

EJTŐDÁRDÁS MÉRÉSI KONSTRUKCIÓ TOVÁBBFEJLESZTÉSE POLIMER HABOK DINAMIKUS MECHANIKAI VIZSGÁLATÁHOZ

DEVELOPMENT OF FALLING WEIGHT MEASUREMENT LAYOUT FOR DYNAMIC MECHANICAL TESTING OF POLYMER FOAMS

Tomin Márton¹ PhD hallgató, Kmetty Ákos^{1,2} egyetemi docens

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnök Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

²MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

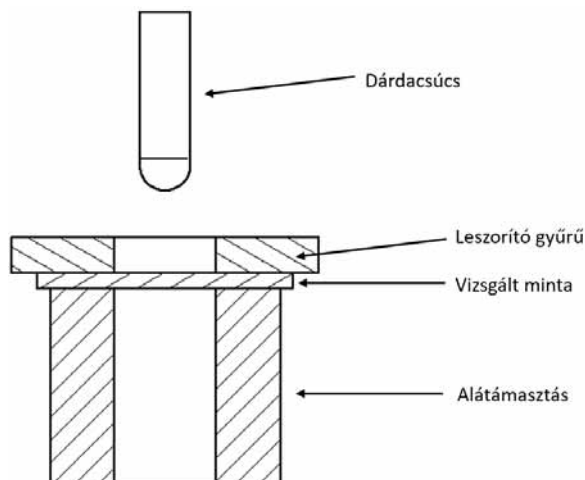
ABSTRACT

In this research, we investigated the applicability of different falling weight impact testing layouts for the dynamic mechanical characterization of polymeric foams. We have showed that by modifying the hollow support of the impact tester to a solid support, the real-life application of polymer foams can be modeled better. The developed measurement arrangement is suitable for the determination of the so-called cushion curves. The measurement methods were evaluated by testing weakly cross-linked polyethylene foams in two different densities.

1. BEVEZETÉS

A polimer habok ipari felhasználása folyamatosan növekszik köszönhetően a habosított termékek kisebb tömegének [1], valamint a kiváló szigetelő- és energiaelnyelő képességüknek [2-4]. A legnagyobb felhasználói szegmensek közé tartozik a csomagoló- és a sportzergyártó ipar, ahol a habok fő feladata a becsomagolt termék (pl. műszaki cikk) vagy a sportolást végző személy védelme a mechanikai sérülésekkel szemben [5]. Ehhez kiemelkedő ütésállapítási képesség szükséges, amely tulajdonságot jellemzően ejtődárdás mérésekkel szoktak minősíteni [6].

Az ejtődárdás mérés a dinamikus mechanikai vizsgálatok közé tartozik, amelyet gyakran alkalmaznak fóliák, lemezek és kompozitok vizsgálatára [7, 8]. Ezen esetekben adott magasságból egy leszorító gyűrű által pozícionált mintára ejtenek egy adott tömegű, jellemzően félgömb végződésű dárdát (1. ábra). A méréssel az átszakításhoz szükséges energiából, valamint az erő-idő diagrammok lefutásából következtetni tudunk az anyag ütőszilárdságra, valamint szívósságára [9].



1. ábra. Hagyományos ejtődárdás vizsgálat sematikus képe

Az iparban azonban a polimer habok ütésállapítási képességének minősítéséhez eltérő mérési konstrukció (tömör, sík alátámasztás és nagyobb méretű dárdacsúcs) kialakítására van szükség. Sportszőnyegként funkcionáló habszerkezetek esetében például a talaj szolgál alátámaszként, míg a csomagolóanyagok minősítésére alkalmazott úgynevezett párnázási görbék meghatározása is tömör alátámasztással történik [10-12].

Kutatómunkánk során egy hagyományos ejtődárdás ütőmű átalakítását végeztük el úgy, hogy az iparban (pl. sportolási célú) használt polimer habok ütésállapítása szempontjából relevánsabb mérési konstrukciót alakítsunk ki. A különböző mérési elrendezések alkalmazhatóságát kis sűrűségű, gyengén térhálóított polietilén habok dinamikus mechanikai vizsgálatával minősítettük.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK

Vizsgálatainkat két különböző sűrűségű, zárt cellás, gyengén térhálóított polietilén habszerkezeteken végeztük el. A minták jelölését, vastagságát, valamint sűrűségét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Vizsgált minták jelölése, vastagsága és sűrűsége

Minta jelölése	Vastagság [mm]	Sűrűség [kg/m ³]
C30	30,08 ± 0,14	29,5 ± 0,1
C40	29,86 ± 0,35	41,1 ± 2,0

A minták minden esetben 3 db 10 mm vastag rétegből lánglaminálási módszerrel kerültek összehegesztésre. A lánglaminálás egy gyors és költséghatékony technológia, amely során a már előre legyártott habosított táblákat kalander hengerek segítségével egy nyílt lángon vezetik keresztül, de csak annyi időre, hogy a hablemez felületén egy vékony, folyékony polimer réteg keletkezzen, majd a táblákat egymáshoz rögzítik. A kialakított kötés minősége függ a gáz típusától, a lángmagasságtól és a lángterjedési sebességtől is. Az ilyen technológiával előállított többrétegű termékekkel gyakran találkozni egészségügyi és sportmatracok esetében, mivel a szigorú egészségügyi szabályozások miatt általában nem alkalmazható ragasztóanyag [13].

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

3.1. Dinamikus mechanikai vizsgálatok

A dinamikus mechanikai vizsgálatokat egy Ceast Fractovis 9350 típusú (Torino, Olaszország) ejtődárdás ütőművel végeztük. A mérőberendezés gyári mérési konstrukciója (1. ábra) mellett módosított elrendezésű méréseket is végeztünk, amelyek esetében eltérő dárda geometriát és alátámasztásokat alkalmaztunk. Az eredetileg félgömb végződésű dárdacsúcsot egy henger alakú dárdára cseréltük, míg új, tömör alátámasztásként először egy 10 mm vastag

poliamid (PA) lapot, majd később egy 40 mm vastag acél téglatestet használtunk (2. ábra).



2. ábra. Módosított mérési konstrukciók: PA és acél alátámasztás

Mindkét vizsgálati típus esetében egy nyúlásmérő bélyeggel ellátott, 22 kN méréshatáru erőmérő cellát alkalmaztunk és törekedtünk az azonos mérési paraméterek megválasztására (2. táblázat). Az eredeti elrendezésben a vizsgálatokat leszorító gyűrűvel és anélkül egyaránt elvégeztük. A mérésekhez minden esetben szalagfűrésszel 5 db 100x100 mm befoglaló méretű próbatestet készítettünk.

2. táblázat. Ejtődárdás mérésekhez alkalmazott beállítások

Jellemző	Eredeti elrendezés	Módosított elrendezés
Dárda geometria	Félgömb	Henger
Dárda átmérő	20 mm	50 mm
Ejtési magasság	400 mm	400 mm
Becsapódási sebesség	2,8 m/s	2,8 m/s
Becsapódási energia	21,20 J	21,63 J
Alátámasztás típusa	eredeti furatos (átmérő: 40 mm)	tömör PA/ acél
Leszorítás	3000 N/ nincs	nincs leszorítás

Az újfajta, módosított alátámasztással végzett vizsgálatokat az elnyelt energia, az ütközés során ébredő maximális erő, illetve a hab maximális deformációja alapján értékeltük ki. Az eredeti, átszakításos vizsgálatokból pedig meghatároztuk a habok perforációs energiáját (1), illetve duktilitási index értékét (2).

$$E_{\text{perf}} = E_{\text{total}}/h \quad (1)$$

ahol E_{perf} [J/mm] a perforációs energia, E_{total} [J] az átszakításhoz szükséges energia, míg h [mm] a próbatest vastagsága.

$$DI = (E_{\text{total}} - E_{\text{fmax}})/E_{\text{total}} \cdot 100 \quad (1)$$

ahol DI [%] a duktilitási index, míg E_{fmax} [J] a törés megindításához szükséges energia.

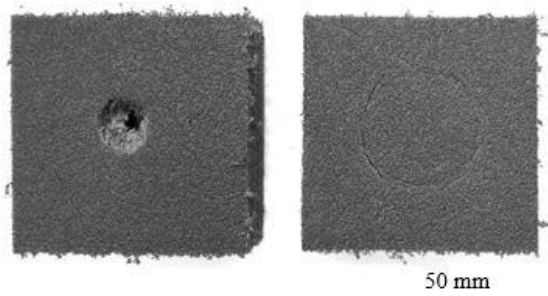
3.2. Pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálat

A dinamikus ütésszerű igénybevételeknek kitétt habok cellaszerkezetét JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) minősítettük. A mikroszkópi vizsgálatok előkészítése során a mintákon kriogén töretfelületeket állítottunk elő, majd a megfelelő vezetőképesség biztosítása céljából arany-palládium ötvözzel vontuk be azokat.

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

4.1. Dinamikus mechanikai vizsgálatok

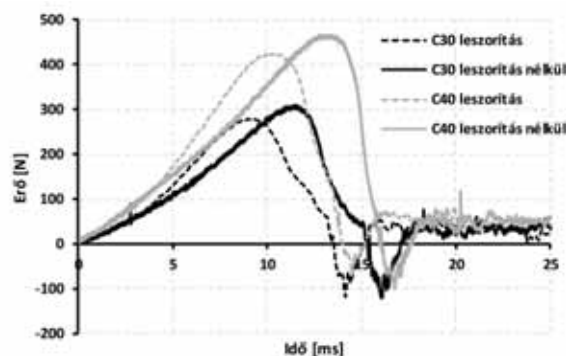
Az ejtődárdás vizsgálatok mindkét mérési elrendezés esetében a próbatesteken szemmel látható sérüléseket okoztak, azonban azok mértékében és jellegében jelentős különbségek adódtak (3. ábra).



3. ábra. C40 próbatestekről készített fotó eredeti átszakításos (a) és módosított (b) ejtődárdás mérést követően

Látható, hogy az eredeti mérési konstrukciónál a 20 mm átmérőjű dárdacsúcs a habon áthaladva annak közepét kiszakította, így a hab felülete hiányos. A módosított mérési elrendezés esetében viszont a tömör alátámasztás és a lapos dárda miatt csupán kisebb, felszíni sérülések detektálhatók az alkalmazott dárdával megegyező sugarú körív mentén.

Az eredeti, átszakításos vizsgálat során kapott erő-idő diagrammokat mutatja be a 4. ábra.



4. ábra. Eredeti mérési konstrukcióval végzett ejtődárdás vizsgálatok során kapott, jellemző erő-idő diagrammok

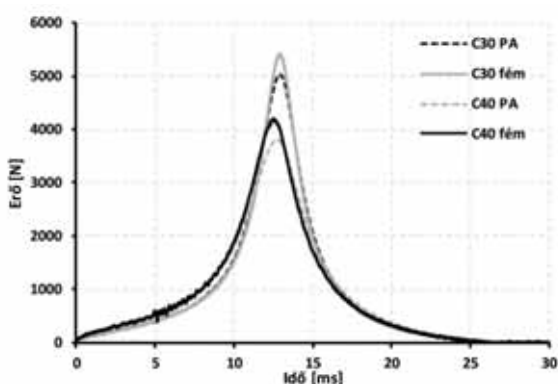
Látható, hogy a bemutatott görbék mindegyikén az erő egy adott pontig – a repedésterjedés megindításáig lineárisan növekszik, majd ezt követően az átszakadás miatt hirtelen csökkenni kezd és visszaesik nullára. Fontos azonban, hogy a leszorítással és anélkül végzett mérések különböznek, ami a számított perforációs energia és duktilitási index eredményekben is megmutatkozott (3. táblázat)

3. táblázat. Eredeti mérési konstrukcióval kapott ejtődárdás vizsgálati eredmények különböző sűrűségű habok esetén

Leszorítás	Minta	E_{perf} [J/mm]	DI [%]
van	C30	0,17 ± 0,01	35,9 ± 4,5
	C40	0,27 ± 0,01	31,5 ± 3,7
nincs	C30	0,20 ± 0,01	26,7 ± 2,3
	C40	0,33 ± 0,02	21,4 ± 3,4

Leszorítástól függetlenül megállapítható, hogy a nagyobb sűrűségű C40 hab merevebb cellaszerkezetéből fakadóan nagyobb perforációs energiát és kisebb duktilitási indexet mutatott, ami ridegebb jellegű tönkrementelre utal. Fontosnak tartjuk azonban a leszorítás eredményekre gyakorolt hatását tárgyalni. A leszorító gyűrű a vizsgált próbatesteket összenyomta, ami egyfajta előterhelésként a hab felkeményedését okozta, ezáltal az erő-idő görbék felterhelési szakaszának merevedése meghaladta a leszorítás nélkül vizsgált próbatestek eredményét. További probléma, hogy a leszorítás emellett a cellafalak behorpasztásával csökkentette a cellaszerkezetek merevségét, és így a leszorítással vizsgált habok perforációs energiája is csökkent. Relevánsabb eredményeket adnak tehát a leszorítás nélküli mérések, azonban ez esetben a próbatestek több alkalommal elmozdultak, ami szintén befolyásolhatja a mérési eredményeket.

A módosított, tömör alátámasztással végzett ejtődárdás mérések során a dárda visszapattant a vizsgált mintáról, azon csak felszíni sérüléseket okozott, ami teljesen eltérő jellegű erő-idő diagrammokat eredményezett (5. ábra)



5. ábra. Módosított mérési konstrukcióval végzett ejtődárdás vizsgálatok jellemző erő-idő diagramjai

Látható, hogy a görbék lefutásának jellege alátámasztástól és a vizsgált habok sűrűségétől függetlenül azonos, azonban a fém alátámasztással végzett mérések erőmaximuma meghaladja a PA alátámasztással kapott értékeket. Az alátámasztás típusa emellett az elnyelt energia és a maximális deformáció eredményeket is befolyásolta (4. táblázat)

4. táblázat. Módosított mérési konstrukcióval kapott ejtődárdás vizsgálati eredmények különböző sűrűségű habok esetén (E - elnyelt energia, F_{max} - maximális erő, P_{max} - maximális deformáció)

Minta	E [J]	F_{max} [N]	P_{max} [mm]
C30 - PA	12,63 ± 0,86	5193 ± 390	30,11 ± 1,28
C40 - PA	13,67 ± 0,04	3836 ± 26	27,95 ± 0,09
C30 - fém	12,84 ± 0,09	5453 ± 30	29,62 ± 0,07
C40 - fém	14,00 ± 0,11	4157 ± 37	27,59 ± 0,15

Alátámasztástól függetlenül itt is elmondható, hogy jelen mérési beállítások mellett a C40 típusú hab alkalmazása előnyösebb, hiszen nagyobb energiaelnyelő-képességet mutatott, valamint jobban csillapította a dárdára ható erőt.

A kapott eredmények, valamint a görbék jellege egyaránt megfelel a szakirodalomban megtalálható korábbi kutatások tapasztalatainak [14, 15], azonban a PA alátámasztással végzett vizsgálatokat ellentmondásos deformáció értékeket mutattak. Ez esetben a C30 minta maximális deformáció értéke meghaladta a vizsgált hab vastagságát, amit feltételezésünk szerint a poliamid lap

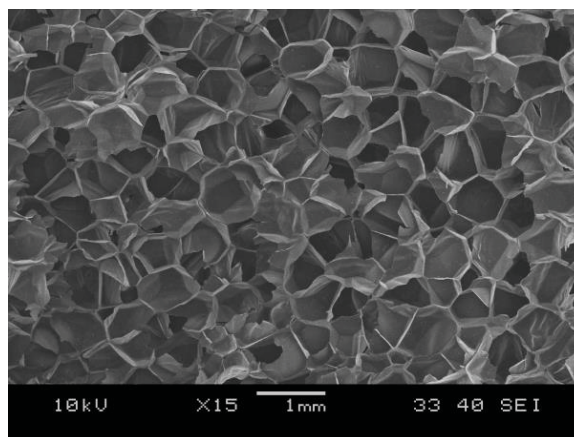
rugalmas alakváltozása okozott. A fém alátámasztással való mérések során kapott magasabb maximális erő eredmények és kisebb maximális deformációk alátámasztják a hipotézisünket, miszerint a fém alátámasztással ellentétben a poliamid nem tekinthető végtelen tömegű merev testnek, hiszen részben csillapításként funkcionált.

A fém alátámasztás alkalmazása viszont releváns eredményeket adott, így alkalmas lehet a bevezetésben említett párnázási görbék meghatározására. Ehhez a jövőben a mérések számának növelése szükséges, hiszen azokat különböző ejtési magasságokon és eltérő tömegű dárdával is el kell végezni.

4.3. Páztázó elektronmikroszkópi vizsgálat

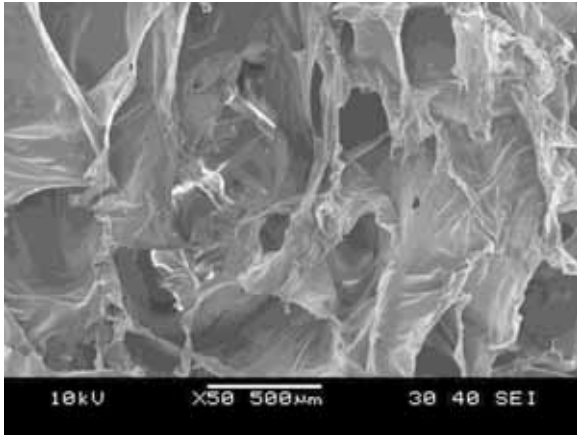
A habminták cellaszerkezetét páztázó elektronmikroszkóppal minősítettük. A továbbiakban a C40 típusú próbatestekről készített felvételeket fogjuk bemutatni, a C30 mintákról készített képeken jellegre azonos típusú szerkezetbeli változásokat voltak megfigyelhetők.

A C40 mintáról a vizsgálatokat megelőzően készített felvételt mutatja be a 6. ábra, amelyről megállapítható, hogy a vizsgált habok zárt cellás szerkezetűek, hiszen az üregeket teljesen zárt cellafalak veszik körül. További fontos információ, hogy a nagyobb sűrűségű C40 minta több, kisebb méretű cellával és vastagabb cellafallal rendelkezik, mint a kisebb sűrűségű C30 habminta. Ez magyarázatot ad az ejtődárdás eredményekben tapasztalható különbségekre.



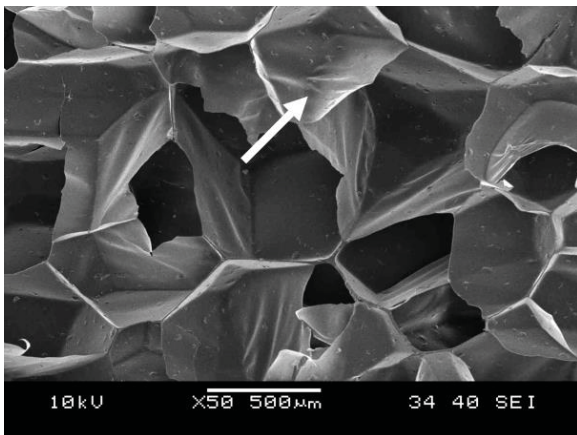
6. ábra. C40 minta ejtődárdás vizsgálatot megelőzően készített elektronmikroszkópi képe

A hagyományos, átszakításos vizsgálat után a C40 minta sérült részéről készített képet mutatja be a 7. ábra. Látható, hogy a tönkrementel során a hab eredetileg zárt cellás szerkezete nagymértékben sérült, a cellafalak és cellaélek kontúrjai teljesen összemosódtak. A vizsgált területen a minta teljesen elveszítette a hab jellegét.



7. ábra. Hagyományos, átszakításos vizsgálat után a C40 minta sérült részéről készített elektronmikroszkópi felvétel

A módosított, fém alátámasztással végzett mérés után a dárda alatti területről készített kép a 8. ábrán látható. A hagyományos vizsgálattal szemben ez esetben a hab zárt cellás szerkezete megmaradt, a becsapódás hatása csupán a cellafalakon látható apróbb sérülésekben, gyűrődésekben jelenik meg.



8. ábra. Módosított, fém alátámasztással végzett vizsgálat után a C40 mintáról készített elektronmikroszkópi felvétel (a cellafalon megjelenő gyűrődéseket fehér nyíl jelzi)

Az elektronmikroszkópi vizsgálatok eredményei szintén alátámasztják, hogy a hagyományos ejtdárdás vizsgálatok kevésbé alkalmasak a habok ütécscillapítási és energiaelnyelő képességének minősítésére. A furatos alátámasztás és félgömb alakú dárdacsúcs a hab cellaszerkezetét teljesen szétrombolta, míg a módosított mérési elrendezés nem okozott jelentősebb mértékű irreverzibilis alakváltozásokat.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunkban egy Ceast Fractovis 9350 típusú ejtdárdás ütőmű mérési elrendezését módosítottuk úgy, hogy a csomagoló- és sportszergyártó iparban használt polimer habok minősítése szempontjából relevánsabb mérési módszer tudjunk kialakítani. Ennek érdekében az eredeti furatos alátámasztást egy tömör poliamid lapra, majd egy tömör fém alátámasztásra cseréltük. Az eszközölt módosítás következtében a poliamid alátámasztás deformációját ki tudtuk küszöbölni, és a továbbfejlesztett mérési konstrukció pontosabb mérési megoldást nyújtott. Vizsgálatainkat két különböző sűrűségű gyengén térhálósított polietilén habon végeztük, és eredményeink rámutattak arra, hogy az alkalmazott mérési paraméterek mellett a nagyobb sűrűségű hab jobb ütécscillapítási és energiaelnyelő képességgel rendelkezik. Az elért eredményeink egyaránt hasznosíthatók

a dinamikus mechanikai vizsgálatokkal foglalkozó kutatók és az iparban tevékenykedő mérnökök számára.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-132462 számú pályázatának, a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és a Nemzetközi Birkózó Szövetség (United World Wrestling) támogatásával készült. A szerzők köszönik a vizsgálatokhoz használt habminták biztosítását a Polifoam Kft.-nek.

6. IRODALOM

- [1] Mills N.: Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide. Elsevier Science, Oxford (2007).
- [2] Hasanzadeh R., Azdast T., Doniavi A., Lee R. E.: Multi-objective optimization of heat transfer mechanisms of microcellular polymeric foams from thermal-insulation point of view. Thermal Science and Engineering Progress, 9, 21-29 (2019).
- [3] Heidari A., Fasihi M.: Cell structure-impact property relationship of polypropylene/thermoplastic elastomer blend foams. Express Polymer Letters, 13, 429-442 (2019).
- [4] Tomin M., Kmetty Á.: Evaluating the cell structure-impact damping relation of cross-linked polyethylene foams by falling weight impact tests. Journal of Applied Polymer Science, e49999, 1-12 (2020).
- [5] Mills N. J., Fitzgerald C., Gilchrist A., Verdejo R.: Polymer foams for personal protection: cushions, shoes and helmets. Composites Science and Technology, 63, 2389-2400 (2003).
- [6] Sek M. A., Minett M., Rouillard V., Bruscella B.: A new method for the determination of cushion curves. Packaging Technology and Science, 13, 249-255 (2000).
- [7] Boominathan R., Arumugam V., Santulli C., Adhithya Plato Sidharth A., Anand Sankar R., Sridhar B. T. N.: Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon/epoxy laminates. Composites Part B: Engineering, 56, 591-598 (2014).
- [8] Warnet L., Reed P. E.: Falling Weight Impact Testing Principles. in 'Mechanical Properties and Testing of Polymers: An A-Z Reference' (eds.: G. M. Swallowe) Springer Netherlands, Dordrecht, Vol 66-70 (1999).
- [9] Karger-Kocsis J.: Polypropylene Structure, blends and Composites: Volume 3 Composites. Springer Science & Business Media, Dordrecht (2012).
- [10] Burgess G.: Consolidation of cushion curves. Packaging Technology and Science, 3, 189-194 (1990).
- [11] Jenkins M.: Materials in Sports Equipment. Elsevier Science, USA (2003).
- [12] Zhang Z., Dai X., Zou L., Wen S., Sinha T., Li H.: A developed, eco-friendly, and flexible thermoplastic elastomeric foam from SEBS for footwear application. Express Polymer Letters, 13, 948-958 (2019).
- [13] Shim E.: Bonding requirements in coating and laminating of textiles. in 'Joining Textiles: Principles and Applications' (eds.: I. Jones and G. K. Stylios) Woodhead Publishing, Cambridge, Vol 309-351 (2013).
- [14] Lyn G., Mills N. J.: Design of foam crash mats for head impact protection. Sports Engineering, 4, 153-163 (2001).
- [15] Mosleh Y., Vander Sloten J., Depreitere B., Ivens J.: Novel Composite Foam Concept for Head Protection in Oblique Impacts Advanced Engineering Materials, 19, 1700059 (2017).