

Kísérletek helyett szimuláció a terméktervezésben

A fröccsöntött termékek fejlesztésére indított európai projekt, a Pro4Plast eredményeinek 2. részét ismertetjük. A kidolgozott szervezési és szimulációs szoftverekkel sikerült az új termékek fejlesztési idejét és költségeit jelentősen csökkenteni.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; szerszámtervezés; szimuláció; reométer; viszkozitásmérés; költségcsökkentés.

A szerszámfejlesztés költségeinek csökkentése szimulációval

Az európai fröccsöntő szakmának jó a híre a világban, de versenytársainak költségszerkezete sokszor jobb, ezért az európai feldolgozóknak célszerű a bonyolultabb, nagyobb hozzáadott értékű termékekre koncentrálni. A bonyolult termék bonyolult szerszámot is jelent, amelyek fejlesztése korábban nagyrészt próba-hiba módszerrel történt, még ha a felhalmozott empirikus tapasztalatokat ökol szabályok formájában fel is használták. A már meglévő szerszám folyamatos módosítása nem könnyű, nem olcsó, időigényes, és újabb és újabb mintapéldányok előállítását igényli a vizsgálatokhoz.

Az EU finanszírozásában a *Pro4Plast* projekt keretében egy termékfejlesztő rendszert alakítottak ki, amelynek segítségével a fejlesztési munka strukturált, tervezhető és optimalizálható. *A rendszer egyik előnyös tulajdonsága az, hogy régebben a fejlesztés későbbi fázisaiban meghozott döntések korábbra kerülnek* (frontloading = „orrnehéz” projektvezetés). Ehhez azonban arra van szükség, hogy a döntéshez szükséges információk idejében rendelkezésre álljanak, amihez viszont elengedhetetlen a szimulációs eszközök kiterjedt alkalmazása. A bonyolultabb termékek közül sok a betétes vagy körülöntött fröccsdarab. Az ilyenek fejlesztéséhez szükséges szimulációs eszközök eddig nem, vagy csak korlátozottan, nehezen kezelhető vagy nem megfelelő minőségben álltak rendelkezésre. A fröccsöntő ipar nagyrészt kis és közepes vállalkozások formájában működik, ezért az általuk használt szoftvereknek lehetőleg egyszerűen kezelhetőnek kell lenniük, és viszonylag hamar pontos választ kell szolgáltatniuk a termékekre és a fröccsöntés során fellépő anyagviselkedésre vonatkozóan.

Geometriai és hőtechnikai tervezés

A termék geometriája megtervezhető már jól ismert 3D szoftverekkel, pl. a *Cadmould 3D-F* programmal. Ez a szimulációs program számára „emészthető” *stl* (standard háromszöges felületekkel határolt) formátumban állítja elő a geometriát. A

felhasználó az összes geometriát megjelenítheti és manipulálhatja a grafikus felületen. A betétes és körülöntött termékek esetében megfelelően figyelembe kell venni az ömledék és a betétek közti érintkezési felületeket is. Ezekben az új felületeken történő hőátadás számításához a szoftver standard értékeket használ, de a felhasználó kívánságára ezek átállíthatók. A betétek hőmérséklete is megszabható. Körülöntött termékek-nél az első fröccsöntéskor adódó hőmérséklet-eloszlás beolvasható és figyelembe vehető a fröccsöntés későbbi fázisaiban. A zsugorodás és vetemedés számításakor figyelembe kell venni a betétek és a körülöntött alkatrészek termikus és mechanikai jellemzőit is. Az új programelemeket a következő lépésekben fejlesztik:

- az új számítási lehetőségek installálása,
- a módszer alkalmazhatóságának próbája,
- számítások végzése valós termékekkel összehasonlítva,
- eredmények kiértékelése, összegzése.

A teszteredményeket közvetlenül fel lehet használni a szimulációs szoftver továbbfejlesztésében. A fejlettebb programverziót a projektben részt vevő partnercégek kipróbálták és értékelték.

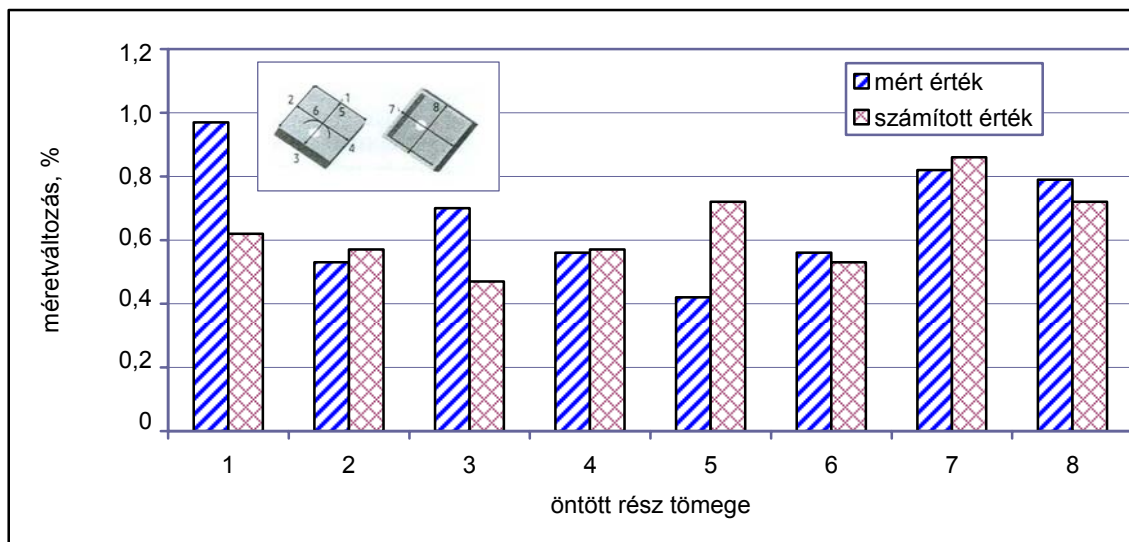
A szimulációs szoftver tesztelése

Az alkalmazhatósági vizsgálat pozitív eredményekkel zárult. A vizsgált termék olyan lemez volt, amelyben egy alumíniumból készült betétgyűrű helyezkedik el, amelynek a fele „kilóg” a lemezből. A szimulációban jól látható az ömledékfront lassulása a betétnél, valamint a gyűrű ömledékkel érintkező és a lemezből kiálló részének eltérő melegedése. A zsugorodás és a vetemedés szimulációja jól mutatja a betét zsugorodásgátló hatását. Valós, betétes szerszámokon végzett szimulációk azt mutatták, hogy a kapott zsugorodások reálisak.

A kiértékeléshez használt szerszámokat az aacheni **IKV**, a holland **TNO** és a német **Simcon GmbH** fejlesztette ki, és ők végezték a kiértékelést is. Az „orrmehéz” projekttervezést már a kísérletek során is alkalmazták. Szimulációk egész sorát végezték el már a legelején (különböző geometriákat, anyagokat és feldolgozási módokat szimulálva), és ezek közül választották ki az elvégezhető és várhatóan határozott végeredményeket szolgáltató variánsokat. A szimulációs kísérletekben változtatták a befröccsöntési áramot, az ömledék-hőmérsékletet, az utónyomás nagyságát és alkalmazásának idejét, és nézték, hogy hogyan alakul a szerszámhőmérséklet az idő függvényében, a nyomás változását a beömlőcsomk közelében és attól távolabb, és vizsgálták a termék különböző méreteinek eltérését a számítottól (a zsugorodást és a vetemedést, ld. az *1. ábrát*). A szerszám két különböző pontján mért és a szimulált nyomás-görbék összehasonlítása alapján megállapítható, hogy elég jó az egyezés a mért és számított értékek között. Hasonló mondható el a zsugorodási értékekről is. A projekt vége felé valós fejlesztésekben megvizsgálták, hogy miként befolyásolja a szoftver használata a költségeket és a fejlesztési időt. Kiderült, hogy a projektek több mint felében sikerült a szerszámok utólagos módosításán, a fejlesztési időn és a költségeken 20–40%-ot csökkenteni (*2. ábra*).

Szimuláció és valóság

Az ipari projektek követése azt mutatta, hogy az alkalmazott lépcsőzetes fejlesztési modell, amely bizonyos kulcseredmények eléréshez köti a projekt folytatását (úgynevezett fejlesztési fázisok és „kapuk” megkülönböztetésével), lehetővé teszi a fejlesztési idők és költségek jelentős csökkentését. Ebben a *fröccsöntés szimulációja az egyik legfontosabb eszköz, amely hozzájárul fontos döntések korai meghozatalához*. Maga a szimuláció lehetőségeket kínál jelentős költségcsökkentésre: csökkenti a fejlesztési időt és javítja a termék minőségét. A kifejlesztett szoftver egyszerűen kezelhető és viszonylag gyors számítás után a valóságoshoz közeli eredményeket szolgáltat. A fröccstermékek piaca folyamatosan nő, ugyanakkor nincs elég tapasztalt szakember. A *Pro4Plast* keretében kifejlesztett támogató eszközök legalább részben lehetővé teszik a kis és középvállalatoknak, hogy pótolják a hiányzó know-how-t, ezért remélhető azok elterjedése és ipari standardként való alkalmazása.

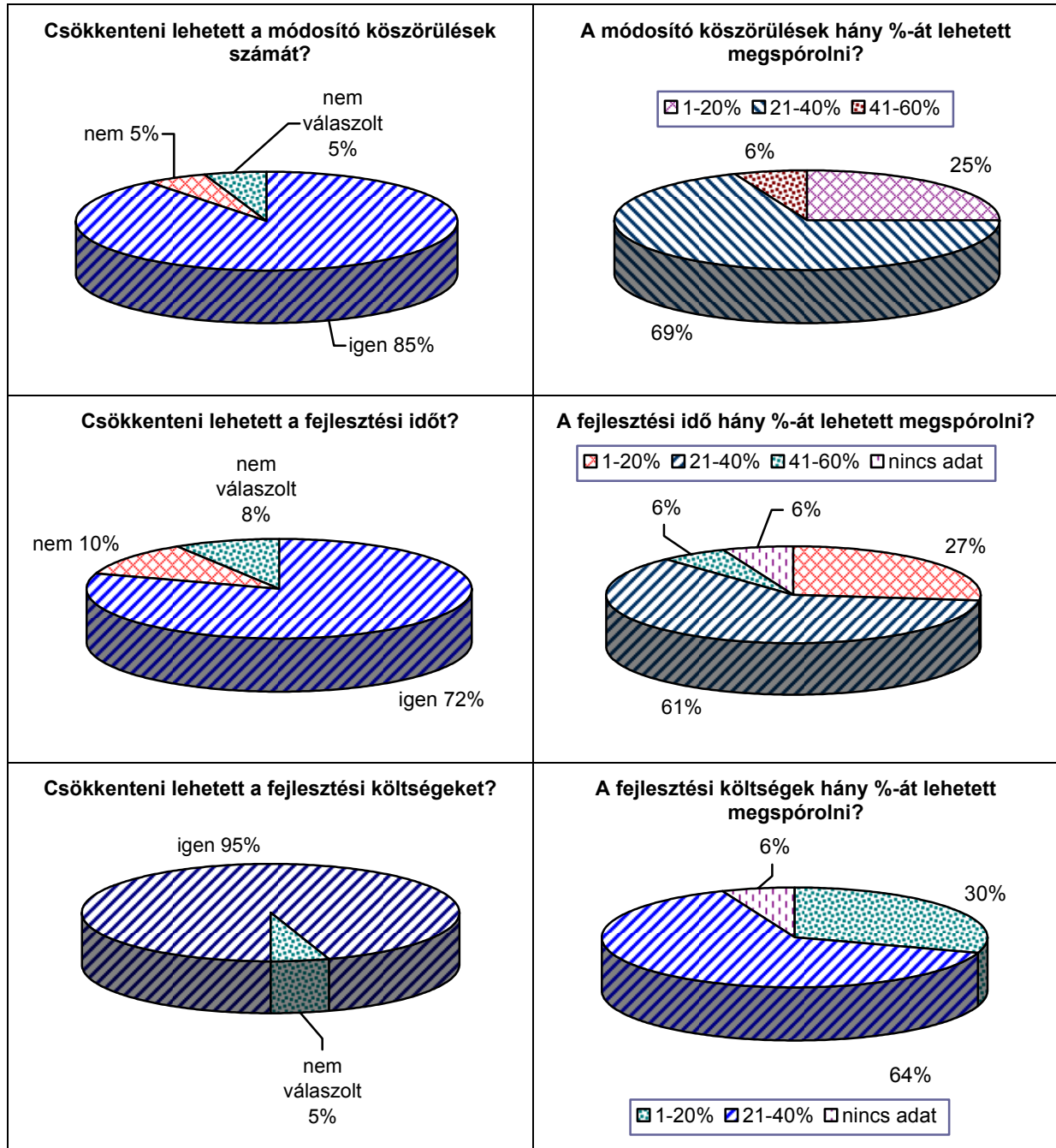


1. ábra Mért és számított zsugorodási és vetemedési értékek egy betétes termék 8 pontján meghatározva

A szimulációban felhasznált viszkozitások mérése

A szimuláció jóságát alapvetően befolyásolja a felhasznált viszkozitásgörbék jósága. Az alapanyaggyártók a kkv-k számára ma már nem mindig bocsátják rendelkezésre a megbízható és részletes viszkozitásgörbéket. A leobeni **Montanuniversität** éppen ezért kifejlesztett egy egyszerű viszkozitásmérő rendszert, amely egy úgynevezett fröccsöntő-reométerre épül. Ennek segítségével a gyakorlathoz közeli, nagy nyírósebességek mellett egyszerűen, megbízhatóan lehet megmérni a viszkozitást – még hozzá a saját fröccsgépen.

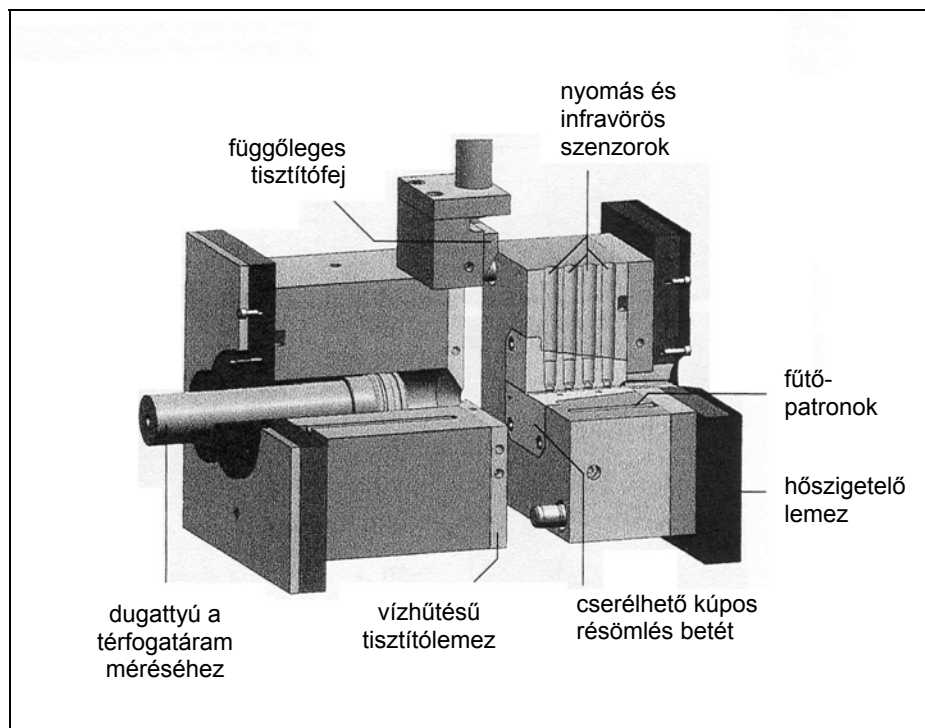
A speciális reométert egy standard, 1300 kN-os záróerejű fröccsgéphez tervezték (3. ábra). A szerszámot az ömledék-hőmérsékletre hevítik, és az adatokból egy egyszerű szoftverrel határozzák meg a reológiai jellemzőket. A reométerrel szembeni követelmények a következőképpen foglalhatók össze:



2. ábra A fejlesztést támogató szoftver alkalmazásának előnyei – valós ipari projektek eredményeinek kérdőíves kiértékelése

- egyszerű kezelhetőség (kkv-knek készül!),
- általánosan alkalmazott, vízszintes fröccsgépre felszerelhető,
- egyszerű, PC alapú adatgyűjtés,
- felhasználóbarát reológiai kiértékelő szoftver,
- standard adatszolgáltató rendszer a *Cadmould-3D-F* szimulációs szoftver számára,
- gyakorlatihoz hasonló nyírósebesség-tartomány (10^2 – 2×10^6 1/s),
- az ömledék-hőmérséklet változásának figyelembevétele a mérés során (választható),
- a viszkozitás nyomásfüggésének mérése (választható).

Annak érdekében, hogy a nyírósebesség széles tartományban változtatható legyen, a kúpos szerszámrészt tartalmazó fröccsoldali szerszámfélbe különböző betéteket lehet elhelyezni. Ezek hossza 105,5 mm, szélessége 10 mm, szöge 60° . A betéteken levő rés nagysága választható módon 1 mm, 0,5 mm vagy 0,35 mm. A szerszámot kívülről fűtőpatronokkal, fűtőlemezek felhasználásával fűtik, a gép felé pedig szigetelőlemezekkel elszigetelik.



3. ábra A reológiai mérésekhez használható fröccsszerszám keresztmetszete: a rögzített szerszámfélben van egy mérőrés a hozzá tartozó szenzorokkal együtt, a mozgó szerszámrészben pedig a térfogatáramot lehet meghatározni

Nyomás- és hőmérsékletszenzorok

A nyírófeszültség számításához a mérőrésben 20 mm-ként elhelyezett nyomás-szenzorokkal mérik a nyomás változását. A mérés mentén két infravörös hőmérővel

mérik a belépő és kilépő hőmérsékletet, és a különbségből meghatározzák a képződő hőt. A falhőmérsékletet hőáramszenzorokkal követik. Záróoldaltól a szerszámot egy dugattyúval szerelik fel a térfogatáram méréséhez, amely összeköttetésben áll a központi kidobóval. A mérőréstől kiáramló ömledék visszanyomja a dugattyút, és a mozgás sebességéből kiszámítható a térfogatáram és a látszólagos nyírósebesség. Ezzel a módszerrel ki lehet küszöbölni a visszaáramlást gátló szelep zárásának pontatlanságát. A dugattyú előterében levő ömledék nyitott szerszám esetében ismét kinyomja a kidobót. Egy pneumatikusan működtetett lehúzó és letisztítja a szerszám felületét.

A mérés azzal kezdődik, hogy befröccsöntik az ömledéket a felhevített szerszámba. Félautomatikus üzemmódban akár tíz befröccsöntési ciklust is elvégeznek szabályozott befröccsöntési sebességek mellett. A szenzorok mérik a résben a nyomásokat és a hőmérsékleteket, valamint a dugattyú hátramozásának sebességét. Az adatokat egy szokásos adatgyűjtő rendszerrel gyűjtik.

Nyomásfüggő viszkozitások mérése

Az adatok kiértékeléséhez fejlesztették ki a *Rheosoft V.1.0* szoftvert. A mérőrendszert és a szoftvert egy *Engel VC 940/130* villamos fröccsgépen tesztelték. A gépet kiegészítették egy szervohidraulikus egységgel a kidobó működtetésére. Ez lehetővé teszi, hogy a térfogatáram mérésére használt dugattyút a befröccsöntés közben legfeljebb 500 bar ellennyomással terheljék, aminek a révén a fröccsöntésnél fontos viszkozitás-nyomásfüggést lehet kimérni. A beolvasott adatokból a program első lépésben a látszólagos nyírósebesség függvényében számítja ki a viszkozitásértékeket, newtoni folyást feltételezve. Második lépésben elvégzik az úgynevezett *Weissenberg-Rabinowitsch korrekciót*, amelyben a látszólagos nyírósebességeket a nyírófeszültségtől függő módon korrigálják. Ez lehetővé teszi a valós viszkozitás kiszámítását:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\gamma}_s}{3} \left(2 + \frac{d \lg \dot{\gamma}_s}{d \lg \tau} \right) \quad (1)$$

Ezután a program kiszámítja a hőmérséklet-független mestergörbét legalább három hőmérsékleten mért görbe eltolásával. A viszkozitás nyírósebességtől való függését többféle formulával le lehet írni, pl. hatványfüggvénnyel vagy az alábbi, ún. *Carreau-formulával*:

$$\eta = \frac{a_{Tp} A}{(1 + a_{Tp} B \dot{\gamma})^C} \quad (2)$$

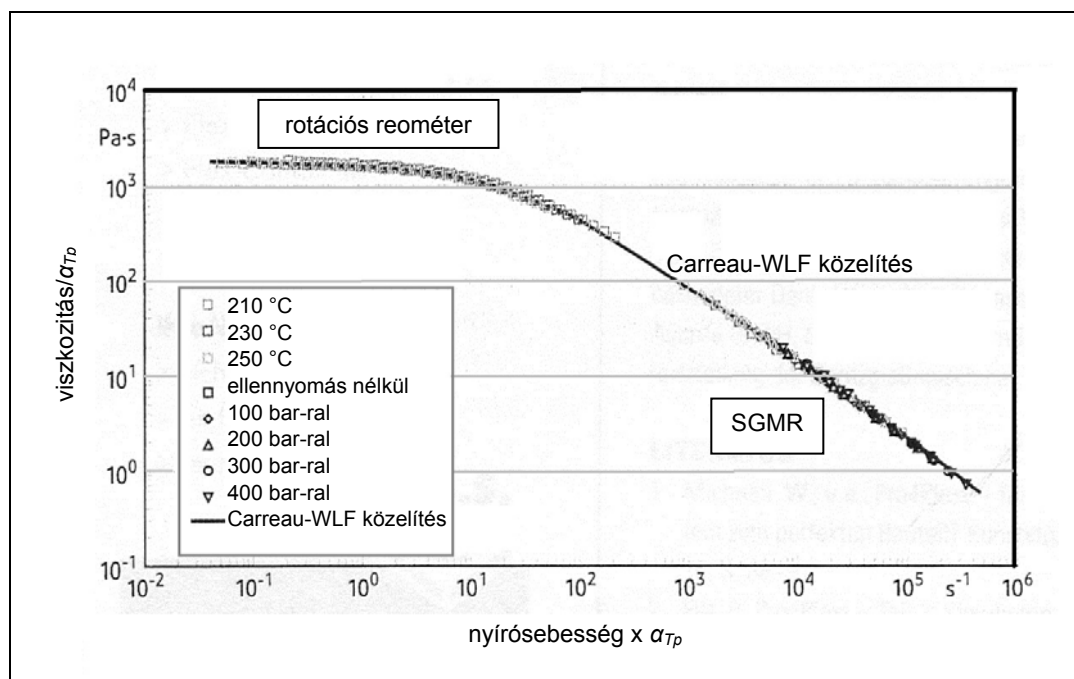
ahol A, B és C anyagállandók, a_{Tp} pedig a hőmérséklet- és nyomásfüggő ún. eltolási faktor:

$$\log(a_{Tp}) = \frac{8,86(T_0 - T_s)}{(101,6 + T_0 - T_s)} - \frac{8,86(T_m - T_s)}{(101,6 + T_m - T_s)} + \frac{B_\tau p}{\ln(10)} \quad (3)$$

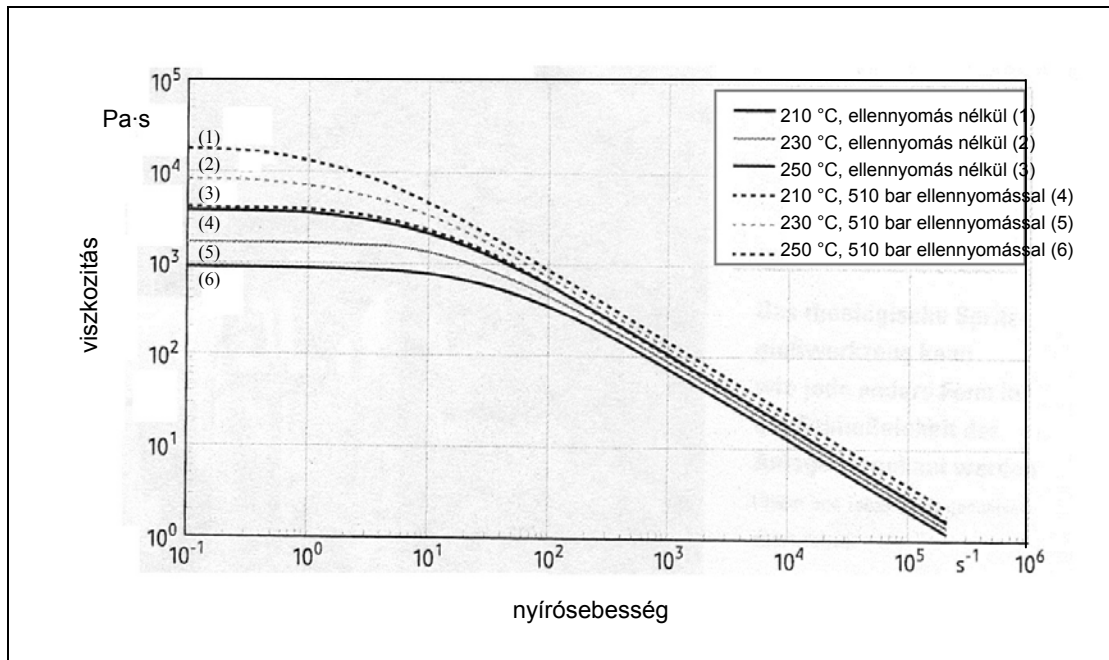
a viszonyítási hőmérséklet (T_0), a mért hőmérséklet T_m , T_s pedig az úgynevezett standard hőmérséklet, amely az üvegesedési átmenettartományában van, β_τ a nyomási eltolási faktor állandó nyírófeszültség mellett.

A módszer és a szoftver verifikálása

A mérőrendszert és a kiértékelő rendszert PP, PS, PC és PC+ABS alapanyagokon tesztelték. Választható módon a szoftver ki tudja számítani a mérésben a disszipáció révén kialakuló hőmérséklet-emelkedést. A **BASF AG** által előállított *PS 495 F* típusú polisztirol ömledék-hőmérsékletemelkedése 230 °C-on, 5000 1/s nyírósebesség mellett kb. 7 K, ami 200 000 1/s nyírósebességnél 11 K-re emelkedik. A pontosság kedvéért az ábrázolt viszkozitásadatokat hőmérséklet szempontjából korrigálják (4. és 5. ábra). A nyomástól és a hőmérséklettől független viszkozitásadatokat amorf polimerek esetében kúp-sík reométer- és fröccsreométer adatokból lehetett összeállítani (4. ábra). A görbe jól illeszthető volt és a szuperpozíciós elv is jól teljesült, tehát a hőmérséklet- és nyomásfüggetlen anyagállandókkal az anyag a mérési tartomány bármely pontján megbízhatóan jellemezhető. Az 5. ábrán látható az univerzális összefüggésből levezetett viszkozitásgörbe három hőmérsékleten, ellennyomás nélkül és 500 bar ellennyomással. A 250 °C-on, 500 bar ellennyomás mellett mért adatok szinte pontosan meg egyeznek a 210 °C-on, ellennyomás nélkül felvett görbe adataival. Ez azt jelenti, hogy az ellennyomás által kiváltott viszkozitásnövekedés mintegy 40 °C-os hőmérséklet-csökkenéssel egyenértékű.



4. ábra PS 495F polisztirol viszkozitás-mestergörbéje az a_{Tp} korrekciós tényező segítségével hőmérséklettől és nyomástól függetlenül megadható. A bemutatott adatokat rotációs viszkoziméterrel és fröccsreométerrel (SGMR) nyerték



5. ábra PS 495F polisztirol
(univerzális összefüggésből levezetett) viszkozitásgörbéje három hőmérsékleten,
ellennyomás nélkül és 510 bar ellennyomással

Választható hőmérséklet-korrektció

A teljes viszkozitásgörbe három hőmérsékleten történő felvétele (ellennyomás mellett is), beleértve a berendezés és a szerszám felszerelését, valamint az adatkiértékelést egy teljes munkanapot vesz igénybe. Időigény szempontjából ez összevethető egy nagynyomású kapillárisreométerrel végzett vizsgálattal. A fröccsreométer lehetővé teszi, hogy minden új műanyagot a használatbavétel előtt a feldolgozó a saját berendezésén részletesen megvizsgáljon a reológiai viselkedés szempontjából. Ennek birtokában a megvalósíthatósági tanulmányok és az első ajánlatok pontosabban elkészíthetők. A cégen belüli oktatáshoz egy reológiai bevezető és a mérőszenzorika felszerelését segítő részletes kézikönyv áll rendelkezésre. Van benne a mérőrendszer működtetésére és a reológiai kiértékelő szoftver kezelésére vonatkozó információ is. A disszipációs hő figyelembevételével számított hőmérséklet-korrektció választható – ez kapilláris reométerek esetében nem áll rendelkezésre és az elsődleges megvalósíthatósági tanulmányokat alátámasztó számításokhoz nem is feltétlenül szükséges. A korrekció nagy (10 000 1/s fölötti) nyírósebességek esetében nagyobb viszkozitást eredményez. A nyomásnak a viszkozításra gyakorolt hatása vékony falú fröccsdaraboknál már nem hanyagolható el. 500 bar nyomás már a teljes hőmérséklet-tartományban igen komoly viszkozitásvégelkedést eredményez. Ha ezt figyelembe veszik a feltöltés és az utónyomási fázis szimulációjában, a számított és mért szerszámnyomások jól fognak egyezni.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György
www.polygon-consulting.ini.hu

Filz, P. F.: Simulieren statt probieren = Kunststoffe, 100. k. 2. sz. 2010. p. 34–37.
Friesenbichler, W.; Duretek, I.; Rajganesch, J.: Praxisnahe Viskositäten für die Simulation =
Kunststoffe, 100. k. 3. sz. 2010. p. 37–40.