

## Uporaba termomehanske analogije za določitev zaostalega napetostnega stanja arterij

Janez Urevc<sup>1,\*</sup> – Milan Brumen<sup>2, 3</sup> – Vojko Flis<sup>4</sup> – Boris Štok<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

<sup>2</sup>Univerza v Mariboru, Medicinska fakulteta, Slovenija

<sup>3</sup>Institut "Jožef Stefan", Slovenija

<sup>4</sup>Univerzitetni klinični center Maribor, Oddelek za žilno kirurgijo, Slovenija

Določitev breznapetostnega stanja arterij predstavlja še vedno nerazrešen problem na področju numeričnega modeliranja mehanskega odziva realnih arterij. Breznapetostno stanje arterije, ki ima v splošnem obliko krožnega sektorja, je namreč eksperimentalno nemogoče določiti. Oblika breznapetostnega stanja (oziroma temu pripadajoče zaostalo napetostno stanje) pa je pomembno zato, ker predstavlja začetno stanje in tako ključen podatek sleherne numerične analize.

Arterije se za karakterizacijo njihovega mehanskega odziva običajno obravnava kot idealno krožne cevi, to pomeni idealno krožne in ravne. Takšna poenostavitev omogoča določitev zaostalih napetosti arterije brez poznavanja njihovega breznapetostnega stanja. Prisotnost zaostalih napetosti je posledica homogenizacije odziva arterij *in vivo*. Napetostno stanje arterije *in vivo* bi bilo namreč izrazito nehomogeno z velikim transmuralnim gradientom brez upoštevanja zaostalih napetosti. Zaradi njihove porazdelitve skozi debelino žilne stene se jih običajno asociira z upogibnimi napetostmi. Na notranji površini kolobarja so zaostale napetosti tlačne, medtem ko so na zunanji površini natezne.

Zaradi kompleksnosti problematike določitve mehanskega stanja realnih arterij na osnovi podatkov *in vivo* so v literaturi v splošnem privzete številne poenostavitve. Te se večinoma nanašajo na poenostavitev določitve breznapetostnega stanja arterij. Najbolj splošen pristop je, da je za začetno breznapetostno stanje upoštevana neobremenjena geometrija arterije, zaostale napetosti pa se zanemari.

V tem delu smo določili mehanski odziv prednapete, tlačno obremenjene hiperelastične cevi, ki predstavlja *in vivo* stanje arterije, brez poznavanja njene začetne breznapetostne oblike. To smo dosegli z vpeljavo termomehanskega pristopa, ki ga kot prvič predstavljamo v tem delu. Kot prikazemo v delu, lahko zaostalo napetostno stanje arterij (ki vsebuje upogibne in vzdolžne napetosti) določimo ekvivalentno s termičnim obremenjevanjem ustrezno definirane zaprte cevi, katere začetna breznapetostna oblika predstavlja obliko arterije v obremenjenem stanju. Na osnovi zaostalega napetostnega stanja arterij, pridobljenega s pomočjo termomehanskega modela arterije, pa nadalje lahko določimo stanje arterije *in vivo*. Ustreznost razvite metodologije smo prikazali z določitvijo breznapetostnega stanja arterije. Izračunano ravnotežno stanje arterije, ki je pridobljeno z vzdolžnim in prečnim rezom njenega zaostalega napetostnega stanja, zasede obliko odprte cevi, katere napetostno stanje predstavlja le majhen delež zaostalega napetostnega stanja. Ti rezultati kažejo, da imajo zaostale napetosti, ki smo jih določili s pomočjo pripadajočega termomehanskega modela, porazdelitev upogibnih napetosti, kar potrjuje ustreznost metodologije.

Mehanski odziv karotidne arterije je v tem delu obravnavan kot nelinearno-elastičen, izotropen in nestisljiv. Vpliv okoliškega tkiva arterije je zanemarljiv, arterija pa je obravnavana kot enoplastna snov. Arterije so v splošnem sestavljene iz treh različnih plasti, intime, medije in adventicije, katerih mehanski odziv je v splošnem anizotropen. Upoštevanje teh lastnosti arterij v predstavljeni termomehanski metodologiji je ena izmed smernic za naše nadaljnje delo.

**Ključne besede:** biomehanika, zaostale napetosti, breznapetostno stanje arterij, metoda končnih elementov, termomehanika