

A „Mikrogömbhéjak infiltrálása” című kutatási projekt szakmai szempontból a munkatervben szereplő ütemterv szerint haladt a hároméves projekt mindhárom éve alatt. Ennek megfelelően a kutatás első évében a szakirodalom kutatása és a mérőrendszer felépítése voltak a fő célok. A második évben a hangsúly a minél nagyobb számú mérés elvégzésére és az eredmények statisztikai / matematikai feldolgozására irányult. A harmadik év során pedig a mérések pontossága, a kifejlesztett eszköz továbbfejlesztése és a publikációk számának növelése volt a fő cél.

A szakirodalom kutatás során számos, nemzetközi lapokban megjelent cikket tanulmányoztam át részleteikbe menően. A cikkek elemzésekor különös hangsúlyt fektettem azokra, a várható infiltrált hosszakat leíró egyenletekre és levezetésükre, amelyek az infiltrálási nyomás és -idő függvényében állítják elő a keresett infiltrált hosszt. A szakirodalmi hivatkozások alapján megállapítható, hogy a tisztán elméleti, vagy fél-empirikus levezetéseket és eredményeket tartalmazó cikkek az idő függvényében gyökösen változó, tehát telítési görbe jellegű, az infiltrálási nyomás függvényében pedig lineáris, tehát egyenesen arányos jellegű kapcsolatokat jósolnak az infiltrálási paraméterek és az infiltrált hossz között. Meg kell azonban jegyezni, hogy ezeket az eredményeket viszonylag nagy időtartományban (jellemzően több perces nagyságrend) és a matematikai modellek egyszerűsítésének és analitikus megoldhatóságának érdekében számos fizikai jelenség elhanyagolásával érték el. (Néhány példa az elhanyagolásokra: csak nem-reaktív rendszerek tárgyalása, az infiltrálás során folyamatosan változó permeabilitás elhanyagolása, vagy bizonytalan alaktényezővel való helyettesítése, a légellenállás elhanyagolása, a gravitáció elhanyagolása, néhány hidraulikus hatás, például a folyadéksúrlódás elhanyagolása stb.). Mivel azonban a kutatási terv egyik célja a szintaktikus fémhabok kisnyomású melegkamrás öntéssel történő gyártásának megvalósítása, ezért éppen a kis időtartományok (néhány másodperc) az érdekesek. A szakirodalomban szereplő mérési adatok ebben az időtartományban általában exponenciális jelleget mutatnak, amit a szerzők szokásosan „inkubációs idő”-ként tüntetnek fel és az esetek túlnyomó többségében elhanyagolják, illetve a nagy időtartományok miatt nem veszik figyelembe. A kisnyomású melegkamrás öntés, mint potenciális és gazdaságos ipari gyártási lehetőség, szempontjából viszont éppen ez az időtartomány kritikus, így az időfüggés mikéntje ebben az időtartományban is pontosabban tisztázandó.

A fentieknek és a kutatási tervnek megfelelően egy univerzális (több anyagpár esetén is használható) kísérleti mérési rendszer került kifejlesztésre és legyártásra. A mérőberendezés legfontosabb része az infiltráló egység, amely működési elvét tekintve a megelőző kutatásokhoz hasonlóan a közlekedő edények elvén alapul. Lényege egy indukciós úton hatékonyan fűthető és 10 bar nyomáshatárig nyomás alá helyezhető rozsdamentes acél tartály. A tartálynak mindösszesen egy fő- és három segédnyílása van. A fő kimentési nyílásnál elhelyeztünk egy rozsdamentes acél csövet, ebbe kerülnek betöltésre az infiltrálni kívánt szemcsék, esetünkben a kerámia gömbhéjak. A gömbhéjakat a minél jobb térkitöltés érdekében ütögetéssel tömörítettünk. A rozsdamentes acélcső két végén egy-egy szitát helyeztünk el, annak megakadályozására, hogy a folyamat elején a gömbhéjak a berendezésbe hulljanak, illetve a nyomás hatására a rendszerből távozzanak. Emellett a rozsdamentes acélcső fűtött, hogy az infiltráló berendezésből érkező olvadt fém ne hogy idő előtt veszítsen hőmérsékletéből, megszilárduljon, „befagyjon” és ezzel megghamisítsa a mérési eredményeket. A másik három, bemeneti segédnyílás egy-egy nagy áteresztőképességű elektromechanikus működtetésű szeleppel csatlakozik. A rendszernek ez a része, amely az infiltráláshoz szükséges argon gázt biztosítja arra lett optimalva, hogy időegység alatt minél több gázt legyen képes a berendezésbe szállítani adott nyomáson. Erre az infiltrálási nyomás minél hamarabbi felépülésének érdekében van szükség (numerikus szimulációval kimutattuk, hogy adott nyomás felépülésére a rendszerben

mindössze mintegy 50 ms-ra van szükség). Amennyiben a bemeneti nyílásra gáznyomást kapcsolunk a közlekedő edények elve alapján megtörténik az infiltráció. A fémolvadék lehűlése és megszilárdulása után az infiltrált hossz közvetlenül mérhető és az infiltrálási nyomás és infiltrálási idő függvényében rögzíthető. A rendszer elválaszthatatlan részét képezi még egy indukciós olvasztó (a megfelelő hőmérséklet biztosításához) és egy, az infiltráló berendezésnél jóval nagyobb térfogatú puffertartály (a megfelelő mennyiségű és nyomású argon gáz biztosításához). Ugyancsak fontos egység a nyomásmérő jeladó (az infiltrálási nyomás folyamatos ellenőrzéséhez) és a rendszer agya, egy mérő / adatgyűjtő rendszerrel felszerelt számítógép, amely vezérlési és adatrögzítési feladatokat lát el.

A fent ismertetett és leírt kísérleti mérőrendszer segítségével az 1-7,5 bar infiltrálási nyomás és az 1-7 s-os infiltrálási idő tartományokban számos mérés készült AlSi12 ötvözet mátrixanyaggal és SL300 ( $\varnothing 150 \mu\text{m}$  Envirospheres Ltd., Ausztrália), valamint Globocer (Hollomet GmbH, Németország) típusú gömbhéjak felhasználásával. A gömbhéjak mérethatásának vizsgálatának érdekében került sor az utóbbi, Globocer típusú gömbhéjak esetének vizsgálatára is. A Globocer gömbhéjak jóval nagyobbak SL300 jelű társaiknál,  $\sim 1200 \mu\text{m}$  átmérőjűek. A mérések tapasztalatait és eredményeit röviden összefoglalva kijelenthető, hogy az épített infiltráló berendezés jól használható a rövid ( $< 10 \text{ s}$ ) időtartományokban. A vizsgálati sorozat idő- és nyomástartományában az infiltrált hossz egyenesen arányosnak bizonyult az infiltrálási nyomással és a kis időtartományban is közel négyzetgyökös (0,47 és 0,60 közötti kitevő) változást mutatott az infiltrálási idő függvényében. A kísérletek során megerősítésre került az is, hogy a nyomásos infiltrálás két határnyomással is rendelkezik. Alsó (szükséges) határt jelent az infiltrálási küszöbnyomás értéke, amely több módszer szerint is becsülhető, azonban a legjobb becslés a Kaptay által kidolgozott modell alapján kapható az adott anyagpár esetében. Felső nyomáshatárként pedig a gömbhéjak törési szilárdsága jelentkezik, hiszen amennyiben az infiltrálási nyomás ezt meghaladja, maguk a gömbhéjak is infiltrálódnak és az anyag elveszti porózus, hab jellegét.

A fentiekkel párhuzamosan elvégeztük az infiltráltság minősítését célzó mikroszerkezeti vizsgálatokat is. Ezek alapvetően két részre tagolódtak. Az első lépés az infiltrálás folyamatának minősítése volt, hiszen alapvető követelmény, hogy az infiltráltság minél jobb legyen, ami azt jelenti, hogy minimálisnak (ideális esetben zérusnak) kell lennie a nem a gömbhéjakkal (tervszerűen) bevitt porozitás mennyiségének. Ez optikai mikroszkópi úton jól vizsgálható a darab keresztmetszeteinek mintavételezésével és tervszerű pásztázásával. A vizsgálati eredmények jó infiltrációt mutattak, a nem tervszerűen bevitt, elsősorban a mikrogömbhéjak között megjelenő nem kívánt porozitás mennyisége minden esetben az elfogadható szint alatt maradt. További, pásztázó elektronmikroszkópos, röntgenspektrometriás mérésekkel kiegészített vizsgálatokat is végeztünk annak ellenőrzésére, hogy a nagy Si tartalmú, közel eutektikus összetételű mátrixanyag nem lép lényegi reakcióba az erősítőanyag amorf  $\text{SiO}_2$  tartalmával. Ez a reakció erősen befolyásolhatná a gyártott kompozitok mechanikai tulajdonságait. Lényeges mennyiségű reakció nem volt tapasztalható, kismértékű oldódás megfigyelhető volt, ez azonban segíti a mátrix és az erősítőanyag közötti átmeneti réteg (interfész) kiépülését, amely elengedhetetlen feltétele a terhelés átszármaztatásának a mátrixanyagról az erősítőanyag irányába.

További fontos tényező a kísérletileg előállított kompozitok alapvető mechanikai tulajdonságainak lehetőleg teljes körű felmérése. Ennek elvégzése jelentősen segíti az ilyen, viszonylag új anyagok elhelyezését a tervezők, fejlesztők általánosan alkalmazott anyagai között. Ennek érdekében a

vonatkozó, DIN50134-es szabványnak megfelelően elvégeztük a gyártott szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálattal mérhető mechanikai tulajdonságainak felmérését. A monitorozott tulajdonságok a nyomószilárdság, a törési alakváltozás, a szerkezeti merevség és a zömítés során elnyelt mechanikai munka volt. Az eredmények azt mutatják, hogy a szintaktikus fémhabok nagyrészt a kerámia erősítőanyagnak köszönhetően a „hagyományos” fémhaboknál jóval nagyobb szilárdsággal, energiaelnyelő képességgel és fajlagos (sűrűségre vonatkoztatott) tulajdonságokkal bírnak. A fent említett mechanikai tulajdonságokat az infiltrálási paraméterek függvényeként rögzítettük. Ezek alapján kijelenthető, hogy a darabok sűrűsége és vizsgált mechanikai tulajdonságai az infiltrálási nyomással egyenesen arányosan növekedtek. Az infiltrálási idő szintén a kedvező irányban mozdította el a megfigyelt tulajdonságokat, de eltérő trendek szerint. A próbatestek izotrópnak mutatkoztak, nem volt tapasztalható semmilyen eltérés a mechanikai tulajdonságokban az infiltrálás irányában és arra merőlegesen sem. A fentieknek megfelelően adott befoglaló méretű, kívánt mechanikai tulajdonságokkal rendelkező alkatrész esetén egyszerűen meghatározhatók a szükséges gyártási paraméterek, ami megintcsak a tervezők munkáját segíti elő.

A fentiek mellett részben már megtörtént az eredmények félempirikus matematikai modellekbe foglalása is (az infiltrálási küszöbnyomás esetén nagymértékben a Kaptay által bevezetett modellre támaszkodva). Kerestük azokat a függvényeket, amelyek megfelelő módon leírják az infiltrált hossz változását mind az infiltrálási nyomás, mind pedig az infiltrálási idő függvényében, ugyanakkor kellően egyszerűek a mindennapos munkában való használathoz. Erre a feladatra az exponenciális és a hatvány függvények tűnnek a legalkalmasabbnak. A függvények felállításának célja az, hogy (i) alapadatokat nyújtson a fémhabok nyomásos öntéssel, ipari léptékben történő gyártásának megvalósításához, (ii) segédletként szolgáljon akár egyedi, akár sorozatgyártású infiltrált alkatrészek sikeres gyártásához szükséges infiltrálási idő és infiltrálási nyomás paraméterek meghatározásához.

A teljes, három év alatt elvégzett kutatómunka alapján kijelenthető, hogy a fejlesztett berendezés alkalmas különböző anyagpárok infiltrálási kinetikájának vizsgálatára. Különösen alkalmas a berendezés a kis időtartományokban történő mérésekre, amelyekkel jól modellezhető a kisnyomású, melegkamrás öntés technológiája. Ez az öntési technológia gazdaságos és termelékeny eljárásnak bizonyulhatna a szintaktikus fémhabok fél-üzemi, üzemi gyártására.

A hároméves kutatómunka során számos publikáció (összesen 22 darab) született főleg folyóiratcikkek (15 darab) és konferenci cikkek (7 darab) formájában. A teljes munkát, kereteiben is összefoglaló, záró jellegű publikáció a nemzetközi szinten is elismert Materials Science and Engineering A folyóiratban (IF: 2,108) jelent meg.