

Nina Čuk, Matejka Bizjak

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, grafiko in oblikovanje,
Snežniška 5, 1000 Ljubljana

Tkani kardiovaskularni vsadki

Woven Cardiovascular Implants

Strokovni članek/Professional article

Prispelo/Received 3-2023 • Sprejeto/Accepted 5-2023

Korespondenčna avtorica/Corresponding author:

Prof. dr. Matejka Bizjak

E-pošta: matejka.bizjak@ntf.uni-lj.si

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-9784>

Izvleček

V prispevku je obravnavano interdisciplinarno področje tkanih srčno-žilnih vsadkov, za izdelavo katerih je poleg tekstilnega znanja potrebno tudi natančno in ustrezno razumevanje delovanja človeških organov. Lastnosti teh poskušajo posnemati pri izdelavi vsaditvenih medicinskih tekstilij, ki pri različnih obolenjih podpirajo ali nadomeščajo funkcije organov. Predstavljene so osnovne značilnosti tkanih žilnih vsadkov in srčnih zaklopk in najpogosteje uporabljene strukture za njihovo izdelavo. Pomemben del prispevka je novost, ki je bila predstavljena na sejmu Techtextil 2022, prva tkana srčna zaklopka, ki ne potrebuje dodatnega šivanja oz. spajanja. Tema srčno-žilnih bolezni je v današnjem svetu zelo aktualna, saj zaradi njih umre ali pa se z njimi srečuje velik del človeške populacije.

Ključne besede: tkani vsadki, žilni vsadki, srčna zaklopka, novost Techtextil 2022

Abstract

The paper addresses the interdisciplinary field of woven cardiovascular implants, which require not only textile expertise but also a detailed and adequate understanding of the functioning of human organs. Their properties are attempted to be mimicked in the fabrication of implantable medical textiles that support or replace organ functions in various diseases. The basic properties of woven vascular grafts and heart valves are presented, as well as the most commonly used structures for their fabrication. An important part of the paper is the innovation presented at Techtextil 2022, i.e. the first woven heart valve that does not require additional sewing or joining. Cardiovascular diseases represent a very topical issue in today's world, with a large proportion of the population dying from or being affected by it.

Keywords: woven implants, vascular grafts, heart valve, Techtextil 2022 innovation

1 Uvod

Zgodovina uporabe tekstilnih materialov za medicinske namene sega kar 2000 let pred naše štetje, v antično Kitajsko in Egipt, ko so naravna vlakna uporabljali za šivanje ran. Med drugo svetovno vojno in po njej so v medicinske namene začeli uporabljati tudi sintetična vlakna [1]. Danes je področje medicinskih tekstilij eno najhitreje rastočih med tehnič-

nimi tekstilijami. Medicinske tekstilije delimo na implantate in neimplantate. Implantati se uporabljajo za zdravljenje in popravilo prizadetih organov v telesu osebe, zato mednje štejemo šive, vsadke za mehka tkiva, ortopedske vsadke, kardiovaskularne vsadke itd. Navadno so izdelani iz biorazgradljivih tekstilnih materialov, ki se v telesu razgradijo v dveh do treh mesecih [2]. Kardiovaskularni vsadki se naprej delijo na vaskularne vsadke in umetne srčne zaklopke [3].



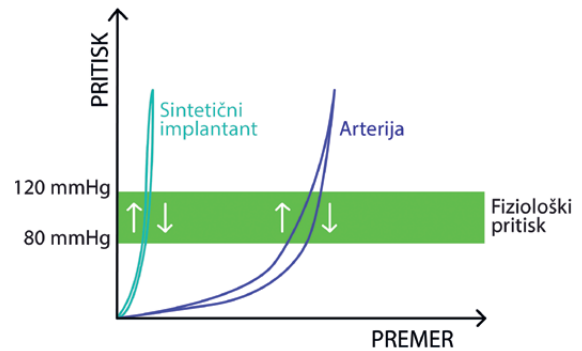
Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution CC BY 4.0 licence (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Authors retain ownership of the copyright for their content, but allow anyone to download, reuse, reprint, modify, distribute and/or copy the content as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publisher. This journal does not charge APCs or submission charges.

Medicinske tekstilije, ki jih ne uporabljamo kot vsadke, so namenjene zunanji uporabi. Mednje uvrščamo povoje, izdelke za oskrbo in nego ran, obliže itd. [2]. Za zunanjo rabo se največkrat uporabljajo tekstilni materiali, ki niso biorazgradljivi [2]. Vsadki iz tkanin so posebej primerni za medicinsko uporabo, saj je človeško telo v veliki meri sestavljeno iz materialov, ki so podobni vlaknatim strukturam [4].

2 Žilni vsadki

Osnovni namen žilnega vsadka je, da deluje kot nadomestek za obolelo arterijo. Njegova dolgoročna zdravilna funkcija je odvisna od sposobnosti posnemanja mehanskega in biološkega obnašanja arterije. Za izdelavo tekstilnih žilnih vsadkov se uporabljajo tehnike tkanja, pletenja, prepletanja in elektrovedenja. Njihov razvoj in doseganje podobnih lastnosti, kot jih ima človeška žila, je zahteven proces, kar je posledica heterogene strukture arterije, ki žilni steni daje edinstvene mehanske značilnosti, kot so nelinearno, viskoelastično in anizotropno obnašanje. Pri nizkih tlakih je odziv arterije na obremenitev zelo majhen, s povečevanjem tlaka pa se njen elastični modul strmo povečuje, kar označujemo kot nelinearno obnašanje. Hkrati je geometrijska razporeditev strukturnih komponent v steni žile vzrok za značilno anizotropno mehansko obnašanje. Sintetični tkani arterijski nadomestki imajo v primerjavi z naravno arterijo bolj homogeno strukturo, ki ima nizko elastičnost in relativno linearen odziv na obremenitev pri podobnih deformacijah. Viskoelastičnost je še ena pomembna lastnost, ki določa hemodinamiko arterijske žile in jo je prav tako težko posnemati v sintetičnem vsadku. Ko je arterija izpostavljena cikličnim obremenitvam, se na te obremenitve ne odzove takoj, temveč se arterija zaradi svoje viskoelastičnosti pri spremembah tlaka in volumna odziva z zamikom, ki je znan kot pojav histereze, slika 1. Poleg zgoraj omenjenih biomehanskih lastnosti ima pri žilni mehaniki odločilno vlogo tudi radialna raztegljivost arterije v območju fiziološkega tlaka (80–120 mmHg) [5]. Pri sintetičnih vsadkih je ta lastnost neposredno povezana s strukturo in lastnostmi materiala, zato jo je mogoče spreminjati. Arterija je sestavljena iz treh glavnih plasti, v katerih se nahajajo tudi elastinska in fibroinska vlakna, ki imajo različen modul elastičnosti [6, 7].

Rajendran [8] navaja, da so žilni vsadki izdelani iz različnih sintetičnih materialov, najpogosteje

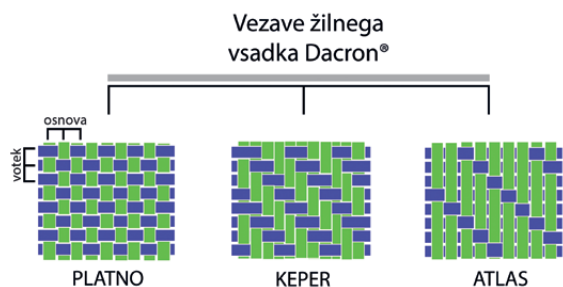


Slika 1: Primerjava spremembe premera sintetičnega implantata in arterije v odvisnosti od spremembe pritiska (prirejeno po viru [5])

polietilentereftalata (PET), ekspaniranega PET-a (ePET), ekspaniranega politetrafluoroetilena (ePTFE) in poliuretana (PU), saj njihova visoka kristalinična struktura preprečuje hidrolizo. Pri napovedovanju polimernih površinskih interakcij s tkivom in krvjo igra pomembno vlogo tudi njihova hidrofobnost [8]. Kanevicha et al. v članku poleg uporabe polietilentereftalata (PET) navajajo tudi uporabo politetrafluoroetilena (PTFE) in polipropilena (PP) [9]. Preje iz PETa izkazujejo dobre mehanske in higroskopske lastnosti, odporne so proti visokim cikličnim obremenitvam, kislinam in alkalijam. PTFE-preja je biološko stabilna, izkazuje tudi dobre mehanske lastnosti ter je odporna proti velikim obremenitvam, v človeškem telesu izkazuje antitrombogene lastnosti. Površina PTFE-vsadka je prevlečena z raztopino sintetičnih polimerov (silikon) ali z različnimi biološkimi snovmi (kolagen, albumin). Polipropilenska preja ima relativno nizko gostoto in izkazuje visoko trdnost, vendar se njene mehanske lastnosti pod vplivom cikličnih obremenitev poslabšajo. Zaslediti je mogoče uporabo kombinacije poliestra in poliuretana, ki izkazuje odlične elastične lastnosti. Poleg tega se uporabljajo sintetični biorazgradljivi materiali na osnovi polimerov organskih kislin, na primer iz organske polilaktatne mlečne kisline je izdelan polilaktat (PLA), iz glikolne kisline pa poliglikolid (PGA) [9]. Najpogosteje se uporabljajo preje z okroglim prečnim prerezom in trilobalne preje. Te namreč zagotavljajo večjo specifično površino, vendar pa so nagnjene k mehanskim poškodbam. [10, 11]

Žilni vsadki morajo zagotavljati ustrezno poroznost, saj s tem omogočajo rast tkiva in tvorbo tanke plasti na osnovi fibroina za odpornost proti krvnim strdkom. V primerjavi tkanih in pletenih žilnih

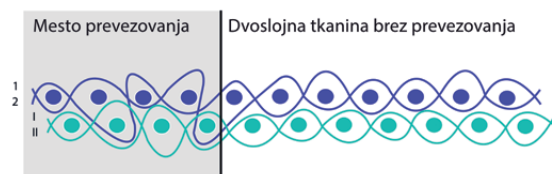
proteze tkani vsadki izkazujejo visoko dimenzijsko stabilnost v smeri osnove in votka, visoko trdnost in nizko poroznost. Zaradi nizke poroznosti in višje trdnosti se proteze uporabljajo brez dodatnega premaza v arterijah z velikim pretokom in veliko obremenitvijo. Pletene proteze so večinoma iz snukovnih pletiv, kjer na trdnost in poroznost vsadka vpliva struktura pletiva. Pleteni vsadki imajo običajno visoko poroznost in manjšo trdnost kot tkani [8]. Stene žilnih implantatov morajo simulirati biomehanske lastnosti človeške krvne žile in omogočiti ponovno vzpostavitev normalne hemodinamike po vključitvi vsadka v celoten kardiovaskularni sistem. Stena vsadkov mora biti elastična, porozna, vodoodporna in mehansko stabilna, hkrati pa morajo biti takšni vsadki združljivi s človeškim telesom, anti-trombogeni, odporni proti okužbam, antikancerogeni, netoksični in nealergeni. Večina implantatov, ki se uporabljajo zdaj, je precej bolj toga kot naravne človeške krvne žile in imajo tudi višji modul elastičnosti. Poleg tega se premer človeške žile pod vplivom krvnega pritiska poveča tudi do 10 %, medtem ko se pri sintetičnem implantatu poveča le za 1 % do 3 %. Posledično lahko pride tudi do raztrganine na spoju sintetičnega implantata z naravno žilo [9]. Za tkanje žilnega vsadka Dacron uporabljajo temeljne vezave, kot so platno, keper in atlas, slika 2 [5, 12].



Slika 2: Vezave žilnega vsadka Dacron (prirejeno po viru [5])

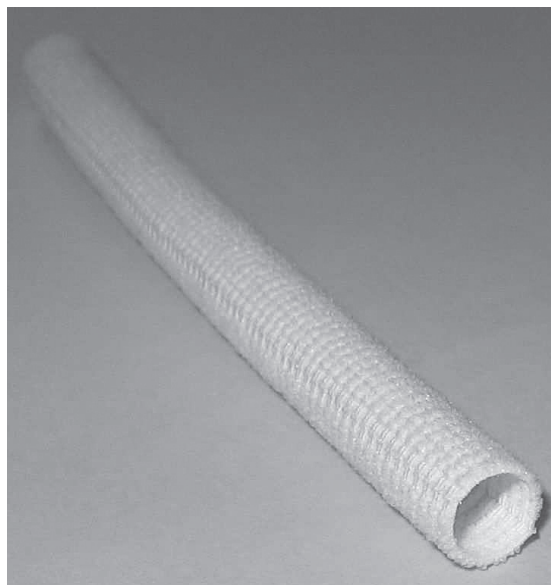
Fizikalnomehanske lastnosti tkanine je mogoče načrtovati s spreminjanjem gostote osnovnih in votkovnih niti, s finostjo uporabljene preje in vezavo [13]. V vezavi platno se osnovne in votkovne niti izmenično prepletajo, zato je tkanina dobro odporna proti obrabi, vendar je zaradi tega najmanj elastična. Prevezovalne točke v vezavi keper tvorijo v tkanini poševni žarek, manj prevezovanja med nitmi omogoča boljše elastičnost. Pri vezavi atlas je flotiranje niti večje, ima najmanj prevezovalnih točk, zato je tkanina mehkejša, vendar slabše odporna proti

obrabli [12]. Chen et al. so izdelali prototip tkane žilne proteze z dvoslojno steno, z izboljšano radialno raztegljivostjo/skladnostjo z obnašanjem naravnih arterij [14]. Radialna skladnost je strukturna lastnost vsadka, ki se odraža kot dimenzijska sprememba pri spremembi intraluminalnega tlaka [15]. Za izdelavo prototipa tkane žilne proteze z dvoslojno steno so za notranji sloj tkanine v smeri osnove uporabili filamente (poli)trimetilen tereftalata (PPT) in s tem povečali radialno skladnost notranje stene. V zunanem sloju so v osnovi uporabili filamente (poli)etilen tereftalata (PET) in s tem zagotovili mehansko bolj odporen in bolj tog zunanji sloj proteze. Dvoslojna tkanina je dvojna tkanina, ki je združena aksialno po dolžini proteze s posebnim načinom prevezovanja, podobnim prevezanim dvojnimi tkaninam, slika 3 [14].



Slika 3: Votkovni rez dvojne tkanine s prikazom prevezanega in neprevezanega dela (prirejeno po viru [14])

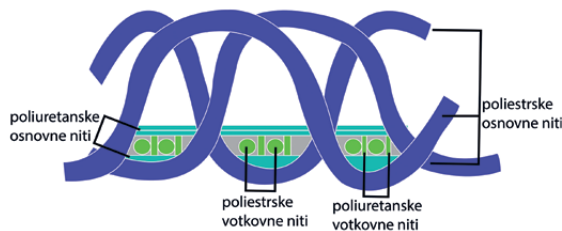
Izdelani so bili različni raztegljivi žilni vsadki z zankasto površino, slika 4 [16]. Kancevicha & Lukyanchikovs opisujeta tkani žilni vsadek iz poliestrske in poliuretanske preje z uporabo posebne votle vezave. Osnova tkanine je vezava platno. S pomočjo enega grabila sta v isti zev sočasno položeni



Slika 4: Žilni vsadek (vir slike: [16])

dve votkovni niti, ena raztegljiva poliuretanska in ena poliestrska, s čimer dobimo videz vezave rips. Poliuretanske niti so pri vnosu v zev raztegnjene za 50 %. Po izhodu iz tkalskega področja se poliuretanska preja skrči v prvotno stanje, pri skrčenju se neelastične poliestrske niti dvignejo iz površine tkanine in tvorijo valovito steno vsadka, slika 4 [16].

Zasnovan in izdelan je bil elastičen žilni vsadek iz poliestrskih in poliuretanskih niti z zankasto strukturo, slika 5. Zunanja stena ima površino podobno dvojnemu velurju, notranja površina cevke je gladka. Po tkanju so bili vsadki termično stabilizirani in sterilizirani ter impregnirani z raztopino bioaktivnih snovi v vakuumski komori. Rezultat poobdelav je, da se je na steni vsadka oblikovala elastična neprepustna membrana [16].



Slika 5: Shematski prikaz vezave (prirejeno po viru [16])

3 Umetne srčne zaklopke

Srce ima dve strani, levo in desno, vsaka pa je razdeljena na dve votlini, preddvora in prekata. Srčne zaklopke ločujejo preddvora in prekate. V srcu imamo štiri zaklopke: aortno, mitralno, trikuspidalno in pulmonarno. Zaklopke imajo nalogo, da kri spuščajo po točno določeni poti in tudi po točno določenem vrstnem redu. Tako je npr. naloga aortne srčne zaklopke nadzorovanje enosmernega pretoka krvi med levim srčnim prekatom in aorto. V enem dnevu se odpre več kot 100.000-krat, pri čemer je izpostavljena različnim strižnim napetostim, upogibnim silam, deformacijam in obremenitvam [17, 18]. V primeru, ko srčna zaklopka preneha opravljati svojo funkcijo [19], tj. preprečevati, da bi kri tekla v nasprotno smer [20], jo je mogoče nadomestiti z mehanskimi ali biološkimi različicami, slika 6 [19]. Prednost mehanskih srčnih zaklopk je predvsem njihova vzdržljivost in posledično manjša verjetnost potrebe po zamenjavi. Po drugi strani se uporabniki lahko srečajo tudi s pomanjkljivostmi takšnih naprav, npr. z njihovim glasnejšim delovanjem. Poleg tega obstaja poten-

cialna verjetnost, da se na zaklopki tvorijo krvni strdki, zaradi česar je potrebno dosmrtno zdravljenje z antikoagulatnimi zdravili. Pri bioloških srčnih zaklopkah je potencialna nevarnost tvorbe krvnih strdkov manjša [21], vendar imajo krajšo življenjsko dobo. Umetne srčne zaklopke so lahko narejene tudi iz tekstilnih materialov, pri čemer so tkanine zaradi trdnosti in stabilnosti strukture najprimernejše [22].

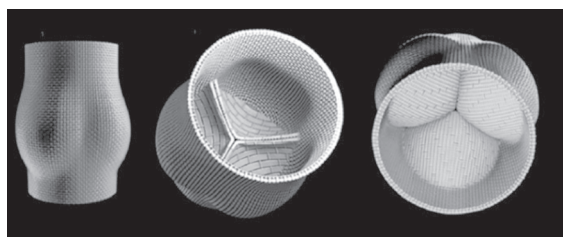


Slika 6: Mehanska in biološka srčna zaklopka (vir slike [23])

Tekstilije izkazujejo velik potencial za izdelavo umetnih srčnih zaklopk za neinvazivno zdravljenje, saj so izjemno fleksibilne in obenem trdne, zato se preprosto zložijo v majhne premere za vstavljanje s pomočjo katetra. Dokazano je, da lahko tekstilni material, iz katerega je narejena umetna srčna zaklopka, zdrži več kot 200 milijonov ciklov. Po drugi strani pa zaradi svoje poroznosti omogoča vraščanje fibrotičnega tkiva [24]. Ugotovljeno je bilo, da se z večjo poroznostjo materiala prepuščanje krvi skozi zaklopko poveča, manjša debelina zaklopke pa povzroči, da je le-ta bolj prožna in se hitreje zapira. Tkana srčna zaklopka mora dosegati ustrezno upogibno togost za zagotavljanje dobre odpornosti proti utrujanju materiala in dobro ortotropno natezno togost, ki je bistvenega pomena za prenašanje obremenitev [25].

Surovina, ki se največkrat uporablja za izdelavo tkanih srčnih zaklopk, je poliester (PET) [25–28]. Na lastnosti končnega izdelka poleg izbire surovine in strukture vplivajo tudi lastnosti preje. Za monofilamentno prejo je značilna bolj gladka površina, vendar je z mehanskega vidika bolj toga, medtem ko je multifilamentna preja na otip bolj hrapava, a mehansko bolj prožna. Različne raziskave sicer navajajo, da hrapavost lahko omeji celično rast. V raziskavi Vaeskens et al. so primerjali lastnosti kalandrirane multifilamentne preje, nekalandrirane multifilamentne preje in monofilamentne preje pri uporabi za umetne srčne zaklopke. Izkazalo se je, da je fibrozo, tj. reaktivno ali reparacijsko razraščanje veziva, najmanj spodbujala nekalandrirana multi-

filamentna preja [27, 29]. Pri monofilamentni preji je zaradi večjih por med nitmi sledilo spodbujanje rasti in razmnoževanja fibroblasta, glavne aktivne celice vezivnega tkiva [27, 30]. Pri obremenjevanju do 40 milijonov ciklov je bilo mogoče opaziti prve znake pretrgov pri monofilamentnih in kalandriranih prejah, medtem ko pri multifilamentnih prejah ni bilo vidnih znakov poškodb. Izkazalo se je, da na vzdržljivost same tkanine vplivata postopek izdelave in tudi vrsta preje ter da je multifilamentna preja boljša izbira [31]. Lastnosti tkanih vsadkov se lahko spreminjajo s spreminjanjem osnovnih konstrukcijskih parametrov, tj. uporabljene surovine in strukture preje, gostote osnovnih in votkovnih niti, in vezave, slika 7 [13]. Od uporabljene vezave, finosti preje in gostote niti, ki med drugim določa razdaljo med nitmi, so odvisne karakteristike končnega izdelka, kot npr. debelina, trdnost, poroznost, raztegljivost in odpornost tkanine [13, 32]. Največkrat uporabljena vezava v tkanih srčnih zaklopkah je zaradi kompaktne strukture platno [27–30].

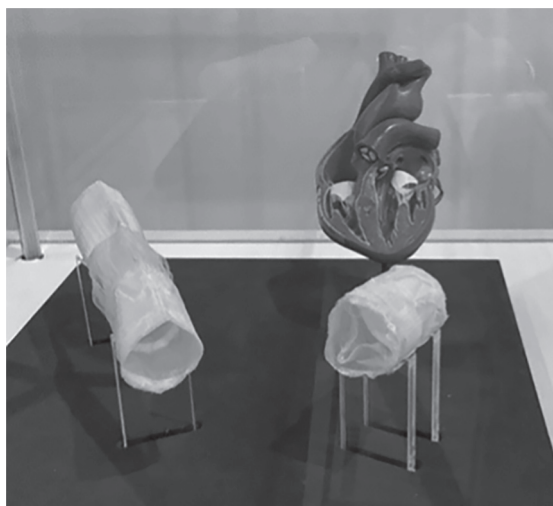


Slika 7: Različne izvedbe srčnih zaklopk: vezava platno, panama in atlas (vir slike [13])

4 Novost

Ena od pomanjkljivosti tekstilnih izdelkov za vsadke so bili vedno spoji oz. šivi, saj se tako zapletenih oblik, kot je srčna zaklopka, do sedaj ni dalo stakati brez dodatnih obdelav [19]. Rešitev za omenjeno pomanjkljivost je prva tkana srčna zaklopka, ki ne potrebuje dodatnega šivanja oz. spajanja, slika 8. Predstavljena je bila na sejmu Techtextil 2022, ki se je odvijal med 21. in 24. junijem 2022 v Frankfurtu. Ta inovacija, ki je na sejmu zbudila veliko zanimanje, je prejela nagrado Techtextil Innovation Award 2022 v kategoriji Novi izdelki (New Product). Razvili so jo raziskovalci Inštituta za tekstilne stroje in tehnologijo visoko zmogljivih materialov (Institute of Textile Machinery and High Performance Material Technology) na Tehnični univerzi Dresden v sodelovanju z izdelovalci medicinskih pripomočkov

in srčnimi kirurgi iz Kardiovaskularnega centra Würzburg in Univerzitetne bolnišnice Würzburg [33]. Izdelava srčne zaklopke brez dodatnih spojev je mogoča s kombinacijo trakotkalskega stroja s čolnički in žakarskega mehanizma, ki so ga poimenovali žakarsko cevasto tkanje, in omogoča tkanje zaklopke v »enem kosu«. Del raziskav je bil vključen v diplomsko delo z naslovom »Razvoj cevaste strukture z vgrajeno funkcijo zaklopke« diplomanta Mathisa Brunsa, za kar je prejel tudi nagrado Peter Dornier Foundation Prize 2022, ki nagraduje kompleksne tkalske rešitve [34]. Prednost tkane zaklopke, ki je bila predstavljena na sejmu Techtextil 2022, je zdravljenje z minimalno invazivnim kirurškim postopkom, saj je mogoče zloženo zaklopko s pomočjo katetra vstaviti skozi ožilje do končne pozicije v srcu in jo tam razpreti [34].



Slika 8: Tkana srčna zaklopka kot novost na sejmu 2022 Techtextil (avtorica slike prof. dr. Matejka Bizjak)

5 Sklep

V članku so predstavljeni primeri žilnih vsadkov in srčnih zaklopk, ki omogočajo boljše življenje njihovih uporabnikov. Osrčje članka je opis prve tkane srčne zaklopke, ki ne potrebuje dodatnega spajanja, kar izkazuje velik potencial tkalske tehnologije za izdelavo tridimenzionalnih tkanih struktur zahtevnih oblik za uporabo v medicini [34]. Poleg razvoja tekstilne tehnologije za iskanje kompleksnejših rešitev je za končen rezultat ključnega pomena tudi uspešno vključevanje biomimetike.

Viri

1. Understanding implantable textiles [dostopno na daljavo]. Advanced Textiles Association [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://advancedtextilesource.com/2018/05/21/understanding-implantable-textiles/>>.
2. GURU, R., KUMAR, A., GREWAL, D., KUMAR, R. Study of the implantable and non-implantable application in medical textile. In *Next-Generation Textiles*. Edited by Hassan Ibrahim. London : IntechOpen, 2023, doi: 10.5772/intechopen.103122.
3. TOMŠIČ, B. *Medicinske tekstilije – študijsko gradivo*. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, 2022.
4. Peter Dornier Foundation Prize 2022 honours the Dresden textile research on woven heart valve [dostopno na daljavo]. Technische Universität Dresden [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/die-fakultaet/news/peter-dornier-stiftungspreis-2022?set_language=en>.
5. SINGH, C., WONG, C.S., WANG, X. Medical textiles as vascular implants and their success to mimic natural arteries. *Journal of Functional Biomaterials*, 2015, **6**(3), 500–525, doi: 10.3390/jfb6030500.
6. SHADWICK, R.E. Elasticity in arteries. *American Scientist*, 1998, **86**(6), 535–541, doi: <https://www.jstor.org/stable/27857132>.
7. SHADWICK, R.E. Mechanical design in arteries. *Journal of Experimental Biology*, 1999, **202**(23), 3305–3313, doi: 10.1242/jeb.202.23.3305.
8. RAJENDRAN, S. Implantable materials: an overview. In *Medical and healthcare textiles*. Edited by S. C. Anand, J. F. Kennedy, M. Mirafteb and S. Rajendran. Oxford : Woodhead Publishing, 2010, 329–332.
9. KANCĚVIČA, V., LUKJANČIKOVŠ, A., AUZĀNS, A. Structure of elastic woven vascular implants. *Material Science*, 2011, **6**, 9–12.
10. KATZER, K. Polyethylene polymers for hygiene market. *Asian Textile Journal*, 2002, **2**(4), 30–36.
11. *Handbook of medical textiles*. Edited by V. T. Bartels. Cambridge : Woodhead Publishing, 2011.
12. JIAO, Y., LI, C., LIU, L., WANG, F., LIU, X., MAO, J., WANG, L. Construction and application of textile-based tissue engineering scaffolds: a review. *Biomaterials Science*, 2020, **8**(13), 3574–3600, doi: 10.1039/D0BM00157K.
13. LIBERSKI, A., AYAD, N., WOJCIECHOWSKA, D., KOT, R., VO, D. M., AIBIBU, D., HOFFMANN, G., CHERIF, C., GROBELNY-MAYER, K., SNYCERSKI, M., GOLDMANN, H. Weaving for heart valve tissue engineering. *Biotechnology Advances*, 2017, **35**(6), 633–656, doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.07.012.
14. CHEN, Y., DING, X., LI, Y., KING, W. M., GAO, J., ZHAO, X. A bilayer prototype woven vascular prosthesis with improved radial compliance. *The Journal of The Textile Institute*, 2012, **103**(1), 106–111, doi: 10.1080/00405000.2011.552956.
15. SONODA, H., TAKAMIZAWA, K., NAKAYAMA, Y., YASUI, H., MATSUDA, T. Small-diameter compliant arterial graft prosthesis: design concept of coaxial double tubular graft and its fabrication. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2001, **55**(3), 266–276, doi: 10.1002/1097-4636(20010605)55:3<266::AID-JBM1014>3.0.CO;2-C.
16. LUKJANČIKOVŠ, A., KANCĚVIČA, V., AUZĀNS, A. f: *Book of abstracts and proceedings, Finland, Tampere, 28.–30. June, 2011*. Tampere : Tampere University of Technology, 2011, p. 16.
17. YACOUB, M.H., TAKKENBERG, J.J.M. Will heart valve tissue engineering change the world? *Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine*, 2005, **2**(2), 60–61, doi: 10.1038/ncpcardio0112.
18. DOHMEN, P.M., KONERTZ, W. Tissue-engineered heart valve scaffolds. *Annals of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2009, **15**(6), 362–367.
19. Peter Dornier Foundation Prize 2022 honours the Dresden textile research on woven heart valve [dostopno na daljavo]. Technische Universität Dresden [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/die-fakultaet/news/peter-dornier-stiftungspreis-2022?set_language=en>.
20. Heart valves, anatomy and function [dostopno na daljavo]. Columbia University Irving Medical Center [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.columbiadoctors.org/treatments-conditions/heart-valves-anatomy-and-function>>.
21. What happens: aortic valve replacement [dostopno na daljavo]. NHS [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.nhs.uk/conditions/aortic-valve-replacement/what-happens/>>.

22. The woven heart valve [dostopno na daljavo]. Techtextil blog [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.techtextil-blog.com/en/the-woven-heart-valve/>>.
23. Heart valve surgery – mechanical vs. bioprosthetic – which is better? [dostopno na daljavo]. MyHeart.net [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://myheart.net/articles/heart-valve-surgery-mechanical-vs-bioprosthetic-which-is-better/>>.
24. AMRI, A., LAROCHE, G., CHAKFE, N., HEIM, F. Fibrous composite material for textile heart valve design: in vitro assessment. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 2018, **63**(3), 221–230, doi: 10.1515/bmt-2017-0226. PMID: 29664732.
25. HEIM, F., DURAND, B., CHAKFE, N. Textile heartvalve prosthesis: manufacturing process and prototype performances. *Textile Research Journal*, 2008, **78**(12), 1124–1131, doi:10.1177/0040517508092007.
26. HEIM, F., DURAND, B., CHAKFE, N. Textile heart valve: novel shaping process and material performances. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, **26**(10), 1303–1309, doi: 10.1080/10426914.2011.552018.
27. VAESKEN, A., PELLE, A., PAVON-DJAVID, G., RANCIC, J., CHAKFE, N., HEIM, F. Heart valves from polyester fibers: a preliminary 6-month *in vivo* study. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 2018, **63**(3), 271–278, doi: 10.1515/bmt-2016-0242.
28. HEIM, F., DURAND, B., CHAKFE, N. Textile for heart valve prostheses: fabric long-term durability testing. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2010, **92B**(1), 68–77, doi: 10.1002/jbm.b.31490.
29. Fibroza [dostopno na daljavo]. Termania [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.termania.net/slovarji/slovenski-medicinski-slovar/5515312/fibroza>>.
30. Fibroblast [dostopno na daljavo]. Britannica [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.britannica.com/science/fibroblast>>.
31. VAESKEN, A., HEIM, F., CHAKFE, N. Fiber heart valve prosthesis: influence of the fabric construction parameters on the valve fatigue performances. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, **40**, 69–74. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.08.015.
32. *Handbook of technical textiles*. Edited by A.R. Horrocks and S.C. Anand. Cambridge : Woodhead Publishing, 2000.
33. Promise of new seamless heart valve [dostopno na daljavo]. Innovation in Textiles [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.innovationintextiles.com/medical-health-hygiene/promise-of-new-seamless-heart-valve/>>.
34. Peter Dornier Foundation Prize 2022 honours textile research on woven heart valve [dostopno na daljavo]. Dornier [citirano 23. 12. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.lindauerdornier.com/en/company/news/peter-dornier-foundation-prize-2022/>>.