzetes számítások tapasztalatai alapján akkor lehet kritikus egy üregrendszer vákuumozása és telítési folyamata, ha az öntvényben létrejött nagyobb méretű belső üreg 20–30 μm alatti átmérőjű kapillárisjellegű csatornával csatlakozik az öntvény külső felületeihez, vagy – ami ezzel egyenértékű helyzet – a külső légtérrel kapcsolatban lévő nagyobb méretű folytonossági hiányhoz. A 3a. ábra egy, a megmunkált felületekhez vékony csatornákkal kapcsolódó belső üreg vázlatát és geometriai modelljét ábrázolja. A matematikai modellezéshez, vagyis a kapillárison keresztül megvalósuló vákuumozás és telítés dinamikájának elemzéséhez elegendő a 3b. ábrán bemutatott egyszerűsített üregmodell vizsgálata.

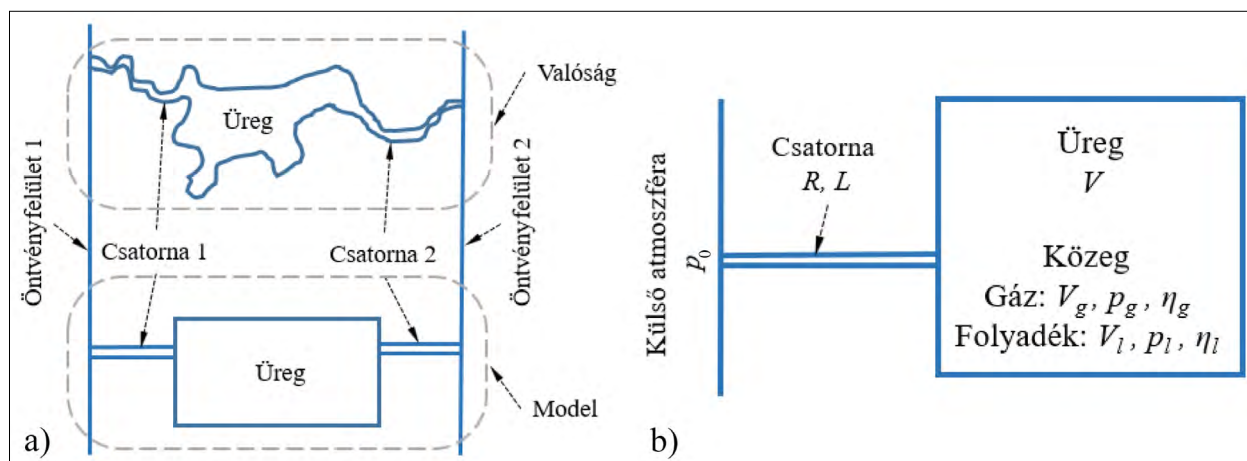
Az átmenő üregrendszer valóságban kialakuló összetett geometriája több, egymással összekapcsolt egyszerűsített üregmodellel írható le. Az ábrán az impregnálási folyamat szempontjából meghatározó paramétereket is feltüntettük, amelyek értelmezését a következő szakasz tartalmazza.

Matematikai modell

Az ebben a szakaszban ismertetett összefüggések mind a vákuumozás, mind a telítési lépésben kialakuló nyomásviszonyok leírására alkalmasak. A matematikai modell adott p_0 külső nyomásérték alkalmazása esetén a belső üregben kialakuló p gáznyomás időbeli változását határozza meg, valamint leírja a telítési viszonyokat a 3b. ábrán bemutatott egyszerű üreggeometria feltételezésével. A vákuumozási lépésben $p_0 < p$, és a V térfogatban csak gáz (levegő) van, így az üregben lévő gáz V_g térfogata azonos V -vel. Az infiltrációs műveletben $p_0 > p$, és az üreg V_g térfogatában gáz, a V_l térfogatban folyadék (gyanta) van, és teljesül a $V_g + V_l = V$ feltétel. Az eredmények közelítése véges időlépéses numerikus eljárással történt. A nyomásértékek időfüggésének meghatározását a folyamat dinamikájához illeszkedő elegendően kicsi Δt időlépés alkalmazásával szükséges elvégezni.

A modellben alkalmazott feltételezések és közelítések a következők: a kapilláris térfogata elhanyagolható az üreg térfogatához képest; a kapilláris feltöltődésének időigénye zérus; a kapillárisban lamináris áramlás alakul ki (a Reynolds szám: $Re < 2300$); az impregnáló gyanta összenyomhatatlan folyadék viselkedésű; a közeg (gáz, folyadék) η dinamikai viszkozitása független a nyomástól; a hőmérséklet a folyamat során nem változik.

Az állandónak tekintett jellemzők és az időlépésekben értelmezett változók a következők:



3. ábra. Egy átmenő üregrendszer vázlatát és modellje. a) Egy szivárgási útvonal vázlatát és modellje. b) Az egyszerűsített üregmodell elemei és meghatározó paraméterei

R a csatorna sugara (egyenletes keresztmetszet feltételezésével) [m];
 L az üreget a felülettel összekötő csatorna hossza [m];
 V az üreg térfogata [m³];
 p_g^n és ρ_g^n az üregben lévő V_g térfogatú gáz nyomása és sűrűsége az n -edik időlépésben [Pa] és [kg/m³];
 η a kapillárisban áramló közeg (gáz, folyadék) dinamikai viszkozitása [Pa·s];
 Δt az időlépés [s];
 m_g a gáz tömege [kg].

A folyamatban a független változó p_0^n , a külső térben uralkodó nyomás az n -edik időlépésben [Pa], a számítás eredménye p_g^{n+1} , vagyis az $n + 1$ -edik Δt időlépésben az üregben lévő gáz nyomása.

A külső atmoszféra p_0^n és az üregben lévő gáz mennyiség p_g^n nyomáskülönbségének hatására az R sugarú, L hosszúságú kapillárisban kialakuló I térfogatáram (gáz vagy folyadék) a veszteségeket is figyelembe vevő Hagen–Poiseuille-összefüggés alapján:

$$I^n = \frac{\pi(p_0^n - p_g^n)R^4}{8\eta L} \quad [\text{m}^3/\text{s}]. \quad (3.1)$$

A térfogatáram és a sűrűség szorzataként értelmezhető a kapillárisban megvalósuló M tömegáram az alábbiak szerint:

$$M^n = I^n \rho^n \quad [\text{kg}/\text{s}]. \quad (3.2)$$

A Δt időtartam alatt a kapillárison áthaladó anyagmennyiség Δm (gáz vagy folyadék) ebből adódóan a

$$\Delta m^n = M^n \Delta t = I^n \rho^n \Delta t \quad [\text{kg}] \quad (3.3)$$

összefüggéssel írható le. A vákuumozás szakaszában a (3.3) egyenlet szerinti gáztömegváltozás a $V_g = V$ állandó térfogatú üregben nyomáscsökkenést eredményez.

Bevezetve a konstans paramétereket tartalmazó K tényezőt, a vákuumozás szakaszában a következő összefüggéssel számítható az üregben lévő gáz nyomása:

$$p_g^{n+1} = p_g^n + K(p_0^n - p_g^n)p_g^n \Delta t, \quad (3.4)$$

ahol

$$K = \frac{\pi R^4 \rho_g^n}{8\eta_g L m_g^n} = \frac{\pi R^4}{8\eta_g L V_g}. \quad (3.5)$$

Az infiltrálás alatt a vákuumozás után az üregben maradó gáz anyagmennyisége (tömege) nem változik. Az üregbe a (3.1) egyenletnek megfelelő intenzitással folyadék (gyanta) áramlik, amely csökkenti a gáz térfogatát, így az üregben lévő gáz nyomása a $p_g V_g =$ konstans összefüggés alapján számítható.

Amennyiben a vákuumozás során a külső légtér p_0 nyomása állandó, akkor a belső üreg (3.4) egyenlettel kifejezett gáznyomásának változása az idő függvényében analitikus módon is meghatározható (lásd Appendix).

A Δt időlépés értékére minden esetben teljesül a

$$\Delta t \leq 0,01 (V_g/I^n) \quad [\text{s}] \quad (3.6)$$

egyenlőtlenség, amely azt fejezi ki, hogy egy időlépésen belül az üregből eltávozó vagy az oda érkező közeg térfogata nem haladhatja meg a gáz által elfoglalt térfogat 1%-át. Ezzel a feltétellel a numerikus számítás stabilitása biztosítható.

Az impregnálógyanta és a kapilláris kölcsönhatásából adódó p_c kapillárisnyomás a

$$p_c = (2\gamma \cos \Theta)/R \quad [\text{Pa}] \quad (3.7)$$

összefüggéssel határozható meg, ahol γ a gyanta felületi feszültsége N/m-ben, Θ pedig a gyanta nedvesítési szöge az alumíniumöntvény felületén.

3. A vákuumozás és a telítési folyamat modellezése

Technológiai paraméterek és anyagjellemzők

Az impregnálási folyamat vákuumozási lépésében az autoklávban az öntvényt körülvevő atmoszféra nyomása fokozatosan éri el a megkívánt vákuumszintet a vákuumszivattyúk teljesítményének függvényében. A modellszámításban feltételezhetjük, hogy a külső nyomás lecsökkentésének nincsen időigénye. Ennek megfelelően a folyamat első pillanatától a névleges külső vákuumszint $p_0 = 1000$ Pa értéke vehető figyelembe, míg az üregben lévő gáz p_g nyomása megfelel az atmoszferikus nyomásnak (100 000 Pa). A vákuumozás időtartama 10 perc, a levegő sűrűsége atmoszferikus nyomáson $\rho_g = 1,2$ kg/m³, dinamikai viszkozitása $\eta_g = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.

A vákuumozást követően az impregnálás telítési folyamatában az öntvényeket bemeztik az autoklávban szintén vákuum alatt lévő impregnáló folyadékba, majd az autoklávot nyitják, így az impregnáló folyadék felszínén az atmoszferikus nyomás érvényesül. A folyadékfelszínre ható nyomás a vákuumozott üregekbe kényszeríti az impregnálószert, a technológiában általában az erre rendelkezésre álló idő 6 perc. A számításban az Ultraseal Rexeal 100 impregnáló gyanta tulajdonságait [24] vettük figyelembe a következő jellemzőkkel: dinamikai viszkozitás $\eta_l = 0,0045$ Pa·s; sűrűség $\rho_l = 920$ kg/m³; felületi feszültség $\gamma = 0,031$ N/m; saját mérés alapján a gyanta nedvesítési szöge alumíniumöntvény tisztított felületén $\Theta = 10^\circ$.

A telítési szakasz végén az öntvényeket kiemelik az impregnálószerből, így továbbra is atmoszferikus külső nyomás hat a rendszerre, de a folyadékutánpótlás (gyanta) megszűnik. Az impregnálási művelet

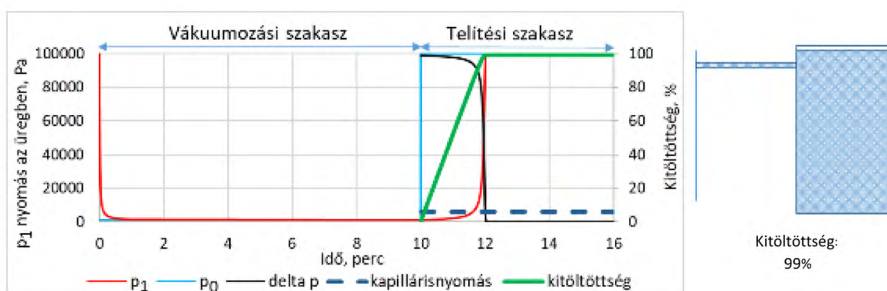
utolsó szakasza a hidegvizes, majd forróvizes mosás. Ez utóbbinak célja az öntvények, illetve az impregnálószer kikeményítési hőmérsékletre (mintegy 90–95 °C) való melegítése. Mindkét mosási művelet az impregnálószernek az öntvény felületeiről való eltávolítását is szolgálja. Az intenzív mosás során előfordulhat, hogy a nagyobb felületi üregekből az impregnálószer még a kikeményítés előtt kimosódik. A mosási szakasz időtartama 4 perc.

Számítási eredmények

A jelen szakaszban bemutatott számítást egy reálisan feltételezhető méretű üregrendszer geometriai adataival és a vákuumimpregnálás szokásos technológiai paramétereinek figyelembevételével végeztük el. Legyen az öntvény szivárgási szempontból kritikus részében egy $0,1 \text{ cm}^3$ össztérfogatú üreg, amely a külső felülethez egy $0,1 \text{ mm}$ hosszúságú kapilláriszakkal csatlakozik az *1b. ábra* geometriai modellje szerint! Vizsgáljuk meg, hogy az $L = 100 \text{ }\mu\text{m}$ hosszúságú

kapilláriszakkal keresztül a kapilláris sugara függvényében milyen módon történik a $V = 100 \text{ mm}^3$ -es üreg vákuumozása és gyantával való telítése! A teljes impregnálási műveletsorban a vákuumozás és telítési folyamat egymásra épülése, valamint eközben a nyomás és telítési viszonyok alakulása a *4. ábra* diagram-sorozatán követhető nyomon.

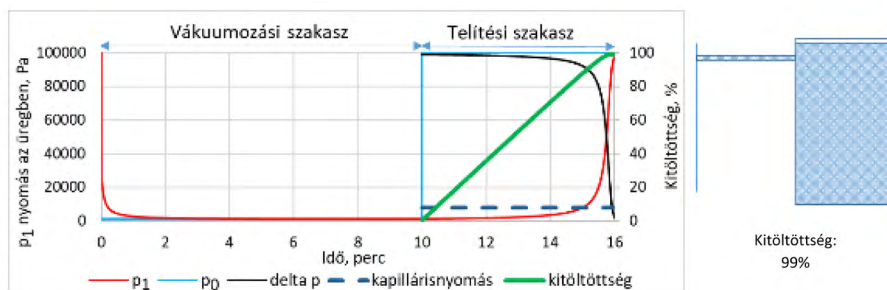
A diagramokon jelzett (*4. ábra*) első 10 percen a vákuumozás, a 10 és 16 perc közötti intervallumban pedig az impregnálógyantával való telítés történik. A kék vonal jelzi a külső levegőatmoszféra p_0 nyomását, ez a vákuumozás során 1000 Pa, a telítési szakaszban 100 000 Pa értékű. Az üregben lévő levegő p_g nyomását a pirossal jelzett függvény mutatja. A telítési szakaszban (10–16 perc) a p_0 külső és a p_g belső nyomás különbségét fekete vonallal jelölve külön is feltüntetjük. A zöld vonal a $V = 100 \text{ mm}^3$ -es üreg gyantával való telítettségének százalékos értékét jelzi. Az aktuális kapillárisugárhoz tartozó kapillárisnyomást a fekete szaggatott vonal reprezentálja, ez a folyamat során nem változik.



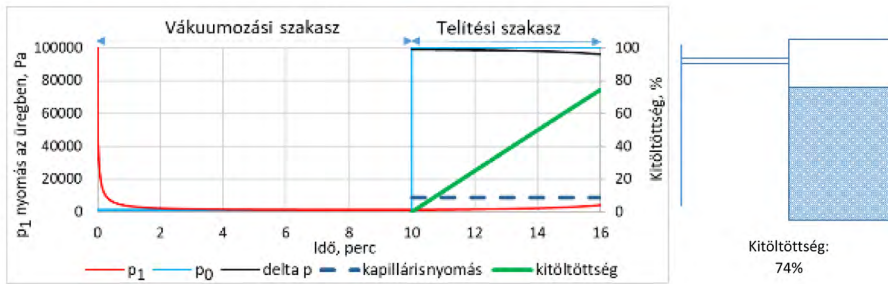
a) A kapilláris sugara $R = 10 \text{ }\mu\text{m}$



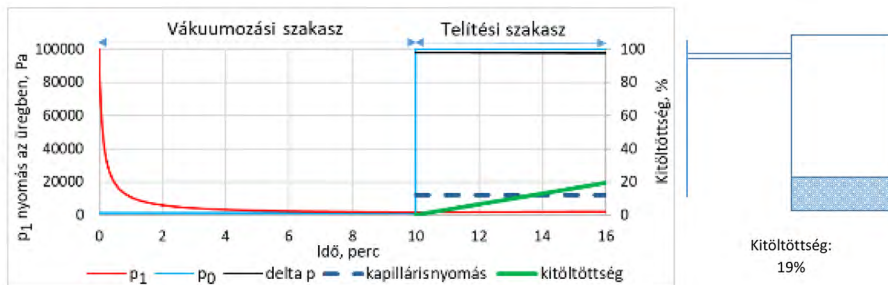
b) A kapilláris sugara $R = 8 \text{ }\mu\text{m}$



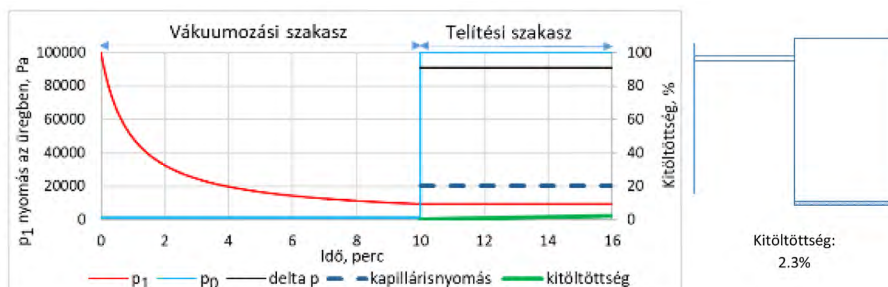
c) A kapilláris sugara $R = 7,64 \text{ }\mu\text{m}$



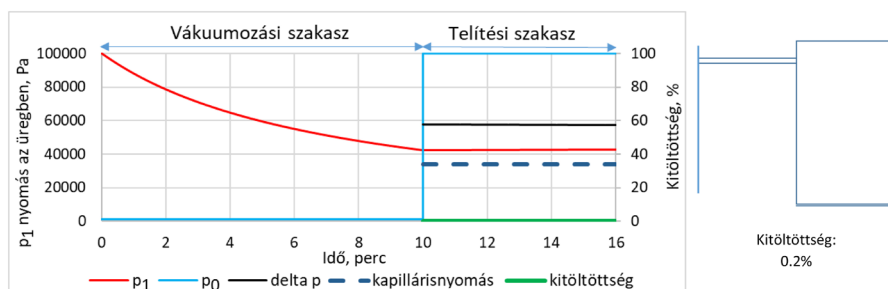
d) A kapilláris sugara $R = 7 \mu\text{m}$



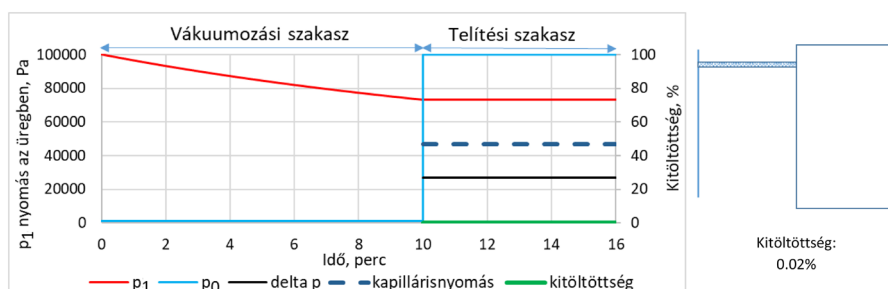
e) A kapilláris sugara $R = 5 \mu\text{m}$



f) A kapilláris sugara $R = 3 \mu\text{m}$



g) A kapilláris sugara $R = 2 \mu\text{m}$



h) A kapilláris sugara $R = 1,3 \mu\text{m}$

4. ábra. A nyomás és telítési viszonyok alakulása egy $V = 100 \text{ mm}^3$ -es, a felülethez egy $L = 100 \mu\text{m}$ hosszúságú kapillárisszakaszon keresztül kapcsolódó üreg impregnálási folyamatában a kapilláris sugara függvényében

A 4a. ábra az $R = 10 \mu\text{m}$ kapilláris sugarú esetén kialakuló viszonyokat szemlélteti. A vákuumozási szakaszban igen rövid idő alatt, mintegy fél perccel belül a 100 mm^3 -es üregben a nyomás megközelíti a megkívánt vákuumszintet, és a telítés is igen gyorsan lezajlik, a 99%-os kitöltési érték elérése mintegy két percet igényel. A telítés során az üregbe beáramló gyanta térfogataránya növekszik (zöld vonal), és a bent maradó, a folyamat végén 1% térfogatarányú levegő nyomása eléri a külső nyomás értékét (piros vonal), miközben a nyomáskülönbség zérusra csökken (fekete vonal). Az üregben mindenképpen marad legalább 1% térfogatarányban levegő, mivel a vákuumozás nyomásértéke az atmoszferikus nyomás 1%-a. A telítési folyamat hajtóereje – a külső és belső tér nyomásának különbsége – mindaddig elősegíti a gyanta áramlását, amíg a nyomáskülönbség ki nem egyenlítődik, vagy le nem telik a technológiában rendelkezésre álló idő. A 4a. ábra példájában mindkét feltétel teljesül. Az impregnálási művelet végére a külső és belső nyomás egyensúlyt tart egymással, megszűnik a folyadékáramlás, és a kapilláris szakasz is telítve van folyadékállapotú gyantával a 4a. ábra jobb oldali vázlatának megfelelően. A gyantából való kiemelés nem okoz semmilyen változást, mivel a kapilláris mindkét végén továbbra is atmoszferikus nyomás uralkodik. A nyomások egyensúlya miatt feltételezhető, hogy az intenzív mosás sem befolyásolja a kapillárisban lévő gyanta mennyiségét, elhelyezkedését.

Hasonló viszonyok kialakulására lehet számítani $R = 8 \mu\text{m}$ kapilláris sugarú esetén is (4b. ábra). Az üregben elért vákuumozási nyomás megközelíti a célértéket ($p_g = 1005 \text{ Pa}$ a 10. perc végén), és a telítés is lezajlik a technológiai időn belül, mintegy 4,8 perc alatt. Éppen 6 perc szükséges az üreg telítéséhez a 4c. ábrán bemutatott példában, ha a kapilláris sugara $R = 7,64 \mu\text{m}$. Ebben az esetben pontosan a telítési szakasz végére csökken le zérusra a külső és belső tér közötti nyomáskülönbség, miközben az üreg közel 99%-os kitöltöttséget ér el (a vákuumozási szakasz végén az üregben $p_g = 1013 \text{ Pa}$ a nyomás). A fentiekből következik, hogy ha a kapilláris szakasz sugara nagyobb, mint $7,64 \mu\text{m}$, akkor mind a vákuumozás, mind a telítés befejeződik a technológiában rendelkezésre álló időtartam alatt, és az üreg kitöltöttsége is megközelíti a 99%-ot.

Alapvetően változnak a viszonyok, ha a kapilláris sugara $7,64 \mu\text{m}$ -nél kisebb. A 4d–g. ábrán feltüntetett esetekben az üreg kitöltöttsége drasztikusan csökken a kapilláris sugarának csökkenésével. Maga a kapilláris sem tartalmaz gyantát az impregnálás után, mivel a 16. perc végén megszűnik a gyantautánpótlás. Ekkor a külső és belső tér közötti nyomáskülönbség még meghaladja a kapillárisnyomást, így a gyantából való kiemelés követően a külső légnyomás az üregbe

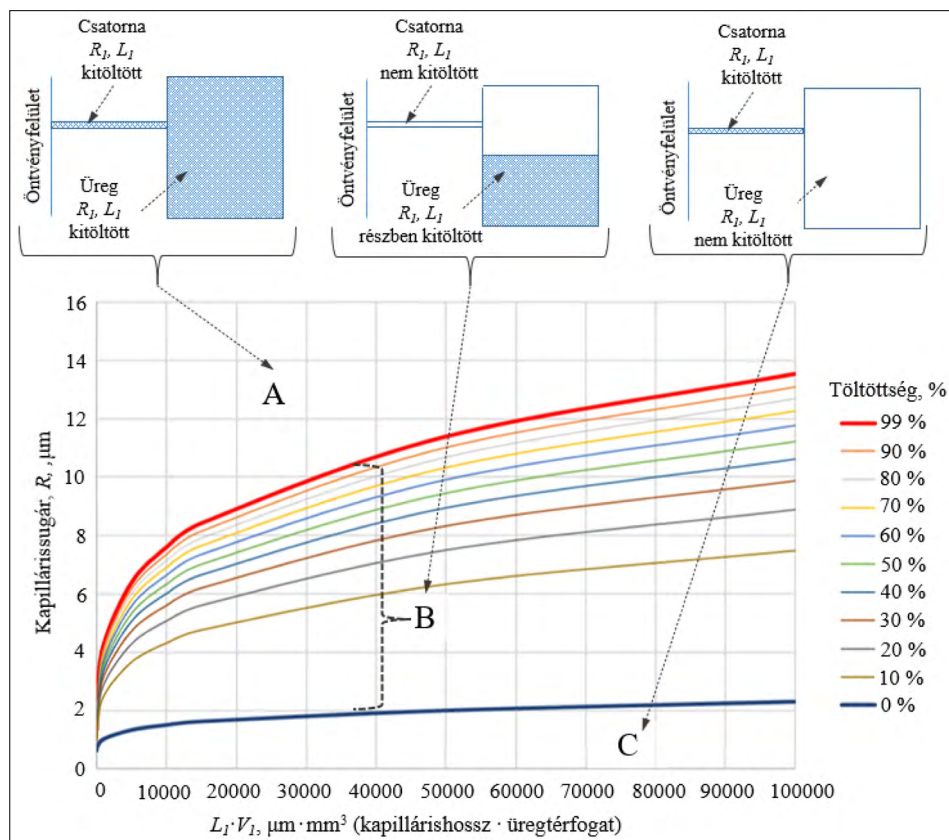
préseli a kapillárisban lévő gyantamennyiséget, és a szabaddá váló kapillárison keresztül egyenlítődik ki a nyomás. A gáztömörség ezekben az esetekben nem tekinthető megfelelőnek, mivel az üregek nem a teljes térfogatukban vannak kitöltve gyantával és a kapilláris szakasz is átjárható a gázok számára. Az impregnálási művelet végén a mosási műveletben az alkatrészrel érintkező víz is bejuthat az üregbe részben a kapilláris hatás, részben a külső és belső tér nyomáskülönbsége okán.

Ha a 16. perc végén, vagyis a gyantából való kiemelés időpontjában a külső és belső nyomás különbsége kisebb, mint a kapillárisnyomás, akkor a kapillárisban a gyanta stabilan meg tud maradni. Ilyen esetet szemléltet a 4h. ábra, ahol az $R = 1,3 \mu\text{m}$ kapilláris sugarra vonatkozó számítás eredménye látható. A jelenség oka, hogy a kapilláris méretének csökkenésével az üregben elért vákuumszint romlik, miközben a kapillárisnyomás növekszik. A jelen számítási példában a két nyomásérték $R = 1,51 \mu\text{m}$ kapilláris sugaránál azonos.

4. Az impregnálási alapesetek általánosítása

Egy adott térfogatú, a felülethez adott hosszúságú kapilláris szakaszon keresztül kapcsolódó üreg impregnálása a kapilláris sugara függvényében háromféle eredménnyel zárulhat: bizonyos kapilláris sugar felett teljes telítés történik (A eset); egy adott határérték alatti kapilláris sugaránál csak a kapilláris fog gyantát tartalmazni (C eset); a két határérték között pedig az üreg részleges impregnálódása várható a kapilláris rész kitöltése nélkül (B eset). A problémakör általánosabb vizsgálatához a kapilláris hosszát és az üreg térfogatát célszerű egy paraméterbe összevonni, mivel a (3.3) egyenlet szerint hatásukat tekintve egyenértékűek, így a nyomás- és telítési viszonyok azonosra adódnak $L \cdot V$ azonos értékeinél. Az összevont paraméter függvényében a három alapesetet szétválasztó kapilláris sugar-értékek az 5. ábra diagramjáról olvashatók le.

A diagram vonalai az $L \cdot V$ szorzat, valamint az R kapilláris sugar által meghatározott síkrészt három részre osztják, amelyek a fenti alapesetek várható előfordulását reprezentálják. A diagram segédvonalai a (B eset) tartományba eső paraméterkombinációknál a várható üregtöltési értéket jelzik. Ha például egy 40 mm^3 -es össztérfogatú üreg $500 \mu\text{m}$ hosszúságú $8 \mu\text{m}$ sugarú kapillárisal csatlakozik a felülethez, akkor az $L \cdot V = 20\,000$ -es értéknél leolvasható, hogy a B területbe eső részleges impregnálódás esete várható az üreg 70%-os telítettségével. Ugyanez az eredmény adódik, ha az üreg térfogata például $56,98 \text{ mm}^3$ és a kapilláris hossza $351 \mu\text{m}$, mivel a két paraméter szorzata $20\,000$. A vastag piros vonal feletti részen az üregtöltés minden paraméterkombinációban megfelelő (A eset), vagyis a szivárgás megakadályozása szempontjából



5. ábra. Az impregnálási alapesetek előfordulása az egyszerűsített üreg geometriai jellemzőinek függvényében, és az impregnálás lehetséges eredményeinek vázolata

optimális viszonyok állnak elő. A vastag fekete vonal alatti tartományba eső paraméterkombinációk esetében csak a kapillaris feltöltődése történik meg, az üregbe nem kerül számottevő mennyiségű impregnálószert (C eset). A vastag piros és fekete vonalak közötti területen részleges üregtöltés alakul ki úgy, hogy a kapillárisban nem marad impregnálószert (B eset).

A szivárgás megakadályozása szempontjából az A eset a legkedvezőbb, mivel 99%-os üreg és 100%-os kapillaris töltöttség várható, vagyis az impregnálás az adott viszonyok között tökéletes. Ennél jobb kitöltöttség csak a vákuumszint további csökkentésével vagy a telítési szakaszban a külső nyomásérték megnövelésével érhető el. A piros vonal feletti paraméterkombinációkkal jellemezhető, kapillaris szakaszt is tartalmazó üregek a vákuumimpregnálási technológiával szivárgásmentesen lezárhatók.

A B eset paramétertartománya meglehetősen széles, és a paraméter kombinációk függvényében sokféle és változatos impregnálási eredmény valószínűsíthető. Például az $L \cdot V$ szorzat 50 000-es értékénél (50 mm^3 -es üreg, 1000 μm hosszúságú csatorna), ha a kapillaris 11 μm sugarú, akkor majdnem tökéletes (90%-os kitöltöttség), ha 2,1 μm sugarú, akkor szinte teljesen hatástalan az impregnálás (a kapillaris egyik esetben sem tartalmaz gyantát). Az üreg kitöltésének szintje drasztikusan változik ebben a tartományban,

10 μm -es sugárnál 60%-ra, 6 μm esetén pedig 10%-ra csökken az értéke. Minél nagyobb az üreg kitöltöttsége, annál valószínűbb, hogy az üregrendszer gáztömör lesz, ugyanakkor egy magas, 90%-os kitöltöttség sem garantálja a gáztömörséget, mivel a bonyolult alakú üregrendszerben a gyanta úgy is elhelyezkedhet, hogy egy szivárgási útvonal nyitva marad. Az elmondottakból az következik, hogy a B eset területére eső paraméterkombinációk mindegyikében bizonytalan az impregnálás eredménye, de minél közelebb vagyunk a B terület felső határához, annál valószínűbb a gáztömörség kialakulása.

A C esetben az üreg kitöltöttsége lényegében zérus, a kapillaris viszont telítve lesz gyantával. A teljes üregrendszer ugyanolyan állapotban van, mint az impregnálás előtt, csak a kapillaris feltehetően igen rövid szakaszán lesz tömítés. Szivárgási szempontból talán kedvezőbb is a helyzet, mint a B terület alsó harmadában, mivel a kapillarisban lévő gyanta legalább lezárja a nagyobb térfogatú üregrendszert. Ugyanakkor, ha a későbbiekben ez a kapillarisban lévő gyantadugó valamilyen okból megsérül (például kimosódik, vagy összerosódik a vízzel a hideg-melegvizes műveletben, vagy az összeszerelés alatt deformáció éri a környezetét, például a csavarok meghúzása), akkor az üregrendszerben minden bizonnyal szivárgást fog eredményezni.

5. Összefoglalás

A dolgozat alumíniumötvözet nyomásos öntvények belső részében előforduló porozitási üregrendszerek impregnálhatóságával foglalkozik. Az egymással összefüggő porozitási üregek által alkotott üregrendszerek a vonatkozó [23, 25, 26] mérések alapján erősen változó hosszúságú és keresztmetszetű folytonossági hiányok sorozataként fogható fel, amelyben a különböző térfogatú üregeket kisebb keresztmetszetű csatornák kötik össze. Az öntvény belsejében lévő, a felületet el nem érő összefüggő folytonossági hiány – elsősorban a megmunkálásoknak köszönhetően – nyitott, illetve több öntvényfelületet összekötő átmenő üregrendszerre válhat. Bár a gáztömörség biztosítására a vákuumimpregnálás igen hatékony technológia, az átmenő üregrendszerek a tapasztalatok szerint okozhatnak szivárgást az impregnálást követően is. A számítások alapján az impregnálószert az egyenes keresztmetszetű üregeket kitölti. A változó keresztmetszetű, szűk csatornákat is tartalmazó szivárgási útvonalak lezárása viszont nem feltétlenül lesz sikeres, mivel a teljes térfogat feltöltéséhez kis keresztmetszetű szakaszokon kell az anyagtranszportnak megvalósulni. Az összetett geometriájú üregrendszer elemi része a 2b. ábrán bemutatott modell, amelynek többszörözésével az üregrendszer geometriája áramlási szempontból modellezhető. Az egyszerűsített geometriájú üreg feltöltődése iránymutató a valós üregrendszerek impregnálhatósága szempontjából.

Az üregrendszer elemeinek reálisan feltételezhető méreteivel végzett modellszámítások (vákuumimpregnálás használatával) eredményei alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg:

- Amennyiben a szivárgási útvonal közel egyenes keresztmetszettel jellemezhető, akkor problémamentes impregnálódás várható függetlenül a csatorna méretétől, sugarától.
- Az üregrendszerben az egyes szakaszok közötti térfogati és keresztmetszeti különbségek növekedése az elégtelen impregnálódást valószínűsíti.
- Az üregrendszerben kialakult kisebb keresztmetszetű szakaszok jelenléte szintén az elégtelen impregnálódás előfordulását valószínűsíti, az áteresztő képesség lokális korlátja miatt.
- Ha az összetett geometriájú, változó keresztmetszetű üregrendszerben lévő legkisebb keresztmetszet egyenértékű átmérője $28\ \mu\text{m}$ feletti ($R > 14\ \mu\text{m}$), akkor az öntvényben az üregek 99%-ban telítődnek gyantával, vagyis tökéletes az impregnálódás (3. ábra).

- Teljes impregnálódás várható a 3. ábrán az A tartományba eső üreggeometriai paraméterek esetén.
- Szivárgási szempontból bizonytalan eredményű, részleges impregnálódás várható a 3. ábrán jelzett B tartományban; a telítés mértéke adott $L \cdot V$ értéknél az R sugártól nagymértékben függ.
- A C tartományba eső üregparaméterek esetén csak a kapilláris szakasz tartalmaz gyantát. A gáztömörség nem garantálható, mivel a kapilláriszakaszt esetlegesen érő hatások (a gyanta vízzel való keveredése, mechanikai hatások) miatt a szivárgási útvonal aktivizálódhat.
- Minden olyan hatás, amely az üregrendszerben a $14\ \mu\text{m}$ alatti egyenértékű sugárral jellemezhető, keresztmetszetek előfordulását valószínűsíti, rontja az impregnálás hatékonyságát. Ilyen hatása lehet például az öntvényben lévő belső menetek kialakítására alkalmazott menetmángorlási technológiának, amely a magfuratot keresztvevő szivárgási útvonalak lokális alakváltozását, ezáltal a felületre kifutó üregrészt keresztmetszetének csökkenését eredményezheti.

A kidolgozott matematikai modell számos technológiai kérdés tisztázásához hozzájárulhat. Alkalmazásával megítélhető, hogy az impregnálási eljárás paramétereinek módosítása, például a vákuumszint csökkentése vagy növelése, a telítés során alkalmazott nyomás növelése az atmoszferikus nyomás fölé, a technológiai lépések időtartamának módosítása, a gyanta viszkozitásának változtatása stb. milyen módon és mértékben befolyásolja az impregnálás végeredményét a telítési folyamat szempontjából kritikus, kapillárist is tartalmazó üregek előfordulása esetén.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Somogyi Istvánnak, a Hanon Systems Auto Parts Hungary Ltd. minőségügyi mérnökének, Nyeste Viktornak, a Hanon Systems műszaki munkatársának és Orosz Sándornak, az Euraseal Szolgáltató Bt. technikai vezetőjének a kutatáshoz szükséges technológiai információk átadásáért, illetve Szlivka Ferencnek, az Óbudai Egyetem professzorának a tanulmány szakmai lektorálásért.

IRODALOM

- [1] Weiler J. P., Wood J. T., Klassen R. J., Maire E., Berkmortel R., Wang, G. (2005): Relationship between internal porosity and fracture strength of die-cast magnesium AM60B alloy. *Materials Science and Engineering: A* 395(1–2) 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.12.042>

- [2] Lee S. G., Gokhale A. M., Patel G. R., Evans M. (2006): Effect of process parameters on porosity distributions in high-pressure die-cast AM50 Mg-alloy. *Materials Science and Engineering: A* 427(1–2), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.082>
- [3] Irfan M. A., Schwam D., Karve A., Ryder R. (2012): Porosity reduction and mechanical properties improvement in die cast engine blocks. *Materials Science and Engineering: A* 535, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.049>
- [4] Wan Q., Zhao H., Zou C. (2014): Effect of micro-porosities on fatigue behavior in aluminum die castings by 3D X-ray tomography inspection. *ISIJ International*, 54(3), 511–515. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.511>
- [5] Nourian-Avval A., Fatemi A. (2020): Fatigue life prediction of cast aluminum alloy based on porosity characteristics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102774>
- [6] Simon M., Sauerwein C. (2000): Quality control of light metal castings by 3D computed tomography. In: 15th World Conference on Non-destructive Testing.
- [7] Jaques V. A., et al. (2021): Review of porosity uncertainty estimation methods in computed tomography dataset. *Measurement Science and Technology*, 32(12), 122001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac1b40>
- [8] Carmignato S. (2012): Computed tomography as a promising solution for industrial quality control and inspection of castings. *Metallurgical Science and Technology*, 30(1).
- [9] Garb C., et al. (2018): Statistical analysis of micropore size distributions in Al–Si castings evaluated by X-ray computed tomography. *International Journal of Materials Research*, 109(10), 889–899. <https://doi.org/10.3139/146.111685>
- [10] Weidt M., et al. (2018): Prediction of porosity characteristics of aluminium castings based on X-ray CT measurements. *International Journal of Cast Metals Research*, 31(5): p. 289–307. <https://doi.org/10.1080/13640461.2018.1467105>
- [11] Nicoletto G., Konečná R., Fintova S. (2012): Characterization of microshrinkage casting defects of Al–Si alloys by X-ray computed tomography and metallography. *International Journal of Fatigue*, 41, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.01.006>
- [12] Nourian-Avval A., Fatemi A. (2020): Characterization and analysis of porosities in high pressure die cast aluminum by using metallography, x-ray radiography, and micro-computed tomography. *Materials*, 13(14), 3068. <https://doi.org/10.3390/ma13143068>
- [13] Roy N., Samuel A., Samuel F. (1996): Porosity formation in Al-9 Wt pct Si-3 Wt pct Cu alloy systems: Metallographic observations. *Metallurgical and Materials transactions A*, 27(2), 415–429. <https://doi.org/10.1007/BF02648419>
- [14] Ran G., Zhou J. E. (2007): Metallographic characterization of porosity in a cast aluminum alloy A356-T6. In: *Materials science forum*. Trans. Tech. Publ. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.546-549.989>
- [15] Limodin N., et al. (2014): Application of X-ray microtomography to study the influence of the casting microstructure upon the tensile behaviour of an Al–Si alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 324, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.07.034>
- [16] Felberbaum M. (2010): Porosity in Aluminum Alloys. EPFL. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-4639>
- [17] Campbell J. (2015): Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann.
- [18] Soga N., et al. (2021): Micro-computed tomography to analyze industrial die-cast Al-alloys and examine impregnation polymer resin as a casting cavity sealant. *Production Engineering*, 15(6), 885–896. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01071-1>
- [19] Young P. (1974): Impregnation of porous castings. *Foundry Trade Journal*, 136 (2993), 439–431.
- [20] Stefanescu D., Davis J., Destefani J. (1988): *Metals Handbook*, Vol. 15--Casting. ASM International, 1988, p. 937.
- [21] Lloyd G. (2012): Finding a Solution to the Eternal Problem of Porosity in Casting. *Die Casting Engineer*, p. 40.
- [22] Rottländer H., Umrath W., Voss G. (2016): Fundamentals of leak detection. Leybold GMBH (ed.) Cat, 199, p. 37.
- [23] Réger M., Gáti J., Oláh F., Horváth R., Fábán E. R., Bubonyi T. (2023): Detection of porosity in impregnated die-cast aluminum alloy piece by metallography and computer tomography. *Crystals*, 13(7), 1014. <https://doi.org/10.3390/cryst13071014>
- [24] <https://www.ultraseal-impregnation.com/wp-content/uploads/2017/08/Ultraseal-Data-Sheet-v1-Rex-eal-100-Sealant-v3.pdf>
- [25] Sai T. V., Vinod T., Sowmya G. (2017): A critical review on casting types and defects. *Engineering and Technology*, 3(2), 463–468.
- [26] Zhang T. T., Yu W. B., Ma C. S., Chen W. T., Zhang L., Xiong S.M. (2022): The effect of different high pressure die casting parameters on 3D microstructure and mechanical properties of AE44 magnesium alloy. *J. Magnesium Alloys*. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.05.001>

APPENDIX

Legyen az öntvény körül a légtér p_0 nyomása a vákuumozást megelőzően p_{\max} , a vákuumozás során pedig konstans p_{\min} értékű ($p_{\max} > p_{\min} > 0$).

Az üregben lévő gáz $p_g(t)$ nyomását leíró differenciálegyenlet (3.4) alapján a következőképpen írható fel:

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = Kp_g(t) [p_g(t) - p_0(t)], \quad (\text{A.1})$$

ahol $t = 0$ esetén $p_0(t) = p_{\max}$, $t > 0$ esetén $p_0(t) = p_{\min}$, és K értékét a (3.5) egyenlet definiálja. A differenciálegyenlet megoldása az (A.1) kifejezés $(0, t)$ intervallumban történő integrálását követően:

$$p_g(t) = \frac{p_{\max} p_{\min} S}{p_{\max} (S - 1) + p_{\min}} \quad (\text{A.2})$$

adódik, ahol S értéke a

$$\ln S = p_{\min} K t \quad (\text{A.3})$$

összefüggésből határozható meg.