

SZUCHÁCS ANNA<sup>1</sup>, KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR<sup>1,2</sup>

# TERMOPLASZTIKUS POLIMEREK MOLEKULAHOSSZÁNAK HATÁSA A KIALAKULÓ KÖTÉSSZILÁRDSÁG SZÁMÍTÁSI MÓDSZERÉRE

## EFFECT OF THE MOLECULAR LENGTH OF THERMOPLASTIC POLYMERS ON THE BOND STRENGTH CALCULATING METHOD

A polimer hegedését leíró képletek a polimer molekulák hosszával és szerkezetével nem foglalkoznak, ezért célunk volt ezen képletek alkalmazhatóságának vizsgálata két eltérő molekulatömeggel és eloszlással rendelkező polimer esetén. Ennek érdekében vizsgáltuk a kialakuló hegedést két különböző polikarbonát anyaggal, majd a reptációs idejüket felhasználva kiszámoltuk a felület kötési szilárdságát a Yang képlet segítségével, majd a mért és számított eredményeket összevetettük.

Formulas describing polymer welding do not deal with the length and structure of the polymer molecules, so our aim is to investigate the applicability of these formulas for two polymers with different molecular weights and distributions. We investigated the healing of two different polycarbonate materials, then used their reptation times to calculate the surface bond strength using Yang's formula and compared the measured and calculated results.

### 1. BEVEZETÉS

Manapság az autógyártás területén fontos a súlycsökkentés, de még fontosabb szerepet kapott az újrahasznosíthatóság. Legtöbb esetben a súlycsökkentést térhálós kompozit termékekkel valósítják meg, azonban ezek hátránya, hogy költségesek és újrahasznosításuk még nem megoldott. A termoplasztikus gyan-tainfúziós technológia során (T-RTM), amellyel nagyméretű, hőre lágyuló mátrixú kompozit alkatrészek gyárthatók, a szerszámot kis viszkozitású monomerrel vagy oligomerrel töltjük ki, majd a polimerizáció a szerszámban megy végbe, így akár szövetek átítatása is lehetséges. Ezzel a technológiával előállított termékek esetén szinte a térhálós kompozitokkal létrehozott súlycsökkentés érhető el, ezen felül újrahasznosíthatók és a technológia sorozatgyártásra is alkalmas. A T-RTM technológiával gyártott

termékek merevsége utólagos bordázással növelhető. A bordák ráfröccsöntés segítségével alakíthatók ki.

A végső termék mechanikai tulajdonságát a T-RTM-mel kialakított darab és a borda között kialakuló kapcsolat nagymértékben befolyásolja. Azonos alapanyagú előgyártmány és borda esetén ez a kapcsolat hegedéssel jön létre, amelyet több paraméter befolyásol. A legnagyobb hatása a hőmérsékletnek van, hiszen a hőmérsékletet emelve a molekulák mozgása gyorsul, így a határfelületen végbemenő diffúzió is gyorsul. A hőmérsékleten kívül a nyomás is szerepet játszhat a hegedés során. Nem elegendően nagy nyomás esetén a hegedési felületen nem jön létre a megfelelő kapcsolat, amely gátolja a molekulák diffúzióját az egyik felületről a másikra. Ráfröccsöntés esetén a hegedési felületen, a technológiából kifolyólag, az ömledék nagy nyomással nyomódik az előgyártmánynak, ezért a megfelelő nyomás megléte minden ráfröccsöntés esetén feltételezhető. Egy jól kialakított kötéseő számítás módszerrel, az egész alkatrész tervezhetővé válna. Ennek ellenére a ráfröccsöntés szimuláció legnagyobb hiányossága, hogy a kialakuló kötéseőt a fröccsöntés szimulációs szoftverek még nem tudják számítani.

A polimerek móltömege a mechanikai tulajdonságra és a molekulák mozgékonyására nagy hatással van. Általánosságban elmondható, hogy meghatározható egy kritikus molekulatömeg, amely alatt a molekulák összefonódása nem tud létrejönni, így ez alatt az anyag viasz állagú, műszaki felhasználásra nem alkalmas. Ez a kritikus molekulatömeg 10000 g/mol körül van. Tehát minden műszaki felhasználású polimer esetén vannak összehurkolódások, amelyek a molekula láncok mozgását nagymértékben korlátozzák. A polimer láncok mozgását globálisan a reptációs modellel [1] és az összehurkolódások között a Rouse modellel [2] lehet leírni.

A reptáció elméletet, amivel akár a termoplasztikus anyagok hegedése is leírható, de Gennes [1] mutatta be az 1970-es években. A reptációs modell leírja a makromolekula helyzetét és mozgását az amorf polimerekben. Az „L” hosszúságú makromolekula helyzetét egy cső segítségével írja le, amely teljesen magába foglalja a makromolekulát. Ez a cső egy határ a többi molekula és a makromolekula között. A molekula mozgása csak ebben a

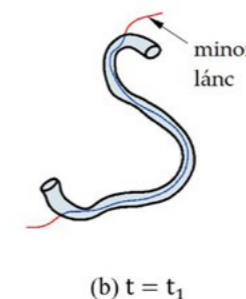
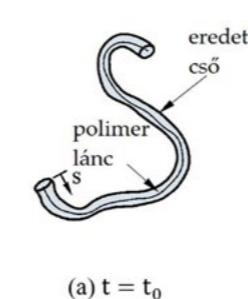
csőben történik. Amikor a hőmérséklet meghaladja az üvegesedési hőmérsékletet amorf anyagok esetén, vagy a kristályolvadási hőmérsékletet részben kristályos anyagok esetén, a makromolekula elkezd elhagyni ezt a csövet. Először a molekula végei lépnek ki ebből a képzeletbeli csőből, majd a molekula egyre nagyobb része hagyja el az eredeti helyét. Azt az időt, ami alatt a molekula teljesen elhagyja a csövet, reptációs időnek nevezzük (1. ábra) [1].

Wool és társai [3] azt állították, hogy a relaxációs idő használható reptációs időként. A polimerek relaxációs ideje meghatározható DMA-val és rotációs reométerrel. Ennek során különböző hőmérsékletek és frekvenciák mellett alakváltozás gerjesztéskor nézzük a polimer feszültség válaszát. Ebből a polimer tárolási (G') és veszteségi (G'') modulusza meghatározható és a polimer relaxációs ideje számítható. Bastien és Gillespie [4] az anyag reptációs idejét ezzel a módszerrel állapították meg.

A polimereknek molekulatömeg eloszlása van, ezért relaxációs idő spektrummal rendelkeznek, ebből kifolyólag nem egyértelmű, hogy a polimer melyik definíció szerinti relaxációs ideje alatt heged össze teljesen a két rész. A frekvencia függvényében a G' és G'' görbéje 2 (egy esetben 3) helyen metszi egymást, ezt keresztezési frekvenciának nevezik. Az első keresztezési frekvenciából a leghosszabb relaxációs idő számítható, és a lineáris molekulalánc hosszával és hosszeloszlásával van kapcsolatban. A második keresztezési frekvenciából, ami a frekvencia sóprésszel meghatározott görbén a plató után figyelhető meg, az összefonódási relaxációs idő számítható [5]. Giusti és társai [6] szerint a reptációs idő az első keresztezési frekvenciából számítható, Lui [7] szerint a második keresztezési frekvencia reciprokának harmada írja le megfelelően [8]. Ferry [8] szerint pedig a plató modulusz és a G'' görbe metszéspontja által meghatározott idő használható reptációs időként. Regnier és társai [9] azt állították, hogy a szám szerinti átlagos relaxációs idővel vagy a tömeg szerinti átlagos relaxációs idővel lehet leírni, egyes esetekben e között található a reptációs idő. Egy biztos, a polidiszperz anyagok esetén annak meghatározása nem egyszerű, hogy melyik relaxációs idő használandó, viszont a válasz az első és a második keresztezési frekvencia között keresendő, hiszen az előbb leírt helyek mind itt találhatóak.

Bastien és Gillespie [4] egyéb módszert is javasoltak a reptációs idő mérésére. Ebben az esetben nyíró próbatesteket készítettek préseléssel. Azt feltételezték, hogy a felmelegítés és hűtés ideje elhanyagolható a hegesztés időtartamához képest, és így a folyamat izotermikusnak tekinthető. A reptációs időt a (1) egyenlet segítségével számították vissza a kialakult kötéseőből.

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = \left(\frac{t}{t_R}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$



1. ábra: A polimer molekulák reptációs mozgásának szemléltetése: (a) a kezdeti időpillanatban, (b) a mozgás elindulta után és (c) a reptációs idő elteltével

ahol  $\sigma$  a kialakult kötési szilárdság,  $\sigma_{\infty}$  a kialakítható maximális kötési szilárdság,  $t$  az eltelt idő és  $t_R$  a reptációs idő.

Két termoplasztikus polimer darab között végbemenő hegedést a felületre bevitt hőmérséklet és a két darabot összenyomó, a felületen fellépő nyomás befolyásolja [3, 10, 11]. Tehát ráfröccsöntés esetén a kötési szilárdság ( $\sigma$ ) általában leírható a feldolgozási hőmérséklet ( $T$ ), az utónyomás ( $p$ ) és az idő ( $t$ ) függvényében ((2) egyenlet).

$$\sigma = f(T, p, t) \quad (2)$$

A kialakuló kötési szilárdság nagysága ráfröccsöntés esetén az alkalmazott feldolgozási paramétereiktől függ, például a szerszám és az ömledék hőmérsékletétől ( $T_{sz}$  és  $T_{\theta}$ ), az alkalmazott utónyomás nagyságtól és idejétől ( $p_{ut0}$  és  $t_{ut0}$ ). Candal és társai [12] bemutatták, hogy a növekvő ömledék hőmérséklettel és egyes esetekben a növekvő szerszám hőmérséklettel a kötéseő polipropilén lap és termoplasztikus Santoprene elasztomer borda között növekszik. Kísérleteik során az utónyomásnak és a befroccsöntési sebességnek a hatása elhanyagolható volt a hegedés szempontjából.

Giusti és Lucchetta [13] kísérleteik során azt kapták, hogy a magasabb ömledék hőmérséklet és utónyomás nagyobb kötési szilárdságot eredményez polipropilén esetén, viszont Candal és társai [12] ellentétben kutatásuk során a szerszám hőmérséklet növelésével a kötési szilárdság csökkent.

Számos analitikus modell létezik, ami leírja két polimer rész között kialakuló kötéseőt amorf polimerek esetén. Ezeknek a modelleknek a közös tulajdonsága, hogy segítségükkel a hegedési fokot ( $D_h$ ) tudjuk meghatározni. A hegedési fok az elért kötési szilárdság ( $\sigma$ ) és a maximálisan elérhető kötési szilárdság ( $\sigma_{\infty}$ ) aránya ((3) egyenlet), amely egyenlő az egybefroccsöntött darabok szilárdságával, ami az anyag szakítási szilárdságával egyezik meg [4, 10, 14, 15].

$$D_h = \frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} \quad (3)$$

Bastien és Gillespie [4] voltak az elsők, akik olyan modellt publikáltak, amellyel számítható az amorf anyagok hegedése nem izoterm körülmények között. Első cikkükben két modellt mutattak be, amelyeknek a levezetését más kezdeti képletekből kezdték el. Az első modell ((4) egyenlet) esetén az alárendelt láncrészt növekményéből, míg a második képletüket ((5) egyenlet) a kötéseő növekedéséből vezették le.

$$D_h = \frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = \left(\frac{t}{L}\right)^{1/2} = \left[\sum_{i=0}^n \frac{t_{i+1}^{1/2} - t_i^{1/2}}{t_R(T)^{1/2}}\right]^{1/2} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport

$$D_h = \frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \sum_{i=0}^n \frac{t_{i+1}^{1/4} - t_i^{1/4}}{t_R(T)^{1/4}} \quad (5)$$

ahol  $D_h$  a hegedési fok,  $\sigma$  a kialakult kötésező,  $\sigma_\infty$  a maximálisan kialakítható kötesszilárdság,  $l$  a minor láncrész hossza,  $L$  a teljes lánc hossz,  $t_i$  az adott lépéshez tartozó időintervallum és  $t_R$  a  $T$  hőmérsékletre tartozó reptációs idő.

Sonmez és Hahn [15] olyan összefüggést ((6) egyenlet) publikáltak, amely integrál segítségével számítja ki a nem izotermikus körülmények között kialakuló hegedés nagyságát.

$$D_h = \frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \left[ \int_0^t \frac{d\tau}{2\sqrt{\tau \cdot t_{rep}(\tau)}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

ahol  $\tau$  az idő,  $t_{rep}$  pedig a reptációs idő.

Azonban később Yang és Pitchumani [10, 14] bebizonyították, hogy az előzőekben bemutatott összefüggések ((4)-(6) egyenlet) csak izoterm esetekben tudják helyesen leírni a polimerek viselkedését. Ezen kívül azt állították, hogy ezek az összefüggések ((4)-(6) egyenlet) csak egy bizonyos molekulatömeg alatti polimerekre érvényesek. A kritikus molekulatömeg  $M_c$  és  $8M_c$  között a hegedés tönkremenetele lánckihúzó, míg  $8M_c$  felett lánckszakadás lesz. Így Bastien modellje csak  $M_c$  és  $8M_c$  között használható, viszont a mérnöki gyakorlatban használt hőre lágyuló polimerek ennél nagyobb molekulatömeggel rendelkeznek. A szerzők azt állították, hogy a nagy molekulatömegű anyagoknak a reptációs időnél kevesebb időre van szükségük, hogy elérjék maximális kötesszilárdságukat. Ez az idő az, ami alatt a  $8M_c$  molekulatömegű polimer láncrész elhagyja az eredeti csövet. Ezek alapján létrehoztak egy olyan összefüggést ((7) egyenlet), amely leírja a nagy molekulatömegű amorf polimerek hegedését nem izotermikus körülmények között.

$$D_h = \frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \left[ \int_0^t \frac{1}{t_w(T)} dt \right]^{1/4} \quad (7)$$

ahol  $t_w$  a hegedési idő a  $T$  hőmérsékleten.

A hegedés mértéke nem csak a feldolgozási paramétereiktől, hanem az alapanyag tulajdonságaitól is függ. Az egyik legmeghatározóbb alapanyag tulajdonság a molekulatömeg és a molekulák alakja. Azonos ismétlődő egység esetén, minél hosszabb a molekulalánc, annál inkább csökken a molekulalánc mozgékonyasága. A molekulalánc hosszára akár MFI értékekből is tudunk következtetni ((8) egyenlet), így azonos gyártó, azonos adalékolású, azonos típusú alapanyagainak molekulatömegét össze lehet hasonlítani [16, 17].

$$\frac{1}{MFI} = GM_w^x \quad (8)$$

ahol MFI a folyási mutatószám,  $M_w$  a súly szerinti átlagos molekulatömeg,  $G$  és  $x$  anyagfüggő konstansok, értékük:

$$G = 2 \cdot 10^{(-20)} - 1 \cdot 10^{(-24)} \quad \text{és} \quad x = 3,4 - 3,7$$

A polimer hegedését leíró képletek a polimer molekulák hosszával és szerkezetével nem foglalkoznak, ezért a célunk ezen képletek alkalmazhatóságának vizsgálata két eltérő molekulatömeggel és eloszlással rendelkező polimer esetén. Ennek érdekében vizsgáltuk a kialakuló hegedést két különböző polikarbonát anyaggal, majd a reptációs idejüket felhasználva kiszámoltuk a felületi kötési szilárdságát a Yang képlet segítségével, majd a mért és számított eredményeket összevetettük.

## 2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

### 2.1. ANYAGOK

A mérésekhez két különböző polikarbonát (PC) anyagot használtunk fel (1. táblázat). Ezek az anyagok a molekulatömegükben és molekulatömeg eloszlásukban különböznek, amely a hegedést nagymértékben befolyásolhatja.

1. táblázat: Hegedés vizsgálatához használt alapanyagok tulajdonságai

Felhasznált anyag	Covestro Makrolon 2805 PC	Covestro Makrolon 2205 PC
MFI	37 g/10min	10 g/10min
Ajánlott szárítási hőmérséklet és idő	120 °C (2-4 óra)	120 °C (2-4 óra)
Ajánlott ömledék hőmérséklettartomány	280 – 320 °C	280 – 320 °C
Ajánlott szerszám hőmérséklettartomány	80 – 120 °C	80 – 120 °C

### 2.2. RÁFRÖCCSÖNTÉS

A ráfröccsöntéshez szükséges alaplapokat Arburg Allrounder 320C 400-170 fröccsöntő gépen gyártottuk le. Az alaplapokra történő ráfröccsöntéshez Arburg Allrounder 470 A 1000-290 fröccsöntő gépet és egy erre alkalmas csúszkás fröccsöntő szerszámot [18] (2. ábra) használtunk. A ráfröccsöntés előtt 20 másodperc várakozási időt alkalmaztunk, amely alatt az előgyártmány a zárt szerszámokban a szerszám hőmérsékletére melegedett fel. A ráfröccsöntést 80 °C-os szerszám és három különböző ömledék hőmérséklet (300, 320 és 340 °C) mellett hajtottuk végre. A ráfröccsöntés sebessége 40 cm/s volt, amely után az átkapcsolást az érintkező felület közelében lévő nyomásmérő szenzor segítségével szabályoztuk, amely 0,4 MPa-os nyomás elérésekor kapcsolt át. Az utónyomás 50 MPa volt 5 másodpercig.

### 2.3. MECHANIKAI ÉS REOLÓGIAI TESZTEK

A hegedési felületen létrejövő szilárdságot Zwick Z020-as szakítógéppel és egy speciális befogó szerkezettel [45] (3. ábra) vizsgáltuk. Az anyagok reptációs idejének számításához szükséges keresztelési frekvenciát sík-sík lapú rotációs reométer (TA Instrument RA 2000) segítségével mértük meg frekvenciasóprás módszerrel.

### 2.4. FRÖCCSÖNTÉSI SZIMULÁCIÓK

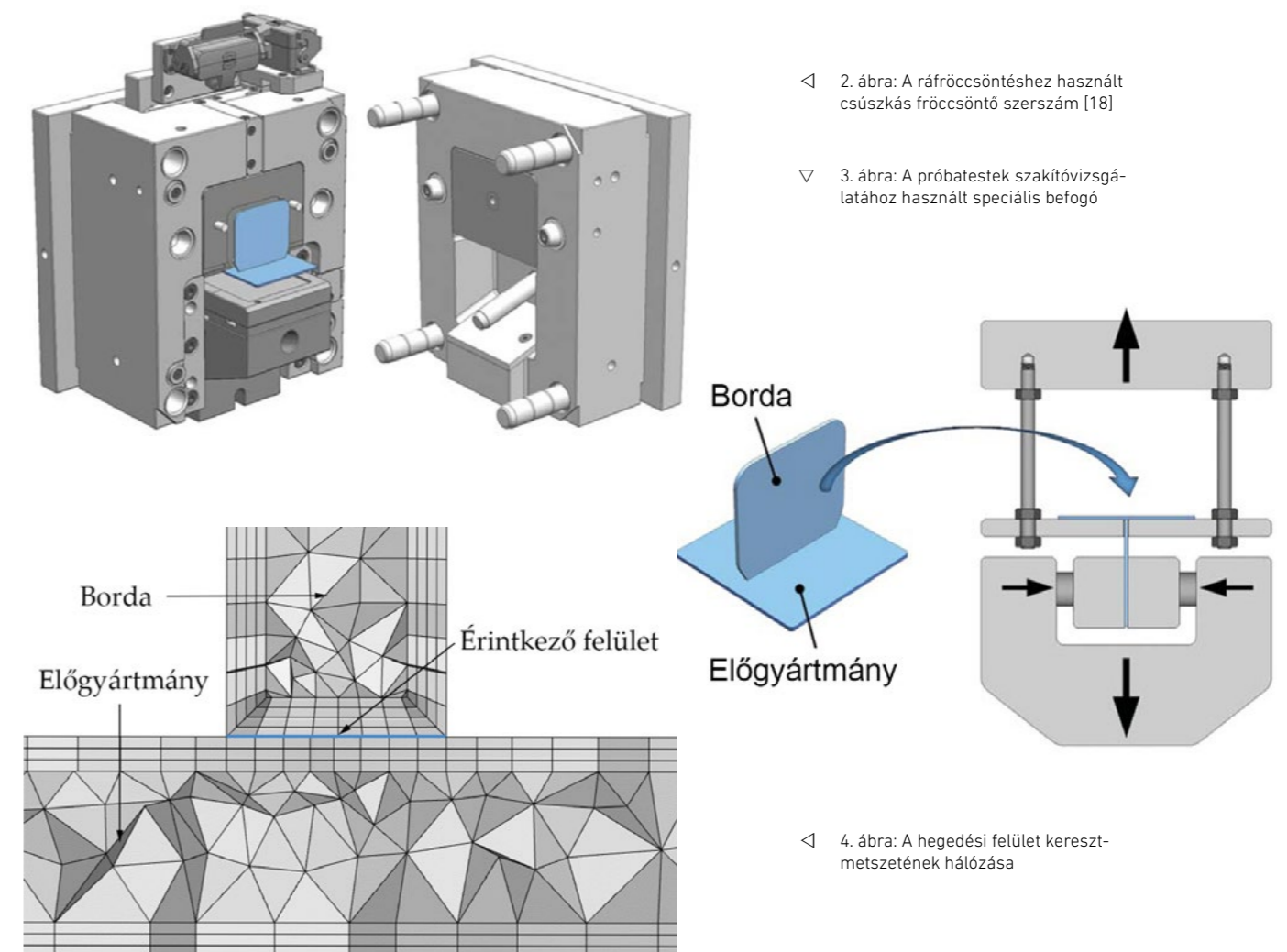
A hegedési szilárdság számításokat Matlab programban írt kóddal végeztük el. A számításokhoz szükséges az érintkező felület hőmérséklet lefutása, amit a Moldex3D fröccsöntési szimulációs program segítségével határoztunk meg. 3D hálót hoztunk létre, amely tetraéder és hexaéder hálóelemeket használ. A hexaéder elemekből határreteg hálót hoztunk létre, így javítva a számítás pontosságát a keresztmetszet mentén, míg a tetraéder elemek a test belsejét töltik ki (4. ábra). A szimulációk beállítását minden esetben a valósággal megegyezően állítottuk be. A kialakuló

hőmérsékletlefutásokat három ömledék hőmérsékleten (300, 320 és 340 °C) vizsgáltuk.

## 3. EREDMÉNYEK

A hegedési erő számításához az irodalomkutatásban bemutatott összefüggést ((7) egyenlet) használtuk. A hegedés számítási képletek hátránya, hogy a felületi hőmérséklet egyenetlenségeket nem veszik figyelembe, viszont ráfröccsöntés esetén az érintkező felületen található egyes pontok hőmérséklet lefutása jelentős mértékben eltér egymástól. Az eltérő hőmérsékletlefutás figyelembevétele érdekében a hegedési szilárdságot a létrehozott háló minden felületi csomópontjára kiszámoltuk. Ezután minden csomóponthoz hozzárendeltük annak a felületnek a nagyságát, amelyet ez a szilárdság jellemez. Ez közel azonos méretű hálóelemek esetén kiszámítható úgy, hogy a hegedési felület teljes területét elosztjuk a felületen található csomópontok számával. A hozzárendelt felülettel rendelkező csomópontok szilárdságából a teljes felület szilárdságát számoltuk ki, amely összehasonlítható a mért eredményekkel. A számításokat Matlab programmal végeztük, amihez a következő adatokra volt szükségünk:

- a reptációs időre illesztett WLF függvény  $C_1$  és  $C_2$  konstansaira,
- a referencia reptációs időre ( $t_{ref,rep}$ ) és hőmérsékletre ( $T_{ref}$ ),



2. ábra: A ráfröccsöntéshez használt csúszkás fröccsöntő szerszám [18]

3. ábra: A próbatestek szakítóvizsgálatához használt speciális befogó

4. ábra: A hegedési felület keresztmetszetének hálózása

2. táblázat: A felületi pontok hőmérséklet mátrixa, ahol "n" az érintkező felületen található csomópontok száma és "m" a szimulációból kimentett időlépések száma

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_m$
csomópont 1	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	...	$T_{1m}$
csomópont 2	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	...	$T_{2m}$
csomópont 3	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	...	$T_{3m}$
...	...	...	...	...	...
csomópont n	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$	...	$T_{nm}$

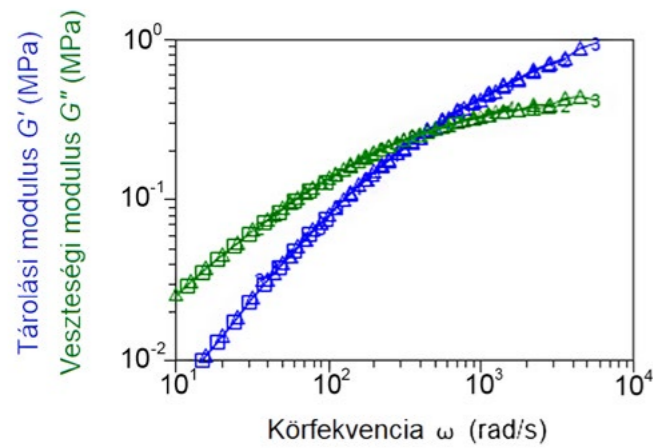
- az anyag szakítószilárdságára,
- a felületi pontok hőmérséklet lefutására (2. táblázat).

Az általunk bemutatott módszer esetén a számításokhoz csak a reptációs idő mérésére és a hőmérsékletlefutásra van szükség, így csak azokat a változásokat tudja modellezni, amelyek hatással vannak a reptációs időre vagy a hőmérsékletlefutásra. A reptációs időt a második keresztelési frekvenciából számoltuk át ((9) egyenlet).

$$t_R = \frac{2\pi}{\omega_x} \quad (9)$$

Polikarbonát anyagnál a második keresztelési frekvencia a rotációs reométer mérési tartományán kívül esett a feldolgozási hőmérséklet tartományban. Azokat a tartományokat, amelyeket





△ 5. ábra: A PC 2205 anyag tárolási és veszteségi modulusz mestergörbéje vízszintes és függőleges eltolás esetén

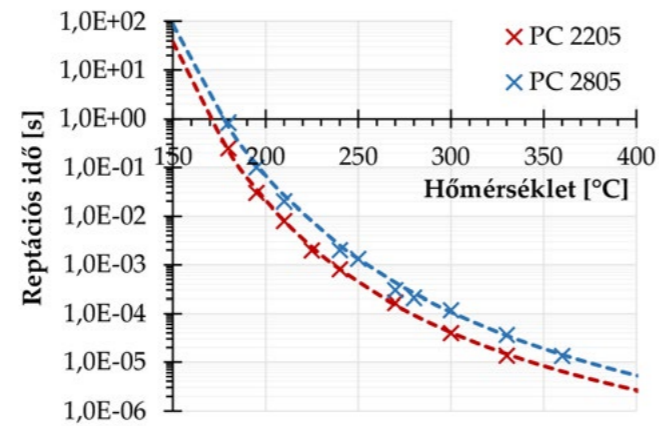
nem tudtuk mérni, mestergörbe szerkesztéssel a TA Instruments TRIOS programjában határoztuk meg. Mestergörbe szerkesztés esetén y irányú eltolás csak jelentős sűrűségváltozás esetén kötelező, ami részben kristályos polimereknél jellemzőbb. A polikarbonátnál az y irányú eltolással a görbék sokkal pontosabban illeszkedtek, ezért mindkét irányú eltolást használtuk (5. ábra). A program az eltolási tényezőket automatikusan számolja. A további számítások esetén, mivel csak a keresztezési frekvenciához tartozó modulusz értékre nincs szükség, elegendő az x irányú eltolási tényezők ismerete.

A két polikarbonát anyag reptációs idő görbéje eltérő, amelynek egyik oka a különböző molekulatömeg lehet (6. ábra). A molekulaláncok hossza a hegedést nagymértékben tudja módosítani, hiszen a molekulalánc rövidülésével a molekulalánc könnyebben tud mozogni, így a teljes hegedéshez szükséges idő, tehát a reptációs idő csökken. A molekulatömeg adat az anyagok adatlapjában nem található, de az MFI (Melt Flow Index) értékekből erre következtetni lehet ((8) egyenlet). A súlyszerinti átlagos molekulatömeg becsléséhez szükséges konstansokat  $G = 10^{(20)}$  és  $x=3,6$ -ra választottuk meg. Az így kapott eredményekből megállapítható, hogy abban az esetben, ha a két polimer molekulalánc szerkezete közel azonos, akkor a PC 2805 rendelkezik a nagyobb átlagos molekulatömeggel (3. táblázat). Az is megfigyelhető, hogy a molekulatömeg növekedésével a reptációs idő is növekedett, ahogy arra számítani lehetett (6. ábra).

3. táblázat: Számolt súly szerinti átlagos molekulatömeg PC 2205 és PC 2805 esetén

Alapanyag	Súly szerinti átlagos molekulatömeg ( $M_w$ )
Covestro Makrolon 2805 PC	190000 g/mol
Covestro Makrolon 2205 PC	132000 g/mol

Mivel a számítási képletekben a reptációs idő lefutására volt szükségünk, először a hőmérséklet adatokat számoltuk át



△ 6. ábra: Eltérő molekulatömeg hatása polikarbonát anyagok reptációs idejére

4. táblázat: A felületi pontok reptációs idő mátrixa, ahol "n" az érintkező felületen található csomópontok száma, "m" a simulációból kimentett időlépések száma

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_m$
csomópont 1	$t_{rep,11}$	$t_{rep,12}$	$t_{rep,13}$	...	$t_{rep,1m}$
csomópont 2	$t_{rep,21}$	$t_{rep,22}$	$t_{rep,23}$	...	$t_{rep,2m}$
csomópont 3	$t_{rep,31}$	$t_{rep,32}$	$t_{rep,33}$	...	$t_{rep,3m}$
...	...	...	...	...	...
csomópont n	$t_{rep,n1}$	$t_{rep,n2}$	$t_{rep,n3}$	...	$t_{rep,nm}$

reptációs időkké a WLF konstansok és a referencia értékek segítségével ((10) egyenlet, 4. táblázat). Abban az esetben, amikor a csomópont hőmérséklete az üvegesedési hőmérséklet alatt van, akkor a reptációs idő végtelen, hiszen hegedés nem történik. Ha a csomópont a teljes folyamat alatt nem lépi át az üvegesedési hőmérsékletet, abban a pontban a hegedés nem jön létre.

$$t_{rep}(T) = 10^{\frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})}} \cdot t_{ref,rep} \quad (10)$$

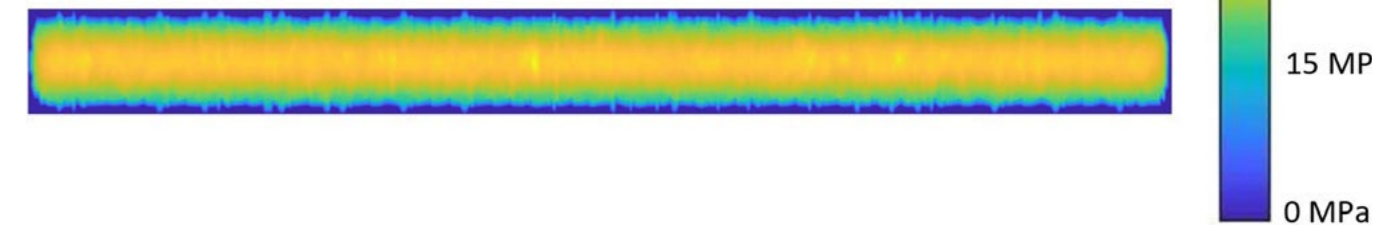
A reptációs idő lefutásokkal minden csomópontra meghatározható a hegedési fok, ami a kötési szilárdság és a teljes kötési szilárdság hányadosa. A teljes kötési szilárdság akkor alakul ki, ha a teljes diffúzió lejátszódik. Ha a teljes diffúzió a felületen lejátszódik, akkor a tulajdonságok az érintkező felületen megegyeznek a tömbi anyag tulajdonságaival, ezért a teljes kötési szilárdság értékre az anyag szakítószilárdságát használtuk. A hegedési fokot az irodalomkutatásban bemutatott (7) egyenlettel határoztuk meg (5. táblázat). A folyamat alatt a reptációs idő több nagyságrendet változnak, így a megfelelő görbeillesztéshez nagyon magas fokszámú polinomot kell használni. A magas fokszámú polinom illesztésének, majd a későbbi integrálásának számítási igénye nagyon nagy. A számítási igény csökkentésének érdekében numerikus integrálást, trapéz módszert használtunk. Mivel a hegedési fok definíciójából következően nem lehet egynél nagyobb, ezért ebben az esetben a  $D_{(h,max)}=1$  megkötést alkalmaztuk.

5. táblázat: A felületi pontok hegedési fok vektora, ahol "n" az érintkező felületen található csomópontok száma

	$D_h$
csomópont 1	$D_{h,1}$
csomópont 2	$D_{h,2}$
csomópont 3	$D_{h,3}$
...	...
csomópont n	$D_{h,n}$

6. táblázat: A felületi csomópontok kötési szilárdság vektora, ahol "n" az érintkező felületen található csomópontok száma

	$\sigma$
csomópont 1	$\sigma_1$
csomópont 2	$\sigma_2$
csomópont 3	$\sigma_3$
...	...
csomópont n	$\sigma_n$

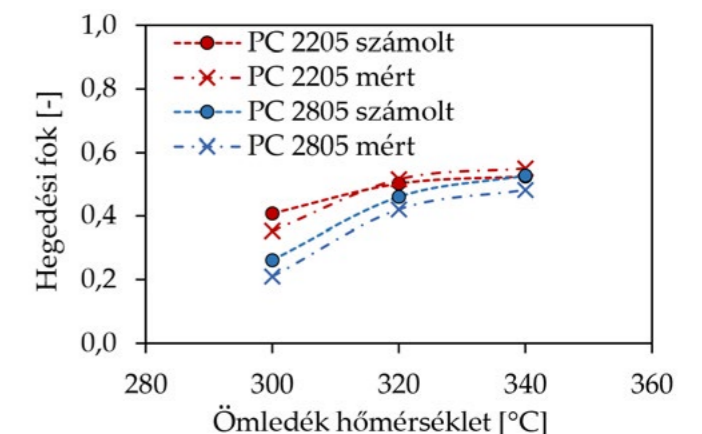
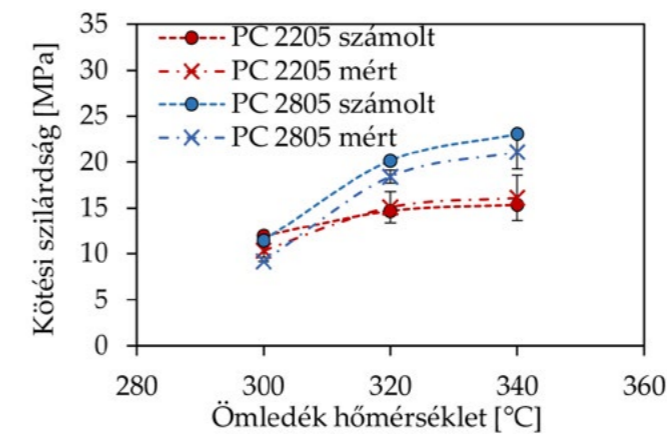


△ 7. ábra: Hegedési fok térkép az érintkező felületen PC 2205 esetén 80 °C-os szerszámhőmérséklet és 300 °C-os ömledék-hőmérséklet mellett

Mint már említettük, a hegedési fok a kötési szilárdság és az anyag szakítószilárdságának hányadosa. Az anyag szakítószilárdság értékével és a hegedési fokkal a (11) egyenlet alapján minden csomópontban kiszámoltuk a hozzá tartozó felületrész kötési szilárdságát (6. táblázat).

$$\sigma_{x,i} = D_{h,x,i} \cdot \sigma_{szak} \quad (11)$$

A kiszámolt kötési szilárdság értékekkel és az adott pontok koordinátájával a kötési szilárdság eloszlás az érintkező



△ 8. ábra: Molekulatömeg hatása a (a) kötési szilárdságra és (b) a hegedési



változást jól leköveti (8/a ábra). A számított eredmények szinte minden esetben a szórási tartományon belül található. Az eredményekből az is látható, hogy a nagyobb molekulatömegű anyag kötési szilárdsága nagyobbra adódott. Ez nem ellentétes azzal az állítással, hogy a kisebb molekulatömegű anyagok jobban hegednek, hiszen a kötési szilárdság számításához az anyag szakítószilárdságára is szükség van. A hegedés jóságára a hegedési fokból következtethetünk, amely az elért szilárdság és az anyag szakítószilárdságának hányadosa. A hegedési fokokból megállapítható, hogy a vártakkal megegyezően mind a mérések esetén, mind számolás esetén a nagyobb molekulatömegű PC 2805 kevésbé hegedt össze, mint a kisebb molekulatömegű PC 2205 (8/b ábra). Így az eredmények alapján elmondható, hogy a számítási módszer alkalmas akár kismértékű átlagos molekulatömeg változtatás hatásának kimutatására is.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során egy olyan módszert fejlesztettünk ki, amivel a kötési szilárdság ráfröccsöntés esetén számítható. A módszer segítségével figyelembe tudjuk venni, hogy a hegedési felületen a csomópontok hőmérsékletlefutása nagymértékben eltér. A módszerünk teszteléséhez két polikarbonát anyagot használtunk, amelyek a gyártó szerint csak a molekulatömegükben és eloszlásukban térnek el. A polimerek hegedésére nagy hatással van a molekulaláncok hossza, amelyet így a hegedés számítás során figyelembe kell vennünk. Az általunk létrehozott módszer a hegedési fokot és az ebből számított kötési szilárdságot megfelelően számolta Convesto Makrolon PC 2805 és PC 2205 esetén is. A hegedés számítás jól lekövette azt a trendet, amely szerint a kisebb molekulatömeggel rendelkező anyagok hegedési képessége nagyobb, így nagyobb hegedési fok tud létrejönni azonos körülmények között. A hegedés számítási módszer átlagosan 10%-os hibával rendelkezett és a valóságban kialakuló trendeket jól lekövette.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásunk a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) 2018-1.3.1-VKE-2018-00001 pályázatának a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Köszönjük az ARBURG Hungária Kft-nek az Arburg Allrounder 470 A 1000-290 típusú fröccsöntő gépet, valamint a TOOL-TEMP Hungária Kft-nek, a LENZKES GmbH-nak és a PIOVAN Hungary Kft-nek a kiegészítő berendezéseket.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [ 1 ] De Gennes, P. G.: Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles, The Journal of Chemical Physics (1971).
- [ 2 ] Rouse, P. E.: A theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers, The Journal of Chemical Physics (1953).

- [ 3 ] Wool, R. P.; Yuan, B. L.; McGarel, O. J.: Welding of polymer interfaces, Polymer Engineering & Science (1989).
- [ 4 ] Bastien, L. J.; Gillespie, J. W.: A non isothermal healing model for strength and toughness of fusion bonded joints of amorphous thermoplastics, Polymer Engineering & Science (1991).
- [ 5 ] Szántó, L., Vogt, R.; Meier, J., Auhl, D.; Van Ruymbeke, E., Friedrich, C.: Entanglement relaxation time of polyethylene melts from high-frequency rheometry in the mega-hertz range, Journal of Rheology (2017).
- [ 6 ] Giusti, R.; Lucchetta, G.: Modeling the adhesion bonding mechanism in overmolding hybrid structural parts for lightweight applications, in Key Engineering Materials (2014).
- [ 7 ] Liu, C. Y.; Keunings, R.; Bailly, C.: Direct rheological evidence of monomer density reequilibration for entangled polymer melts, Macromolecules (2007).
- [ 8 ] Ferry, J. D.: Viscoelastic properties of polymers (1980).
- [ 9 ] Regnier, G., Le Corre, S.: Modeling of Thermoplastic Welding, in Heat Transfer in Polymer Composite Materials: Forming Processes (2016).
- [ 10 ] Yang, F., Pitchumani, R.: Nonisothermal Healing and Interlaminar Bond Strength Evolution During Thermoplastic Matrix Composites Processing, in Polymer Composites, (2003).
- [ 11 ] Stokes-Griffin, C. M.; Compston, P.: An inverse model for optimisation of laser heat flux distributions in an automated laser tape placement process for carbon-fibre/PEEK, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2016).
- [ 12 ] Candal, M. V.; Gordillo, A.; Santana, O. O.; Sánchez, J. J.: Study of the adhesion strength on overmoulded plastic materials using the essential work of interfacial fracture (EWIF) concept, Journal of Materials Science (2008).
- [ 13 ] Giusti, R.; Lucchetta, G.: Analysis of the welding strength in hybrid polypropylene composites as a function of the forming and overmolding parameters, Polymer Engineering and Science (2018).
- [ 14 ] Yang, F., Pitchumani, R.: Interlaminar contact development during thermoplastic fusion bonding, Polymer Engineering and Science (2002).
- [ 15 ] Sonmez, F. O.; Hahn, H. T.: Analysis of the on-line consolidation process in thermoplastic composite tape placement, Journal of Thermoplastic Composite Materials (1997).
- [ 16 ] Bremner, G.; Cook, A.; Rudin, T. D.; Bremner, T.; Cook, D. G., Rudin, A.: Further Comments on the Relations between Melt Flow Index Values and Molecular Weight Distributions of Commercial Plastics, Journal of Applied Polymer Science, 43, 1617 (1991).
- [ 17 ] Bremner, T.; Rudin, A.: Melt Flow Index Values and Molecular Weight Distributions of Commercial Thermoplastics
- [ 18 ] Boros, R., Rajamani, P. K., Kovács, J. G.: Thermoplastic overmolding onto injection-molded and in situ polymerization-based polyamides, Materials, 11, (2018).

### MACH-TECH és IPAR NAPJAI szakkiállítások

– Magyarország legjelentősebb üzleti találkozója az iparban

**Helyszín:** HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

A MACH-TECH és IPAR NAPJAI kiállítás-együttes évről évre teret ad az ipari ágazatok, az egyedülálló innovációk bemutatkozására, valamint az üzleti kapcsolatépítésre.

**Betétkiállítás: VÉDŐHÁLÓ Budapest** - munkavédelmi kiállítás

**Egyidejű rendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY**  
Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiállítás

**Bővebb információ és kiállítói jelentkezés:**  
[www.iparnapjai.hu](http://www.iparnapjai.hu)

**Szakmai partnerek:**    

### MACH-TECH

15. Nemzetközi gépgyártás-technológiai és hegesztéstechnikai szakkiállítás

### IPAR NAPJAI

9. Nemzetközi ipari szakkiállítás

2022. május 10-13.

## A technológia az átalakuláshoz itt van.



GREENPLAST

### ÚJ IDŐPONTBAN!

A 10. Automotive Hungary 2022 májusában kerül megrendezésre a HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központban

#### FÓKUSZPONTOK:

- DIREKT és INDIRÉKT beszállítók
- „ÜZLET, TUDOMÁNY, KARRIER” tematikai pontokra épülő programok
- Automotive Hungary TechTogether mérnökverseny
- Beszállítói fórumok
- Magas színvonalú szakmai konferenciák
- Mérnöki továbbképzések

#### Társrendezvények:

**MACH-TECH** Nemzetközi gépgyártás-technológiai és hegesztéstechnikai szakkiállítás  
**IPAR NAPJAI** Nemzetközi ipari szakkiállítás

**Bővebb információ és kiállítói jelentkezés:**  
[www.automotivexpo.hu](http://www.automotivexpo.hu)  
[automotivexpo@hungexpo.hu](mailto:automotivexpo@hungexpo.hu)

### AUTOMOTIVE HUNGARY

10. Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiállítás

2022. május 10-13.

## A jövőhöz vezető út itt van.

