

Zložljive levo-leve pletene strukture z oksetičnim potencialom

Foldable Links-Links Knitted Structures with Auxetic Potential

Izvirni znanstveni članek/Original Scientific Paper

Prispelo/Received 06-2013 • Sprejeto/Accepted 7-2013

Izvleček

V zadnjih letih se tekstilna tehnologija čedalje bolj uveljavlja pri izdelovanju oksetičnih materialov. Le-ti se od konvencionalnih razlikujejo po nenavadnem učinku samodejnega prečnega povečevanja ob hkratnem vzdolžnem raztezanju in imajo zato številne koristne lastnosti. Pozitivni oz. negativni predznak in vrednost Poissonovega števila izhajata iz medsebojnega delovanja mehanizma deformacije in notranje strukture materiala. Namen raziskave je oblikovanje in preskušanje lastnosti zložljivih votkovno pletenih struktur, ki spadajo med geometrijske strukture s potencialnim oksetičnim učinkom. Preskušane zložljive levo-leve strukture so izdelane iz konvencionalnih vlaken in prej s pozitivnim Poissonovim številom. Predstavljen je le del obširnejše in sistematične raziskave vpliva dimenzij notranje strukture s cikcakasto razporeditvijo levih in desnih zank ter surovinske sestave preje na zlaganje levo-levih votkovnih pletiv. Večja sposobnost zlaganja pletene strukture pomeni večji oksetični potencial. Rezultati kažejo, da ima številčno razmerje levih in desnih zank v raportu v smeri zračnih vrst in v smeri zračnih stolpcev pomemben vpliv na sposobnost zlaganja levo-levih pletiv. Votkovno pleteni vzorci so bili izdelani na računalniško vodenem pletilniku Shima Seiki SES 122 RT delitve 12E. Zložljive strukture poleg funkcionalnosti ponujajo nove, estetsko izjemno zanimive reliefne učinke, zato so še posebej primerne za uporabo v oblačilne namene, za notranjo opremo, njihova tekstura in videz pa sta pomembna tudi pri embalažnih materialih.

Ključne besede: oksetični materiali, zložljive strukture, levo-levo votkovno pletivo, pletenje

Abstract

In the past couple of years, the use of textile technology to produce auxetic materials has attracted more and more attention. Auxetic materials exhibit an unusual property of lateral expansion under longitudinal strain. Consequently, these materials have various beneficial properties compared to the conventional ones. A positive or negative sign and magnitude of the Poisson's ratio arise from the interaction between the internal geometry and deformation mechanism(s) of the material structure. The aim of the research was to design and test different properties of foldable weft knitted structures, one of the different geometrical structures with a potential auxetic effect. The tested foldable links-links structures were made of conventional fibres and yarns with a positive Poisson's ratio. In the article, we are only going to present a part of an extensive and systematic study of the unit cell dimensions influence of the zigzag arrangement of face and reverse loops and the material composition of the fibre on the folding effect. A better folding ability of the knitted structure means a higher auxetic potential. As results show, the numerical ratio in the unit cell between the front and reverse loops in the course and wale direction has a significant influence on the folding ability of weft knits. Weft-knitted structures were produced on a computer controlled knitting machine Shima Seiki SES 122 RT gauge 12E. Apart from the functionality, foldable structures offer new, aesthetically intriguing relief surfaces, and are therefore appropriate for the use in the clothing sector, interior design and even packaging materials that are visually appealing.

Keywords: auxetic materials, foldable structures, links-links weft knitted structures, knitting

1 Uvod

Oksetični materiali se od konvencionalnih razlikujejo po nenavadnem učinku samodejnega prečnega povečevanja ob hkratnem vzdolžnem raztezanju in prečnega krčenja ob vzdolžnem stiskanju [1]. Poleg presenetljivega prečnega raztezanja imajo oksetični materiali v primerjavi s konvencionalnimi številne koristne lastnosti: izboljššan strižni modul, večjo odpornost proti vdrtinam in odtisom, večjo odpornost proti udarcem, boljšo absorpcijo energije, možnost spreminjanja poroznosti oz. prepustnosti glede na obremenitev in sposobnost ukrivljanja v obliko kupole ali vrečasto deformacijo [2, 3]. Zaradi večje odpornosti proti vdrtinam in odtisom so npr. primerni za uporabo za zaščitno opremo. Sposobnost vrečaste deformacije je zelo zaželena pri konstrukciji kupolastih površin oz. struktur, zaradi izboljšanih akustičnih lastnosti pa so primerni za zvočno izolacijo. Razvoj oksetičnih tekstilij omogoča nove načine uporabe, npr. za tekstilije, ki pod vplivom napetosti spremenijo barvo, niti z vozli, ki ne drsijo, zobno nitko s sposobnostjo sproščanja zdravil ali drugih substanc, različne naprave za zaščito pred nenadnimi fizičnimi udari idr. Predvidevamo, da so ti materiali primerni tudi za embalažo, kjer sposobnost ukrivljanja v obliko kupole omogoča dobro prileganje embalažnega ovoja vsebini, izboljšana odpornost proti vdrtinam in odtisom ter večja odpornost proti udarcem pa varujeta vsebino. Navsezadnje so ti materiali primerni tudi za oblačila, saj sposobnost boljšega prileganja oblačila telesu daje večje udobje.

Znanstveniki so v zadnjih desetletjih raziskovali in preskušali različne geometrijske strukture in modele, ki izkazujejo potencialni oksetični učinek. Mednje spadajo: dvo- in tridimenzionalne navznoter obrnjene strukture, kiralne strukture, vrtljive toge in polto-ge enote, laminati, kjer se plasti materiala stikajo pod kotom, trde molekule, mikroporozni polimeri, tekoči kristalini polimeri [4] in zložljive strukture, ki so osnova v članku predstavljenih votkovnih pletiv.

2 Teoretični del

Tekstilni materiali z oksetičnim učinkom so lahko izdelani na dva načina. Pri prvem gre za uporabo oksetičnih vlaken, iz katerih so izdelane tkane ali pletene tekstilije z oksetičnim delovanjem.

Prva oblika sintetičnega oksetičnega polimera je bil ekspandiran mikroporozen politetrafluoroetilen (PTFE). Caddock in Evans [5] ter Evans in Caddock [6] so odkrili, da je izrazito negativno Poissonovo število tega polimera posledica njegove kompleksne mikrostrukture. Mikrostruktura številnih vozlišč, medsebojno povezanih s fibrili, reagira na uporabljeno silo z oksetičnim raztezanjem v prečni smeri.

Tovrstno mikrostrukturo so poskušali prenesti tudi na druge polimere, za kar sta Alderson in Evans [7] najprej uspešno uporabila polietilen ultravisoke molekulske mase (UHMWPE), nato pa je sledila izdelava polipropilena [8] in poliamida [9]. Omenjene raziskave so omogočile izdelavo polimernih valjev večjih premerov, medtem ko so prva oksetična polipropilenska vlakna [10] izdelali leta 2000. Razvoj kontinuiranega postopka izdelave polipropilenskih vlaken je omogočil izdelavo oksetičnih vlaken tudi iz drugih polimerov – poliestra in poliamida [11, 12].

Za povečanje modula oksetičnih vlaken za uporabo v tekstilnih strukturah brez dodatnih poobdelav bo potreben drugačen pristop k izdelavi vlaken. Eden od teoretičnih predlogov je izdelava oksetičnih materialov na molekularni ravni. Polifenilacetilenska mreža »reflexyne« je nastala s posnemanjem dvodimenzionalne šesterokotne vdrtne strukture, ki se deformira s spreminjanjem kota med rebri, ki tvorijo mrežo [1]. Zelo preprost in obetajoč pristop k izdelavi sintetičnih polimerov z oksetičnim učinkom na molekularni ravni so zavzeli He in sodelavci [13, 14], ki so predvideli model tekočega kristalinskega polimera (LCP).

Oksetični učinek je posledica načina medsebojne povezanosti togih paličastih molekul z vmesnimi fleksibilnimi skupinami: nekatere se s togimi molekulami povezujejo na koncih le-teh, druge pa prečno na sredini molekul. Zaradi rotacije togih paličastih molekul ob vzdolžni obremenitvi se verige razmaknejo in povzročijo prečno povečanje sistema.

Pri drugem načinu izdelave tekstilij z oksetičnim učinkom gre za uporabo konvencionalnih vlaken s pozitivnim Poissonovim številom, oksetični učinek tekstilij pa izhaja iz geometrijske strukture materiala. Tovrstne strukture so lahko izdelane tudi iz vlaken z negativnim Poissonovim številom.

Hook [15] je predstavil oksetično multifilamentno prejo, izdelano iz kombinacije dveh konvencionalnih vlaknatih komponent v dvojni spirali: relativno upogibljivega jedra, okoli katerega je spiralno ovito bolj togo vlakno. Ob vzdolžni obremenitvi se togo

vlakno poravna in »prisili« oz. potisne središčno vlakno v spiralno obliko (ovije se okrog izravnane vlakna), zato se poveča prečni prerez ob sočasnem vzdolžnem raztežku.

Poleg linearnih tekstilij z oksetičnim učinkom, tj. vlaken in prej, je mogoče načrtovati tudi ploske tekstilije z oksetičnim učinkom. Pletenje je med načini izdelave ploskih tekstilij najbolj raznoliko, saj omogoča širok razpon struktur in izdelavnih tehnologij, votkovnih in snutkovnih.

Ugbolue in sodelavci [16] so predstavili tehniko izdelave snutkovno pletene šesterokotne mrežaste oksetične strukture, pri kateri so uporabili vezavo zaprti triko z vpleteno konvencionalno visoko elastično prejo. Elastično prejo so položili med zanke sosednjih zanjnih stolpcev v smeri pletenja, tako da je ovila oz. obkrožila vezne dele zank, s čimer so zagotovili primerno konfiguracijo pletene strukture po relaksaciji. Starbuck in sodelavci [17] so patentirali snutkovno pletivo z geometrijsko strukturo puščic, ki ob raztezanju omogoča oksetični učinek.

V nasprotju s snutkovnim pletenjem tehnologija ploskega votkovnega pletenja omogoča preprost, vendar zelo učinkovit način izdelave zaprtih oksetičnih tekstilij iz konvencionalnih prej.

Liu in sodelavci [18] so na podlagi geometrijske analize vzorca, poimenovanega Miura-ori, z notranjo strukturo paralelogramov enakih oblik in velikosti izdelali votkovno pletivo z oksetičnim učinkom, pri katerem se leve in desne zanke izmenjujejo v cikcakasti razporeditvi. Ko strukturo raztegnemo v horizontalni ali vertikalni smeri, paralelogrami spremenijo svoj prvotni položaj v geometrijski razporeditvi, kar se odraža v odpiranju celotne strukture in v posledičnem povečevanju v obeh glavnih smereh. Rezultati kažejo, da je začetni kot, ki se pod vplivom obremenitve odpira, glavni strukturni parameter, ki vpliva na oksetični učinek teh tekstilij. Pletiva z manjšim kotom, ki pomeni tesneje zloženo strukturo v izhodiščnem oz. relaksiranem stanju po pletenju, imajo večji oksetični učinek. Poleg različnih razporeditev levih in desnih zank na oksetični učinek vpliva tudi uporaba prej z različnimi elastičnimi lastnostmi in togostjo.

Projektiranje oksetičnih pletiv z izmenjavo levih in desnih zank v votkovni strukturi so raziskovali tudi Hu in sodelavci [19]. Izdelali so pletiva z razporeditvijo zank v obliki kvadratov ter v obliki horizontalnih in vertikalnih črt. V zadnjem primeru je oksetični učinek opazen v obeh glavnih smereh, vendar

je večji, ko pletivo raztežemo v smeri zanjnih vrst, kot ob raztezanju v smeri zanjnih stolpcev.

Buhai in sodelavci [20] so raziskovali vpliv dolžine zanke na oksetični učinek votkovnih cikcakastih pletiv. Pletivo z manjšimi vrednostmi dolžin zanke je bolj zbito, zato bolje obdrži svojo obliko, oksetični učinek pa je posledično večji. Dolžina zanke neposredno vpliva na oksetični učinek votkovnih pletiv. Pri primerjavi oksetičnih pletiv iz različnih prej so ugotovili, da je uporaba akrilnih vlaken smotrnejša od uporabe bombažnih vlaken, saj so imela pletiva iz akrilnih vlaken boljši oksetični učinek.

Pozitivni oz. negativni predznak in vrednost Poissonovega števila izhajata iz medsebojnega delovanja mehanizma deformacije in notranje strukture materiala [2]. Mehanizem deformacije votkovno pletenih zložljivih struktur temelji na strukturnem neravnovesju med levimi in desnimi zankami, zato se pletivo po izdelavi naguba in skrči v tridimenzionalno obliko. Pod vplivom raztezanja v horizontalni ali vertikalni smeri se tridimenzionalne zložljive strukture poravnajo v ravno ploskev, pri čemer se zlogi razprejo, struktura pa se poveča v obeh glavnih smereh. Raziskava je usmerjena v oblikovanje in preskušanje različnih votkovno pletenih levo-levih zanjnih razporeditev ter primerjavo njihovega mehanizma zlaganja. Ker so Liu in sodelavci [18] ugotovili, da votkovna pletiva z bolj zloženo in zaprto cikcakasto strukturo izkazujejo večji oksetični učinek, smo se pri oblikovanju pletenih struktur z oksetičnim potencialom osredinili na njihovo sposobnost zlaganja. Zlaganje vpliva tudi na debelino pletiv, ki se s krčenjem strukture povečuje. Večja debelina pomeni bolj zloženo strukturo.

3 Materiali

V raziskavi proučujemo vpliv surovinske sestave preje in velikosti raporta na zlaganja levo-levih votkovnih pletiv. Večja sposobnost zlaganja pomeni večji oksetični potencial.

Številni avtorji poročajo, da je oksetični učinek neodvisen od velikosti delcev, saj obstaja na različnih strukturalnih ravneh, od molekularne do makroskopske [4, 21]. Cikcakasta pletiva, za katera je v določeni razporeditvi zank oksetično delovanje že dokazano [18], smo izdelali v različnih velikostih raportov, da bi ugotovili, ali za votkovno pletenje

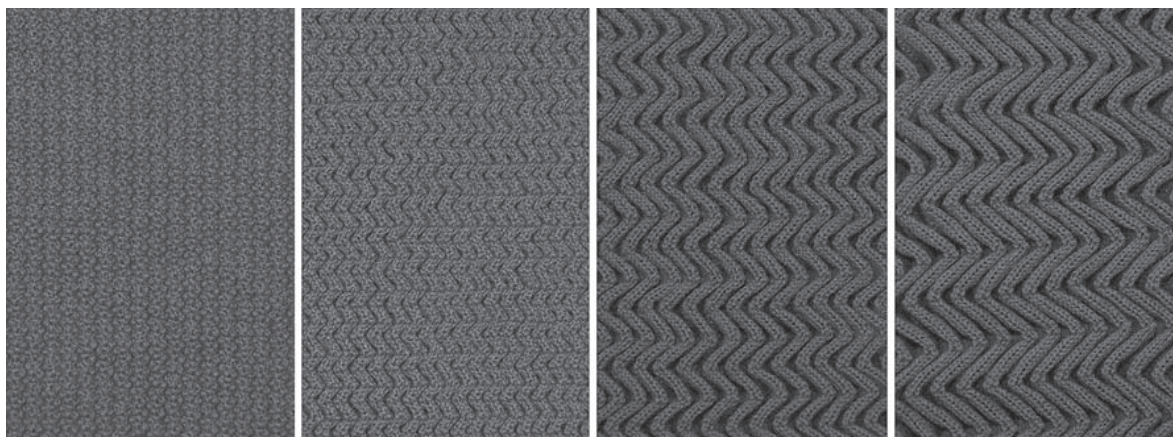
prav tako velja, da je zlaganje, ki je osnovni pogoj za oksetični učinek votkovnih pletiv, neodvisno od velikosti strukture. Obenem smo pri vzorcih s spreminjanjem širine cikcakastih reber ugotavljali potrebno število istovrstnih zank v zančni vrsti, ki omogoča ustrezno zlaganje pletiva.

Izdelali smo 2 seriji vzorcev s po 12 cikcakastimi strukturami različnih raportov. V prvi seriji gre za spreminjanje velikosti raporta od najmanjšega 2×2 do največjega 24×24 zank, pri čemer se spreminjajo tako širina reber kot širina in višina raporta (slika 1). V drugi seriji se spreminja širina reber (število zank po širini rebra) cikcakastih pletiv od 1 do 12 zank v rebri ter z njo širina raporta, višina raporta pa ostaja enaka; raport se spreminja od 2×24 do 24×24 zank (slika 2). Obe seriji vzorcev smo izdelali na pletilniku Shima Seiki SES 122 RT z delitvijo 12E. Globina kuliranja je bila nastavljena na vrednost 35.

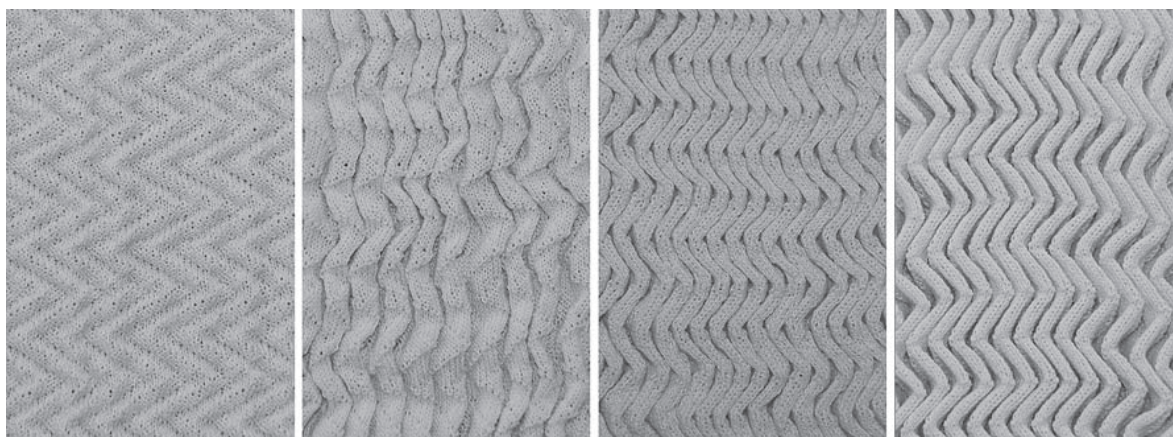
Uporabili smo dve različni preji: prva je bila iz mešanice 46,38 % volne (WO) in 53,62 % akrila (PAN) z dolžinsko maso 70,54 tex in vitjem 243 zavojev/m, druga pa iz mešanice 86,38 % viskoze (CV) in 13,62 % poliamida (PA) z dolžinsko maso 74,78 tex in vitjem 330 zavojev/m.

Napleteni vzorci so se po snetu s stroja relaksirali in zložili v 3-dimenzionalne strukture. Po vsaj 48-urni relaksaciji sta sledili merjenje dimenzij napletenih vzorcev v prečni in vzdolžni smeri in merjenje debeline pletiv.

Na vzorcih smo označili kontrolne točke za merjenje širine in višine mnogokratnikov raportov. Izmerili smo razdalje med kontrolnimi točkami zložene pletiva v smeri zračnih vrst in v smeri zračnih stolpcev. Dimenzije smo merili s pomočjo slikovne analize s programsko opremo Infinity Analyze (Lumenera Corporation). Za vsak vzorec smo izvedli



Slika 1: Cikcakasta pletiva s spreminjanjem velikosti raporta tako v smeri zračnih stolpcev kot v smeri zračnih vrst, izdelana iz preje WO/PAN (velikost raportov od leve proti desni: 4×4, 8×8, 16×16 in 24×24)



Slika 2: Cikcakasta pletiva s spreminjanjem širine reber, izdelana iz preje CV/PA (velikost raportov od leve proti desni: 8×24, 14×24, 16×24 in 24×24)

po 10 meritev v prečni in vzdolžni smeri na različnih mestih. Iz izmerjenih razdalj med kontrolnimi točkami pletiva ter števila zank smo izračunali širino zloženega pletiva/zanko in višino zloženega pletiva/zanko za vsak posamezni vzorec.

Zaradi stisljive strukture zložljivih votkovnih pletiv smo debelino merili z odčitavanjem iz kompresijske krivulje. Pletivo smo po debelini stiskali na dinamometru Instron 5567. Uporabili smo najnižjo mogočo hitrost premikanja prižeme 0,1 mm/s, največja kompresijska obremenitev pa je bila nastavljena na 10 N. Ko je prišlo do zaznavanja kompresijske sile, smo odčitali razdaljo med prižemama in s tem določili debelino posameznih vzorcev. Izvedli smo po pet meritev za vsak vzorec.

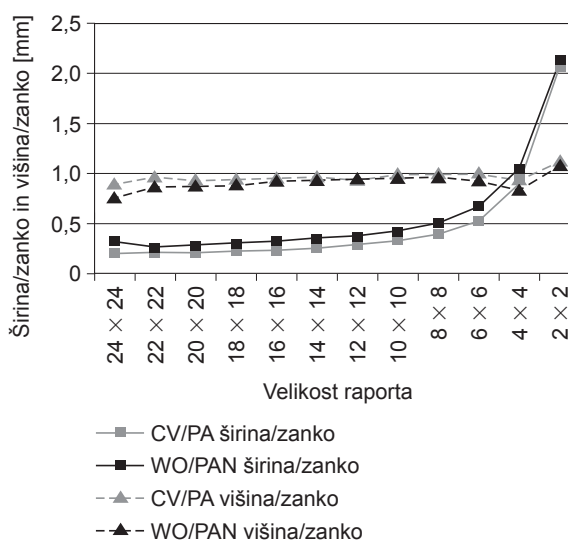
4 Rezultati z razpravo

Cikcakaste strukture iz serije vzorcev, pri katerih se spreminja velikost raporta tako v smeri zračnih stolpcev kot v smeri zračnih vrst, se zlagajo v obeh smereh – v smeri zračnih vrst in v smeri zračnih stolpcev. Pri obeh vrstah prej, iz volnene in viskozne mešanice, pride do zlaganja pri vseh velikostih raportov, zlaganje ni prisotno le pri najmanjšem cikcakastem vzorcu 2×2 (slika 3).

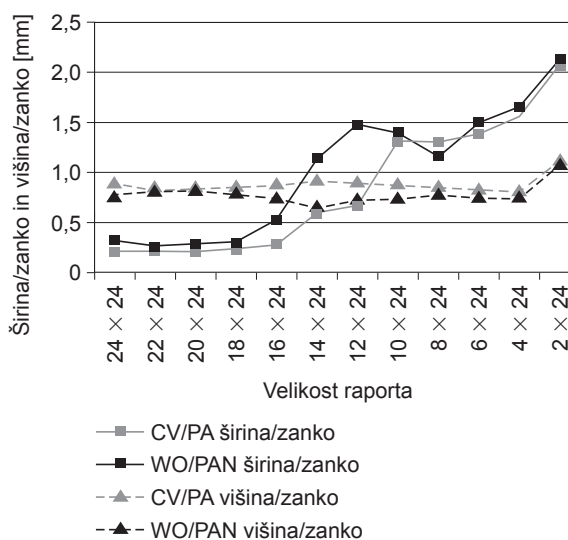
Pri primerjavi širine/zanko in višine/zanko cikcakastih struktur s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpcev in v smeri zračnih vrst so vrednosti višine/zanko večje od vrednosti širine/zanko (slika 4), kar pomeni, da je pletivo bolj zloženo v smeri zračnih vrst kot v smeri zračnih stolpcev. Hkrati se vrednosti gibljejo v ozkem območju, zato je mogoče sklepati, da je zloženost strukture teh vzorcev v obeh smereh dobra. Pri primerjavi slik 3 in 4 ugotovimo, da se vrednosti širine/zanko in višine/zanko cikcakastih struktur s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpcev in v smeri zračnih vrst od največjega raporta do raporta 4×4 gibljejo v območju prve polovice vrednosti vzorcev s spreminjanjem širine reber pri stalni višini raporta. Širina/zanko cikcakastih struktur s spreminjanjem velikosti raporta se z zmanjševanjem raporta povečuje, kar pomeni, da so pleteni vzorci z manjšimi raporti prečno manj zloženi. Čeprav je širina/zanko vzorcev z manjšim raportom precej večja od širine/zanko vzorcev z večjim raportom, vrednost širine/zanko cikcak vzorca 4×4 kljub temu pomeni le 60,6 % vrednosti širine/zanko primerjalnega gladkega levo-desnega (LD)

pletiva za vzorce iz preje WO/PAN in le 52,6 % vrednosti za vzorce iz preje CV/PA, kar pomeni, da je tudi pletivo z raportom 4×4 dobro zloženo.

Višina/zanko vzorcev s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpcev in v smeri zračnih vrst je bolj ali manj stalna in se s spremembo velikosti raporta ne spreminja bistveno. Za vzorce WO/PAN višina/zanko v povprečju znaša 70,9 % višine/zanko gladkega LD pletiva in 73,8 % za vzorce iz mešanice CV/PA. Vzorci iz preje WO/PAN se torej bolje zlagajo v smeri zračnih stolpcev, medtem ko



Slika 3: Primerjava širin/zanko in višin/zanko vzorcev iz različnih materialov s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpcev in v smeri zračnih vrst



Slika 4: Primerjava širin/zanko in višin/zanko vzorcev iz različnih materialov s spreminjanjem širine reber

se v smeri zračnih vrst bolje zlagajo vzorci iz preje CV/PA. Vrednosti zlaganja v smeri zračnih vrst in v smeri zračnih stolpccev so pri vzorcih iz preje WO/PAN v istem ožjem območju, zato je zlaganje v obeh smereh enakomernejše.

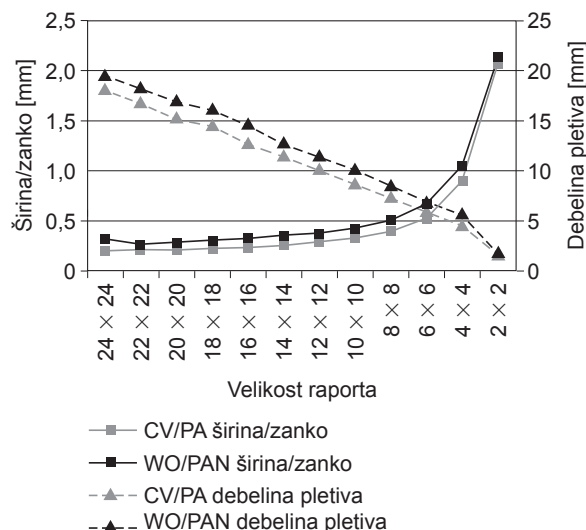
Pri pletenih vzorcih s spreminjanjem širine reber, tj. s spreminjanjem le širine raporta, so spremembe širine/zanko precej večje; z ožjenjem širine reber se vrednosti hitro povečujejo. Pri vzorcu 4×24 se vrednost širine/zanko približa vrednosti širine/zanko gladkega LD pletiva, za vzorec WO/PAN pomeni 94,3 % vrednosti, za vzorec CV/PA pa 91,2 % vrednosti. Ta vzorec je zelo slabo zložen. Višina/zanko se med posameznimi vzorci le malo spreminja in v povprečju znaša 59,1 % višine/zanko gladkega LD pletiva za vzorce WO/PAN in 65,4 % za vzorce iz mešanice CV/PA.

Iz primerjave debelin cikcak pletiv s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpccev in v smeri zračnih vrst, izdelanih iz dveh različnih prej (slika 5), vidimo, da se debelina zmanjšuje enakomerno in sorazmerno z velikostjo raporta, torej se vzorci z različno velikimi raporti enakovredno zlagajo, tisti z večjim raportom so posledično debelejši, z manjšim raportom pa sorazmerno tanjši.

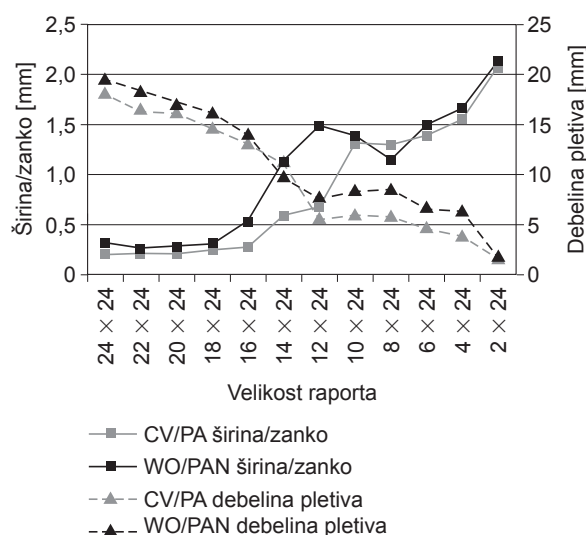
Če primerjamo vzorce glede na surovinsko sestavo, opazimo, da so vzorci, izdelani iz mešanice WO/PAN, debelejši kot vzorci iz preje CV/PA.

Pri vzorcih cikcakastih struktur s spreminjanjem širine reber (slika 6) je zlaganje pri vzorcih z večjimi širinami reber podobno zlaganju vzorcev s spreminjanjem velikosti raporta v smeri zračnih stolpccev in v smeri zračnih vrst, medtem ko se zlaganje pri vzorcih z manjšimi širinami reber izrazito poslabša. Vzorci iz preje WO/PAN se enakovredno zlagajo od največjega raporta 24×24 do raporta 16×24, vzorci iz preje CV/PA pa od raporta 24×24 do raporta 14×24. Vzorci z ožjimi rebri so slabo zloženi in tanjši. Širina reber pri nespremenjeni višini raporta torej izrazito vpliva na sposobnost zlaganja. V zračni strukturi je potrebno določeno minimalno število istovrstnih zank, da pride do zadostne relaksacije, ki omogoči zlaganje pletiva. Sedem oz. šest ali manjše število zank v rebri pri razporeditvi levih in desnih zank v cikcakasti liniji pod kotom 45° ne zagotavlja zadostnega zlaganja.

Kjer je vrednost debeline pletiva visoka, vrednost širine/zanko pa nizka, gre za dobro zloženo strukturo in posledično lahko pričakujemo oksetično obnašanje materialov.



Slika 5: Primerjava širin/zanko in debelin vzorcev iz različnih materialov s spreminjanjem velikosti raporta



Slika 6: Primerjava širin/zanko in debelin vzorcev iz različnih materialov s spreminjanjem širine reber

5 Sklepi

Cikcakaste strukture z različnimi velikostmi raporta, pri katerih je število zank v smeri zračnih stolpccev in v smeri zračnih vrst v raportu enako, se zlagajo v obeh smereh. Zlaganje je prisotno ne glede na velikost raporta, razen pri najmanjšem cikcakastem vzorcu 2×2. Debelina se zmanjšuje enakomerno in skladno z velikostjo raporta; pri večjem raportu je debelina večja, pri manjšem so vzorci sorazmerno tanjši.

Levo-leve cikcakaste votkovne strukture z različno širino reber, tj. različno širino raporta in enako višino raporta, kažejo bistveno razliko v sposobnosti zlaganja med vzorci z 12 ali le petimi istovrstnimi zankami v zančni vrsti. Zato je mogoče sklepati, da sta velikost osnovne enote, tj. raporta, ter številčno razmerje med širino in višino raporta zelo pomembna. Če je eden od teh dveh parametrov, višina ali širina raporta, pomembno večji, zlaganje v obeh glavnih smereh ni uravnoteženo.

V okviru celovite in obširne raziskave si prizadevamo definirati optimalno razmerje med prečnim in vzdolžnim zlaganjem pletiv, pri katerem bi se pletivo v obeh smereh enakovredno zlagalo in posledično ob obremenitvi tudi enakovredno razpiralo v obeh glavnih smereh.

Zložljive strukture poleg funkcionalnosti ponujajo nove, estetsko izjemno zanimive reliefne učinke, zato so še posebno primerne za uporabo v oblačilne namene, za notranjo opremo, njihova tekstura in videz pa sta pomembna tudi pri embalažnih materialih.

Zahvala

Za finančno podporo v okviru sofinanciranja doktorskega študija Darje Rant se zahvaljujemo Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Evropskemu socialnemu skladu.

Viri

- EVANS, K. E., NKANSAH, M. A., HUTCHINSON, I. J. in ROGERS, S. C. Molecular network design. *Nature*, 1991, vol. 353, no. 6340, str. 124, doi:10.1038/353124a0.
- EVANS, K. E. in ALDERSON, A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! *Advanced Materials*, 2000, vol. 12, no. 9, str. 617–628, doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3.
- YANG, W., LI, Z-M., SHI, W., XIE, B-H. in YANG, M-B. Review on auxetic materials. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 10, str. 3269–3279.
- LIU, Y. in HU, H. A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 2010, vol. 5, no. 10, str. 1052–1063.
- CADDOCK, B. D. in EVANS, K. E. Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1989, vol. 22, no. 12, str. 1877–1882, doi: 10.1088/0022-3727/22/12/012.
- EVANS, K. E. in CADDOCK, B. D. Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1989, vol. 22, no. 12, str. 1883–1887, doi: 10.1088/0022-3727/22/12/012.
- ALDERSON, K. L. in EVANS, K. E. The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio. *Polymer*, 1992, vol. 33, no. 20, str. 4435–4438.
- PICKLES, A. P., ALDERSON, K. L. in EVANS, K. E. The effects of powder morphology on the processing of auxetic polypropylene (PP of negative Poisson's ratio). *Polymer Engineering & Science*, 1996, vol. 36, no. 5, str. 636–642.
- ALDERSON, K. L., ALDERSON, A., WEBBER, R. S. in EVANS, K. E. Evidence for uniaxial drawing in the fibrillated microstructure of auxetic microporous polymers. *Journal of Materials Science Letters*, 1998, vol. 17, no. 16, str. 1415–1419, doi: 10.1023/A:1026409404057.
- ALDERSON, K. L., ALDERSON, A., SMART, G., SIMKINS, V. R. in DAVIES, P. J. Auxetic polypropylene fibres: Part 1 – Manufacture and characterization. *Plastics, Rubbers and Composites*, 2002, vol. 31, no. 8, str. 344–349, <http://dx.doi.org/10.1179/146580102225006495>.
- RAVIRALA, Naveen, ALDERSON, Kim L., DAVIES, Philips J., SIMKINS, Virginia R. in ALDERSON, Andrew. Negative Poisson's ratio polyester fibers. *Textile Research Journal*, 2006, vol. 76, no. 7, str. 540–546.
- RAVIRALA, N., ALDERSON, A., ALDERSON, K. L. in DAVIES, P. J. Expanding the range of auxetic polymeric products using a novel melt-spinning route. *Physica Status Solidi (b)*, 2005, vol. 242, no. 3, str. 653–664.
- HE, C., LIU, P. W. in GRIFFIN, A. C. Toward negative Poisson ratio polymers through molecular design. *Macromolecules*, 1998, vol. 31, no. 9, str. 3145–3147, <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ma970787m>.
- HE, Chaobin, LIU, Puwei, McMULLAN, Phylip J. in GRIFFIN, Anselm C. Toward molecular auxetics: Main chain liquid crystalline polymers consisting of laterally attached para-quinaterphenyls. *Physica Status Solidi (b)*, 2005, vol.

- 242, no. 3, str. 576–584, doi: 10.1002/pssb.200460393.
15. HOOK, Patrick. Uses of auxetic fibres, *US Patent*, no. US 8,002,879 B2. 2011-08-23.
 16. UGBOLUE, Samuel C., KIM, Young K., WARNER, Steven B., FAN, Qinguo, YANG, Chen-Lu., KYZYMCHUK, Olena in FENG, Yani. The formation and performance of auxetic textiles. Part I: theoretical and technical considerations. *The Journal of The Textile Institute*, 2010, vol. 101, no. 7, str. 660–667, doi: 10.1080/00405000902733790.
 17. STARBUCK, M., ANAND, S. C., RAVIRALA, N., ALDERSON, K. L. in ALDERSON, A. Fabrics having knit structures exhibiting auxetic properties and garments formed thereby, *Patent WO 2008016690-2008*.
 18. LIU, Yanping, HU, Hong, LAM, Jimmy K. C. in LIU, Su. Negative Poisson's ratio weft-knitted fabrics. *Textile Research Journal*, 2010, vol. 80, no. 9, str. 856–863, doi:10.1177/0040517509349788.
 19. HU, Hong, WANG, Zhengyue in LIU, Su. Development of auxetic fabrics using flat knitting technology. *Textile Research Journal*, 2011, vol. 81, no. 14, str. 1493–1502, doi:10.1177/0040517511404594.
 20. BUHAI, C., BLAGA, M., CIOBANU, R. in BUDULAN, C. Development of auxetic weft knitted fabrics. V *Proceedings of 46th International Congress IFKT*, Sinaia, Romania, 6–8 September 2012, str. 758–763.
 21. GRIMA, Joseph N., FARRUGIA, Pierre-Sandre, GATT, Ruben in ATTARD, Daphne. On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: A preliminary investigation. *Physica Status Solidi (b)*, 2008, vol. 245, no. 3, str. 521–529, doi: 10.1002/pssb.200777705.