

## Elastokalorično hlajenje: Pregled razvoja in nadaljnji izzivi pri razvoju regenerativnih elastokaloričnih naprav

Parham Kabirifar – Andrej Žerovnik – Žiga Ahčin – Luka Porenta – Miha Brojan – Jaka Tušek\*

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

Elastokalorični hlajenje, ki temelji na izkoriščanju latentne toplote sproščene/absorbirane pri napetostno povzročeni martenzitni transformaciji v zlitinah z oblikovnim spominom, se v zadnjih letih kaže kot ena najperspektivnejših alternativ relativno neučinkovite ter še vedno okoljsko sporne parno-kompresijski tehnologiji hlajenja. Elastokalorično hlajenje je potencialno lahko bolj učinkovito od parno-kompresijskega ter zaradi uporabe neškodljivih hladilnih sredstev (materialov z oblikovnim spominom) okolju prijazno.

V prvem delu prispevka je opisan elastokalorični učinek v zlitinah z oblikovnim spominom ter pregled stanja na področju elastokaloričnih materialov in naprav. V splošnem lahko vse zlitine z oblikovnim spominom, ki so pri želeni delovni temperaturi v avstenitni fazi, obravnavamo kot potencialne elastokalorične materiale. Elastokalorični krožni proces temelji na štirih osnovnih korakih. Ko elastokalorični material obremenimo z zunanjo silo, to povzroči avstenitno-martenzitno transformacijo, in material se segreje. Nato material toploto odda v okolico in se s tem ohladi nazaj na začetno temperaturo. Sledi razbremenjevanje materiala, pri čemer pride do povratne martenzitno-avstenitne transformacije in material se ohladi pod temperaturo okolice. Hladen elastokaloričen material je nato sposoben črpati toploto iz okolice in s tem hladiti želen prostor/telo. Pri najboljših danes poznanih elastokaloričnih materialih so lahko adiabatne spremembe temperature med obremenjevanjem in razbremenjevanjem tudi več kot 30 K. Do danes je bilo na svetu razvitih in testiranih okoli 10 demonstracijskih elastokaloričnih naprav. Najboljše med njimi, ki temeljijo na principu aktivne elastokalorične regeneracije, že dosegajo komercialno zanimive hladilne karakteristike s temperaturnimi razponi okoli 20 K, specifičnimi hladilnimi/toplotnimi močmi okoli 800 W na kilogram elastokaloričnega materiala in eksergijskimi učinkovitostmi okoli 20 %. Aktivni elastokalorični regeneratori so porozna struktura iz elastokaloričnega materiala preko katerega se črpa tekočina za prenos toplote (npr. voda). Glavna prednost takšnega principa izkoriščanja elastokaloričnega učinka je, da se ob ustreznih obratovalnih pogojih vzdolž regeneratorja ustvari temperaturni profil med virom in ponorom toplote. S tem je lahko temperaturni razpon regenerativne elastokalorične naprave večji od temperaturnih sprememb generiranih v materialu zaradi elastokaloričnega učinka.

V drugem delu prispevek obravnava dva ključna izziva pri razvoju regenerativne elastokalorične hladilne naprave oziroma toplotne črpalke. To sta razvoj poroznih struktur iz elastokaloričnih materialov, ki bi lahko služili kot aktivni elastokalorični regeneratori ter razvoj učinkovitega pogonskega sistema za obremenjevanje/razbremenjevanje takšnih regeneracij. Predstavljene so različne geometrije aktivnih elastokaloričnih regeneracij izdelane iz različnih oblik elastokaloričnih materialov. Predstavljene so tudi dosedanje raziskave aditivne proizvodnje poroznih struktur iz materiala z oblikovnim spominom. V splošnem lahko aktivne elastokalorične regeneracije obremenimo z natezno ali tlačno silo, pri čemer imata oba načina obremenjevanja nekatere prednosti oziroma slabosti za elastokalorično hlajenje. Glavna prednost nateznega obremenjevanja je možnost uporabe tankih elementov (žic, ploščic) z veliko specifično površino, kar omogoča hiter in učinkovit prenos toplote med elastokaloričnim materialom ter tekočino za prenos toplote, medtem ko je glavna slabost nateznega obremenjevanja omejena doba utrujanja. Prikazano je, da je lahko doba utrujanja pri tlačnem obremenjevanju bistveno boljše kot pri nateznem (preko  $10^6$  obremenitev brez poškodb), a se pri tem pojavlja problem uklonske stabilnosti elastokaloričnih materialov ter s tem povezane nezmožnosti uporabe poljubno tankih elastokaloričnih elementov, ki bi omogočali hiter prenos toplote. Druga ključna komponenta elastokalorične naprave pa je pogonski sistem, ki mora na učinkovit način zagotavljati relativno velike sile potrebne za obremenjevanje elastokaloričnih materialov in hkrati koristno izrabljati sproščeno mehansko delo med njihovim razbremenjevanjem. Prikazana je analiza pogonskega sistema z integriranim vstajnikom, ki omogoča tudi do 70 % regeneracijo celotnega vložene delo (preostanek predstavljajo histerezne izgube elastokaloričnega učinka).

**Ključne besede:** elastokalorični učinek, hlajenje, aktivni elastokalorični regeneratori, doba utrujanja, pogonski mehanizem

\*Naslov avtorja za dopisovanje: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za hlajenje in daljinsko energetiko, AŠkerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija, jaka.tusek@fs.uni-lj.si