

Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management

## TEZĂ DE DOCTORAT

DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

# Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof.univ.dr.ing. Ioan MIHAI

> DOCTORAND: Ing. Silviu SPRINCEANĂ

**SUCEAVA, 2017** 





### Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

"Lucrarea a beneficiat de suport financiar prin proiectul cu titlul "SOCERT. Societatea cunoașterii, dinamism prin cercetare", număr de identificare contract POSDRU/159/1.5/S/132406. Proiectul este cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013. Investește în Oameni!"

### CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat intitulată "*Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate*", a fost elaborată sub atenta îndrumare a domnului prof.univ.dr.ing. Ioan MIHAI care a avizat activitatea mea de cercetare și de diseminare a rezultatelor. Pe parcursul elaborării tezei s-a beneficiat de suport financiar pe o perioadă de 15 luni prin proiectul: "SOCERT. Societatea cunoașterii, dinamism prin cercetare", număr de identificare contract POSDRU/159/1.5/S/132406. Proiectul este cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013. Investește în Oameni!

Doresc să adresez sincere mulțumiri domnului prof.univ.dr.ing. Ioan MIHAI pentru activitatea de îndrumare pe tot parcursul tezei de doctorat, pentru răbdare, sprijin, și modul de lucru impus.

Mulțumesc distinșilor referenți științifici pentru că au acceptat să analizeze conținutul științific al tezei, pentru efortul depus la verificarea acesteia, recomandărilor făcute cât și pentru participarea la susținere.

Adresez mulțumiri membrilor comisiei de tutori, prof.univ.dr.ing. Ilie MUSCĂ, prof.univ.dr.ing. Marilena GLOVNEA și conf.univ.dr.ing. Delia CERLINCĂ, pentru sfaturile și sugestiile transmise cu ocazia susținerii referatelor științifice care au avut ca scop atingerea unui nivel științific cât mai ridicat al tezei de doctorat.

În formarea mea s-au implicat prin transmiterea de cunoștințe, idei, sfaturi și încurajări, membrii colectivului de cadre didactice din Departamentul de Mecanică și Tehnologii a Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management din cadrul Universității "Ștefan cel Mare" Suceava. Am beneficiat de sprijinul colectivului departamentului sus menționat pe parcursul studiilor de licență, masterat și doctorat.

Alături de ei mi-au fost colegii și prietenii, cărora le mulțumesc pe această cale.

Nu în ultimul rând, adresez întreaga mea recunoștință familiei mele, pentru răbdarea, înțelegerea și susținerea continuă de care au dat dovadă pe toată perioada studiilor doctorale.

Silviu Sprinceana

### **CUPRINS**

	Pag.	Pag.
ODIECTIVELE SI STDUCTUDA TEZELDE DOCTODAT	rezumat	teză
1 Oportunitatea și obiecțivele terei	1	xiv
<ol> <li>Oportumatea și oblectivele tezer</li> <li>Structura lucrării</li> </ol>	1	xix
1 STADIUL ACTUAL PRIVIND DEZVOLTAREA MICRO	). 6	1
TURURILOR TERMICE PLATE	<b>)</b> - 0	-
1.1 Scurt istoric privind aparitia tuburilor termice	6	1
1.2. Clasificarea tuburilor și micro-tuburilor termice	8	6
1.3. Elementele constitutive ale MTTP, materiale utilizate și tehnologii de fabricati	ie 9	9
1.3.1. Principiul de funcționare și zonele de lucru ale MTTP	9	9
1.3.2. Materiale și lichide de lucru utilizate la MTTP	10	10
1.3.3. Tehnici și tehnologii de fabricație a MTTP	11	11
1.4. Cazuri constructive particulare ale MTTP	13	15
1.4.1. Principii de funcționare ale MTTP particulare	13	15
1.4.2. Utilizarea camerelor de vapori ca micro-tuburi termice	14	15
1.4.3. Cazul conductanței variabile aplicate la micro-tuburile termice plate	15	16
1.4.4. Tuburi termice în buclă	16	17
1.4.5. Tuburi termice pulsatorii	16	18
1.4.6. Tuburi termice rotative	17	19
1.5. Metode de intensificare a transferului de căldură utilizate la răcirea MTTP	17	19
1.5.1. Limitele de funcționare ale MTTP	17	19
1.5.2. Rolul stratului capilar interior și a structurii acestula asupra transferului	la 18	20
MITP 152 Chaifeanna matadalan da internificana a transformlai da ašldanš	20	25
1.5.3. Clasificarea metodelor de intensificare a transferului de caldura	20	25
1.5.4. Aplicății ale micro-luburilor termice	20	25
directiiler de corectore	ea 21	28
2 CONTRIBUTIL ADUSE LA INTENSIFICAREA SCHIMBULUL	F 22	30
<b>Z.CONTRIDUȚII ADUSE LA INTENSIFICAREA SCHIMBULUI D</b> CĂI DURĂ ÎN MICRO-TURIRII E TERMICE PI ATE		50
2.1. Utilizarea materialelor cu memoria formei și a avcesului de lichid	22	30
2.1. Ottizarea materialeloi cu memoria former și a excessitul de nemu 2.2. Adiția de lichid în zona de vaporizare a MTTP folosind un mini-cilind	$r_{11}$ $24$	33
exterior	Iu 24	55
2.3. Importanta stratului capilar interior asupra transferului de căldură la MTTP	25	36
2.4. Permeabilitatea si porozitatea stratului capilar interior asupra transferului c	de 25	36
căldură la MTTP		
2.5. Regimurile funcționale ale MTTP cu sau fără adiția de extrafluid	26	39
2.6. Concluzii privind soluțiile propuse pentru intensificarea transferului	de 27	40
căldură		
3.SUDIUL TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ ÎN MICRO-TUBURIL	E 28	42
TERMICE PLATE		
3.1. Particularitățile transferului de căldură în MTTP	28	42
3.1.1. Introducere	28	42
3.1.2. Determinarea capacității maxime de transport a căldurii la MTTP	29	44
3.1.3. Transferul de căldură în zona de vaporizare a MTTP	33	49
3.1.4. Transferul de căldură prin medii poroase polisintetice	36	57
3.1.5. Determinarea conductivității termice echivalente a zonei de	38	61
vaporizare		
3.1.6. Intensificarea transferului de căldură și răcirea MTTP prin adiție de	39	64
extra-fluid		
3.2. Modelarea transferului de câldură la MTTP	44	11
3.2.1. Modelarea transferului de caldurá în zona sursei calde a MTTP	44	77
5.2.2. Modelarea transferului de caldura în secțiunea transversala a MITP	45	/9

3.2.3. Modelarea intensificării transferului de căldură la încălzirea și răcirea	46	80
MTTP pentru adiția de extra-fluid		
3.2.4. Modelarea transferului de căldură și a curgerii în MTTP folosind metoda	46	83
Crank-Nicolson		
3.3. Rezultate și concluzii preliminarii privind transferul de căldură în MTTP	49	87
4.CONCEPEREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL	51	89
4.1. Descrierea standului experimental destinat studiului intensificării transferului	51	89
de căldură la încălzirea și răcirea MTTP		
4.2. Realizarea unui MTTP cu extra-fluid generat de un material polisintetic presat	52	93
de o lamelă cu memoria formei	~ ~	~ .
4.3. Realizarea unui MTTP cu extra-fluid folosind un mini-cilindru cu piston	53	94
controlat electronic		0.6
4.4. Aparatura de cercetare utilizată	54	96
4.4.1. Contribuții aduse la masurarea temperaturii cu circuitul integrat	54	96
AD395CQ-ND 4.2.2. Echinementul uSeen de comencernin musicalementuis lesen e miere completen	<b>55</b>	07
4.2.2. Echipamentul µScan de scanare prin promometrie laser a micro-canalelor	55	97
și a stratului sinterizat 4.4.2 Miaroscopul MOTIC SZM 168 au surgă de lumină rece Mle 150	56	08
4.4.5. Microscopul MOTIC SZM-108 cu suisa de fumina fece Mic-150	50 56	98
5 DEZULTATE EVDEDIMENTALE SUINTEDDDETADEA LOD	50 57	99 101
5.1 Analiza stratului canilar sinterizat si a micro canalalor tranazzidala prin	57	101
profilometrie cu laser	57	101
5.2 Analiza prin profilometrie laser a structurii materialului polisintetic folosit ca	58	107
rezervor de extra-fluid	50	107
5.2.1. MTTP cu micro-canale tranezoidale si lichid de lucru acetonă metanol si	59	110
apă distilată	C ,	110
5.2.1.1. MTTP cu lichid de lucru acetonă, sarcină normală, ventilator pornit	60	112
5.2.1.2. MTTP cu lichid de lucru metanol, sarcină normală, ventilator pornit	61	113
5.2.1.3. MTTP cu lichid de lucru apă distilată, sarcină normală, ventilator pornit	61	114
5.2.1.4. MTTP răcit cu extra-fluid acetonă, funcționând la supra-încălzire	62	116
5.2.1.5. MTTP răcit cu extra-fluid metanol, funcționând la supra-încălzire	63	118
5.3. MTTP răcit cu injecție de extra-fluid, folosind un mini-cilindru cu piston controlat	64	122
electronic		
5.3.1. MTTP cu acetonă, supra-încălzire, răcit cu injecție de extra-fluid	65	123
5.3.2. MTTP cu metanol, supra-încălzire, răcit cu injecție de extra-fluid	65	125
5.3.3. MTTP cu apă distilată, supra-încălzire, răcit cu injecție de extra-fluid	66	127
5.4. Monitorizarea câmpului de temperatură folosind camerele IR	67	129
5.5. Compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcule	69	134
5.6. Compararea rezultatelor experimentale cu cele din cercetàri similare	69	136
6.CONTRIBUȚII, CONCLUZII FINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE	71	140
6.1. Introducere	71	140
6.2. Contribuții teoretice	71	140
6.3. Contribuții experimentale	/5	144
6.4. Concluzii finale		148
0.5. Direcții de cercetare	65 9 <b>5</b>	155
BIBLIUGKAFIE SELECIVA	85	150
	-	100
Anexa i Coduri sursa obținute în Mathcad (extras <sup>*</sup> )	-	100
Anexa 2 Coduri sursă obținute în Matlab (extras*)	-	177
Anexa El pană la:	-	177
Anexa E18	-	300

### **OBIECTIVELE ȘI STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT**

#### 1. Oportunitatea și obiectivele lucrării

Evoluția continuă a echipamentelor electronice care au aplicații în mai toate domeniile de activitate, a impus crearea unor structuri de calcul capabile să facă față noilor cerințe ale standardelor de fiabilitate, miniaturizare și costuri de fabricație. Apariția procesoarelor pe 64 și 128 de biți, cu două, patru sau opt nuclee a impus rezolvarea răcirii eficiente a acestora cu device-uri miniaturale. Gradul tot mai avansat de miniaturizare a CPU și a componentelor electronice a impus găsirea unor soluții pentru ca sistemele de răcire să aibă o eficacitate sporită, un consum extern de energie cât mai redus, dimensiuni minime și costuri de realizare cât mai mici. Pentru a răspunde cerințelor actuale, sunt necesare cercetări în domeniul intensificării transferului de căldură prin micro si nano-canalele sistemelor de răcire, care urmăresc rezolvarea totală sau parțială a dezideratelor menționate. Printre sistemele cu rol de răcire a CPU sau a componentelor electronice se enumeră tuburile și micro-tuburile termice plate (TTP, MTTP). Acestea constau în principiu din niște incinte aplatizate, realizate din cupru sau alte materiale care au un coeficient mare de transmitere a căldurii, prevăzute cu micro-canale în interior, vidate și umplute parțial cu diferite lichide. Întrucât MTTP sunt utilizate frecvent pentru răcire, s-a considerat că este oportun ca prin cercetări să se studieze care metode de intensificare a transferului de căldură și ce fluide de lucru asigură o mai bună răcire a MTTP. Determinările experimentale efectuate până în prezent arată că MTTP funcționează bine între anumite limite de temperatură, la regimuri termice uzuale. S-a constatat însă că este posibil ca la MTTP să apară o blocare funcțională în cazul regimurilor termice de supra-încălzire. Dacă sistemul de răcire nu funcționează corect, în majoritatea cazurilor procesorul sau componentele electronice de putere sunt distruse rapid, consecintele fiind uneori extrem de grave.

Pentru a evalua teoretic dacă apare o creștere a eficienței folosind metoda intensificării transferului de căldură (fenomene convective), au fost efectuate calcule care să confirme sau nu veridicitatea acestui lucru. Analiza rezultatelor obținute din calcule coroborat cu analiza posibilităților experimentale de implementare a unor noi metode de intensificare a transferului de căldură trebuie să scoată în evidență dacă se asigură sau nu răcirea eficientă a MTTP.

Prezenta lucrare, încearcă ca prin soluțiile noi propuse - de intensificare a transferului de căldură - să rezolve evitarea blocării funcționale a micro-tuburilor termice plate în situațiile în care acestea ar fi nevoite, pentru scurt timp, să disipe un flux termic superior celor pentru care au fost proiectate.

Principalele obiective ale tezei de doctorat sunt:

- a) Găsirea unor *soluții constructive de principiu* care să asigure răcirea micro-tuburilor termice plate pentru evitarea apariției blocajelor funcționale la supra-încălzirea MTTP, prin:
  - analiza comportării termice a MTTP în zonele constitutive ale acestora (vaporizare, adiabatică, condensare) cu scopul de a determina procesele ce conduc la apariția blocării funcționale a MTTP;
  - stabilirea diferențelor comportamentale la supra-încălzire luând în considerare diferitele forme constructive ale micro-canalelor interioare;
  - pornind de la soluțiile constructive dezvoltate conform literaturii de specialitate studiate, se propun noi soluții de răcire (acționând asupra straturilor capilare interioare) care prin testări să dovedească viabilitatea în evitarea blocajului funcțional;

- analiza fenomenelor termice în interstițiile stratului capilar sinterizat ce includ micro-grăunții de cupru sau alte configurații;
- introducerea de extra-fluid de lucru în interiorul micro-tuburilor termice plate folosind micromotoare pas cu pas ce controlează și dozează un sistem de microinjecție;
- dezvoltarea unei soluții constructive noi, care utilizează un micro-rezervor de lichid în interiorul micro-tubului termic plat, realizat din material polisintetic, asupra căruia acționează prin presare o lamelă de metal cu memoria formei;
- b) Determinarea *eficacității soluțiilor noi propuse* prin efectuarea unor studii asupra nivelului de intensificare a transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate:
  - analiza importanței straturilor capilare asupra intensității fenomenelor convective din interiorul micro-tuburile termice plate;
  - determinarea prin calcul a gradului de intensificare a transferului de căldură la apariția unui debit suplimentar de lichid de lucru în zona de vaporizare a micro-tuburilor termice plate;
  - studiul influenței deplasării lichidului de lucru prin straturile capilare compuse din micro-canale și pulberi de cupru sinterizat comparativ cu cele care folosesc materiale polisintetice;
  - determinarea eficacității transferului de căldură prin micro-tuburi termice plate cu straturi capilare realizate din micro-canale trapezoidale și cupru sinterizat, la apariția excesului de lichid în zona de vaporizare dintr-un micro-rezervor extern controlat electronic;
  - modelarea fenomenelor de transfer de căldură și analiza evoluției temperaturii pentru cazul funcționării normale și în cazul adiției interioare de extra-fluid.
- c) *Efectuarea unor determinări experimentale* care să stabilească dacă soluțiile noi propuse (de intensificare a transferului de căldură) au efectul de răcire scontat la MTTP:
  - realizarea elementelor constitutive ale micro-tuburilor termice plate modificate conform noilor soluții propuse și realizarea unui stand de încercări folosit pentru funcționarea normală și în cazul apariției supraîncălzirii MTTP;
  - obținerea pe cale experimentală a evoluției temperaturilor pe peretele exterior al micro-tubului termic folosind ca lichide de lucru acetonă, metanol și apă distilată, când zona de vaporizare este străbătută de un flux termic ce corespunde funcționării la sarcină normală sau supra-încălzire;
  - analiza comparativă a funcționării micro-tuburilor termice plate pentru diferite straturi capilare interioare: micro-canale trapezoidale, strat sinterizat din cupru, material polisintetic;
  - monitorizarea schimbului de căldură în regim tranzitoriu prin vizualizarea câmpului de temperatură în IR pe peretele exterior al MTTP pe cele trei zone: vaporizare, adiabatică și condensare.

Prima metodă propune un sistem semi-activ [MI14] înglobat în interiorul micro-tubului termic plat. Soluția constă în folosirea unui material polisintetic pe post de rezervor de lichid care va fi acționat progresiv de un metal cu memoria formei. Dacă în zona de vaporizare se atinge o temperatură critică care poate provoca blocarea micro-tubului termic plat, deformarea metalului cu memoria formei (la o temperatură prestabilită) va conduce la presarea materialului polisintetic în care se găsește o cantitate de extra-fluid. Eliberarea extra-fluidului are loc în trepte. Inițial, când temperatura în MTTP se apropie de valoarea de supra-încălzire se eliberează un debit parțial de fluid de lucru iar în momentul atingerii temperaturii maxime debitul total va conduce la vaporizarea acestuia cu efectul diminuării rapide a temperaturii în zona vaporizatorului.

Ce-a de-a două metodă de răcire propusă pentru intensificarea transferului de căldură prin MTTP (micro-injecție) constă în injectarea în zona de vaporizare a unei cantități de lichid suplimentare, controlată din exterior. Injectarea se va realiza prin intermediul unei micro-duze conectată la un cilindru cu piston acționat de un mini-motor electric pas cu pas, controlat electronic. Lichidul de lucru suplimentar va fi injectat ca și la soluția precedentă în momentul în care în zona de vaporizare temperatura depășește un prag prestabilit, tinzând să urce către o valoare critică. După cum deja s-a afirmat, dacă se depășește temperatura critică, componenta electronică răcită se deteriorează definitiv.

Pentru analiza în detaliu a transferului convectiv de căldură în micro-tuburile termice, o primă analiză este axată pe determinarea capacității de transport pentru cazul în care stratul capilar interior este format din micro-canale trapezoidale longitudinale. Este necesar să se determine variația temperaturii în pereții micro-tubului termic la aplicarea unui flux termic staționar cât și variația temperaturii din canelura micro-canalului trapezoidal ce intră în componența stratului capilar interior. Determinarea vitezelor de deplasare a lichidului de lucru permite să se studieze variația densității fluxului termic pe meniscul lichidului pe toată lungimea micro-canalelor. Este necesar să se cunoască fenomenele din vaporizator pentru a se putea stabili modul în care decurg transformările de fază și care sunt legile de deplasare a lichidului și vaporilor în interiorul micro-tubului termic, funcție de agentul de lucru ales. Prin calcule se determină pierderile de presiune ale vaporilor când aceștia "părăsesc" zona vaporizatorului. Prin ipoteze preliminare se consideră că vitezele de deplasare ale vaporilor sunt subsonice și că numărul Reynolds corespunde unei curgeri laminare.

Un alt obiectiv al tezei îl reprezintă efectuarea unor determinări experimentale cu ajutorul microscopiei și a profilometriei laser care să permită măsurători ale straturilor capilare folosite în determinările experimentale. Este necesar ca prin metoda profilometriei cu laser sau prin microscopie să se analizeze structura materialului polisintetic folosit pentru rezervorul cu extra-fluid. Trebuie să se determine capacitatea de absorbție a materialului polisintetic folosit prin analiza structurii interne (cu și fără agent de lucru) la microscop sau scanare prin profilometrie laser. Determinarea dimensiunile incluziunilor (golurilor) se face pentru varianta uscată și după umectare materialului polisintetic.

Ca obiectiv final, pentru verificarea convergenței datelor experimentale cu cele teoretice sau similare în domeniu este necesar ca acestea să fie comparate între ele și să se stabilească dacă noile metode de intensificare a transferului de căldură dau rezultate satisfăcătoare. În baza rezultatelor experimentale efectuate, a unei analize privind posibilitățile de implementare, a avantajelor și dezavantajelor metodelor propuse este necesar să se stabilească care dintre metode este mai eficace. Este necesară o analiză care să arate care dintre cele două soluții propuse asigură mai bine evitarea blocării funcționale a MTTP în cazul când în zona de condensare răcirea nu se realizează cu fluxul de aer produs de ventilator. Vor fi formulate concluzii în sensul celor prezentate mai sus.

### 2. Structura lucrării

Lucrarea intitulată "*METODE DE INTENSIFICARE A TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ LA MICRO-TUBURILE TERMICE PLATE*" este structurată în 6 capitole și cuprinde 158 pagini, 21 tabele, 139 figuri, 145 referințe bibliografice și ANEXE ce însumează 141 pagini.

În primul capitol intitulat "*Dezvoltarea micro-tuburilor termice plate până în stadiul actual*" sunt prezentate principalele variante constructive ale tuburilor termice realizate până în prezent. S-au realizat clasificări ale tuburilor și micro-tuburilor termice după diferite criterii ce țin seama de tipul constructiv, intervalele de temperaturi în care funcționează, fluidele de lucru utilizate, tipul de capilaritate internă etc.

Pentru cunoașterea proceselor termice și aprecierea performanțelor MTTP se prezintă în acest capitol principiile de funcționare, materialele utilizate în construcția acestora, lichidele de lucru folosite, tehnicile și tehnologiile de fabricație. O atenție deosebită este acordată cunoașterii limitelor de funcționare ale MTTP, rolului structurii interioare asupra transferului de căldură, metodelor de intensificare a transferului de căldură și aplicațiilor acestora.

Al doilea capitol a fost denumit "*Contribuții aduse la intensificarea schimbului de căldură în micro-tuburile termice plate*" urmărind să prezinte noile concepte care folosesc metoda intensificării transferului de căldură pentru răcirea MTTP. Se propun două metode; una care folosește materiale cu memoria formei și un material polisintetic umectat (cu capacitate de absorbție mare), iar a doua constă în injectarea directă a lichidului de lucru în zona de vaporizare. În acest capitol sunt descrise detaliat soluțiile propuse pentru cele două metode alese cu explicarea implicațiilor ce vizează alegerea și realizarea straturilor capilare interioare. Se consideră util să se testeze trei lichide de lucru: acetonă, metanol și apă distilată. O importanță deosebită este acordată stabilirii regimurilor potențiale de funcționare, stabilindu-se ca MTTP să fie testate la regimuri normale de funcționare cât și la supra-încălzire, cu sau fără pornirea ventilatorului de răcire din zona de condensare.

Cel de-al treilea capitol intitulat "Transferul de căldură în micro-tuburile termice plate", este structurat în trei subcapitole. Modelele matematice dezvoltate în acest capitol analizează regimurile de funcționare ale MTTP. Pentru a înțelege mecanismele care conduc la transformărilor termodinamice din interiorul MTTP, au fost concepute coduri realizate în Mathcad. Rezultatele obtinute au permis să se studieze cum evoluează o serie de mărimi precum diametrul hidraulic echivalent, Numărul lui Poiseuille, raza de curbură a meniscului de lichid în funcție de unghiul format de meniscul de lichid la peretele micro-canalului trapezoidal (prin ipoteză acesta considerându-se circular). Cu aceleași coduri s-a determinat variația presiunii vaporilor și pierderea de presiune în zona vaporizatorului. A fost analizată variația presiunii capilare pe direcția axială a micro-canalului trapezoidal determinându-se și valorile numărului Reynolds pentru curgerea fluidelor de lucru. A fost studiat procesul de vaporizarea a lichidului din interiorul MTTP în stratul capilar sinterizat realizat din microsfere de cupru. Prin calculele efectuate în Mathcad s-a determinat debitul masic al vaporilor din vaporizator, densitatea fluxului termic functie de viteza axială a vaporilor de lichid și a căldurii latente de vaporizare și variația coeficientului de frecare a vaporilor odată cu cresterea temperaturii din zona de vaporizare. Pentru determinarea corectă a parametrilor transferului de căldură în MTTP s-a tinut seama de caracterul curgerii. Au fost calculați invarianții Poiseuille, Reynolds, Nusselt, etc. stabilindu-se vitezele de curgere ale lichidului și vaporilor prin micro-canalele trapezoidale și prin straturile sinterizate. Ca metodă alternativă de calcul s-a folosit softul Matlab cu ajutorul căruia s-a modelat curgerea vaporilor și a lichidului de lucru.

Pentru realizarea experimentelor, în capitolul patru denumit "*Conceperea și realizarea standului experimental*" se prezintă în mod detaliat elementele constitutive. Standul experimental permite simularea încălzirii unui microprocesor de PC și răcirea acestuia cu un MTTP. Standul experimental este adaptat studiului diverselor metode de răcire și de intensificare a transferului de căldură. Acesta este astfel conceput încât să pună în evidență comportamentul MTTP la aplicarea unor fluxuri termice variabile și să monitorizeze perioadele de timp. Monitorizarea temperaturii pe întreaga lungime a MTTP se realizează prin intermediul unor termocupluri Cromel-Alumel conectate la un termometru digital cu opt canale. Temperaturile măsurate de termocupluri pot fi citite pe un display sau pot fi stocate cu ajutorul unui datalogger cu card de memorie și ulterior memorate pe un PC, prin conectarea la portul USB al standului.

În cadrul determinărilor experimentale, s-a optat pentru două metode de intensificare a transferului de căldură. S-au confecționat două MTTP folosind lichide de lucru cu punct de vaporizare diferit (acetonă, metanol, apă distilată). De asemenea s-a realizat un dispozitiv electronic ce realizează controlul injecției de lichid de lucru în zona de vaporizare a MTTP. În cadrul determinărilor experimentale s-a folosit ca aparatură de cercetare Profilometrul cu laser  $\mu$ Scan®, microscopul MOTIC SZM-168 cu sursă de lumină rece Mlc-150 și camerele cu termoviziune MobIR M3 și FLUKE Ti25.

În capitolul cinci intitulat "*Rezultate experimentale și interpretarea lor*" sunt prezentate condițiile și modul în care au fost efectuate determinările experimentale destinate analizei transferului de căldură (cu sau fără intensificare) prin MTTP. Cu ajutorul aparaturii de cercetare s-a analizat structura straturilor capilare interiore ale MTTP. Utilizând profilometrie laser s-au determinat pentru micro-canalele trapezoidale forma și geometria acestora precum și adâncimea golurilor obținute prin sinterizarea micro-sferelor din cupru. S-a considerat că este oportun să se analizeze structura materialului polisintetic folosit ca rezervor de extra-fluid. Rezultatele obținute cu ajutorul MTTP realizate experimental au stat la baza reprezentărilor grafice privind evoluția temperaturii în timp, pentru fiecare caz studiat. Analiza termografică cu camere IR a pus în evidență evoluția câmpului termic pe peretele exterior al MTTP. Analiza comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcule și cercetări similare, arată gradul de eficacitate a răcirii pentru metodele propuse.

Teza de doctorat se încheie cu capitolul "*Contribuții, concluzii finale și direcții de cercetare*". Pentru a se arăta care este rolul cercetărilor efectuate față de stadiul actual de dezvoltare a MTTP, se face mai întâi o enumerare a contribuțiilor aduse privind noile principii funcționale propuse și asupra metodelor de management termic ce pot asigura intensificarea transferului de căldură. Sunt detaliate apoi contribuțiile teoretice aduse care permit intensificarea transferului de căldură prin MTTP, în vederea răcirii acestora. Sunt enumerate modelele matematice dezvoltate pentru analiza curgerii lichidului prin diferite categorii de straturile capilare interioare formate din: micro-canale trapezoidale, materiale polisintetice, micro-sfere de cupru sinterizat.

Contribuțiile experimentale au constat în realizarea unor MTTP cu straturi capilare interne formate din micro-canale trapezoidale sau de tip compus cu adiție de lichid de lucru în zona de vaporizare. A fost studiat fenomenul de intensificare a transferului de căldură în cazul folosirii ca lichide de lucru a acetonei, metanolului și apei distilate.

Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale și cele similare din domeniu, au arătat că metodele de intensificare a transferului de căldură în vederea răcirii MTTP au rezultatul scontat.

Direcțiile de cercetare formulate în acest capitol, arată care sunt căile viitoare care trebuiesc urmate pentru a îmbunătăți transferul de căldură prin MTTP, astfel încât să se asigure o răcire și mai eficientă a acestora.

Bibliografia studiată cuprinde referințele bibliografice utilizate pentru elaborarea acestei lucrări, pentru compararea și validarea rezultatelor teoretice cu cele experimentale sau similare în domeniu.

### 1. STADIUL ACTUAL PRIVIND DEZVOLTAREA MICRO-TUBURILOR TERMICE PLATE

### 1.1. Scurt istoric privind apariția tuburilor termice

Procedeele clasice de eliminare a căldurii de la o sursă caldă către mediul exterior necesită un aport substanțial de consum energetic. Una dintre cele mai moderne metode de transport a căldurii este cea a tuburilor termice. Utilizarea tuburilor termice oferă un mare avantaj față de alte metode, întrucât acestea pot transporta fluxuri mari de căldură dintr-o zonă în alta, folosind un fluid de lucru închis într-un spațiu etanș.

*Principiul de funcționare* a tuburilor termice a fost pus în evidență pentru prima dată în anul 1836 de Jacob Perkins [FA14, HL05, NO05, RD13, SK15], acestea fiind cunoscute și sub denumirea de *tuburi Perkins*. Elementele componente ale dispozitivului conceput de Perkins (boilerul lui Perkins) sunt prezentate în figura 1.1, acesta având principiul de funcționare denumit *termo-sifonare gravitațională*.



Fig. 1.1. Tub termic Perkins cu termo-sifonare gravitațională, [RD13].

Tubul Perkins avea rolul de a transmite căldura de la o sursă caldă cu o singură fază (gaze arse) la un boiler care lucra cu lichid și vapori (bi-fazic). Tubul termic conceput de Perkins, a suferit cu timpul diferite modificări structurale, varianta cea mai cunoscută fiind cea realizată dintr-un tub cilindric închis ermetic la ambele capete, în interiorul căruia se găsea un lichid. Când unul din capete se încălzește, lichidul din interior suferă o transformare bifazică. Transferul de căldură se realizează prin transportul cvasi-instantaneu al vaporilor obținuți din vaporizarea lichidului situat la unul din capetele țevii (capătul cald), către celălalt capăt (capătul rece), unde căldura este cedată prin intermediul unui radiator extern.

Cu timpul s-au realizat funcțional două categorii de tuburi termice a căror principii de funcționare pot fi urmărite în figura 1.2 a-b. Pentru a înțelege diferențele funcționale se va explicita mai întâi cazul tubului termic care funcționează cu termo-sifonare gravitațională. Din figură se observă că la baza tubului termic este introdusă o mică cantitate de apă (sau alt

lichid). Tubul este vidat iar capetele acestuia se etanșează. Partea de jos a tubului este supusă unui proces de încălzire, caz în care datorită vidului apare un fenomen de vaporizare cvasiinstantanee și o deplasare cu viteză a vaporilor formați către capătul rece. Prin răcirea vaporilor apare condens care se va deplasa gravitațional pe pereții interiori către partea de jos a tubului. Procesul se reia. La astfel de tuburi termice apar limitări funcționale datorate căderii condensului prin efect gravitațional în punctul cel mai de jos al capătului de vaporizare (condensul întâlnește zona caldă și tinde să se vaporizeze), altfel sistemul nu este funcțional.



Fig. 1.2. Principiul termosifonului și al tubului termic, [UN\*\*].

*Tuburile termice cu termo-sifonare gravitațională* sunt cele mai simple din punct de vedere constructiv. Funcționarea tuburilor termice cu termo-sifonare este condiționată de amplasarea vaporizatorului sub condensator. Orientate vertical, acestea au în partea de jos un rezervor cu lichid. Vaporii de lichid rezultați prin încălzirea rezervorului încep să se ridice treptat spre partea superioară a tubului. Aici vaporii cedează treptat căldura latentă de vaporizare, condensând. Condensul format în condensator coboară spre vaporizator datorită forței gravitaționale. Tuburile termice cu termo-sifonare sunt ineficiente când gravitația este zero. În 2003 Berre și al [BM03] *introduc noțiunea de micro-matrice*, fabricând două micro-tuburi termice cu structură capilară formată din micro-canale de secțiune triunghiulară. La primul structura era formată din 55 micro-canale triunghiulare cu dimensiunile: lungime 20 mm, lățime 230µm și adâncime 170µm, iar cel de-al doilea avea 25 micro-canale cu aceeași secțiune și cu dimensiunile: lungime 20mm, lățime 500µm, adâncimea 340µm. Acestea au fost cuplate ca în figura 1.3, obținând o micro-matrice cu o conductivitate termică de 133W/m·K, pentru un flux termic de 3W.



Fig. 1.3. Secțiune prin MTT cu micro-canale triunghiulare, [BM03].

Noțiunea de *tuburi termice plate* (TTP) [LF06, VL05], a apărut odată cu aplicații ale acestora în domeniul răcirii componentelor electronice de către Lallemand și Lefèvre, 2004, Vasiliev *și al.*, în 2008.

#### 1.2. Clasificarea tuburilor și micro-tuburilor termice

MTT sunt considerate sisteme termodinamice care folosesc transformări bifazice pentru transportul căldurii de la vaporizator la condensator. În aceste condiții un MTT cu transformări bifazice poate asigura o funcționare izotermă a vaporizatorului indiferent de variația fluxului termic aplicat pe acesta. În mod teoretic, un MTT poate funcționa la orice temperatură cuprinsă între punctul triplu și punctul critic al lichidului de lucru utilizat. Referitor la capacitatea de transport a căldurii [LG13, MH02, MH06, OJ99], s-a constatat conform literaturii de specialitate studiate că aceasta se reduce semnificativ în apropierea celor două puncte sus amintite, din cauza proprietăților fizico-chimice ale lichidului de lucru, a tensiunii superficiale și a vâscozității acestuia. Până în prezent au fost concepute, realizate și utilizate o diversitate de TT, în figura 1.4 fiind prezentată clasificarea acestora după principiul constructiv.



Fig. 1.4. Clasificare tuburilor termice după principiul constructiv.

Întrucât prin cercetarile propuse se urmărește ca pentru răcirea MTT să se utilizeze fenomenul de intensificare a transferului de căldură, prezintă interes să se cunoască modalitățile de reglare a temperaturii. În figura 1.5 s-a făcut o clasificare a MTT care ia în considerare răcirea MTTP prin modalități de reglare a temperaturii.



Fig. 1.5. Clasificarea MTT după tipul de reglare a temperaturii.

# **1.3.** Elementele constitutive ale MTTP, materiale utilizate și tehnologii de fabricație

### 1.3.1. Principiul de funcționare și zonele de lucru ale MTTP

În ultimele decenii industria electronică și în special cea micro-electronică, a cunoscut o dezvoltare spectaculoasă în principal în producția de microprocesoare. Datorită gradului de miniaturizare și a înglobării mai multor nuclee într-un singur cip, a apărut o nouă provocare privind posibilitatea eliminării rapide a căldurii produse de acestea în funcționare. A fost necesar să fie concepute noi sisteme de răcire adaptate acestor cerințe. În același timp s-au dezvoltat sisteme de control capabile să realizeze managementul termic al transportului și eliminării căldurii generate în funcționare. O nouă provocare apărută odată cu dezvoltarea electronicii de putere o constituie gradul de miniaturizare care se răsfrânge în mod indirect și asupra sistemelor de răcire. Controlul disipării căldurii generate de componentele electronice de putere, a condus la apariția unei multitudini de concepte și de dezvoltare a unor echipamente de răcire. Unul sau mai multe dispozitive de răcire trebuie să fie capabile să disipe fluxuri termice mari de pe suprafețe mici și din această cauză mărimea acestora devine comparabilă cu a echipamentelor pe care ar trebui să le răcească [LM02].



Fig. 1.6. Structura unui tub termic, [PO\*\*].

Un tub termic (figura 1.6), este conceput sub forma unei carcase de formă cilindrică (sau de alt tip), cu presiune interioară scăzută, etanșată la ambele capete, în care se găsește un fluid de lucru care în condiții normale se află în stare lichidă [BA04, CT84, FA94, KF08, OK08, PG98, RM12, RD13, SC00, SK15, VL05, s.a.]. Capătul tubului termic care conține fluidul de lucru în formă lichidă, primește căldură de la o sursă din exterior. Datorită presiunii interioare scăzute din interiorul tubului termic, lichidul se vaporizează brusc (zona de vaporizare) și se deplasează rapid, sub formă de vapori către celălalt cap al tubului. Datorită vitezei rapide de deplasare în zona centrală a tubului apare o zonă adiabatică. Mecanismul deplasării este pus pe seama diferențelor de presiune care apar între presiunea vaporilor de lichid rezultați prin vaporizare și presiunea interioară scăzută din tub. Practic presiunea vaporilor de lichid va ocupa rapid depresiunea din tub. Vaporii vor prelua si vor transporta o parte din căldura primită spre partea mai rece a tubului (zona de condensare). Porțiunea dintre cele două capete (de vaporizare și condensare) este cunoscută ca fiind zona adiabatică a TTP (zonă fără schimb de căldură). Zona de condensare este răcită permanent prin insuflarea unui jet de aer rece peste aripioarele schimbătorului de căldură amplasat în capătul de condensare. Răcirea favorizează transformarea izobar-izocoră de condensare a vaporilor în lichid. Printrun sistem capilar ce se află pe pereții interiori ai tubului termic, o parte din lichidul condensat obtinut în condensator se întoarce prin fenomenul de capilaritate spre vaporizator.

#### 1.3.2. Materiale și lichide de lucru utilizate la MTTP

Micro-tuburile termice plate [B-O\*\*, LJ08, LX12, SS09, YI12], au dimensiuni mult mai mici decât cele normale însă folosesc același principiu de funcționare ca și tuburile termice, fiind confecționate dintr-o conductă de cupru cu pereți subțiri aplatizați. *Microtuburile termice* au fost definite ca fiind tuburi termice la care raza medie a meniscului de lichid format la interfața lichid-vapori este comparabilă cu inversul razei hidraulice a canalului prin care curge lichidul. Pe baza acestei definiții diametrul hidraulic tipic al unui micro-canal prin care se deplasează lichidul variază între  $10\div500\mu m$ . Din studiul stadiului actual s-a constatat că MTTP au o înălțime cuprinsă între  $3\div8mm$ , o lățime care variază între  $4\div10mm$  și o grosime a peretelui între  $0,2\div0,4mm$ . Lungimea maximă a unui MTTP este de 250mm, iar cea minimă de 50mm. În interiorul acestuia se găsește o cantitate de lichid de lucru care se află dispersat în stratul capilar interior. Geometric acesta poate fi drept, curbat, în formă de S, etc., funcție de aplicație.

În cazul MTTP lichidul de lucru folosit este ales în funcție de domeniul temperaturii la care acesta lucrează. Lichidele de lucru se aleg în funcție de metalul din care este confecționată carcasa MTTP, între acestea trebuind să existe o compatibilitate. În timpul transferului de căldură, lichidul de lucru nu trebuie să producă oxizi ai metalului din care este confecționat stratul capilar interior și nici ai corpului MTT. În tabelul 1.1 [KF08] sunt prezentate lichidele de lucru și metalele compatibile din care se poate confecționa MTT.

Lichidul de lucru	Compatibilitate metal		
Acetonă, metanol, apă distilată	Cupru, Bronz		
Freon	Oțel de înaltă calitate, aluminiu		
Amoniac	Aluminiu, nichel, oțel		
Potasiu	Oțel de înaltă calitate		
Sodiu	Oțel de înaltă calitate, nichel		
Litiu	Niobiu, tantal, tungsten, molibden		
Mercur	Tantal, tungsten		

Tab. 1.1. Lichide de lucru și compatibilitatea acestora cu anumite metale, [KF08].

Lichidele de lucru folosite pentru transferul de căldură prin MTTP și domeniul de temperaturi utilizate [KF08] sunt prezentate în tabelul 1.2.

Lichidul de lucru	Temperatura de topire	Temperatura de	Domeniul de	
	[°C]	fierbere la	temperatură	
		P = 101325 Pa [°C]	[°C]	
Heliu	-271	-261	-271 la -269	
Azot lichid	-210	-196	-203 la -160	
Amoniac	-78	-33	-60 la 100	
Acetonă	-95	57	0 la 120	
Metanol	-98	64	10 la 130	
Etanol	-122	78	0 la 130	
Apă	0	100	30 la 200	
Toluen	-95	110	50 la 200	
Mercur	-39	361	250 la 650	
Sodiu	98	892	600 la 1200	
Litiu	179	1340	1000 la 1800	

Tab. 1.2. Lichide de lucru în MTTP și domeniul temperaturii de utilizare, [KF08].

### 1.3.3. Tehnici și tehnologii de fabricație a MTTP

Structura stratului capilar trebuie să ofere capacitatea necesară circulației interioare a lichidului de lucru prin asigurarea unui debit minim de lichid vehiculat pentru a facilita vaporizarea și implicit transferul de căldură. Stratul capilar este caracterizat în principal de *permeabilitate* și *capacitatea de înmagazinare* a unei cantități de lichid care trebuie să fie cât mai mare. Dacă facem o comparație între stratul capilar sinterizat (SCS) și cel realizat din micro-canalele dispuse longitudinal (MCL) [HX08], se poate spune că MTTP cu SCS va funcționa mai bine în condiții de termo-sifonare gravitațională, iar MCL în condiții de amplasare orizontală. Cercetările cu privire la SCS, s-au axat în special asupra mecanismului de transfer de căldură și asupra performanțelor termice pe care le are asupra MTTP.



Fig. 1.7. Principiul de obținere al SCS, [LJ08].

Procedeele de fabricație sunt adaptate în general la tipul de MTTP sau la mărimea fluxului termic pe care acesta trebuie să-l transfere. Nu există o metodă generală de fabricare a SCS, aceasta aplicându-se diferentiat pentru fiecare tip de MTTP în parte. Un exemplu de obținere a SCS prezentat de Le-lun JIANG [LJ08], conform figurii 1.7, folosește procedeul de sinterizare a pulberilor metalice pe peretele interior al unui MTTP. Jiang L. și colaboratorii [LJ08], prezintă principiul de sinterizare a pulberilor metalice pe interiorul unui tub de cupru, care constă în presarea acestora pe pereții interiori cu ajutorul unui dorn din inox. Ulterior tubul este introdus într-un cuptor pentru tratamente termice și este ștrangulat la unul din capete. Aceasta se va introduce în poziție verticală în cuptor, încălzirea ansamblului având loc la o temperatură de 950°C pentru un timp de 30÷60 minute. Prin încălzire, coeficientii diferiți de dilatare ai tubului din cupru cu pulberea sinterizată și ai dornului de inox favorizează scoaterea acestuia fără a deteriora stratul sinterizat. Capătul notat cu  $\Delta L$  în figura 1.7 este destinat obturării prin sudură iar celălalt capăt rămas fixat în reazemul inferior se va obtura după umplerea cu lichidul de lucru. Rezultatele experimentale [LI10] au demonstrat că sinterizarea pulberilor metalice alcătuite din micro-sfere de cupru cu diametrul de 150µm, încălzite la o temperatură de 950°C timp de 3 ore, au avut o contracție radială redusă și un grad de porozitate ridicat.

Una dintre soluțiile utilizate pentru realizarea micro-canalelor [MA95] constă în depunerea de straturi subțiri de metal prin tehnica vaporizării întru-un mediu controlat. Analizată din punct de vedere economic, metoda nu este foarte productivă, generând costuri mari, rezultând un produs finit cu un preț de cost ridicat.

Extrudarea este cea mai uzuală metodă utilizată pentru obținerea micro-canalelor în interiorul MTTP [YL08]. Prin această metodă se pot realiza micro-canalele direct în peretele MTTP. Realizate prin această metodă, micro-canalele pot avea diferite profiluri în funcție de aplicația în care este folosit MTTP. O variantă a unui dispozitiv pentru obținerea micro-canalelor interioare este prezentat în figura 1.8.



Fig. 1.8. Dispozitiv pentru obținerea micro-canalelor interioare la MTT, [YL08].

1 - dispozitiv de învârtire, 2, 7 - bucșe pentru centrare, 3 - tub de cupru extrudat, 4 - camera de lubrifiere cu ulei, 5 - bilă, 6 - dorn alezor cu caneluri, 8 - țeavă de cupru ne-extrudată, 9 - mandrină, 10 - dispozitiv fixare mandrină, 11 - dispozitiv de tragere a țevii.

Dispozitivul este astfel conceput încât să realizeze micro-canale interioare printr-un procedeu de roluire a tubului de cupru din care urmează a se realiza MTT. Dornul alezor 6, este fixat de dispozitivul de fixare tip mandrină 9-10. Pe tubul 3 se montează dispozitivul de roluire format din subansamblele 1-2-5-7. Cu dispozitivul 11 se acționează prin tragere pe direcția Oy asupra tubului 3 în timp ce dispozitivul de roluire descrie o mișcare de rotație radială cu turația  $n_0$ . Dacă în starea inițială tubul 3 are dimensiunile: exterior  $Dw_1$ , interior  $Dw_0$ , după extrudare dimensiunile acestuia devin exterior  $D'w_1$ , interior  $D'w_0$ . După extrudare dispunerea micro-canalelor pe peretele interior al tubului de cupru poate fi vizualizat în figura 1.9, [FR\*\*].



Fig. 1.9. Micro-canale dispuse longitudinal pe pereții interiori ai MTT, [FR\*\*].

#### 1.4. Cazuri constructive particulare de MTTP

#### 1.4.1. Principiile de funcționare ale MTTP particulare

Pe lângă micro-tuburile termice cu structură constructivă standard, există o serie la care soluțiile adoptate sunt diferite, acestea constituind așa zisele cazuri particulare. În această categorie întră următoarele micro-tuburi termice [AW12, AC\*\*, DP12, JK11, NR12, R&M12, WI1\*]:

- camerele de vapori: sunt concepute pentru a disipa fluxuri termice ridicate, la care funcționarea se bazează pe același principiu cu al tuburilor termice. Se folosesc în special în aparatura electronică care se caracterizează constructiv prin secțiuni

transversale mici. Camerele de vapori sunt în general confecționate din profile de aluminiu și folosesc acetona ca lichid de lucru,

- *micro-tuburi termice cu conductanță variabilă:* sunt tuburi termice care în funcție de cum variază funcțional fluxul termic în zona de vaporizare își modifică constructiv suprafața condensatorului cu ajutorul unui micro-rezervor extern cu gaz ne-condensabil,
- *micro-tuburi termice cu presiune controlată:* principiul de funcționare este asemănător cu cel al micro-tuburilor cu conductanță variabilă, însă la acestea presiunea este controlabilă și se asigură menținerea strictă a temperaturii în vaporizator,
- *micro-tuburi termice cu funcționare tip diodă:* folosesc principiul conductanței variabile, gazul ne-evaporabil din micro-rezervorul suplimentar fiind folosit pentru a bloca curgerea vaporilor dinspre condensator spre vaporizator. Blocarea apare în cazul în care condensatorul s-ar încălzi excesiv, stabilindu-se o curgere a vaporilor numai într-un singur sens, dinspre vaporizator spre condensator,
- *micro-tuburi termice cu funcționare centrifugală:* se folosesc pentru deplasarea condensului din condensator prin forța centrifugă. Se utilizează în dispozitivele rotative la care o răcire clasică sau prin tub termic convențional nu este posibilă,
- *micro-tuburi termice în buclă:* sunt dispozitive pasive care asigură transferul de căldură în două faze. Acestea pot transporta fluxuri termice mari pe distanțe lungi, folosind straturi capilare doar în camera de la vaporizator și de condensare (nu pe lungimea întregului tub termic, cum este în cazul celor uzuale).

Dintre cazurile particulare prezentate, la câteva se prezintă principiul de funcționare în cele ce urmează.

### 1.4.2. Utilizarea camerelor de vapori ca micro-tuburi termice

Camerele de vapori (CV) au același principiu de funcționare ca și MTT însă diferă constructiv de acestea. Camerele de vapori utilizate cu scop de răcire sunt utilizate cu precădere pentru două cazuri particulare. Primul corespunde răcirii acelor device-uri electronice care au puteri ridicate și necesită disiparea unor fluxuri mari de căldură de pe suprafețele mici ale vaporizatorului [DP12, SS13, SS14]. Prin aport de căldură la vaporizator, lichidul de lucru vaporizează și se deplasează spre zona de condensare. Caracteristic camerelor de vapori este faptul că după procesul de condensare, lichidul va curge pe suprafața condensatorului din zona centrală spre extremități, ajungând în zona de vaporizare din două direcții opuse (la TTP lichidul curge unidirecțional).



a) Principiul de funcționare [AN\*\*] b) Fig. 1.10. Răcirea CPU folosind o cameră de vapori.

b) Structură internă

În figura 1.10-a [AN\*\*], este prezentată camera de vapori destinată răcirii nucleului CPU (Central Processing Unit). Pentru răcirea CPU, CV are montat vaporizatorul pe suprafața care trebuie răcită iar peste condensator este amplasat un radiator de răcire cu aripioare. Radiatorul va fi spălat de un curent de aer rece în vederea disipării căldurii. În figura 1.10-b este prezentată structura internă a unei CV la care structura capilară este depusă pe vaporizator. Din punct de vedere al gabaritului, CV față de MTT sunt mai mari iar costurile de producție sunt mai ridicate pentru CV.

### 1.4.3. Cazul conductanței variabile aplicate la micro-tuburile termice

Micro-tuburile termice cu conductanță variabilă (MTTCV) au același principiu de funcționare ca și MTT clasice, însă în plus sunt prevăzute la capătul condensatorului cu un micro-rezervor ce conține un gaz ne-condensabil. Micro-rezervorul acționează ca un element tampon, mărind suprafața condensatorului (figura 1.11).



Fig. 1.11. MTT cu conductanță variabilă, [SK15],

Rezervorul MTTCV acționează ca un tampon pentru compensarea presiunii interioare. Pe măsură ce temperatura din vaporizator crește, vaporizarea lichidului se amplifică ducând în final prin supra-încălzire la creșterea presiunii interioare (spațiul de lucru este inițial parțial vidat). Deplasarea vaporilor de la vaporizator spre condensator întâlnește zona cu gazul necondensabil (azot lichid  $N_3$ , amoniac  $NH_3$ ). Prin comprimarea acestuia, se eliberează o suprafață mai mare din condensator (figura 1.11-b.) fapt ce duce la o condensare sporită a vaporilor și implicit la diminuarea presiunii. Acest mecanism determină creșterea conductivității MTT și scăderea temperaturii în zona de vaporizare lucru care permite condensului să se întoarcă prin capilaritate la vaporizator. Invers, dacă vaporizatorul se răcește, gazul din micro-rezervor se destinde lăsând un condensator parțial activ (figura 1.11-a.). Prin controlul presiunii în zona inactivă se controlează starea de saturație a zonei active. Reglarea presiunii micro-rezervorului prin modificarea temperaturii acestuia, permite modificarea temperaturii de saturație a MTTCV.

### 1.4.4. Tuburi termice în buclă

Ma H. [MH06] arată că tuburile termice în buclă (figura 1.12), utilizează presiunea capilară dezvoltată în structura internă a stratului capilar cu scopul de a deplasa lichidul de lucru într-un sistem în buclă închisă. Lichidul curge printr-o conductă din condensator spre evaporator. Prin încălzirea vaporizatorului se formează vapori care se deplasează în interiorul tubului termic din vaporizator spre condensator.



Fig. 1.12. Tub termic în buclă, [MH06].

*Tuburile termice în buclă* pot reduce semnificativ sau chiar elimina scăderea presiunii lichidului. În plus, se diminuează puternic efectul fluxului de vapori asupra curgerii lichidului, obținându-se la astfel de TT o creștere semnificativă a capacității de pompare capilară.

### 1.4.5. Tuburi termice pulsatorii

O altă categorie de cazuri constructive particulare ale MTT sunt cele de tip pulsatorii (figura 1.13) care au constructiv trei zone: condensator, adiabatică și vaporizator.



Fig. 1.13. Tub termic pulsatoriu, [RD13].

Umplerea cu lichid a tuburilor termice pulsatorii nu se efectuează în totalitate, lăsânduse un spațiu prin care circulația vaporilor formați să antreneze o parte din lichidul nevaporizat. Pe măsură ce fluxul termice crește în zona vaporizatorului are loc transformarea lichidului de lucru în vapori procesul fiind însoțit și de un fenomen de expansiune care asigură transportul de substanță și căldură spre condensator. Deplasarea vaporilor are loc prin mișcări de tip pulsatoriu întrucât antrenează parțial lichid și bule de vapori. La această categorie de tuburi termice [LG13], este dificil să se realizeze o mișcare permanentă de tip pulsatoriu a sistemului lichid-vapori, întrucât acest lucru ține de aportul permanent de flux de căldură (care ar trebui să fie constant), de orientarea MTT și cel mai important de raportul dintre volumul de lichid și volumul interior total.

### 1.4.6. Tuburi termice rotative

*Tuburile termice rotative* au zona de vaporizare și cea de condensare separate de direcția axei de rotație. Principiul de funcționare [RD13], se bazează pe cel al termo-sifonării, caz în care condensul acumulat în condensator este returnat spre vaporizator cu ajutorul forței centrifuge.

### 1.5. Metode de intensificare a transferului de căldură utilizate la răcirea MTTP

### 1.5.1. Limitele de funcționare ale MTTP

Conducția termică presupune transmiterea energiei prin rețele de atomi din moleculele aflate în mediile solide asigurându-se astfel capacitatea de transmitere a energiei sub formă de căldură. Pentru ca un MTT să poată transfera fluxuri termice [OJ99, PW12, RD13] este necesar ca presiunea capilară de pompare  $\Delta P_{max}$ , să fie mai mare decât căderea de presiune totală din tubul termic care este alcătuită din trei componente:

- a. căderea de presiune  $\Delta P_{lic}$ , necesară pentru ca lichidul să poată reveni de la condensator la vaporizator,
- b. căderea de presiune  $\Delta P_{vap}$ , necesară pentru ca vaporii să poată curge dinspre vaporizator spre condensator,
- c. presiunea produsă de accelerația gravitațională  $\Delta P_g$  care poate fi zero, pozitivă sau negativă în funcție de înclinarea MTT.

La proiectarea MTT trebuie ținut cont că în exploatarea acestora pot să apară diferite categorii de limitări funcționale. În figura 1.14 sunt prezentate conform lui D.Reay ș.a. [RD13] limitele care pot apărea în timpul transferului de căldură prin MTT.



Fig. 1.14. Limitele transferului de căldură prin MTT, [RD13].

În acest caz apare *limita de vâscozitate* care în general se produce la temperaturi scăzute. Limita de vâscozitate presupune ca presiunea vaporilor de saturație  $P_{vap}$  să aibă același ordin de mărime ca și căderea de presiune interioară  $\Delta P_{vap}$  care apare la deplasarea vaporilor prin interiorul tubului termic.

*Limita sonică* apare pentru fluxuri termice considerate a fi mari, pentru anumite lichide de lucru, atunci când temperaturile sunt ridicate caz în care procesul de vaporizare decurge atât de rapid încât viteza de deplasare poate să atingă valori sonice. Viteza sonică este considerată un prag în ceea ce privește performanțele MTT în transferul de căldură. Realizarea unui transfer de căldură eficace este condiționată de deplasarea vaporilor dinspre vaporizator spre condensator și a lichidului dinspre condensator spre vaporizator. Întrucât cele două deplasări sunt de sens contrar, este posibil ca viteza de deplasare prea ridicată a vaporilor să poată influența revenirea lichidului către vaporizator producându-se astfel blocarea MTT. Definim acest fenomen ca fiind *limita de antrenare* a vaporilor în curgerea axială.

Cercetările axate pe studiul MTT, arată că *limită la capilaritate* apare la temperaturi scăzute datorită vâscozității crescute a lichidului și presiunii mici a vaporilor. În acest caz densitatea mică a vaporilor generează viteze mari de curgere. La temperaturi ridicate apropiate de punctul critic, capacitatea de transport a MTT scade întrucât tensiunea superficială și căldura latentă de vaporizare tind către zero. Când fluxul termic atinge o valoare critică într-un timp foarte scurt, în zona interioară a suprafeței vaporizatorului se poate produce o vaporizare bruscă a lichidului, caz în care se poate atinge *limita de fierbere*. Aceasta constă în apariția nedorită a fenomenului de nucleație.

### **1.5.2.** Rolul stratului capilar interior și a structurii acestuia asupra transferului termic la MTTP

În exploatarea MTTP sunt utilizate mai multe tipuri de straturi capilare interioare alcătuite la rândul lor din diverse structuri. Combinarea structurilor capilare interioare pot genera situații când în anumite condiții de funcționare (diferite temperaturi, fluxuri termice, lichide de lucru, etc.) se asigură o accentuare a transferului de căldură. Cu cât apare o intensificare mai mare a transferului de căldură într-un MTTP, cu atât se asigură o răcire mai adecvată. *Limita capilară* la micro-tuburile termice cu structură capilară compusă din micro-canale de secțiune trapezoidală și strat capilar sinterizat din micro-granule de cupru (SCSC) a fost analizată de Xibing și al [XL12]. Un MTT cu structură capilară compusă este prezentat în figura 1.15.



a) secțiune prin MTT cu structura capilară compusă, b) SCSC cu micro-sfere din cupru, Fig. 1.15. Reprezentare structură capilară, [XL12].

Se consideră prin ipoteză că sarcina termică este uniform distribuită pe vaporizator și condensator, curgerea vaporilor este staționară și de tip laminar. Pornind de la formula lui Chi [XL12] se poate considera că fluxul termic la *limita de capilaritate*, pentru structura compusă (figura 1.15), este:

$$\dot{Q}_{cpl,max} = \frac{\frac{2\sigma_{lic}}{r_{cpl}} - \rho_{lic}g d_h \cos\theta \pm \rho_{lic}g L_{tot} \sin\Phi}{\left(f_{lic} + f_{vap}\right)L_{ef}},$$
(1.1)

unde  $\sigma_{lic}$  - tensiunea superficială a lichidului de lucru,  $r_{cpl}$  - raza efectivă a capilarității (raza formată de cavitatea formată de trei micro-sfere ce alcătuiesc stratul capilar sinterizat – fig. 1.23b),  $\rho_{lic}$  - densitatea lichidului de lucru,  $d_h$  - diametrul hidraulic al MTT prin care circulă vaporii lichidului de lucru,  $f_{lic}$  - coeficientul de frecare al lichidului de lucru la deplasarea prin stratul capilar,  $f_{vap}$  - coeficientul de frecare a vaporilor la curgerea acestora,  $L_{tot}$  - lungimea totală a MTT,  $L_{ef}$  - lungimea efectivă interioară prin care are loc curgerea vaporilor,  $\Phi$  - unghiul de înclinare al MTTP față de orizontală.

*Limita capilară* pentru un MTT cu structură capilară compusă este superioară celei formată numai din SCSC sau micro-canale trapezoidale (MCT). Analizând limita capilară numai pentru un strat capilar sinterizat depus pe pereții interiori ai MTT, pentru ca aceasta să crească și să nu introducă o rezistență la refluxul de lichid, este necesar ca dimensiunile micro-sferelor ce alcătuiesc stratul capilar să crească. În acest caz interstițiul dintre sfere crește și se evită apariția fenomenului de *limită capilară*. La MTT cu structură compusă, *limita capilară* devine maximă dacă dimensiunile micro-sferelor au dimensiunea aproximativ egală cu cea a micro-canalelor trapezoidale peste care s-au depus acestea. În acest caz dimensiunile micro-sferelor ce alcătuiesc pulberea ce urmează a fi sinterizată trebuie selectată minuțios. S-a creat astfel un MTT cu o structură capilară ce îmbină proprietățile capilare ale micro-canalelor cât și pe cele ale SCSC. Pentru categoriile de MTT cu strat capilar modulat, la proiectare, se ia în considerare fenomenul de dilatare a capilarității interioare atunci când aceasta este supusă unui flux termic, fenomen ce ar produce o mărire a dimensiunilor structurii capilare. Acest fenomen conduce la diminuarea diametrului interior al MTTP ceea ce produce o îngreunare a curgerii vaporilor.

În figura 1.16 este prezentat prototipul unui micro-tub termic cu strat capilar interior modulat, micro-canalele de secțiune trapezoidală fiind obținute prin sinterizarea pulberilor de cupru.



a) MTT cu strat capilar interior modulat, b) vaporizator cu strat capilar modulat. Fig. 1.16. Micro-tuburi termice cu sisteme de modulare, [HG07, JX14],

### 1.5.3. Aplicații ale micro-tuburilor termice

În prezent micro-tuburile termice (inclusiv cele plate) sunt folosite la scară largă în mai toate aplicațiile ce necesită menținerea echipamentelor electronice la o temperatură ce nu pune în pericol funcționarea componentelor acestora. În figura 1.17 este prezentat modul de răcire al procesoarelor de PC și Notebook cu ajutorul MTTP. În primul caz (fig. 1.17-a) este prezentat modul de răcire prin MTT cu un curent de aer natural iar în al doilea caz (fig. 1.17-b), modul de răcire cu MTT cu un curent de aer forțat produs de un ventilator.



a) Intel Pentium P35 Platinium,

b) Notebook ASUS A52JU,

Fig. 1.17. Sisteme de răcire PC cu MTTP, [IX\*\*, NO\*\*],

## 1.5.4. Clasificarea metodelor de intensificare a transferului de căldură

Conform literaturii de specialitate studiate au fost dezvoltate diverse metode care urmăresc să intensifice transferul de căldură, cu scopul de a se asigura o răcire cât mai eficientă a MTTP. În figura 1.18 sunt prezentate cele mai cunoscute metode de intensificare a transferului de căldură.



Fig. 1.18. Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice.

# **1.6.** Concluzii preliminare privind stadiul actual al răcirii cu MTTP și formularea direcțiilor de cercetare

- 1. În &1.1 s-a prezentat un scurt istoric al dezvoltării tuburilor termice conform literaturii de specialitate studiate, reieșind că acestea sunt cunoscute și sub denumirea de *tub Perkins* după denumirea celui care le-a inventat.
- 2. Tuburile termice folosesc mai multe principii constructive, însă prima atestare a acestora din 1836 arată că Jacob Perkins (conform figurii 1.1) a folosit ca principiu *termo-sifonarea gravitațională,* [RD13].
- 3. Un MTT este alcătuit din trei zone: de vaporizare, adiabatică și de condensare.
- 4. Tuburile termice nu au nevoie de sisteme de pompare a lichidului dinspre condensator spre vaporizator acest rol fiind preluat de stratul capilar intern. Având în vedere gama largă de temperaturi în care funcționează și eficiența ridicată se poate afirma că tuburile și micro-tuburile termice sunt folosite într-o gamă largă de aplicații care necesită răcire.
- 5. Dezvoltarea microprocesoarelor și a altor componente electronice de putere necesită eliminarea fluxului de căldură în interdependență directă cu capacitatea de prelucrare a datelor. În acest sens tuburile și micro-tuburile termice asigură disiparea unui flux de căldură ce variază de la  $0,5 \div 3,5W$  până la  $2500 \div 3200W$ .
- 6. Pentru valori tot mai crescute ale fluxurilor termice în echipamentele electronice (necesar a fi disipate) a fost necesar să se conceapă noi metode de răcire a acestora, materializate sub diferite variante constructive de tuburi termice.
- 7. Sistemele de răcire care folosesc micro-tuburi termice plate sunt în mare parte de tip pasiv, acestea funcționând cu transformări bifazice ale lichidelor de lucru. Deși MTTP reprezintă soluții viabile de răcire, acestea au anumite limite funcționale determinate de forma constructivă, lichidul de lucru folosit, capacitatea de a transporta fluxuri termice variabile mari.
- 8. Cercetările efectuate conform literaturii de specialitate studiate asupra transferului termic prin MTT s-au realizat în paralel cu evoluția materialelor și a tehnologiilor de fabricație. Producerea straturilor sinterizate din pulberi metalice cu proprietăți capilare superioare cât și a micro-canalelor de diferite secțiuni, au făcut posibilă producerea de MTT la prețuri scăzute.
- 9. În urma studiilor efectuate s-a constatat că straturilor capilare realizate prin sinterizare și micro-canalele din MTT influențează transferului termic total și pot produce limitări în funcționarea corectă a acestora. Studiile au arătat că în practică sunt folosite structuri capilare compuse. S-a prezentat noțiunea de limită capilară și pe cea de temperatură de nucleație a lichidului de lucru. Prin cercetările efectuate s-a demonstrat că micro-sferele de cupru au diametrul de  $150\mu m$ , acestea fiind aduse sub formă de conglomerat prin procedee de sinterizare a pulberilor metalice (încălzire la o temperatură de  $950^{\circ}C$  timp de 3 ore). Procedeele de sinterizare afectează contracția radială a micro-sferelor de cupru și pot conduce la un grad de porozitate ridicat.

### 2. CONTRIBUȚII ADUSE LA INTENSIFICAREA SCHIMBULUI DE CĂLDURĂ ÎN MICRO-TUBURILE TERMICE PLATE

### 2.1. Utilizarea materialelor cu memoria formei și a excesului de lichid

Pentru intensificarea transferului de căldură se propun două metode care vor asigura răcirea și creșterea funcționalității MTTP la supra-încălzire:

- 1. *metoda semi-activă* care constă în presarea în zona de vaporizare a MTTP a unui material polisintetic umectat (cu capacitate de absorbție mare) de către un material cu memoria formei care se va deforma după un anumit prag de temperatură,
- 2. *metoda injectării directe* a lichidului de lucru în zona de vaporizare a MTTP cu ajutorul unui piston care se deplasează în cilindru controlat electronic.

Pentru prima metodă, s-a conceput un micro-tub termic plat semi-activ, cu extra-fluid [MI15, SS15], care să asigure transferul de căldură de la capătul cald (zona de vaporizare) către capătul opus (zona de condensare) printr-un fenomen convectiv rapid. Debitul de lichid de lucru eliberat, va fi controlat cu ajutorul unui tub plat semi-activ realizat dintr-un material cu memoria formei. Acesta este astfel conceput, încât să preseze un tub polisintetic ce conține extra-fluid, cu atât mai mult cu cât temperatura sursei calde crește. Micro-tubul termic plat semi-activ cu extra-fluid (figura 2.1), conform conceperii, este constituit dintr-un tub plat de cupru 1, care este vidat și etanșat la capete.



Fig. 2.1. Schema unui micro-tub termic plat semi-activ cu extra-fluid, [MI15].

1 - micro-tub termic plat - capăt teșit, zona de vaporizare, 2 - micro-canale de capilaritate (detaliu A), 3 - sursă de căldură (exterioară micro-tubului), 4 - tub plat circulație vapori, 5 - zona vaporizatorului micro-tubului termic plat, 6 - element semi-activ (detaliu B), 7 - tub plat material polisintetic ce constituie rezervorul de extra-fluid, 8 - elemente de acționare din material cu memorie al elementului semi-activ, 9 - zona adiabatică a micro-tubului plat, 10 - radiator răcire zona de condensare a micro-tubului termic plat, 11 – zona de condensare, 12 - capăt teșit zona condensare a MTTP.

În interiorul MTTP s-au amplasat alte trei tuburi plate, 4, 6 și 7. Tubul plat 7 amplasat sub carcasa 1, este confecționat din material polisintetic cu capacitate mare de stocare a lichidului de lucru. În functionarea normală, considerată până la un prag al temperaturii sursei de căldură ce corespunde nedeteriorării componentelor electronice, MTTP funcționează clasic (tubul 7 nu furnizează fluid deși îl are stocat). După depășirea pragului de temperatură în zona 5, elementele semi-active 8 ale tuburilor 6, vor presa progresiv tubul 7. Întrucât tubul 7 constituie practic un rezervor de lichid, prin presarea materialului polisintetic din care este constituit va elimina extra-fluid. Extra-fluidul de lucru se va deplasa prin micro sau nanocanalele 2, către capătul de vaporizare 5. În acest mod se asigură o intensificare a transferului de căldură, prin aport de lichid suplimentar în zona de vaporizare, care va conduce la o răcire suplimentară în dependență de variația temperaturii sursei de căldură 3. Aportul de lichid în momentul în care MTTP este blocat și supraîncălzit va genera vapori printr-un proces instantaneu datorat vidului din interior. Aportul de lichid va fi urmat de producerea vaporilor si deplasarea acestora cu viteze apropiate de pragul sonic din zona de vaporizare către cea de condensare. Condensul produs în condensator se va deplasa prin capilaritate către zona de vaporizare unde va conduce la o răcire locală și generarea de noi vapori. Va apare din nou lichid în zona de condensare. La revenirea la un regim normal de funcționare se generează un surplus de lichid care va fi re-absorbit de materialul polisintetic. Ciclul se reia. Schema de principiu din figura 2.1, are prevăzut sistemul semi-activ atât pe partea de vaporizare cât și pe cea de condensare.

Prin acest concept se asigură răcirea semi-activă a MTTP asigurându-se menținerea temperaturii device-urile electronice sub un prag minim considerat periculos.

Micro-tubul termic plat semi-activ cu extra-fluid, poate fi reprodus cu aceleași caracteristici și performanțe ori de câte ori este necesar, fapt care constituie un argument în vederea respectării criteriului de aplicabilitate industrială. Pentru realizarea MTTP semi-activ se propune varianta constructivă prezentată în figura 2.2.



a) secțiune micro-rezervor cu exces de lichid,



b) ansamblu micro-tub termic plat. Fig. 2.2. Micro-tub termic plat semi-activ cu extra-fluid.

Semnificația notațiilor din figura 2.2:

- a) 1 micro-canale trapezoidale, 2 micro-rezervor din material polisintetic, 3 lamelă din metal cu memoria formei, 4 capilar umplere,
- b) 1 zona de condensare cu radiator extern, 2 zona adiabatică, 3 zona de vaporizare cu micro-rezervor cu exces de fluid. 4 micro-rezervor din material polisintetic, 5 micro-canale trapezoidale 6 capilar umplere.

În figura 2.2.-a este prezentat un detaliu al MTTP. Micro-canalele trapezoidale 1 din figura 2.2.-a sunt amplasate pe toata secțiunea MTTP. Micro-rezervorul 2 din figura 2.2.-a, asigură un surplus de lichid în zona de vaporizare (figura 2.2.-b) fiind confecționat din material polisintetic amplasat pe o lamelă de metal 3 cu memoria formei. Micro-rezervorul (notat cu 3 in figura 2.2.-b) este amplasat peste o zonă cu micro-canale 5 (figura 2.2.-b.) în zona de vaporizare a MTT. Capilarul 6 asigură umplerea parțială cu lichid de lucru și vidarea MTTP. Principiul de funcționare este același cu cel descris anterior.

#### 2.2. Adiția de lichid în zona de vaporizare a MTTP folosind un minicilindru exterior

O altă metodă propusă pentru intensificarea transferului de căldură în vederea răcirii MTTP, constă în injectarea suplimentară a unei cantități de lichid de lucru în zona de vaporizare, prin intermediul unui mini-cilindru exterior. Acesta este prevăzut cu un piston acționat de un mini-motor pas cu pas. Cantitatea de lichid de lucru ce urmează a fi injectată este controlată electronic prin cursa pistonului din interiorul mini-cilindrului. Mini-cilindrul se va atașa la MTTP printr-un tub capilar, care va străbate peretele exterior și va ajunge până în zona centrală a vaporizatorului. Axul mini-motorului acționează asupra pistonului mini-cilindrului prin intermediul unui șurub cu pas fin. Volumul de lichid injectat corespunzător deplasării pistonului în mini-cilindru este corelat cu numărul de rotații efectuat de axul mini-motorului. Controlul numărului de rotații se realizează printr-un modul electronic cu micro-controler. În figura 2.3, este prezentat schematizat ansamblul care asigură prin injectare controlată adiția de extra-fluid de lucru în zona de vaporizare, folosind un mini-cilindru cu piston.



Fig. 2.3. Sistemul de injectare a lichidului de lucru în MTTP, comandat electronic.

1 - capilar, 2 - corp mini-cilindru, 3 - piston, 4 - sistem acționare piston, 5 - piuliță, 6 - braț acționare piston, 7 - șurub, 8 - cuplaj, 9 ax motor, 10 - mini-motor electric pas cu pas, 11 conexiuni electrice, 12 - circuit electronic de prestabilire dozaj și comandă mini-motor electric. Pentru efectuarea încercărilor experimentale și confecționarea MTTP pornind de la cele două idei expuse, s-au studiat proprietățile materialelor care alcătuiesc MTTP. În acest sens este necesar să se utilizeze cupru obținut pe cale electrochimică, cu puritate înaltă și un nivel scăzut de reziduuri din fosfor, fără conținut de oxigen. În plus Cu-PHC (E-Cu57) are o rezistență bună la coroziune în apă și în atmosferă, cât și la acțiunea agenților chimici industriali. Proprietățile de prelucrare la cald și la rece sunt foarte bune, având o conductivitate electrică și termică înaltă. Proprietățile termo-fizice ale E-Cu57 sunt prezentate în tabelul 2.1 [Ma60].

				ju i jugi		, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
Compoziția	Densitatea	Rezistivitate	Conductivitate	Căldura	Modul de	Coeficient
Chimică	$[kg/m^3]$	electrică	termică	specifică	elasticitate	de
(wt.%)		$[\mu\Omega \cdot m]$	$[W/m \cdot K]$	$[J/kg \cdot K]$	[GPa]	expansiune
Cu+Ag			la 20°C	la 20°C	la 20°C	termică
>99.9		0.017-				
	8890	0.0178	388	380	150	3,56
		0,0178				

Tab. 2.1. Proprietățile termo-fizice pentru cupru E-Cu57, [Ma60].

## 2.3. Importanța stratului capilar interior asupra transferului de căldură la MTTP

Alegerea stratului capilar interior pentru MTTP depinde de mai mulți factori, însă dintre aceștia primează criteriul de compatibilitate a materialului din care acesta este confecționat cu proprietățile lichidului de lucru. Evident, scopul principal al stratului capilar este acela de a genera o presiune capilară interioară care împreună cu forțele de adeziune să producă deplasarea lichidului de lucru prin acesta.

La transferul de căldură prin transformări bifazice, performanța transferului termic a unui MTTP este puternic influențată de raportul de umplere cu lichid de lucru și spațiul rămas liber pentru circulația vaporilor:

- dacă spațiul liber prin care circulă vaporii în timpul transferului de căldură se micșorează foarte mult, lichidul neevaporat rămas în stratul capilar are tendința de a se acumula în colțurile și pe marginile MTTP, reducând astfel rezistența termică totală a sistemului,
- în cazul când spațiul de circulație a vaporilor se micșorează foarte mult, se produce o micșorarea a razei de curbură a meniscului lichidului aflat în condensator. Acest lucru s-a constatat experimental și de către F. Lefèvre ș.a. [LF12] care arată că dacă spațiului prin care circulă vaporii scade cu *1 mm*, capacitatea de transfer termic a MTTP scade cu până la 35%.

## 2.4. Permeabilitatea și porozitatea stratului capilar sinterizat și a celui polisintetic

Permeabilitatea stratului capilar sinterizat crește odată cu mărirea dimensiunii porilor. Cu toate acestea, pentru straturi capilare omogene, există o dimensiune optimă a porilor, relativ simplu de determinat. Se creează un compromis între gradul de permeabilitate și dimensiunea porilor.

Straturile capilare poroase se pot clasifica în:

- straturi capilare cu performanțe reduse la care dimensiunile porilor sunt cuprinse între 80÷150μm, folosite în MTTP cu funcționare orizontală la care deplasarea lichidului de lucru nu trebuie să învingă forța gravitațională.
- straturi capilare cu performanțe ridicate la care dimensiunile porilor sunt cuprinse între 30÷80μm, destinate MTTP cu funcționare verticală (sau înclinată) care trebuie să asigure o pompare a lichidului de lucru împotriva gravitației.

Pentru transportul lichidului de lucru condensat în condensator spre vaporizator, s-a încorporat în structura interioară a MTT un strat capilar care poate fi sinterizat din microsfere de cupru sau dintr-un material polisintetic.

Pentru selectarea materialului care va intra în componența micro-rezervorului interior cu extra-fluid, s-au comparat proprietățile mecanice ale unui material celulozic cu cel polisintetic. În tabelul 2.2 [HY\*\*] s-au trecut valorile comparative pentru proprietățile mecanice ale celor două materiale.

Proprietate	Unitate de măsură	Material	Material celulozic
		polisintetic	
Densitate	$kg/m^3$	2,7	3,7
Structura internă	=	Celulă dublă fină	Celulă dublă medie
Deformare la compresiune 25%	KPa	4,137	1,378
Deformare la compresiune 65%	KPa	9,652	4,137
Rezistența la tracțiune	KPa	228,905	279,2
Gradul de rupere	N/mm	0,893	0,490
Capacitatea de absorbție a apei	g/g burete	22	14,6
Temperatura de ardere	°C	158	175

Tab. 2.2. Proprietățile mecanice ale materialului celulozic și polisintetic, [HY\*\*].

S-a ales materialul polisintetic ca rezervor de extra-fluid (pentru realizarea practică a MTTP) întrucât capacitatea de absorbție, structura internă și deformarea la compresiune sunt parametri calitativi superiori materialului celulozic. Testările preliminare au dovedit că materialul polisintetic și-a păstrat calitățile absorbante în cazul utilizării atât a acetonei cât și a metanolului.

### 2.5. Regimurile funcționale ale MTTP cu sau fără adiție de extra-fluid

Pentru efectuarea calculelor și a determinărilor experimentale într-o succesiune coerentă se vor preciza care sunt regimurile de funcționare ale MTTP. Pentru corecta înțelegere a situațiilor care pot să apară funcțional, în figura 2.7 se reprezintă variația estimată a temperaturii în timp, cu sau fără adiție de extra-fluid.



Fig. 2.4. Regimurile funcționale ale MTTP.

Primele două cazuri din figura 2.4.-a sunt pentru funcționarea MTTP fără adiție de extra-fluid. MTTP poate funcționa normal când răcește adecvat componentele electronice sau la supraîncălzire când apare o creștere semnificativă de temperatură notată  $\Delta T$ . În primă

instanță regimul de funcționare este de tip tranzitoriu iar după timpii  $t_1$  și  $t_2$  apare o stabilizare a acestuia.

Celelalte două cazuri din figura 2.4.-b, corespund MTTP la care se adaugă extra-fluid în momentul atingerii unui prag maxim de temperatură, prestabilit. MTTP la pornire după finalizarea regimului tranzitoriu ( $t_1$ ), se stabilizează după timpul ( $t_1$ ). În MTTP apare o supraîncălzire (regim tranzitoriu) până la atingerea timpului  $t_2$ . Întrucât temperatura în MTTP este maximă se adaugă extra-fluid printr-una din metodele descrise anterior, fenomen urmat de o răcire până când are loc stabilizarea la noi regimuri de funcționare corespunzător timpilor  $t_4$  și  $t_5$ . Se presupune că temperatura finală în acest caz diferă pentru cele două situații, întrucât vitezele de creștere a temperaturii (la supra-încălzire) respectiv la scăderea acesteia (răcire) sunt diferite.

# 2.6. Concluzii privind soluțiile propuse pentru intensificarea transferului de căldură

- 1. După ce în primul capitol a fost studiat stadiul actual al dezvoltării MTTP, pentru intensificarea transferului de căldură și asigurarea răcirii, se propun două metode care să asigure răcirea:
  - a. utilizarea de extra-fluid în zona de vaporizare, folosind o metodă semi-activă [MI14, SS<sup>1</sup>16, MI<sup>1</sup>16] care să asigure presarea unui material polisintetic umectat inițial cu lichid de lucru de către un metal cu memoria formei,
  - b. injectarea directă a lichidului de lucru în zona de vaporizare de către un minicilindru cu piston, controlat electronic.
- 2. Problema tehnică pe care o rezolvă soluțiile constructive propuse pentru MTTP constă în realizarea unui sistem de răcire de tip semi-activ, realizat dintr-un micro-tub termic plat, având la dispoziție mai mult fluid de răcire (extra-fluid) decât în funcționarea normală, care poate fi eliberat doar atunci când temperatura depășește un anumit prag.
- 3. MTTP semi-activ cu extra-fluid, este constituit dintr-un corp tubular plat de cupru care este vidat și etanșat la capete în interiorul căruia s-au amplasat alte trei tuburi plate. Stratul capilar interior este format din micro-canale trapezoidale dispuse longitudinal pe peretele interior al MTTP. Primul tub este amplasat peste micro-canalele de tip trapezoidal fiind confecționat din material polisintetic cu capacitate mare de stocare a lichidului de lucru. Acest tub este presat pe interior de lamelele unui tub subțire din material cu memoria formei, generând astfel extra-fluid. Al treilea tub este pozat în interiorul MTTP pentru a asigura separarea fazei lichide de vapori.
- 4. Funcționarea MTTP semi-activ cu extra-fluid se bazează pe realizarea unui proces de răcire prin intermediul unui agent termic cu punct de vaporizare scăzut într-o cavitate vidată, care trece printr-o succesiune de transformări termodinamice, agentul fiind înmagazinat în exces dar utilizat optim prin intermediul unui material cu memoria formei.
- 5. Dispozitivul semi-activ este construit dintr-un material cu memoria formei. Acesta se va deforma doar peste un anume prag de temperatură moment în care va presa asupra tubului polisintetic. Forța de presare va fi în dependență de temperatura sursei de căldură deci tubul polisintetic va elibera optim extra-fluid în cazul supraîncălzirii componentelor electronice.

### 3. SUDIUL TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ ÎN MICRO-TUBURILE TERMICE PLATE

### 3.1. Particularitățile transferului de căldură în MTTP

### 3.1.1. Introducere

Din punctul de vedere al aplicabilității, un tub termic este un dispozitiv care realizează mai eficient transferul de căldură față de alte metode destinate acestui scop. Transformările termodinamice din interiorul unui MTTP la care este supus lichidul de lucru sunt de vaporizare, transport de vapori, condensare și întoarcerea de condens, fenomene ce se realizează într-un ciclu închis. Energia termică sub formă de căldură este transportată de la vaporizator spre condensator prin intermediul lichidului de lucru, care suportă o transformare bifazică, printr-un ciclu continuu de transfer de masă.

Pentru a analiza capacitatea unui MTTP în efectuarea transportului de căldură [CB\*\*, JS03, RD13, SS<sup>2</sup>15, ZN99, WY00], s-au introdus următoarele ipoteze:

- 1. perete MTTP se încălzește conductiv de la sursa de căldură,
- 2. transferul de căldură dintre stratul capilar interior și lichidul de lucru se realizează numai pe direcția radială (y), neglijându-se direcția axială (z),
- 3. lichidul de lucru și vaporii acestuia se deplasează numai pe direcția axială,
- 4. condensatorul nu este blocat de lichidul obținut prin condensarea vaporilor,
- 5. stratul capilar se presupune izotrop și se consideră saturat cu lichid de lucru,
- 6. se consideră că MTTP este așezat orizontal,
- 7. presiunea capilară determină modificarea meniscului pe care îl formează lichidul în micro-canalele stratului capilar,
- 8. curgerea vaporilor este considerată laminară la peretele interior, pe toată lungimea TT sau a MTTP,
- 9. fluxurile de vapori și lichidului de lucru sunt considerate a fi constante,
- 10. curgerea vaporilor este considerată turbulentă în miezul fluxului de vapori.

Din punct de vedere al regimului direcțional, transferul de căldură printr-un MTTP poate avea loc:

- dinspre exteriorul MTTP către interior, cu preluarea căldurii de la sursa caldă în zona de vaporizare,
- în interiorul micro-tubului termic:
  - transfer de căldură conductiv și convectiv prin micro-canalele MTTP în zona de vaporizare,
  - vaporizare în regim bifazic în zona de vaporizare,
  - transfer de căldură și masă prin structura capilară a MTTP în zona de vaporizare,
  - generare de vapori care se deplasează din zona de vaporizare către zona adiabatică,
  - transfer de căldură și masă pentru lichidul care curge prin micro-canale din zona adiabatică spre cea de vaporizare,
  - schimb adiabatic de căldură cu transfer de masă pentru vapori dinspre vaporizator spre condensator și lichid în sens invers în zona centrală a MTTP (zona adiabatică),
  - transfer bifazic de căldură în zona condensatorului prin condensarea vaporilor și generare de lichid,

- transport de lichid rece din zona de condensare spre vaporizator a cărui curgere este asigurată prin fenomenul de capilaritate.
- dinspre interiorul MTTP către mediul exterior în zona de condensare prin intensificarea fenomenului de convecție forțată.

În [SS14] sunt prezentate ecuațiile de continuitate regăsite și în [AH12, JS03, RR12, WS10] pentru curgerea lichidului prin micro-canalele trapezoidale ale MTTP și a vaporilor (*vap*) prin secțiunea centrală a acestuia de la condensator (*co*) spre vaporizator (*va*) și invers.

Prin ipoteză s-a considerat că stratul capilar este realizat din micro-sfere din cupru sinterizat, cu diametrul între  $50 \div 200 \mu m$ . Analiza procesului de vaporizare presupune ca stratul capilar poros realizat din micro-sfere de cupru sinterizat să fie saturat cu lichid de lucru [BK13, BS14, RR11, SS14, SS15]. Prin ipoteză s-a considerat că stratul capilar sinterizat se comportă ca un material poros. Utilizând legea lui Darcy s-a calculat debitul total de lichid care curge prin stratul capilar. Pentru determinarea corectă a parametrilor transferului de căldură în MTTP s-a ținut cont de caracterul curgerii, Numărul Poiseuille, Reynolds, Nusselt, etc. de vitezele de curgere ale lichidului și vaporilor prin micro-canalele trapezoidale și prin straturile sinterizate.

## 3.1.2. Determinarea capacității maxime de transport a căldurii la MTTP

Micro-tuburile termice sunt sisteme termodinamice capabile să transporte căldura chiar și la diferențe mici de temperatură între vaporizator și condensator [LS11]. Acest lucru este pus pe seama transformărilor bifazice. Structura internă a MTT diferă de la un caz la altul, însă o parte dintre elementele componente se regăsesc la toate tipurile constructive.

În cazul funcționării MTTP poate să apară fenomenul de "*limită capilară*" care este legat de regimul presiunilor din interior. Limita capilară are ca efect împiedicarea deplasării lichidului proaspăt condensat în condensator spre zona de vaporizare. Fenomenul de limită capilară poate provoca "*uscarea*" zonei de vaporizare. Limita capilară va determina capacitatea MTTP de a transporta un flux termic maxim, aplicat în zona de vaporizare. Determinarea limitei capilare este importantă în menținerea funcționării unui MTTP. La un MTTP se presupune ca temperatura din zona de vaporizare este mai mică sau egală cu temperatura sursei de încălzire.

Capacitatea maximă de transport a unui MTTP poate fi asimilată cu fluxul termic maxim ce poate fi aplicat pe acesta, pentru a produce o vaporizare constantă a lichidului din vaporizator.

Funcționarea MTTP în regim de limită capilară este legată de volumul lichidului de lucru ce se găsește în interior.

#### Cazul lichidului de lucru în cantitate excesivă:

O cantitate prea mare de lichid de lucru poate determina modificarea limitei capilare. Acest lucru se explică prin faptul că existând mai mult lichid care se vaporizează, crește volumul vaporilor generați iar prin aceasta se modifică presiunea interioară a MTTP. În stratul limită, forțe de adeziune sunt generate de frecarea dintre lichid și pereții microcanalelor. Creșterea presiunii interioare conduce la mărirea forțelor de adeziune și implicit la modificarea limitei capilare (presiunii de pompare prin stratul capilar). Ca efect, lichidul format în exces în condensator prin condensarea vaporilor nu se mai poate întoarce (total sau parțial) prin efect capilar spre vaporizator, caz în care nu se mai poate relua transferul de căldură.

### Cazul lichidului de lucru în cantitate insuficientă:

Dacă în interiorul MTTP există o cantitate prea mică de lichid de lucru, la apariția unui flux termic în zona de vaporizare, în scurt timp se va vaporiza întreaga cantitate de lichid. Micșorându-se cantitatea de vapori formați va conduce la diminuarea cantității de condens. Cantitatea insuficientă de condens care se produce în condensator nu va mai îndeplini condiția de a asigura limita capilară. Zona de vaporizare se usucă iar funcționarea MTTP se blochează. În figura 3.1 este prezentat un MTTP în secțiune longitudinală putându-se observa parametrii zonelor de lucru și cei la saturație cât și modul cum se realizează circulația lichidului și vaporilor în interiorul acestuia.



Fig. 3.1. Evoluția presiunii, curgerea lichidului și vaporilor la un MTTP.

Pentru ca lichidul de lucru care se condensează în zona de condensare să se întoarcă spre vaporizator prin structura capilară internă a unui MTTP, este nevoie conform [CH06, RD13], ca variația totală a presiunii capilare să îndeplinească condițiile Young-Laplace:

$$\Delta P_{cpl,tot} \ge \Delta P_{lic} + \Delta P_{vap} + \Delta P_g, \qquad (3.1)$$

unde:  $\Delta P_{cpl,tot}$  - căderea totală a presiunii de pompare capilare,  $\Delta P_{lic}$  - căderea presiunii lichidului din micro-canale,  $\Delta P_{vap}$  - căderea presiunii vaporilor de-a lungul MTTP,  $\Delta P_g$  căderea de presiune datorată accelerației gravitaționale (numai pentru MTTP ce funcționează înclinate sub un anumit unghi față de orizontală). În figura 3.2 este prezentat un MTTP cu zonele de funcționare și o parte a parametrilor geometrici:



Fig. 3.2. Zonele de funcționare ale unui MTTP cu evidențierea unor parametri dimensionali și funcționali.

Căderea de presiune a lichidului din interiorul MTTP [BB99] ce curge prin microcanale, va fi:

$$\Delta P_{lic} = \frac{\mu_{lic} \dot{m}_{lic} L_{va}}{\rho_{lic} \left(\sum_{i=1}^{N_{mc}} A_{mc}, i\right) \lambda_{lic}}.$$
(3.2)

S-a notat cu:  $\mu_{lic}$  - vâscozitatea dinamică a lichidului,  $\dot{m}_{lic}$  - debitul masic al lichidului,  $L_{va}$  - lungimea vaporizatorului (vezi fig. 3.1),  $\rho_{lic}$  - densitatea lichidului,  $\sum_{i=1}^{N_{mc}} A_{mc}$ , i - suma ariilor micro-canalelor care constituie calea de curgere pentru lichid,  $\lambda_{lic}$  - conductivitatea termică a lichidului.

Căderea de presiune a vaporilor care circulă în interiorul MTTP (vezi fig. 3.1) dinspre vaporizator spre condensator este:

$$\Delta P_{vap} = \frac{\mu_{vap} \dot{m}_{vap} L_{va}}{\left(aH_{mttp} + \pi r^2\right) \rho_{vap} \lambda_{vap}},$$
(3.3)

unde  $\mu_{lic}$  - vâscozitatea dinamică a vaporilor,  $\dot{m}_{vap}$  - debitul masic al vaporilor,  $L_{va}$  lungimea vaporizatorului, a - lățimea zonei cu micro-canale,  $H_{mttp}$  - înălțimea interioară a MTTP, r - raza interioară a MTTP (pt. a,  $H_{mttp}$  și r vezi figura 3.2),  $\rho_{vap}$  - densitatea vaporilor,  $\lambda_{vap}$  - conductivitatea termică a vaporilor.

Dacă se consideră că funcțional MTTP este într-o stare de echilibru termic, atunci debitul masic al vaporilor de lichid și al lichidului din vaporizator sunt egale ca mărime în secțiunea de curgere. Considerând [MH<sup>1</sup>06, SM17, BB99]  $\dot{Q}_{va,max}$  fluxul termic maxim ce poate fi transportat în zona vaporizatorului (figura 3.2),  $\dot{m}_{lic}$  - debitul masic al lichidului și  $\dot{m}_{vap}$  - debitul masic al vaporilor prin secțiunea de curgere a elementelor vaporizatorului, se obține ecuația de bilanț energetic:

$$\dot{m}_{lic} = -\dot{m}_{vap} = \frac{\dot{Q}_{va,max}}{h_{le}}.$$
 (3.4)

Ecuația care exprimă limita de capilaritate ( $Q_{cpl,max}$ ) deduse de Faghri în 1995 [BB99], neglijând pierderile de presiune datorate vaporizării și condensării este:

$$Q_{cpl.max} = \frac{\Delta P_{cpl} - \Delta P_g}{f_{lic} - f_{vap}},$$
(3.5)

unde  $f_{lic}$  și  $f_{vap}$  - reprezintă coeficientul pierderilor prin frecarea lichidului respectiv a vaporilor. Pentru cazul aplicării fluxului de căldură pe o singură față a MTTP, căderea totală a presiunii de pompare capilară este:

$$\Delta P_{cpl,max} = \frac{12\mu_{vap}\dot{m}_{vap}\bar{L}_{ef}}{\rho_{vap}\left(aH_{mttp} + \pi r^2\right)\delta^2_{vap}} + \frac{12\mu_{lic}\dot{m}_{lic}\bar{L}_{ef}}{\rho_{lic}\sum_{i=l}^{N_{mc}}A_{mc}\Psi},$$
(3.6)

unde:  $\delta_{vap}$  - grosimea miezului de vapori în secțiunea transversală a MTTP. Mărimea medie a lungimii efective se consideră  $\overline{L}_{ef} = (L_{va} + L_{co})/2$  întrucât lichidul și vaporii formați au un parcurs mai mic decât cel teoretic. Se poate scrie ecuația de bilanț:
$$\frac{2\sigma_{lic}}{r_{cpl}} = \overline{L}_{ef} \frac{\dot{Q}_{va,max}}{h_{lg}} \left( \frac{12\mu_{vap}}{\rho_{vap} \left( aH_{mttp} + \pi r^2 \right) \delta_{vap}^2} + \frac{\mu_{lic}}{\rho_{lic} \sum_{i=1}^{N_{mc}} A_{mc} \psi} \right), \tag{3.7}$$

unde:  $r_{cpl}$  - raza meniscului lichidului din micro-canalele MTTP,  $h_{lg}$  - căldura latentă de vaporizare,  $\psi$  - permeabilitatea stratului capilar. Se obține:

$$\dot{Q}_{va,max} = \frac{2\sigma_{lic}h_{lg}}{r_{cpl}\bar{L}_{ef}\left[\frac{12\mu_{vap}}{\rho_{vap}\left(aH_{mttp} + \pi r^{2}\right)\delta_{vap}^{2}} + \frac{\mu_{lic}}{\rho_{lic}\sum_{i=1}^{N_{mc}}A_{mc}\psi}\right]}.$$
(3.8)

Pentru efectuarea calculelor s-a utilizat mediul de programare Mathcad [MC\*\*] adoptându-se următoarele valori geometrice ale micro-canalelor trapezoidale ale MTTP: lățimea bazei mici a părții trapezoidale solide  $b=0,200\cdot10^{-3}m$ , lățimea bazei mari a părții trapezoidale solide  $B=0,270\cdot10^{-3}m$  de înălțime  $\delta_1=0,275\cdot10^{-3}m$ . Raza capilară s-a determinat prin calcule pentru diverse valori ale unghiului  $\theta$  și s-a determinat că aceasta poate lua valorile:  $r_{cpl}=3,48\cdot10^{-4}\div9\cdot10^{-4}m$ .

Suprafața totală a micro-canalelor trapezoidale prin care are loc schimbul de căldură este  $A_{mc} = 9,454 \cdot 10^{-4} m^2$  pentru o lungime a vaporizatorului  $L_{va} = 30 \cdot 10^{-3} m$  a zonei adiabatice  $L_{adb} = 80 \cdot 10^{-3} m$  respectiv a condensatorului  $L_{co} = 40 \cdot 10^{-3} m$ . Lungime totală a MTTP va fi:  $L_{ef} = L_{va} + L_{adb} + L_{co}$ . Plecând de la valorile dimensionale prezentate mai sus, cu ajutorul softului Mathcad, s-a calculat și trasat în figura 3.3 valoarea fluxului termic maxim  $\dot{Q}_{va,max}$  în funcție de raza capilară a meniscului de lichid din micro-canalul trapezoidal.



Fig. 3.3. Variația fluxului termic maxim transportat la MTTP în funcție de raza capilară, pentru diferite fluide și temperaturi de lucru.

Pentru a analiza variația fluxului termic maxim ce poate fi transportat la un MTTP în zona de vaporizare când se atinge limita capilară, s-a luat în calcul parametrul  $h_{lg}$  (căldura latentă de vaporizare) a cărui valoare se modifică în funcție de fluidul de lucru și de temperatură. Se poate observa că apa distilată folosită ca lichid de lucru poate transporta un flux termic maxim  $\dot{Q}_{va,max}=114,37W$  la  $T=60^{\circ}C$  pentru o valoare a razei capilare de  $3,48\cdot10^{\circ}$ <sup>4</sup>m. Pentru același caz considerând  $h_{lg}$  la  $T=120^{\circ}C$  la o aceeași valoare a razei capilare s-a obținut  $\dot{Q}_{va,max}=106,62W$ .

#### 3.1.3. Transferul de căldură în zona de vaporizare a MTTP

Pentru efectuarea calculelor se folosesc datele din figura 3.3. În cazul unui MTTP a cărui strat capilar interior este realizat din micro-canale de secțiune trapezoidală dispuse longitudinal, ecuația conducției termice, regim nestaționar, unidirecțional în peretele MTTP este [BA03, BA<sup>1</sup>04, MI10, ZN98, ZN99]:

$$\rho_{Cu}c_{p,Cu}\frac{\partial T_{p,va}}{\partial t} = \lambda_{Cu}\frac{\partial^2 T_{p,va}}{\partial z_I^2},$$
(3.9)

unde:  $\rho_{Cu}$  - densitatea cuprului,  $c_{p,Cu}$  - căldura specifică a cuprului,  $T_{p,va}$  - temperatura vaporizatorului,  $\lambda_{Cu}$  - conductivitatea termică a cuprului, t - timpul, z - direcția radială.

Transferul de căldură în zonele de vaporizare și condensare ale MTTP este nestaționar, unidirecțional pe axa z, acesta fiind:

- *conductiv* în zona de grosime  $\delta$ ,
- *regim mixt* în zona  $\delta_l$  (*conductiv* în partea solidă a micro-canalelor trapezoidale și *convectiv* în lichidul ce le umple),
- convectiv pe direcția z<sub>3</sub> care corespunde deplasării vaporilor în interiorul MTTP.

Ecuațiile pentru variația temperaturii în peretele vaporizatorului și micro-canalului MTTP ținând seama de temperatura generată la perete de sursa de căldură pentru un regim în care se ia considerare timpul *t* (nestaționar), se pot scrie ca fiind:

$$\Theta_{p,va}(t,z_1) = T_{p,va}(t,z_1) - T_i, \qquad (3.10)$$

$$\mathcal{O}_{mc}\left(t, z_{2}\right) = T_{mc}\left(t, z_{2}\right) - T_{i}, \qquad (3.11)$$

unde:  $\Theta_{p,va}(t,z_1)$ ,  $\Theta_{mc}(t,z_2)$  - diferența de temperatură în peretele vaporizatorului și microcanalului, t - timpul,  $z_1$ ,  $z_2$  - grosimea peretelui MTTP respectiv a micro-canalelor (figura 3.3),  $T_{p,va}(t,z_1)$  - temperatura peretelui vaporizatorului,  $T_{p,va}(t,z_2)$  - temperatura nervurii micro-canalului,  $T_i$  - temperatura inițială.

Fie  $\delta_T$  - distanța la care se deplasează liniile câmpului termic prin peretele MTTP și  $\dot{q}_{va}$  - densitatea de flux termic în zona de vaporizare. Se stabilesc condițiile la limită pentru peretele vaporizatorului:

$$\begin{cases} z_{I} = 0 & \dot{q}_{va} = -\lambda_{Cu} \frac{\partial \Theta_{p,va}(t, z_{I})}{\partial z_{I}} \\ z_{I} = \delta_{T}(t) \Big|_{max} & \frac{\partial \Theta_{p,va}(t, z_{I})}{\partial z_{I}} = 0 \end{cases}$$
(3.12)

Pentru calcularea evoluției în timp a distanței liniilor de curent ale câmpului termic față de perete,  $\delta_T(t)$ , se integrează ecuația conducției termice:

$$\int_{0}^{\delta_{T}(t)} \frac{\partial \Theta_{p,va}(t, z_{I})}{\partial t} dz_{I} = \int_{0}^{\delta_{T}(t)} a_{p,va} \frac{\partial^{2} \Theta_{p,va}(t, z_{I})}{\partial z_{I}^{2}} dz_{I}, \qquad (3.13)$$

33

unde:

$$a_{p,va} = \frac{\lambda_{Cu}}{\rho_{Cu}c_{p,Cu}},\tag{3.14}$$

reprezintă coeficientul de difuzivitatea termică a peretelui vaporizatorului.

Folosind modelul matematic prezentat de mai sus s-a realizat un cod sursă în Mathcad prezentat în Anexa 1. Pentru grosimea peretelui vaporizatorului s-a adoptat  $\delta = 0, 6 \cdot 10^{-3} m$  iar pentru suprafața vaporizatorului unde se aplică fluxul termic  $A_{va} = 9,88 \cdot 10^{-4} m^2$ .

În figura 3.4 este dată evoluția diferenței de temperatură în 120s în peretele vaporizatorului MTTP supus unui flux de căldură variabil cuprins între  $10\div40W$  (acesta aflându-se în contact cu sursa caldă) până la stabilizarea regimului termic.



Fig. 3.4. Diferența de temperatură în peretele vaporizatorului MTTP în timp pentru diverse valori ale fluxului termic (10÷40W).

Din graficul prezentat în figura 3.4 se poate observa că diferența de temperatură în peretele vaporizatorului MTTP este cu atât mai mare cu cât fluxul termic crește. Se remarcă faptul că durata până când se atinge echilibrul termic diferă fundamental pentru cele patru cazuri reprezentate care corespund unor fluxuri termice cuprinse între 10÷40W.

Folosind același cod sursă, în figura 3.5.a-d s-a trasat pentru același interval de timp diferența de temperatură din peretele vaporizatorului pentru un flux de căldură de 10, 20, 30 și 40W la grosimi ale peretelui de  $0,1\div0,6\cdot10^{-4}m$ .





Fig. 3.5.a-d. Diferența de temperatură în timp la diferite fluxuri termice și grosimi ale peretelui MTTP:

Din graficele prezentate în figura 3.5.a-d se constată că într-un interval de timp de *120s*, liniile frontului câmpului termic străbat întreaga grosime a peretelui vaporizatorului MTTP.

Se observă din figura 3.5.a-d că diferența de temperatură dintre baza exterioară a MTTP și cea adiacentă lichidului din micro-canalele trapezoidale (după străbaterea grosimii  $\delta$ ) crește de la 3,32°C pentru 10W la 11,2°C pentru 40W.

## 3.1.4. Transferul de căldură prin medii poroase polisintetice

Structura capilară interioară a MTTP, în funcție de domeniul de utilizare poate fi realizată din structuri poroase metalice sau nemetalice. Structurile capilare interioare de tip poros pot fi confecționate din materiale metalice. În mod uzual structurile capilare se obțin prin sinterizare din micro-sfere ale metalului din care este confecționat tubul termic exterior.

În figura 3.6 s-a prezentat o secțiune transversală printr-un MTTP în care se observă dispunerea stratului capilar sinterizat *SCS* la interiorul peretelui.



Fig. 3.6. Dispunere SCS pe peretele interior al MTTP.

Detaliul din figura 3.9 prezintă stratul capilar sinterizat (SCS) care poate fi realizat din micro-sfere de cupru sau alte structuri.

Întrucât analiza simultană a celor două forme de transfer de căldură poate fi complexă, se analizează separat transferul de căldură în materialul poros polisintetic. Prin ipoteză se consideră în calcule că materialul polisintetic este incompresibil.



Fig. 3.7. Reprezentare schematică a unei secțiuni prin peretele MTTP cu SCSC și SCP.

Datele necesare efectuării calculelor se regăsesc în figura 3.7 unde:  $\delta_{p,va}$  - grosimea peretelui vaporizatorului,  $\delta_{sint}$  - grosimea stratului sinterizat,  $\delta_{p,pls}$  - grosimea materialului polisintetic,  $T_{p,va}$  - temperatura peretelui vaporizatorului, l, L - lățimea și lungimea zonei active a MTTP, *SCSC* - strat capilar sinterizat din sfere de cupru, *SCP* - strat capilar polisintetic.

Polyaev și al [ND06] dau o aproximare pentru suprafața porilor pe unitatea de volum, ca fiind  $A^{''}_{p-l}=6(1-\varepsilon_{pls})/d_{por}$ , relație în care s-a notat  $d_{por}$  - diametrul golurilor ce compun porozitatea. Coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție poate fi exprimat ca fiind:

$$h = A_{p-l}^{'''} h^*, (3.15)$$

relație în care coeficientul  $h^*$  poate fi exprimat prin:

$$h^* = \frac{Nu_{p-l}\lambda_{lic} + \beta\lambda_{pls}}{d_{por}},$$
(3.16)

unde  $Nu_{p-l}$  - numărul Nusselt pentru lichidul din interiorul materialului polisintetic iar valoarea coeficientului de porozitate  $\beta$  depinde de forma golurilor din interiorul materialului poros. Pentru uşurarea calculelor se consideră golurile de formă sferică caz în care  $\beta=10$ . Substituind 3.16 în 3.15 rezultă:

$$h = \frac{6\left(1 - \varepsilon_{pls}\right)\left(Nu_{p-l}\lambda_{lic} + 10\lambda_{pls}\right)}{d_{por}^2}.$$
(3.17)

În cazul materialelor poroase, Nusselt este exprimat prin relația:

$$Nu_{p-l} = (0,255 / \varepsilon_{pls}) Pr^{1/3} Re^{2/3}.$$
(3.18)

În figura 3.8, s-a reprezentat grafic variația coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție funcție de numărul Reynolds luând în considerare diferite valori ale diametrului porilor considerați sferici prin ipoteză.



Fig. 3.8. Coeficientul convectiv funcție de numărul Re pentru diferite diametre ale porilor.

Calculul coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție funcție de numărul Reynolds, pentru cazul unei curgeri laminare arată că acesta crește odată cu mărirea diametrului porilor materialului polisintetic. Coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție în cazul materialelor poroase depinde de mărimea golurilor din material deci implicit de tipul de caracteristicile fizice ale structurii.

# 3.1.5. Determinarea conductivității termice echivalente a zonei de vaporizare

Pentru determinarea conductivității termice echivalente a zonei de vaporizare se ia în considerare materialul din care este confecționat peretele și stratul capilar interior al MTTP împreună cu lichidul de lucru. Acestea vor avea împreună o conductivitate termică echivalentă. Transferul termic prin micro-canal și lichidul de lucru se realizează la suprafața acestora. Conform figurii 3.9 se consideră că lichidul de lucru umple total sau parțial micro-canalul trapezoidal.



Fig. 3.9. Geometria secțiunii unui micro-canal trapezoidal la MTTP.

La interfața lichid-vapori în cazul vaporizării se determină coeficientul de transfer termic calculat din teoria cinetică a gazelor [RR08]:

$$h = \frac{2\kappa_a}{2 - \kappa_a} \frac{\rho_{vap} h_{lg}^2}{T_{vap}} \left( 2\pi \frac{R}{M} T_{vap} \right)^{-1/2} \left( 1 - \frac{P_{vap}}{2\rho_{vap} h_{lg}} \right), \tag{3.19}$$

unde s-a notat cu  $\kappa_a$  - coeficient de acomodare,  $\rho_{vap}$  - densitatea vaporilor,  $h_{lg}$  - căldura latentă de vaporizare a vaporilor,  $T_{vap}$  - temperatura de vaporizare, M - masa moleculară,  $P_{vap}$  - presiunea parțială de vaporizare.

Calcularea conductivității termice echivalente a zonei de vaporizare [IB07] se face cu relația:

$$\lambda_{e,va} = \frac{\dot{Q}_{va}L_{va}}{A_{va}\left(T_{p,va} - T_{\delta_{flic,va}}\right)}.$$
(3.20)

Pentru apă [DP04], coeficientul de acomodare se poate considera unitar. Folosind un cod realizat în Mathcad [MC\*\*] s-a reprezentat în figura 3.10 conductivitate termică echivalentă în zona de vaporizare funcție de fluxul termic pentru apă distilată ca fluid de lucru.



Fig. 3.10. Conductivitatea termică echivalentă în zona de vaporizare funcție de fluxul termic și de temperatură.

Conductivitatea termică echivalentă a zonei de vaporizare se modifică direct proporțional cu fluxul termic aplicat în zona vaporizatorului și este invers proporțională cu variația temperaturii MTTP. Din graficul din figura 3.10 se observă că pentru parametrii de intrare considerați, respectiv apă distilată la 70°C,  $\lambda_{e,va}$  are cea mai mare creștere pentru fluxuri termice ce variază de la 10.40W.

# 3.1.6. Intensificarea transferului de căldură și răcirea MTTP prin adiție de extra-fluid

Pentru a realiza un transfer de căldură cât mai eficient prin micro-tuburile termice (figura 3.11), acestea sunt prevăzute constructiv cu o serie de micro-canale care pot avea diferite forme. În cazul de față, pentru determinarea mărimilor schimbului de căldură se consideră micro-canalele de formă trapezoidală. Fiecare micro-canal va reprezenta o sursă de transport a căldurii generată de componenta electronică. Fluxul de căldură generat se transmite conductiv prin pereții subțiri de cupru, până la baza canalelor trapezoidale ale micro-tubului termic. Prin aceste canale se deplasează în stare lichidă agentul de lucru.



Fig. 3.11. Capătul de vaporizare al unui MTTP semi-activ cu extra-fluid.

1 - capăt etanșare MTTP, 2 - micro-canale trapezoidale ce asigură capilaritatea, 3 - sursă de căldură (exterioară micro-tubului), 4 - tub circulație vapori, 5 - tub din material polisintetic ce constituie rezervorul de extra-fluid, 6 - material cu memoria formei ce constituie elementul semi-activ, 7 - capăt vaporizare micro-tub termic.

Micro-tubul termic plat semi-activ cu extra-fluid (figura 3.11), este prevăzut cu capătul teşit 1, acesta având rolul de a permite vidarea, introducerea lichidului de lucru și etanșarea acestuia. În interiorul micro tubului termic plat sunt practicate micro sau nanocanalele 2 cu secțiuni de diferite forme: triunghiulare, rectangulare, trapezoidale, semicirculare etc. Acestea sunt realizate în interiorul carcasei 7 pe toată suprafața MTTP, prin diverse tehnologii. Cu 3, s-a notat sursa generatoare de căldură (CPU sau altă componentă electronică caldă), care nu aparține constructiv MTTP, aceasta fiind alipită în exterior prin presare.

În figura 3.12 se poate observa variația temperaturii în vaporizator la un MTTP, în zona adiabatică, condensator și în proximitatea acestora cât și parametrii ce caracterizează transferul termic.



Fig. 3.12. Variația temperaturii printr-un MTTP și zonele adiacente acestuia.

Se calculează după modelele dezvoltate de Benanfan, Wang ş.a. [WY00, BO08, FA94] mărimile ce urmează. Considerând ecuația de bilanț energetic se poate aprecia că energia termică cedată pe partea de vaporizare a micro-tubului termic plat va fi preluată de partea de condensare. Considerând o distribuție uniformă a temperaturii, fluxul de căldură în zona de vaporizare devine:

$$\dot{Q}_{va} = \frac{\frac{4}{3}\dot{m}_{va} \left[\frac{\rho_{lic}^{2} \lambda_{lic}^{3} h_{lg} g}{4\mu_{lic} \left(T_{va} - T_{sat}\right) L_{va}}\right]^{\frac{1}{4}} A_{va} \int_{t_{cycle}} \left(T_{s,va} - T_{va,sat}\right) dt}{t_{cycle}}.$$
(3.21)

Considerând parametrii fizici pentru apă distilată, la funcționarea normală (fără extrafluid) a rezultat din calcule că în zona de vaporizare grosimea maximă a filmului de lichid este  $\delta_{f.lic.va}=1,459\cdot10^{-4}m$  iar pentru zona de condensare  $\delta_{f.lic.co}=1,95\cdot10^{-4}m$ . În zona de vaporizare fenomenul de transformare a lichidului în vapori decurge permanent fapt care explică diferența de grosime a lichidului față de zona de condensare. În figura 3.13 se poate urmări cum se modifică debitul de lichid din micro-canalele trapezoidale în zona de vaporizare și condensare funcție de grosimea stratului de lichid în exces.



Fig. 3.13. Modificarea debitului funcție de grosimea filmului de lichid la apariția de extra-fluid în microcanalele trapezoidale.

Se observă că debitul în zona de condensare  $\dot{m}_{co}=3,543\cdot10^{-5}$  kg/este superior celui din zona de vaporizare  $\dot{m}_{va}=4,254^{-6}$ kg/s fapt explicabil prin faptul că o parte din lichid se vaporizează parțial datorită căldurii până să ajungă în zona de vaporizare.

Evoluția fluxului termic în timp prin MTTP a fost calculat pentru diferite lichide de lucru și o aceeași structură capilară interioară la încălzire urmată de răcire prin adiție de extra-fluid. În cazul lichidelor de lucru: apă distilată, metanol și acetonă, s-a reprezentat în figura 3.14, graficul variației fluxului termic în timp în zona de vaporizare.



Fig. 3.14. Variația fluxului termic în timp în cazul prezenței de extra-fluid.

Intervalul de timp ales pentru variația fluxului termic este de *500s*, valoare considerată ca fiind suficientă pentru stabilizarea funcționării MTTP. Este necesar să se menționeze că în calcule se ia în considerare perioada tranzitorie între debutul funcționării până la stabilizarea parametrilor după răcire. Evoluția fluxului termic în timp este total diferită, funcție de natura

lichidului de lucru și de structura capilară. Se observă că fluxul termic atinge valoarea maximă cel mai repede la acetonă, în 82,5s, apoi urmând metanolul la 120s și apa distilată la 195s. Fluxul termic maxim disipat diferă valoric în cazul celor trei fluide de lucru. Cea mai mare valoare de 42W corespunde apei distilate, însă celelalte valori ale fluxului termic sunt mult mai mici. Astfel pentru acetonă se disipă un flux de 15.2W iar la metanol 27,5W, fapt care arată că dintre fluidele studiate, apa distilată prezintă cele mai mari avantaje.

În continuare sunt prezentate modelările matematice obținute în Mathcad [SS14] pentru diferite situații de răcire ale MTTP la care se folosește ca metodă de intensificare a transferului de căldură adiția de extra-fluid. Întrucât pentru fiecare caz există diferențe privind codul sursă, în figura 3.15 se dă un exemplu al modului de modelare.

$$\tau$$
Pulse := 500  $\tau$ Max := 1.5 $\cdot$  $\tau$ Pulse nTime := 50 nM := 70

$$\begin{split} q_{va}(\tau) &\coloneqq \left| \begin{array}{l} q_{0} \cdot \frac{\tau}{\frac{\tau Pulse}{A}} & \text{if } \tau \leq \frac{\tau Pulse}{B} \\ & \text{otherwise} \\ & \left| \begin{array}{l} q_{0} \quad \text{if } \tau \leq \tau Pulse \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right| \\ & \text{Given} \quad T_{\tau}(x,\tau) = Ca \cdot T_{xx}(x,\tau) \\ & T(x,0) = T0 \qquad T_{x}(0,\tau) = 0 \\ & -\lambda \cdot T_{x}(L_{tub},\tau) = -q_{va}(\tau) + \sigma \cdot \left(T(L_{tub},\tau)^{D} - T0^{E}\right) \\ & T_{1} \coloneqq Pdesolve\left[T,x, \begin{pmatrix} 0 \\ L_{tub} \end{pmatrix}, \tau, \begin{pmatrix} 0 \\ \tau Max \end{pmatrix}, nM, nTime \right] \\ & T_{1}(L_{tub}, \pi Pulse) = 67.481 \\ & T_{1}(L_{tub}, nTime) = 62.17 \end{split}$$

#### Fig. 3.15. Extras din codul sursă Mathcad (Anexa 1), pentru cazul adiției de extra-fluid

Pentru fiecare caz în parte se introduc o serie de constante A, B, C, D, E, M care sunt dependente de condițiile la limită impuse, regimul de curgere, temperaturile din sistemul modelat, proprietățile termo-fizice sau termochimice ale materialelor ce compun structura MTTP etc. Pentru început s-a modelat în Mathcad încălzirea zonei de vaporizare la un MTTP cu acetonă, determinându-se variația temperaturii în peretele exterior al acestuia până t=390s*pentru un regim de supra-încălzire, urmată de răcire prin adiție de lichid.* Variația temperaturii în zona de vaporizare s-a trasat grafic în figura 3.16.



Fig. 3.16. Variația temperaturii în vaporizator funcție de timp pentru acetonă, sarcină normală.

Calculele iau în considerare cazul funcționării unui MTTP în condiții normale de exploatare, adică pentru un regim termic care devine stabilizat după o anumită perioadă de timp. Temperatura de încălzire luată în calcule a fost de maxim  $87,0^{\circ}C$ . Prin simulare temperaturile de pe vaporizare 1, vaporizare 2 s-au stabilizat la  $83,2^{\circ}C$ , respectiv  $79,3^{\circ}C$ .

Modelarea evoluției temperaturii unui MTTP ce folosește ca lichid de lucru acetonă cu *funcționare inițială în regim normal urmată de supra-încălzire și răcire*, pentru cazul adiției de extra-fluid, s-a prezentat grafic în figura 3.17.



Fig. 3.17. Variația temperaturii în vaporizator funcție de timp la sarcină normală, supra-încălzire și adiție de lichid, MTTP cu acetonă.

Spre deosebire de cazul anterior, variația temperaturii la exteriorul peretelui MTTP pentru un timp t=500s arată că temperatura maximă atinsă pe elementul de încălzire a fost de  $65,5^{\circ}C$  la funcționarea normală și de  $83,5^{\circ}C$  pentru supra-încălzire. Din figura 3.24 se observă că până la t=260s, variația temperaturii corespunde *funcționării normale* când regimul termic tinde să se echilibreze funcțional. După acest timp se consideră că MTTP intră într-un *regim de supra-încălzire* până la t=400s când regimul termic tinde iarăși să se stabilizeze.

## 3.2. Modelarea transferului de căldură la MTTP

# 3.2.1. Modelarea transferului de căldură în zona sursei calde a MTTP

Fluxul termic generat de elementul de încălzire (sursa caldă) aplicat pe fața exterioară a peretelui MTTP în zona de vaporizare, va determina încălzirea pereților și a fluidului de lucru. După cum rezultă din figura 3.18 căldura se va propaga prin conducție, pe direcțiile x și z, de la sursa caldă (caracterizată de fluxul de căldură  $\dot{Q}_{va}$ ) prin pereții MTTP și stratul capilar sinterizat din cupru SCSC. De la SCSC căldura se transmite convectiv la lichidul de lucru. Lichidul de lucru provenit de la condensator se transformă în vapori (zonă vaporizator) care vor curge în sens opus direcției de deplasare a acestuia.



Fig. 3.18. Reprezentarea unei secțiuni prin peretele MTTP cu SCSC.

În figura 3.18 s-a prezentat dispunerea stratului capilar sinterizat din cupru peste peretele interior al MTTP. Considerăm că suprafața pătrată pe care se află poziționată rezistența de încălzire a zonei de vaporizare are latura l=10mm. Ecuația transferului de căldură conductiv pe direcțiile y, z, pentru secțiunea de perete a MTTP considerat, pentru regim tranzitoriu, bidirecțional este:

$$\rho_{Cu}c_{p,Cu}\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{Cu}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right). \tag{3.22}$$

Variația liniilor câmpului de temperatură după cele două direcții y și z pune în evidență modul de încălzire a zonei de vaporizare. În figura 3.19 este prezentat rezultatul modelării în Matlab [ML\*\*] a transferului de căldură în zona de vaporizare (Anexa 2), în regim tranzitoriu, bidirecțional, la aplicarea unui flux termic de 20W pe o suprafață de  $1 \cdot 10^{-4} m^2$ .



Fig. 3.19. Modelarea câmpului de temperatură în zona sursei calde.

Modelarea transferului de căldură în zona sursei calde a MTTP prezentată în figura 3.19.a-b, a fost realizată pentru temperatura inițială  $T_{ini}=20^{\circ}C$  și o temperatura maximă prestabilită  $T_{fin}=80^{\circ}C$ . După un timp t=60s, liniile câmpului de temperatură prezintă o formă circulară (figura 3.19-a), iar la t=180s acestea sau mărit înaintând spre exteriorul ariei (figura 3.19-b). Din cele două figuri 3.19.a-b se observă cum evoluează în timp liniile câmpului de temperatură.

## **3.2.2.** Modelarea transferului de căldură în secțiunea transversală a MTTP

Fluxul termic unitar aplicat pe vaporizator aplicând legea lui Fourier:

$$\dot{Q}_{va} = \lambda_{Cu} \nabla T_{va} = -\lambda_{Cu} \frac{\partial T_{va}}{\partial z}.$$
(3.23)

În figura 3.20 se prezintă evoluția câmpului de temperatură *în secțiunea transversală* a zonei de vaporizare pentru cazul vaporizării lichidului de lucru la un MTTP. S-a considerat că fluxul termic se aplică central pe partea inferioară a vaporizatorului. Modelarea a fost realizată pentru un timp de 20s respectiv 60s.



Fig. 3.20. Modelarea evoluției temperaturii în timp la vaporizarea apei distilate în vaporizator.

În dreapta figurii este prezentată scara temperaturii în  $^{\circ}C$ . Se observă că în cazul din figura 3.20-a, liniile câmpului termic după 20s nu apar în partea de sus a MTTP, în timp ce după 60s figura 3.20-b are loc o stabilizare a regimului termic evidențiindu-se încălzirea peretelui opus zonei de încălzire.

### 3.2.3. Modelarea intensificării transferului de căldură la încălzirea și răcirea MTTP pentru adiția de extra-fluid

Intensificarea transferului de căldură prin MTTP poate fi realizată prin diferite metode. În continuare se prezintă două metode propuse de autor, prima constând în adiția de extra-fluid prin presarea unui material polisintetic umectat în prealabil iar a doua prin injecție directă de extra-fluid în zona de vaporizare. În modelare s-a ținut seama de transferul de căldură și de masă. Adiția de extra-fluid are loc la supra-încălzirea MTTP. În cazul adiției de lichid în vaporizator, crește cantitatea de lichid în zona supraîncălzită și implicit transferul de masă. Dacă deplasarea vaporilor în interiorul MTTP dinspre vaporizator spre condensator se realizează convectiv, cu o anumită viteză axială ( $\vec{v}$  - vectorul de deplasare a temperaturii), are loc un transfer de căldură, bilanțului termic se poate scrie:

$$\frac{\partial T_{p,va}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \vec{v} T_{vap} \right) = a_{p,va} \frac{\partial^2 T_{p,va}}{\partial z^2} + \alpha_{conv} \left( T_{vap} - T_{init} \right) L_{ef} \left( y \right), \tag{3.24}$$

unde:  $T_{p,va}$  - temperatura peretelui vaporizatorului,  $T_{vap}$  - temperatura vaporilor,  $a_{p,va}$  - coeficientul de difuzivitate termică a peretelui vaporizatorului,  $\alpha_{conv}$  - coeficientul de transfer termic convectiv. În dezvoltarea codului sursă în Matlab [SS<sup>1</sup>15, SS14, SS15], pentru transferul de căldură prin MTTP, s-a folosit schema FTCS, considerând *i* puncte în spațiu și *k* puncte în timp.

Modelările au fost efectuate pentru un flux termic de 20W pentru a obține rezultate comparabile cu cele rezultate prin alte metode de calcul sau experimental.



*Fig. 3.32. Modelarea variației temperaturii în timp la peretele exterior al unui MTTP* cu ventilator pe condensare oprit.

# 3.2.4. Modelarea transferului de căldură și a curgerii în MTTP folosind metoda Crank-Nicolson

Pentru modelarea transferului de căldură prin MTTP, s-a considerat o variație de tip tranzitoriu a temperaturii prin peretele MTTP cât și pentru lichidul de lucru. După modelare se va face o analiză comparativă privind rezultatele modelării cu cele obținute prin monitorizarea temperaturii cu termocupluri montate pe peretele exterior al MTTP. Valorile de

temperatură obținute prin modelare indică modul în care liniile câmpului de temperatură evoluează în secțiunea longitudinală a MTTP în cazul unui transfer de căldură conductiv și convectiv, bidirecțional în regim tranzitoriu.

S-a dezvoltat [SS<sup>1</sup>15, SS14, SS15] un cod în Matlab pentru trasarea evoluției izotermelor câmpului de temperatură în timp în secțiunea longitudinală a MTTP. S-au stabilit parametrii de intrare, lungimea pe y și înălțimea pe z, timpul maxim  $t_{max}$  și relațiile aferente ecuațiilor diferențiale. S-au introdus valorile pentru temperatura inițială și finală și s-au efectuat modelări pentru diferite intervale de timp cuprinse între  $5 \div 30s$ . În figura 3.21.a-e sunt prezentate rezultatele modelărilor pentru vaporii din interiorul unui MTTP cu lungimea  $L_{mttp}=150mm$  și înălțimea H=15mm.



Fig. 3.21. Modelarea în Matlab a evoluției temperaturii în timp pentru vapori la un MTTP.

Din modelare se poate observa că în intervalul de timp  $t_{max}=30,00s$  liniile câmpului de temperatură s-au propagat pe întreaga grilă a secțiunii MTTP.

Tot în Matlab a fost realizat un alt cod destinat analizei curgerii lichidului prin stratul capilar. S-au utilizat grile cu două dimensiuni ca și în cazul precedent. S-au utilizat aceeași parametri de intrare însă pentru o înălțime a MTTP de doar H=1,2mm. S-a ales numărul Reynolds Re=3000 pentru cazul când lichidul este la limita de curgere laminară spre turbulentă. Durata maximă a modelării s-a stabilit la t=240s.

Prin rularea codului, s-au obținut rezultatele prezentate în figura 3.22.a-d, pentru diferite intervale de timp.



**c**) t=40s.



Fig. 3.22. Modelarea în Matlab a evoluției temperaturii și a curgerii lichidului de lucru prin stratul capilar al MTTP.

Modelările din figura 3.22.a-d pun în evidență faptul că datorită schimbului de căldură în filmul de lichid partea inferioară are cea mai mare temperatură. Acest lucru coincide cu faptul că sursa de căldură este amplasată în această zonă. Dacă în zona vaporizatorului (partea stângă a imaginilor) temperatura rămâne la valoarea maximă  $92,5^{\circ}C$  chiar și după 240s se observă că în zona de condensare (partea dreapta a figurii) apare o zonă de temperatură minimă  $29,7^{\circ}C$ . Cu nuanțe de albastru s-a reprezentat acumularea progresivă a fluidului de lucru în zona de condensare (dreapta figurii).

Detaliile din cele două zone ale figurii 3.22.-d, prezentate mărit în figura 3.23, reprezintă distribuția de viteză în stratul limită în zona de condensare a lichidului de lucru și a vaporilor.



Fig. 3.23. Detalii privind distribuția vitezei în stratul limită al zonei de condensare.

Se observă că pentru lichid distribuția de viteză este modelată pe întreg domeniul iar pentru vapori doar pe o porțiune a acestuia.

# 3.3. Rezultate și concluzii preliminarii privind transferul de căldură în MTTP

- 1. Modelele matematice dezvoltate arată că straturile capilare interne formate din microcanale sau micro-sfere sinterizate de cupru (sau alte tipuri), la MTTP, au un rol major pentru asigurarea bunei funcționalități a acestuia.
- 2. Au fost efectuate calcule pentru determinarea capacității termice maxime de transport a căldurii în MTTP ținând seama de caracteristicile fizice ale fluidelor de lucru, parametrii geometrici ai micro-canalelor și a structurilor ce asigură capilaritatea. S-a demonstrat că apa distilată poate fi folosită cu succes în transferul de căldură realizat prin MTTP. Capacitatea maximă de transport a unui MTTP este condiționată și de

fluxul termic aplicat. La un flux termic prea mare aplicat în zona de vaporizare (supra-încălzire), MTTP nu poate fi stabilizat funcțional dacă debitul de lichid de lucru este prea mic sau în exces. Debitul în exces poate provoca o curgere atât de intensă a vaporilor încât aceștia împiedică curgerea (în contracurent) a lichidului din micro-canale prin vaporizare și desprinderea stratului limită.

- 3. Au fost propuse și s-au dezvoltat coduri de calcul în Mathcad pentru zona de vaporizare a MTTP. S-au analizat care sunt mecanismele transferului de căldură prin pereți, lichidul din micro-canale și stratul sinterizat. În calcule s-a ținut seama de valorile fluxului termic, dimensiuni, regimuri de curgere. S-au obținut valorile maxime ale temperaturii care pot fi atinse funcție de anumiți parametri funcționali precum grosimea peretelui, fluidul de lucru, modul de transmitere a căldurii, natura regimului de curgere.
- 4. S-a demonstrat că în cazul transformărilor bifazice, straturile capilare prin care au loc transferul de căldură și masă în MTTP, au rolul de a asigura o ciclicitate a transformărilor termodinamice.
- 5. S-a constatat că pentru o nervură care schimbă căldură, densitatea de flux termic aplicată unui micro-canal trapezoidal devine maximă la zona bazei mici și minimă pe flancurile dinspre zona bazei mari.
- 6. O atenție deosebită s-a acordat dezvoltării unor modele matematice pentru calculul transferului de căldură prin medii poroase întrucât acestea se folosesc în mod uzual ca substitut al straturilor sinterizate. Folosind numărul *Nusselt* și modele de calcul adaptate materialelor polisintetice poroase, s-a determinat prin calcule valorile coeficientului de transmitere a căldurii prin convecție în dependență de numărul Re, la diferite diametre ale porilor.
- 7. După determinarea conductivității termice echivalente în zona de vaporizare, s-au dezvoltat modele de calcul în cazul adiției de extra-fluid. Calculele indică faptul că aplicarea metodei conduce la răcirea zonei de vaporizare prin creşterea cantității de vapori şi a condensului rezultat. Injectarea unei cantități suplimentare de lichid de lucru în zona vaporizatorului în cazul în care MTTP se blochează, constituie o metodă de răcire prin intensificarea transferului de căldură. S-a constatat din calcule că pentru o masă de 1g de lichid de lucru injectat în vaporizator, temperatura scade cu 18°C.
- 8. Modelarea transferului de căldură în secțiunea transversală a MTTP realizată cu ajutorul softului Matlab pentru un flux termic de 20W, arată că după o perioadă de timp temperaturile pereților MTTP ajung la aceeași temperatură. Cu ajutorul metodei Crank-Nicolson s-a modelat în Matlab evoluția liniilor câmpului termic prin MTTP pentru diferite perioade de timp. Cu același cod s-a modelat curgerea lichidului prin stratul capilar interior, cu evidențierea distribuției vitezelor în stratul limită al zonei de condensare.
- 9. Prin modelările efectuate s-a pus în evidență fenomenul de desprindere a stratului limită în zona de condensare la interfața lichid-vapori. Acest fenomen apare în condițiile deplasării vaporilor în sens invers deplasării lichidului.
- 10. Concluziile privind rezultatele cantitative obținute prin calcule sau modelări se regăsesc în secțiunea concluzii finale.
- 11. Metodele de intensificare a transferului de căldură asigură răcirea eficientă a MTTP.

## 4. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL

# 4.1. Descrierea standului experimental destinat studiului intensificării transferului de căldură la încălzirea și răcirea MTTP

Pentru efectuarea determinărilor experimentale care privesc *metodele de intensificare a transferului de căldură cu scopul răcirii micro-tuburilor termice plate*, a fost conceput un stand care să permită efectuarea măsurătorilor în condiții de funcționare cât mai apropiate de situațiile reale. Determinările experimentale au avut loc într-o incintă în care s-a putut controla permanent temperatura mediului ambiental. Acest lucru a avut ca scop să elimine curenții de aer cu incidență asupra perturbării temperaturii de funcționare în zona MTTP.

În figura 4.1 este prezentată schema de principiu a standului folosit la efectuarea determinărilor experimentale.



Fig. 4.1. Schema de principiu a standului experimental.

1 - display afişare temperatură termocupluri, 2 - termocupluri, 3 - ventilator pentru radiatorul zonei de condensare, 4 - radiator montat pe zona de condensare a MTTP, 5 - MTTP, 6 - circuit de vacuumare, 7 - manovacuummetru pentru măsurarea presiunii și depresiunii din MTTP, 8 - bloc de rezistențe pentru încălzirea zonei de vaporizare, 9 - pompă de vacuum, 10 - sursă de alimentare generală a standului experimental, 11 - placă electronică sursă de tensiune alimentare încălzitor, 12 - tastatură programare sursă de tensiune încălzitor, 13 - întrerupător general rețea, 14 - display sursă de alimentare încălzitor, 18 - întrerupător alimentare placă adaptor termocupluri și datalogger, 15 - întrerupător alimentare ventilator zona de condensare, 16 - placă datalogger și port de conectare USB cu PC, 17 - circuit adaptor tensiune termocupluri, 18 - întrerupător termometru electronic.

Pornind de la schema de principiu, a fost realizat standul experimental prezentat în figura 4.2. Acesta permite măsurarea temperaturilor în opt puncte la exteriorul micro-tubului termic și controlul adiției lichidului de lucru. Componentele electronice de putere care degajă căldură în timpul funcționării unui laptop au fost simulate cu ajutorul unui element de încălzire rezistiv. Acestora li s-a aplicat o tensiunea de alimentare care poate fi modificată astfel încât să se obțină fluxuri termice de încărcare diferite. În figura 4.2 pot fi urmărite elementele componente ale standului experimental destinat studiului răcirii MTTP prin intensificarea transferului de căldură și echipamentele de măsură.



Fig. 4.2. Standul experimental pentru studiul transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate.

1 - modul electronic de control și monitorizare a parametrilor MTTP, 2 - tastatură pentru prescrierea tensiunii și curentului consumat de rezistențele de încălzire, 3 - buton on/off general, 4 - display tensiune și curent încălzitor zonă vaporizare, 5 - buton on/off cooler, 6 - sistem de control a răcirii zonei de condensare, 7 - display pentru afișarea temperaturii citite de termocuple, 8 - comutator on/off modul termocuple, 9 - datalogger și conexiunea cu PC, 10 - PC, 11 - termocuple, 12 – bloc de încălzire, 13 - micro-tub termic, 14 - cooler, 15 - modul electronic de control a încălzitorului.

Standul experimental permite alimentarea modulului electronic 1 cu switch-ul 8 pentru a permite monitorizarea temperaturii prin micro-tuburile termice plate (interschimbabile) 13. Standul permite simularea funcționării componentelor electronice de putere pentru diferite regimuri termice.

Cu ajutorul tastaturii 2 se pot prestabili regimurile de lucru iar switch-ul 3 permite pornirea și oprirea standului. Regimurile de încălzire se obțin cu ajutorul unui element de încălzire 12, realizat prin depunerea unui strat de grafit cu rezistența de *4 Ohm* pe un suport metalic, alimentat de la o sursă de curent. Parametrii necesari controlului sistemului de încălzire pot fi urmăriți în timp real cu ajutorul afișajului 4. Termometrul electronic 7 prevăzut cu opt canale, achiziționează datele de la termocuplurile 11 și permite monitorizarea temperaturii pe toată lungimea micro-tubului termic.

Datalogger-ul 9 cuplat la termometrul electronic stochează temperaturile citite de termocupluri și realizează interfața cu PC-ul. Standul este prevăzut și cu un sistem de control a răcirii 6 care poate fi pornit cu switch-ul 5. Acesta controlează un cooler 14 amplasat în zona de condensare, a cărui flux de aer se poate modifica variind turația de lucru. Datele obținute de la datalogger sunt transmise printr-un port USB la calculatorul 10. Folosind un software de prelucrare a datelor se obțin graficele cu variația temperaturii în timp pentru cele opt puncte de măsurare. Între blocul de încălzire și micro-tubul termic s-a utilizat o pastă termică necesară îmbunătățirii transferului de căldură.

## 4.2. Realizarea unui MTTP cu extra-fluid generat de un material polisintetic presat de o lamelă cu memoria formei

În anumite condiții de funcționare ale MTTP, cu anumite tipologii ale formei microcanalelor straturilor capilare, vaporii care se deplasează cu viteze ridicate (spre viteze sonice) dinspre zona de vaporizare spre condensator pot să stopeze curgerea lichidului. Acest fenomen de stopare a curgerii lichidului condensat de către deplasarea vaporilor produce "*uscarea*" zonei de vaporizare (figura 4.3).



Fig. 4.3. MTTP cu material polisintetic constituit ca rezervor de extra fluid.

În interiorul MTTP s-a crearea un "rezervor" cu extra-fluid de lucru notat cu 2, realizat dintr-un material polisintetic cu grad mare de absorbție, rezistent la temperaturi ridicate. În structura capilară a acestuia se stochează același lichid de lucru ca și în MTTP. Materialul polisintetic care acumulează extra-fluid are o structură spongioasă (conform detaliu) și este cu atât mai performant cu cât va putea înmagazina o cantitate mai mare de lichid. Materialul polisintetic 3 este presat de lamela metalică cu memoria formei 2 atunci când temperatura la vaporizatorul MTTP devine critică - apare o supra-încălzire. Dimensiunile porilor din structura materialului polisintetic va diferi extrem de mult în cazul prezenței sau absenței lichidului de lucru. Structura capilară realizată din micro-canalele 4, permite întoarcerea lichidului de lucru de la condensatorul micro-tubului termic plat 5, la vaporizator.

# 4.3. Realizarea unui MTTP cu extra-fluid folosind un mini-cilindru cu piston controlat electronic

### 4.3.1. Descrierea MTTP cu mini-cilindru și extra-fluid

Această metodă este folosită la intensificarea transferului de căldură prin adiția de lichid direct în zona de vaporizare cu scopul răcirii MTTP și se realizează prin intermediul unui mini-cilindru cu piston. Acționarea pistonului este realizată prin intermediul unui mini-motor pas cu pas. Numărul de rotații efectuat de mini-motorul pas cu pas pentru injectarea unei cantități precise de lichid, este controlat cu ajutorul unui driver cu micro-controler. În figura 4.4 este prezentat modul în care s-a atașat mini-cilindrul la MTTP.



Fig. 4.4. MTTP cu mini-cilindru cu piston,

1 - mini-cilindru cu piston, 2 - cuplaj din silicon, 3 - capilar din cupru, 4 - micro-tub termic plat, 5 – tuburi capilare pentru umplere, vacuumare și etanșare.

MTTP notat cu 4 are structura nealterată față de cazul clasic însă capilarul 3 este astfel realizat încât să permită injectarea directă a lichidului de lucru direct pe zona de vaporizare. Acest lucru este necesar doar atunci când MTTP se supraîncălzește. Mini-cilindrul cu piston

1 este controlat cu precizie de un motor pas cu pas și asigură prin cuplajul 2 injecția lichidului de lucru. MTTP poate fi umplut, vacuumat și etanșat cu ajutorul tuburilor capilare 5. În figura 4.5 se pot observa câteva detalii constructive ale standului experimental.



Fig. 4.5. Dispozitiv actionare mini-cilindru cu piston.

Semnificația notațiilor din figura 4.5 este: 1 - bloc încălzire, 2 - micro-tub termic plat, 3 - termocupluri, 4 - cilindru gradat cu piston, 5 - cuplaj ax motor și șurub acționare piston, 6 - mini-motor pas cu pas, 7 - ARDUINO Uno cu display și taste pentru programarea cantității de lichid injectate, 8 - driver mini-motor pas cu pas, 9 - ventilator răcire zona de condensare.

#### 4.4. Aparatura de cercetare utilizată

## 4.4.1. Contribuții aduse la măsurarea temperaturii cu circuitul integrat AD595CQ-ND

Pentru măsurarea temperaturii pe întreaga lungime a MTTP, s-a confecționat un termometru electronic ce permite monitorizarea a opt puncte distincte. Temperaturile sunt măsurate cu ajutorul a opt termocupluri de tip K (KA01) construite din aliaj NiCr / NiAl, clasa 1, ce au domeniul de măsurare cuprins între  $-50^{\circ}C \div +250^{\circ}C$ . Termocuplurile folosite la măsurarea temperaturilor au precizia de măsurare ( $\pm 0, 15^{\circ}C \pm 0.25\%$ ) [FA\*\*].

Întrucât tensiunea termo-electromotoare generată de acestea este foarte mică, de ordinul milivolților, a fost necesară amplificarea acestei tensiuni spre valori ce pot fi măsurate și interpretate. Circuitul integrat AD595CQ-ND a fost folosit ca un amplificator și adaptor de semnal pentru tensiunea termo-electromotoare generată de termocupluri. În figura 4.6, este prezenta amplificatorul de semnal pentru termocupluri.



Fig. 4.6. Amplificator de semnal pentru tensiunea termo-electromotoare.

1 - cabluri de conexiuni termocupluri, 2 - circuit integrat AD595CQ-ND amplificator de semnal pentru termocupluri, 3 - multiplexor ADG406 analogic CMOS cu 16 canale, 4 – taste: reset, prestabilire timp salvare între citiri, 5 - display 20x4 afișare temperaturi, 6 - datalogger cu ARDUINO - Uno.

#### **4.4.2.** Echipamentul µScan de scanare prin profilometrie laser a microcanalelor și a stratului sinterizat

Profilometrul  $\mu Scan$ ®, produs de firma NanoFocus, este fără contact, cu laser, și este destinat investigării suprafețelor la nivel microscopic. Este folosit frecvent în activitățile de cercetare științifică datorită avantajelor pe care le oferă: lipsa contactului cu suprafața investigată, precizie ridicată, posibilitatea de preluare și procesare a datelor cu ajutorul calculatorului. Pot fi scanate suprafețe plane cu dimensiuni de până la  $250 \times 350mm$  și înălțimi de până la 80mm. Principalele componente ale unui sistem de măsurare  $\mu Scan$ ®, sunt masa de lucru, sistemul electronic de măsurare și conversie a datelor, unitatea PC.



Fig. 4.7. Vedere de ansamblu a sistemului de măsurare.

1 - masă de lucru din granit, 2 - joystik poziționare fină, 3 - masă lucru în coordonata x, 4 - masă lucru în coordonata y, 5 - laser, 6 - buton stop urgență, 7 - bloc electronic, 8 - cablu transfer date, 9 - șurub cu piuliță, 10 - rozetă poziționare inițială grosieră, 11 - coloane de ghidare cap laser, 12 - cadru U port laser, 13 - calculator cu software specializat.

### 4.4.3. Microscopul MOTIC SZM-168 cu sursă de lumină rece Mlc-150

Prezentarea microscopul Motic SZM-168 cu principalele părți componente este redată în figura 4.8.



Fig. 4.8. Microscopul Motic SZM-168.

1 - Sursă lumină rece MLC-150, 2 - cameră video , 3 - microscop, 4 - masă poziționare probe, 5 – PC, monitor și tastatură.

Sistemul optic bazat pe sursa 1 de lumină rece MLC-150, include microscopul SZM-168 (notat cu 3) de tip binocular care are domeniul de mărire 6,7:1. Pe acesta este montată o cameră video 2, *Moticam 5*, cu o rezoluție reală de 5MP (2592x1944) cu distanța focală de 12mm. Aceasta este cuplată la calculatorul 5 prin intermediul unui cablu USB. Imaginile captate de la canalele rectangulare ale MTTP așezate pe masa 4, sunt prelucrate cu ajutorul unui soft specializat, instalat pe calculatorul ce deservește microscopul.

### 4.4.4. Camere cu termoviziune

Pentru a verifica valorile temperaturii la suprafața exterioară a peretelui MTTP în zonele de funcționare s-au folosit la determinările experimentale camerele cu termoviziune MobIR M3 și FLUKE Ti25. În continuare sunt prezentate datele de catalog ale celor două camere cu termoviziune.

## 5. REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETAREA LOR

# 5.1. Analiza stratului capilar sinterizat și a micro-canalelor trapezoidale prin profilometrie cu laser

Stratul sinterizat constituie stratul capilar din interiorul MTTP, realizat din microsfere sau pilitură de cupru depuse peste micro-canalele trapezoidale [SS<sup>4</sup>15]. Pilitura din cupru ce intră în componența stratului sinterizat, se obțin din bucăți ultra-fine de cupru care sunt "modelate" chimic prin corodare în clorură ferică. Sinterizarea stratului capilar se realizează prin încălzire la temperaturi de  $850^{\circ}C$ , timp de 25 minute, după ce în prealabil elementele din cupru au fost stabilizate pe pereții interiori ai MTTP, prin presare. În figura 5.1.-a,b se poate observa la un microscop cu un factor de multiplicare de 250X stratul capilar obținut după sinterizare, observându-se dispunerea elementelor de cupru și interstițiile care alcătuiesc capilaritatea.



a) vedere normală

b) mărit de 250X.

Fig. 5.1.a-b. Strat sinterizat din pilitură de Cu.

Întrucât curgerea lichidului de lucru prin stratul sinterizat este direct influențată de dimensiunea grăunților de material și a golurilor dintre aceștia, pentru acuratețea efectuării calculelor se consideră necesar să se efectueze măsurători prin profilometrie laser. În figura 5.2.-a,b, sunt prezentate imaginile obținute cu profilometrul cu laser la o rezoluție de  $l\mu m$ . Folosind profilometria cu laser, conform figurii 5.2-a, s-a scanat o suprafață de 5x5mm din stratul sinterizat obținut. Aceasta a pus în evidență valorile adâncimilor și lățimea golurilor create prin sinterizarea piliturii de cupru.



Fig. 5.2.a-b. Scanare prin profilometrie laser a stratului sinterizat din pilitură din Cu.

Pentru a investiga forma micro-canalelor trapezoidale în 3D și dimensiunile acestora în 2D s-au folosit aceleași metode utilizate la stratului capilar sinterizat: microscopie și scanare laser. Pentru acest lucru s-a pregătit o suprafață de 5x5mm din peretele MTTP pe care sunt practicate micro-canalele trapezoidale. În figura 5.3-a se observă imaginea de ansamblu a micro-canalelor trapezoidale iar în figura 5.3-b topologia 3D a micro-canalelor.



a) imagine ansamblu micro-canale trapezoidale, b) detaliu micro-canale trapezoidale prin profilometrie laser.



Întrucât profilometrul cu laser  $\mu Scan$ ® permite ca după scanare să se măsoare în detaliu un profil, în figura 5.4 pot fi urmărite dimensiunile micro-canalelor trapezoidale ce intră in componența stratului capilar interior al MTTP.



Fig. 5.4. Dimensiunile micro-canalelor trapezoidale obținute prin profilometrie laser.

# 5.2. Analiza prin profilometrie laser a structurii materialului polisintetic folosit ca rezervor de extra-fluid

Pentru a determina care este capacitatea de stocare a materialului polisintetic folosit ca un rezervor de extra-fluid, s-au efectuat măsurători ale acestuia (fig. 5.5.a-b) în cazul în care acesta este uscat.



Fig. 5.5.a-b. Material polisintetic supus analizei prin profilometrie laser.

În figura 5.5-a este prezentată o structură uniformă a porilor din materialul polisintetic utilizat la construcția rezervorului pentru adiția excesului de lichid de lucru. În figura 5.5-b se poate observa structura materialului polisintetic scanat prin profilometrie laser la o rezoluție de  $2\mu m$ .

## 5.2.1. MTTP cu micro-canale trapezoidale și lichid de lucru acetonă, metanol și apă distilată

Determinările experimentale pun în evidență intensificarea transferului de căldură și răcirea MTTP în momentul când acesta ajunge la supra-încălzire, fenomen care poate fi constatat prin modificarea bruscă a temperaturii în zona de condensare. Intensificarea transferului de căldură poate fi pusă pe seama transformărilor termodinamice pe care le suferă lichidul de adiție în interiorul MTTP.

Măsurarea temperaturii se realizează în opt puncte conform figurii 4.5, termocuplurile fiind montate după cum urmează: unul în zona blocului de încălzire, două în zona de vaporizare, două pe zona adiabatică și trei în zona de condensare. Distanța dintre acestea este egală. S-a procedat la reconfigurarea parametrilor astfel încât să se asigure un flux de căldură de *23W* continuând achiziția datelor pe cardul de memorie. S-a așteptat stabilizarea regimului după care s-a procedat ca mai sus pentru un flux termic de *34,5W* respectiv *46W*.



Fig. 5.6. Variația fluxului termic în dependență de tensiunea de alimentare a rezistenței de încălzire

Analizând datele obținute din figura 5.6 care sunt prezentate integral în Anexa E1 (E = experimental), se constată că apar diferențe semnificative privind timpii necesari stabilizării regimului termic cât și a temperaturilor maxime admisibile. Se constată că la fluxuri de căldură de până la 34,5W curbele sunt distincte pentru zonele de vaporizare, adiabatică și cea de condensare. După 900s, la 46W când se atinge fluxul maxim, curbele tind brusc către verticală la valorile temperaturii din zona de vaporizare, fapt care arată că apare blocarea termică a MTTP.

#### 5.2.1.1. MTTP cu lichid de lucru acetonă, sarcină normală, ventilator pornit

Într-o primă etapă, prezintă interes comportamentul MTTP în funcție de tipul de lichid de lucru introdus în interiorul acestuia, microstructura interioară și regimul de lucru ales. Pe standul experimental a fost testat un MTTP cu strat capilar format din micro-canale trapezoidale în care s-a introdus *Iml* de acetonă. Presiunea interioară a MTTP a fost coborâtă la valoarea de  $1 \cdot 10^4 Pa$  cu ajutorul pompei de vacuum după care s-a procedat la etanșarea acestuia. S-a setat tensiunea și curentul de alimentare pentru blocul de încălzire amplasat pe zona de vaporizare astfel încât fluxul de căldură să fie de 20W. S-a procedat la pornirea termometrului cu opt canale și s-a așteptat ca tensiunea termo-electromotoare generată de termocupluri să se stabilizeze. S-a pornit sursa de alimentare pentru încălzirea MTTP și s-au efectuat măsurătorile care se regăsesc în Anexa E2. Datele experimentale din anexa menționată, (utilizate pentru *320s*) au condus la obținerea figurii 5.7 și permit analiza evoluției temperaturii în timp pe toate cele trei zone de interes – vaporizare, adiabatică și condensare.



Fig. 5.7. Evoluția temperaturii pentru MTTP cu micro-canale și acetonă.

Pornind de la datele experimentale obținute s-au formulat o serie de observații.

După cum s-a arătat, determinările experimentale au fost efectuate pentru un flux de căldură de 20W aplicat în zona de vaporizare, ceea ce corespunde unei tensiuni de alimentare de 17,2V. Datele experimentale cu valorile temperaturii în cele opt puncte de măsură au fost obținute în fiecare secundă. Timpul total în care s-a atins regimul de stabilizare funcțională a MTTP este de 320s. În figură se poate urmări legea de variație a temperaturii la suprafața MTTP în toate cele opt puncte de măsură. Temperatura critică specifică fiecărui lichid de lucru, coincide în general cu temperatura la care tubul termic funcționează normal fără a se bloca funcțional. Această valoare este apropiată cele de vaporizare în vid parțial. Se constată

că pentru valoarea maximă a temperaturii blocului de încălzire (heater) de  $58,8^{\circ}C$ , la MTTP propriu-zis, se atinge temperatura maximă de  $54,9^{\circ}C$  care corespunde zonei de vaporizare și o valoare minimă de  $39,7^{\circ}C$  la ultimul termocuplu amplasat în zona de condensare. Totuși dacă temperaturile sunt apropiate la vaporizare, diferența fiind de doar  $5,3^{\circ}C$  la condensare între primul și ultimul termocuplu sunt  $7,3^{\circ}C$ . Acest lucru se explică prin existența radiatorului de răcire și a ventilatorului aferent care produc o intensificare a răcirii în zonă. Se observă cu ușurință că toate curbele urmează o aceeași lege de încălzire, însă cu valori diferite ale temperaturii în fiecare zonă.

#### 5.2.1.2. MTTP cu lichid de lucru metanol, sarcină normală, ventilator pornit

În determinările experimentale efectuate cu un MTTP care folosește ca lichid de lucru o cantitate de *1ml* de metanol, s-au folosit aceeași parametri de intrare pentru fluxul termic. Datele experimentale obținute sunt prezentate în Anexa E3, valorile obținute fiind folosite la trasarea graficului din figura 5.8 pentru un interval de timp de *415s*.



Fig. 5.8. Evoluția temperaturii MTTP cu micro-canale și metanol.

În cazul metanolului folosit ca lichid de lucru, din analiza graficului din figura 5.8, se poate constata că temperaturile au o tendință ascendentă pe toate zonele și întreaga lungime a MTTP. Spre deosebire de cazul utilizării acetonei ca lichid de lucru, timpul necesar pentru atingerea regimului stabilizat este de 415 s față de 320 s în cazul acetonei. Diferența poate fi explicată pe seama căldurii latente de vaporizare mai mare a metanolului și a punctului de vaporizare. Curbele de încălzire au alura asemănătoare ca în cazul anterior.

#### 5.2.1.3.MTTP cu lichid de lucru apă distilată, sarcină normală, ventilator pornit

Pentru efectuarea determinărilor s-a folosind același MTTP ca și în determinările anterioare cu strat capilar format din micro-canale trapezoidale. Rezultatele experimentale sunt date în Anexa E4. S-a folosit ca lichid de lucru *1ml* de apă distilată. În figura 5.9 este prezentată variația temperaturii pe întreaga lungime a MTTP pentru un interval de timp de *302s*, pentru cele trei zone: vaporizare, adiabatică și de condensare.



Fig. 5.9. Evoluția temperaturii MTTP cu micro-canale și apă distilată.

Determinările experimentale efectuate pe MTTP cu lichid de lucru apă distilată și strat capilar realizat din micro-canale trapezoidale au arătat că cea mai mare temperatură atinsă când regimul termic s-a stabilizat a fost de 67,07 °C la blocul de încălzire. Această temperatură s-a înregistrat cu ventilatorul pornit pentru o sarcină de 20 W. Ca și în cazurile anterioare curbele câmpului de temperatură au o aceeași alură, evidențiindu-se o apropiere valorică la curbele din zona adiabatică. Se constată că după 306 s apare stabilizarea regimului termic. Se remarcă faptul că temperatura scade mai pronunțat pe capătul de condensare (Condensator 3 Legendă) întrucât radiatorul acoperă parțial MTTP în zona respectivă.

#### 5.2.1.4. MTTP răcit cu extra-fluid acetonă, funcționând la supra-încălzire

Întrucât se simulează cazul defectării ventilatorului, caz în care nu se mai asigură răcirea convectivă forțată a zonei de condensare, va apare o supra-încălzire a tubului termic datorită diminuării drastice a transportului de substanță. Odată atinsă temperatura maximă la care a fost formatat materialul cu memoria formei, acesta se va deforma presând materialul polisintetic umectat în prealabil. În interiorul tubului termic se va elibera extra-fluid asigurându-se revenirea temperaturii în zona de condensare. Utilizând datele experimentale din anexa menționată, s-au trasat curbele din figura 5.10 pentru evoluția temperaturii unui MTTP cu acetonă și extra-fluid.



Fig. 5.10. MTTP cu extra-fluid acetonă, în supra-încălzire, material polisintetic și lamelă cu memoria formei.

Din figura 5.10 se distinge clar că după 258s cu precădere temperaturile din zona de condensare încep să crească brusc, semn că apare blocarea termică a MTTP. După acest prag apare o apropiere a valorilor temperaturii zonei de condensare către cea a valorilor din zona de vaporizare. Timpul de încălzire a zonei de vaporizare pentru MTTP care utilizează ca metodă de intensificare a transferului de căldură acetona, până la apariția primei scăderi a temperaturii (ce corespunde eliberării de extra-fluid în vaporizator), este de 380s. În momentul adiției de extra-fluid, temperatura în zona de vaporizare pentru cazul existenței supra-încălzirii are o scădere de la  $80,72^{\circ}C$  la  $66,93^{\circ}C$ . Se observă din figură că scăderea de temperatură care se produce la blocul de încălzire (heater legendă) nu este însă similară în celelalte zone ale MTTP. Odată cu adiția de extra-fluid apare un efect de tip ondulatoriu în variația temperaturilor (dreapta jos figura 5.10).

#### 5.2.1.5. MTTP răcit cu extra-fluid metanol, funcționând la supra-încălzire

Pentru analiza transferului de căldură în cazul supraîncălzirii la un MTTP care folosește ca lichid de lucru metanol, s-au utilizat datele din anexa E8 care au permis obținerea figurii 5.11.



Fig. 5.11. MTTP cu extra-fluid metanol, la supra-încălzire, material polisintetic și lamelă cu memoria formei.

Din graficele trasate s-a constat că pentru un același flux termic (20W) în cazul demarării determinărilor experimentale cu ventilatorul de răcire a zonei de condensare oprit, variația temperaturii are o cu totul altă lege de variație. Curbele de variație a temperaturii sunt mult mai apropiate unele de altele decât în celelalte cazuri. Atingerea temperaturii maxime pe orice zonă a MTTP se face mult mai rapid. Astfel dacă la MTTP cu metanol și ventilator pornit pentru răcirea zonei de condensare se atingea după 415s o temperatură de  $67,07^{\circ}C$  în cazul lipsei ventilatorului se ating  $67,03^{\circ}C$  în doar 136s. Cazul funcționării cu ventilatorul pornit inițial și apoi oprit după atingerea regimului stabilizat este prezentat în figura 5.11.

#### 5.2.1.6. MTTP răcit cu extra-fluid apă distilată, funcționând la supra-încălzire

Respectând modul de testare a MTTP descris anterior, au fost efectuate determinări utilizând apa distilată ca fluid de lucru. Datele din Anexa E10 care corespund folosirii MTTP fără ca ventilatorul de răcire a zonei de condensare să funcționeze, au stat la baza obținerii figurii 5.12. Se constată din figură că spre deosebire de cazurile anterioare, chiar dacă se atinge la blocul de încălzire o temperatură maximă de  $96,08^{\circ}C$  după 268s iar în zona de vaporizare  $86,47^{\circ}C$  după 270s nu apare o blocare funcțională a MTTP ca în cazurile

anterioare. Acest aspect poate fi pus pe seama temperaturii superioare de vaporizare a apei pe de o parte cât și căldurii latente de vaporizare a apei distilate.



Fig. 5.12. MTTP cu extra-fluid apă distilată, la supra-încălzire, material polisintetic și lamelă cu memoria formei.

Se evidențiază însă în acest caz modul de evoluție a temperaturii dată de cele trei termocupluri amplasate în zona de condensare. Curbele de evoluție a temperaturii din zona de condensare 2 și 3 sunt detașate de restul, ba mai mult, dacă diferența de temperatură în restul zonelor este de doar  $1,7^{\circ}C$ , la acestea există un ecart de  $7^{\circ}C$  (între primul și al doilea termocuplu există  $4,1^{\circ}C$  iar între al doilea și al treilea  $2,9^{\circ}C$ ). Ultima afirmație arată că deși MTTP este supus unui proces rapid de supra-încălzire datorat lipsei ventilatorului de răcire, se formează condens în zona de condensare și se produce o răcire a MTTP.

## 5.3. MTTP răcit cu injecție de extra-fluid, folosind un mini-cilindru cu piston controlat electronic

După cum s-a arătat această metodă asigură răcirea MTTP prin intensificarea transferului de căldură folosind injectarea directă a unei cantități de lichid de lucru în zona de vaporizare în momentul când blocul de încălzire atinge o temperatură considerată critică. În determinările experimentale s-a considerat temperatura critică ca fiind apropiată sau egală cu temperatura de vaporizare a lichidului de lucru folosit. Pentru primul set de determinări experimentale s-a introdus în MTTP o cantitate de *1ml* acetonă. Vor fi aduse completări privind doar diferențele semnificative între cele două cazuri.



Fig. 5.13. Evoluția temperaturii MTTP cu extra-fluid injectat direct în zona de vaporizare.

Ca și în cazul adiției de fluid de lucru prin presarea materialului polisintetic, în cazul injecției directe de apă s-au respectat aceeași pași de testare. Analizând figura 5.13 se constată că în prima parte curbele au aceeași tendință crescătoare până la stabilizarea regimului termic. După oprirea ventilatorului se constată însă că pe zona de condensare nu crește temperatura extrem de rapid. Se atinge pragul maxim de temperatură după *256s* iar odată cu injecția directă a fluidului de lucru apare o reducere a temperaturilor pe toate zonele MTTP.

#### 5.3.1. MTTP cu acetonă, supra-încălzire, răcit cu injecție de extra-fluid

Din graficul prezentat în figura 5.14, se observă evoluția temperaturilor pe toată lungimea MTTP de la momentul de debut al încălzirii până la supra-încălzire când are loc injecția de extra-fluid și se atinge echilibrul termic prin răcire.



Fig. 5.14. MTTP cu acetonă, supra-încălzire, injecție extra-fluid din mini-rezervor.

Ca și în cazul utilizării extra-fluidului folosind material polisintetic, în cazul injecției directe se observă că în cazul acetonei apare un blocaj funcțional al MTTP după 283s când apare în doar câteva secunde o creștere a temperaturii pe zona de condensare de  $8,7\div9,8^{\circ}C$  la ultimele două termocupluri. Odată cu injectarea lichidului de lucru în MTTP se observă din diminuarea drastică a temperaturilor că acesta se răcește. Astfel la blocul de încălzire temperatura scade cu  $12,2^{\circ}C$ , la vaporizator cu  $15,2^{\circ}C$  iar în zona de condensare cu  $22,3^{\circ}C$ . Întrucât în zona de condensare se ating parametrii funcționali corespunzători cazului normal (vezi și fig. 5.14) se consideră că metoda de răcire cu injecție directă de extra-fluid este eficientă.

### 5.3.2. MTTP cu metanol, supra-încălzire, răcit cu injecție de extra-fluid.

Folosind același MTTP cu strat capilar interior format din micro-canele trapezoidale și strat sinterizat aplicat pe zona de vaporizare, și adiția de extra-fluid prin injecție directă dintr-un mini-rezervor cu metanol au fost obținute graficele din figura 5.15. Evoluția temperaturilor pentru cazul considerat corespund unui regim în care ventilatorul de răcire a zonei de condensare este oprit din start.



Fig. 5.15. MTTP cu metanol, supra-încălzire, răcire prin injecție extra-fluid din mini-rezervor.

Curbele evoluției temperaturii în cazul supraîncălzirii diferă fundamental față de cazul acetonei însă este asemănător cu cel al eliberării de extra-fluid din material polisintetic. În acest caz apare o apropiere a curbelor de temperatură până la atingerea valorilor maxime de temperatură (supra-încălzire) și o divergență după injecția de lichid în zona de vaporizare. Dacă diferența dintre temperatura maximă a zonei de vaporizare și cea minimă a celei de condensare este de doar  $4,8^{\circ}C$  după 360s, după răcire la stabilizarea regimului la 500s diferența se majorează la  $15,7^{\circ}C$ . Întrucât ultimul termocuplu al zonei de condensare indică la supra-încălzire  $52,1^{\circ}C$ , se poate aprecia că chiar și în aceste condiții MTTP funcționează.

#### 5.3.3. MTTP cu apă distilată, supra-încălzire, răcit cu injecție de extrafluid

În cazul folosirii apei distilate ca lichid de lucru, s-a procedat la încălzirea heaterului până la temperatura de 98,15°C. În zona de vaporizare s-a atins temperatura maximă de 85,16°C. Variația temperaturilor înregistrate de cele opt termocupluri montate pe peretele exterior al MTTP sunt prezentate în graficul din figura 5.16.



Fig. 5.16. MTTP cu apă distilată, supra-încălzire, răcire injecție extra-fluid din mini-rezervor.

Se constată că temperaturile evoluează după o aceeași lege pe timpul supraîncălzirii. Se impune mențiunea că între temperatura blocului de încălzire și cea de vaporizare după 332s există o diferență de  $8,42^{\circ}C$  în timp ce între temperatura maximă din zona de vaporizare și cea minimă din zona adiabatică aceasta este de doar  $4,1^{\circ}C$ . Se constată că odată cu injecția apei distilate și răcirea MTTP are loc un proces accentuat de răcire. Temperatura blocului de încălzire scade de la  $98,15^{\circ}C$  la  $84.07^{\circ}C$  în timp ce în zona de vaporizare se trece de la  $85,16^{\circ}C$  la  $75,34^{\circ}C$ . După răcire, în zona de condensare apare o diferență de temperatură de  $11,3^{\circ}C$  între primul și ultimul termocuplu, fapt ce indică un ecart de temperatură suficient pentru funcționarea MTTP.

## 5.4. Monitorizarea câmpului de temperatură folosind camerele IR.

Cu ajutorul Camerelor cu termoviziune **MobIR M3** și **FLUKE Ti25**, s-au obținut imagini pentru MTTP care folosesc ca metode de intensificare a transferului de căldură adiția de extra-fluid utilizând materiale cu memoria formei și un mini-cilindru cu piston controlat electronic. Folosind camera MobIR M3 împreună cu softul pentru analiza imaginilor IrAnalyser s-a vizualizat evoluția temperaturii unui MTTP care folosește ca metodă de intensificare a transferului de căldură un mini piston cu lichid controlat electronic și ca lichid de lucru apa distilată.



a) imagine termoviziune, grafic izoterme.

Object Parameter	Value	Object Parameter	Value
L1:AvgTemp	43.6°C	L2:AvgTemp	66.4°C
L1:MaxTemp	54.5°C	L2:MaxTemp	74.0°C
L1:MinTemp	29.3°C	L2:MinTemp	51.3°C
Object Parameter	Value	Object Parameter	Value
L3:AvgTemp	44.7°C	L4:AvgTemp	42.5°C
L3:MaxTemp	56.7°C	L4:MaxTemp	55.6°C
L3:MinTemp	30.4°C	L4:MinTemp	28.2°C
Object Parameter	Value	Object Parameter	Value
L5:AvgTemp	37.1°C	L6:AvgTemp	34.9°C
L5:MaxTemp	50.2°C	L6:MaxTemp	50.2°C
L5:MinTemp	27.1°C	L6:MinTemp	24.9°C
Object Parameter	Value	Object Parameter	Value
L7:AvgTemp	36.0°C	L8:AvgTemp	36.0°C
L7:MaxTemp	52.4°C	L8:MaxTemp	49.1°C
L7:MinTemp	26.0°C	L8:MinTemp	24.9°C

b) valori ale temperaturilor măsurate în cele opt puncte.

Fig. 5.17.a-b. Valorile temperaturilor unui MTTP cu apă distilată răcit cu micro-rezervor extern.

Izotermele trasate în graficul din figura 5.17.-a pentru cele liniile L1÷L8, au fost generate cu ajutorul softului de analiză IrAnalyser. Linia L1 corespunde micro-
cilindrului exterior iar linia L2 corespunde zonei heater care se află sub zona de vaporizare a MTTP. La momentul analizat temperatura maximă înregistrată pe heater a fost de  $74^{\circ}C$ . În continuare s-a realizat o analiză a transferului de căldură realizat prin termografie cu ajutorul camerei cu termoviziune FLUKE T25i.

Folosind un MTTP cu lichid de lucru apă distilată care folosește ca metodă de intensificare material polisintetic și lamelă cu memoria formei, valorile de temperatură înregistrate pentru o funcționare normală sunt prezentat în figura 5.18.



a) evoluția temperaturii - imagine termoviziune,





termoviziune 3D la 300s fără ventilator.

## Fig. 5.18. Imagine termoviziune MTTP cu apă distilată, lamelă cu memoria formei și material polisintetic.

În funcționare normală când ventilatorul este pornit, se consideră că pe condensator există transfer de căldură către mediul ambiant. Tendința descrescătoare a valorilor temperaturii înregistrate pe toată lungimea MTTP pun în evidență funcționarea acestuia și răcirea adecvată. Pentru acest caz, diferența dintre valoarea maximă a temperaturii măsurate în zona de vaporizare și cea de condensare este de  $35^{\circ}C$ .

# 5.5. Compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcule

Determinările obținute analitic cu ajutorul programului Mathcad au luat în considerare modul de lucru al MTTP (funcționare cu sau fără supra-încălzire), proprietățile fizico-chimice ale fluidelor de lucru, regimul uni sau bidirecțional de transmitere a căldurii, starea de agregare, zonele de vaporizare sau condensare, etc. date

care au permis determinarea variației temperaturii. În figura 5.19.a-b, s-a trasat grafic evoluția temperaturii în timp - pentru cazul teoretic și experimental - în cazul unui MTTP la care se utilează acetona ca adiție de extra-fluid, pentru funcționare normală și supra-încălzire, material polisintetic și lamelă cu memoria formei.



Fig. 5.19. Variația temperaturii în timp pentru MTTP cu extra-fluid acetonă, caz teoretic și experimental, lamelă cu memoria formei.

Graficele obținute în Mathcad păstrează în marea lor majoritate același trend cu cele obținute experimental. Diferențele de temperatură pentru cazul teoretic și experimental nu depășesc  $5 \div 6^{\circ}C$ . Deși diferența de temperatură pare semnificativă aceasta este pusă pe seama proceselor ideale considerate în cazurile teoretice. Putem aprecia că există o bună concordanță între rezultatele obținute în Mathcad și cele din determinările experimentale.

## 5.6. Compararea rezultatelor experimentale cu cele din cercetări similare

Fluxul de căldură aplicat și curgerea lichidului prin stratul capilar interior prezintă importanță pentru răcirea optimă a unui MTTP folosit la micro-procesoare sau în schimbătoare de căldură compacte.

Zuo și Faghri în 1998 [FA14], au dezvoltat un model pentru analiza schimbului de căldură prin tuburi termice atunci când acestea lucrează în regimuri tranzitorii. Modelul propus se bazează pe analogia termo-electrică. Acesta a constat în conceperea unei rețele de rezistențe electrice care prin analogie sunt asimilate ecuațiilor diferențiale asociate regimurilor tranzitorii în schimbul termic. În analiza efectuată pe MTTP, au folosit valori mari ale densității fluxului termic ( $7950 \cdot 10^4 W/m^2$ ) iar ca lichid de lucru s-a considerat apa demineralizată. Zuo și Faghri au comparat valorile prezise cu cele experimentale pentru temperatura vaporilor din interiorul tubului termic.

În figura 5.20 sunt prezentate rezultatele obținute de Zuo și Faghri cât și cele ale autorului. Pentru a putea obține rezultate comparabile s-au utilizat în calcule valori apropiate ale densității fluxului termic cu cele ale lui Zuo și Faghri. S-a considerat că se utilizează ca fluid de lucru apa distilată.



Fig. 5.20. Variația temperaturii vaporilor în MTTP în timp pentru diferite valori ale densității fluxului termic, apă distilată.

Se observă din cele două figuri o alură asemănătoare a curbelor de încălzire și răcire. Diferențele valorice sunt datorate densităților de flux termic utilizate de Zuo și Faghri și autor.

În figura 5.20.-a, este prezentată variația în timp a temperaturii la peretele vaporizatorului și a condensatorului obținute de Zhu și Vafai [ZN98], pentru un MTTP. Ei au comparat creșterea temperaturii de pe cele două zone cu variația temperaturii vaporilor de lichid din interiorul MTTP. Analizând modul de variație a temperaturii în timp se poate observa că în modelul dezvoltat de [SS15] apare o întârziere în creșterea temperaturii în primele 60s fenomen pus pe seama inerției la încălzire a structurii stratului capilar și a peretelui MTTP. După această perioadă de timp se menține ca și la Zhu și Vafai o tendință exponențială de creștere a temperaturii. Alura curbelor de creștere a temperaturii pereților celor două zone, de vaporizare și condensare ale MTTP până la momentul t = 250s, este asemănătoare, semn că urmează o aceeași lege.

# 6. CONTRIBUȚII, CONCLUZII FINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

## 6.1. Introducere

Evoluția componentelor electronice și a gradului de miniaturizare necesită disiparea unor fluxuri de căldură ridicate de pe suprafețe cât mai mici. Valorile actuale extrem de mari ale fluxurilor de căldură în raport cu volumul componentelor, necesită instalații de răcire dedicate. Au fost efectuate cercetări care să arate cum se poate intensifica transferul de căldură astfel încât să se răcească MTTP în cazul supra-încălzirii acestora. În baza studiilor efectuate au fost alese două metode de intensificare a transferului de căldură astfel încât să se asigure răcirea unui device electronic cu ajutorul unui MTTP în cazul apariției supraîncălzirii acestora.

După efectuarea determinărilor experimentale s-au trasat grafice cu evoluția temperaturii în timp pentru MTTP umplute cu diferite lichide de lucru. A fost analizat transferul de căldură pentru funcționarea normală, supra-încălzire și adiție de extra-fluid în vederea răcirii.

Analiza datelor experimentale evidențiază eficacitatea metodelor propuse.

În continuare se prezintă detaliat contribuțiile teoretice și experimentale aduse în vederea asigurării unei răciri eficiente a MTTP când acestea sun supra-încălzite.

# 6.2. Contribuții teoretice

În prima parte a lucrării au fost studiate MTTP dezvoltate până în prezent urmărinduse să se analizeze metodele care asigură răcirea acestora în cazul supra-încălzirii. Din bibliografia analizată a rezultat că nu există metode dedicate răcirii în astfel de situații. Pentru buna funcționare a MTTP în sensul asigurării unei anumite eficiențe au fost dezvoltate, conform literaturii de specialitate studiate, diferite metode care asigură transferul de căldură prin MTTP. Marea majoritate a metodelor dezvoltate pentru răcirea MTTP folosesc un ciclu de funcționare descris în detaliu în primul capitol. Unele tehnici de răcire folosesc adiția de lichid în zona de condensare. În urma studiilor și cercetărilor teoretice efectuate au fost aduse următoarele contribuții:

## Capitolul 1.

- 1. S-a realizat o clasificare a tuburilor termice concepute și realizate până în prezent, după principiul constructiv prezentată în figura 1.7. În figura 1.8 pentru cazul tuburilor termice cu termo-sifonare clasificarea ține seama de intervalul de temperatură al fluidului de lucru. În clasificări au fost inserate metodele propuse pentru răcirea MTTP care asigură răcirea MTTP prin adiție de extra-fluid în zona de vaporizare.
- 2. Structura capilară interioară joacă un rol determinant în asigurarea efectului de capilaritate. În figura 1.9 se regăsește o clasificare care arată categoriile de structuri capilare dezvoltate până în prezent iar în figura 1.10 modul în care se realizează controlul temperaturii la MTTP.
- 3. Folosind literatura de specialitate s-a realizat o sinteză cu principiile de funcționare pentru fiecare zonă componentă a MTTP. Se apreciază că zona de vaporizare are rolul de a prelua căldura din zona de vaporizare și de a transforma faza lichidă în vapori. Zona de condensare asigură cedarea căldurii către mediul ambiant, prin intermediul unui radiator și a unui ventilator. Cele două zone sunt despărțite de o zonă adiabatică în care nu se efectuează schimb de căldură cu mediul.

- 4. S-a făcut o sinteză asupra efectelor alegerii lichidelor de lucru cât și a metalelor din care pot fi confecționate tuburile termice. Au fost făcute aprecieri asupra domeniului de temperaturi la care funcționează MTTP iar în figura 1.11 s-a prezentat structura acestora.
- 5. Studiile teoretice efectuate asupra analizei funcționalității structurilor capilare interioare în dependență de lichidele de lucru arată că acestea sunt interdependente cu tehnologiile de fabricație.
- 6. Au fost aduse contribuții asupra a două metode prin care se pot obține structuri capilare interioare de tipul celor sinterizate și a micro-canalelor interioare.

# Capitolul 2.

- 1. Pornind de la brevetul de invenție [MI14] s-a propus realizarea unui MTTP semiactiv cu extra-fluid care să asigure transferul de căldură de la capătul cald către capătul opus printr-un fenomen de intensificare a transferului de căldură cu scopul răcirii unui MTTP printr-un fenomen convectiv rapid.
- 2. MTTP semi-activ cu extra-fluid, descris în figura 2.1 este constituit dintr-un corp tubular plat de cupru care este vidat și etanșat la capete în interiorul căruia s-au amplasat alte trei tuburi plate. Primul tub plat amplasat sub carcasa, este confecționat din material polisintetic cu capacitate mare de stocare a lichidului de lucru, al doilea este dintr-un material cu memoria formei care-l presează pe primul iar cel de-al treilea asigură circulația vaporilor prin miezul MTTP. Stratul capilar interior este format din micro-canale trapezoidale dispuse longitudinal pe peretele interior al MTTP.
- 3. Funcționarea MTTP semi-activ cu extra-fluid se bazează pe realizarea unui proces de răcire prin intermediul unui agent termic într-o cavitate vidată, cu punct de vaporizare scăzut, care trece printr-o succesiune de transformări termodinamice, agentul fiind înmagazinat în exces dar utilizat optim prin intermediul unui material cu memoria formei.
- 4. Dispozitivul semi-activ propus în figura 2.2-a,b are la bază un material cu memoria formei. Acesta se va deforma în intervalul de temperatură  $65 \div 85^{\circ}C$ , moment în care va presa materialului polisintetic îmbibat cu extra-fluid. Prin concepție forța de presare va fi în dependență de temperatura sursei de căldură deci materialul polisintetic va elibera optim extra-fluid doar în cazul supra-încălzirii componentelor electronice.
- 5. S-a constatat că lichidul de lucru este totdeauna ales astfel încât în funcție de domeniul de utilizare să aibă un punct de vaporizare cât mai scăzut. Pentru a asigura eficiența vaporizării și condensării, micro-tuburile termice sunt vidate la valori prestabilite. S-a constatat că existența unor cantități prea mici sau prea mari de lichid de lucru pot conduce la disfuncționalități ale micro-tuburilor termice plate.
- 6. În figurile 2.3, 2.4 a fost propusă o a doua metodă pentru adiția de extra-fluid în zona de vaporizare a MTTP, care să se realizeze prin injecție de fluid de lucru dintrun mini-rezervor exterior controlat electronic. Contribuțiile aduse urmăresc ca injectarea de extra-fluid să se realizeze în momentul în care MTTP este blocat termic datorită aplicării unui flux de încălzire prea mare în zona de vaporizare. S-a definit blocajul termic ca fiind un MTTP la care nu se mai realizează transportul de căldură dinspre vaporizator spre condensator.
- 7. Au fost efectuate studii asupra stratul capilar interior (figura 2.5) arătându-se că acesta se alege în așa fel încât să permită curgerea lichidului acumulat în condensator spre vaporizator. Au fost trasate condițiile care trebuiesc îndeplinite de către lichidul de lucru în interiorul unui MTTP. Pentru buna funcționare a unui

MTTP curgerea trebuie să decurgă fără întrerupere independent de forțele de frecare sau de variația presiunii capilare interioare.

- 8. Analiza comportării structurilor sinterizate realizate din micro-sfere de cupru folosite în realizarea straturilor capilare interioare (figura 2.5), arată că presiunea capilară este mai ridicată decât în cazul structurilor canelate sau a celor cu micro-canale de diferite profile.
- 9. Pornind de la cele două idei expuse, s-au studiat proprietățile materialelor care alcătuiesc MTTP. În acest sens se apreciază că este recomandat să se utilizeze cupru obținut pe cale electrochimică, cu puritate înaltă și un nivel scăzut de reziduuri din fosfor, fără conținut de oxigen.
- 10. Au fost aduse contribuții (figura 2.6) conform cărora în cazul structurilor capilare interioare compuse, realizarea MTTP să conțină în interior micro-canale trapezoidale iar în zona de vaporizare să se depună suplimentar un strat capilar sinterizat realizat din micro-sfere de cupru.
- 11. Studiile efectuate asupra MTTP arată că un alt criteriu în alegerea stratului capilar interior este posibilitatea acestuia de a distribui uniform lichidul de lucru în zona de vaporizare și cea a compatibilității acestuia cu umectabilitatea lichidului de lucru.
- 12. S-au analizat factorii constructivi care asigură deplasarea lichidului de lucru. S-a constatat că se asigură o pompare a lichidului de lucru împotriva gravitației la straturi capilare care au dimensiunea porilor cuprinsă între  $30 \div 80 \mu m$  iar dacă nu trebuie să învingă forța gravitațională aceștia au între  $80 \div 150 \mu m$ .
- 13. Au fost făcute propuneri de alegere a materialelor polisintetice folosite pentru realizarea micro-rezervorului interior cu extra-fluid. S-a apreciat că materialul ales trebuie să asigure un grad de porozitate cât mai mare pentru a se reține în interiorul porilor o cantitate cât mai mare de lichid.
- 14. Analizele asupra alegerii materialelor, conform studiilor efectuate, trebuie să țină seama de domeniul temperaturii în care lucrează MTTP. Materialul trebuie astfel ales încât la temperatura de vaporizare a lichidelor de lucru, acesta să nu-și modifice proprietățile fizice. De asemenea modificarea proprietăților fizice ale materialelor solide nu trebuie să se producă la interacțiunea cu lichidele de lucru folosite.
- 15. Absorbția de lichid realizată în interiorul porilor materialului polisintetic, produce o mărire a dimensiunii acestora și implicit o creștere a razei capilare.
- 16. S-a considerat oportun să fie studiate diferite regimuri de funcționare pentru MTTP. Acestea iau în considerare regimurile de tip tranzitoriu sau staționar considerând că există sau nu un proces de răcire la condensator. În afara cazului în care MTTP funcționează normal s-a propus efectuarea unor studii pentru un proces de supraîncălzire și răcire prin adiție de extra-fluid.

# Capitolul 3.

- 1. Au fost dezvoltate în Mathcad mai multe modele matematice pentru determinarea debitului masic al vaporilor din vaporizator, a densității fluxului termic funcție de viteza axială a vaporilor de lichid și a căldurii latente de vaporizare, a variației coeficientului de frecare a vaporilor în dependență de creșterea temperaturii din zona de vaporizare.
- 2. Pentru determinarea corectă a parametrilor transferului de căldură în MTTP s-a ținut seama de caracterul curgerii, calculându-se în Mathcad invarianții Poiseuille, Reynolds, Nusselt, etc., vitezele de curgere ale lichidului și vaporilor prin micro-canalele trapezoidale și prin straturile sinterizate.
- 3. Pentru a cunoaște capacitatea de transport a unui MTTP care indică în mod direct fluxul termic maxim ce poate fi aplicat pe acesta, s-a dezvoltat un cod în Mathcad care

ține seama și de faptul că este necesar să se producă o vaporizare constantă a lichidului din vaporizator.

- 4. În vederea efectuării calculelor au fost efectuate măsurători preliminare prin profilometrie laser care au permis cunoașterea următoarelor valori geometrice ale micro-canalelor trapezoidale ale MTTP: lățimea bazei mici a părții trapezoidale solide  $b=0,200\cdot10^{-3}m$ , lățimea bazei mari a părții trapezoidale solide  $B=0,270\cdot10^{-3}m$ , înălțimea  $\delta_1=0,275\cdot10^{-3}m$ , lungimile vaporizatorului  $L_{va}=30\cdot10^{-3}m$ , zonei adiabatice  $L_{adb}=80\cdot10^{-3}m$  respectiv a condensatorului  $L_{co}=40\cdot10^{-3}m$ .
- 5. Au fost dezvoltate modele matematice în Mathcad cu ajutorul cărora s-a determinat raza capilară pentru diverse valori ale unghiului  $\theta$  de înclinare a pereților și s-a determinat că aceasta poate lua valorile:  $r_{cpl} = 3,48 \cdot 10^{-4} \div 9 \cdot 10^{-4}m$ . Din același cod s-a determinat suprafața totală a micro-canalelor trapezoidale prin care are loc schimbul de căldură ca fiind  $A_{mc} = 9,454 \cdot 10^{-4}m^2$ .
- Au fost aduse contribuții în determinarea variației fluxului termic maxim posibil a fi 6. aplicat unui MTTP în funcție de raza capilară pentru MTTP care folosesc ca lichid de lucru apa distilată. Dacă acest flux termic este depășit apare blocarea funcțională datorată supraîncălzirii. S-a determinat prin calcule că la  $T=60^{\circ}C$  fluxul termic maxim aplicat este  $\dot{Q}_{va,max}=114,37W$ , pentru o valoare a razei capilare de 3,48.10<sup>-4</sup>m; iar la  $T=120^{\circ}C$  la o aceeași valoare a razei capilare s-a obținut  $\dot{Q}_{va,max}=106,62W$ . Odată cu creșterea temperaturii se observă o scădere a fluxului termic maxim cu 7,75W, reprezentând o scădere de 7,5%. Diminuarea se explică pe seama reducerii grosimii de film condensat care se diminuează odată cu cresterea temperaturii. Pentru lichidele de lucru metanol și acetonă la o aceeași rază capilară s-a obținut: metanol la  $T=60^{\circ}C$ fluxul maxim  $Q_{va,max}=60,24W$  iar pentru acetonă  $Q_{va,max}=21,27W$  iar la  $T=120^{\circ}C$ pentru metanol  $\dot{Q}_{va,max}=44,43W$  iar pentru acetonă  $\dot{Q}_{va,max}=19,12W$ . Pentru metanol scăderea fluxului termic maxim odată cu creșterea temperaturii este de 38,97W care corespunde unei scăderi de 65,4%, iar pentru acetonă 25,31W care corespunde unei diminuări de 57,7%. Explicația diminuării mai pronunțate a fluxului maxim la aceste două lichide se explică pe seama volatilității mult mai ridicate.
- 7. S-au adus contribuții la implementarea în Mathcad a unui cod care să determine diferența de temperatură din peretele vaporizatorului față de temperatura sursei calde pentru fluxuri termice cuprinse între 10.40W la grosimi ale peretelui care se modifică între  $0.1.6.10^{-4}m$ . Rezultatele obținute arată că într-un interval de timp de 120sliniile frontului câmpului termic străbat *întreaga grosime a peretelui vaporizatorului*, diferența de temperatură fiind de  $3.32^{\circ}C$  pentru 10W și de  $11.2^{\circ}C$  pentru 40W. Se remarcă imediat că la fluxuri termice mari căderea de temperatură devine considerabilă. Diferența de temperatură prin perete și nervurile micro-canalului sunt: la  $10W \rightarrow \Delta T=2.981^{\circ}C$ ;  $20W \rightarrow \Delta T=8.094^{\circ}C$ ;  $30W \rightarrow \Delta T= 13.73^{\circ}C$  și la  $40W \rightarrow \Delta T=20.417^{\circ}C$ .
- 8. A fost dezvoltat un model de calcul a transferului de căldură prin medii poroase polisintetice, care a permis determinarea coeficientului de transmitere a căldurii convectiv, pentru diametrul porilor materialului  $d_{por} = 0,050 \cdot 10^{-3} \div 0,105 \cdot 10^{-3}m$  și un grad de porozitate  $\varepsilon_{pls} = 45\%$ . Variația coeficientului de transmitere a căldurii convectiv a luat în considerare numărul Reynolds, obținându-se pentru acesta cea mai mare valoare la un diametru al porilor  $d_{por} = 0,105 \cdot 10^{-3}m$  (figura 3.11).
- 9. S-au adus contribuții la intensificarea transferului de căldură în vederea răcirii MTTP prin adiție de lichid, prin calcularea grosimii filmului de lichid în zona de vaporizare și condensare din micro-canalele trapezoidale. Modelele dezvoltate în Mathcad au arătat că în zona de vaporizare grosimea maximă a filmului de lichid este  $\delta_{f,lic,va} = 1,459 \cdot 10^{-4} m$  iar în zona de condensare  $\delta_{f,lic,co} = 1,95 \cdot 10^{-4} m$ . Utilizând rezultatele

obținute s-a trasat figura 3.13-a.b. În baza acesteia s-a făcut o analiză a modului în care se modifică grosimea filmului de lichid  $\delta_{f.lic.va}$  și  $\delta_{f.lic.co}$  în micro-canale în dependență de gradul de încălzire și lungimea străbătută de lichid în zona de vaporizare și de condensare.

- 10. Prin calcule s-a obținut modificarea fluxului termic în dependență de căderea de temperatură disipată în zonele de vaporizare și condensare. Valoarea fluxului termic ce străbate zona de vaporizare a MTTP nu depășește 45,916W, iar valoarea densității de flux termic din zona de vaporizare este de maxim  $1,709 \cdot 10^5 W/m^2$ .
- 11. Au fost aduse contribuții privind *modelarea* intensificării transferului de căldură la adiția de lichid. În acest sens s-a creat în Mathcad un cod sursă care permite introducerea unor constante care iau în considerare condițiile la limită impuse, regimul de curgere, temperaturile din sistemul modelat, proprietățile termo-fizice sau termochimice ale materialelor ce compun structura MTTP
- 12. În Matlab s-a modelat intensificarea transferului de căldură în vederea răcirii MTTP la adiția de extra-fluid, pentru un flux termic de intrare de 20W, în condițiile de funcționare: supra-încălzire, funcționare normală și supra-încălzire, supra-încălzire urmată de adiția de extra-fluid și funcționare normală și supra-încălzire urmată de adiția de extra-fluid.
- 13. Prin metoda de calcul Crank-Nicolson s-a modelat în Matlab pentru un MTTP evoluția formării vaporilor în timp cât și vizualizarea curgerii lichidului prin stratul capilar.

# Capitolele 4 și 5.

# 6.3. Contribuții experimentale

Pornind de la tema de cercetare aleasă s-au adus contribuții în conceperea unor microtuburi termice plate care să permită adăugarea de extra-fluid în vederea răcirii acestora atunci când se supraîncălzesc. Acestea au fost concepute pentru analiza comportării MTTP când sunt utilizate cele două metode destinate intensificării transferului de căldură.

Au fost aduse contribuții în conceperea și realizarea unui stand experimental care să permită efectuarea de măsurători destinate testării MTTP. Standul permite monitorizarea variației temperaturii peretelui exterior în timp pe întreaga lungime a unui MTTP cu scopul studierii intensificării transferului de căldură. Contribuțiile experimentale aduse au constat în:

- Realizarea a două tipuri de MTTP, unul cu rezervor de extrafluid confecționat din material polisintetic acționat de o lamelă de metal cu memoria formei şi altul căruia i s-a ataşat un micro-rezervor extern pentru injectarea de extra-fluid în zona de vaporizare.
- 2. Construirea unui termometru electronic cu opt canale de măsurare cu posibilitatea stocării valorilor temperaturii măsurate și transferării datelor pe un PC.
- 3. Scanarea straturilor capilare și vizualizarea acestora prin profilometrie cu laser folosind echipamentul µScan și microscopul MOTIC SZM-168.
- 4. Confecționarea stratului capilar sinterizat confecționat din pilitură de cupru și analiza acestuia prin profilometrie cu laser stabilindu-se că lățimea golurilor variază între  $305,1\mu m$  și  $850,5\mu m$  iar adâncimea între  $140\mu m$  și  $350\mu m$ . După introducerea piliturii de cupru în soluție de clorură ferică dimensiunile micro-sferelor s-au redus la valori cuprinse între  $46\mu m$  și  $188\mu m$ . Stratul capilar sinterizat obținut indică la o nouă scanare că valorile golurilor se situează între  $75,1\mu m$  și  $305,1\mu m$  existând o scădere vizibilă față de cazul precedent.
- 5. Realizarea și studierea unui al doilea strat capilar realizat din micro-canale trapezoidale dispuse longitudinal pe suprafața interioară a MTTP prin profilometrie

laser. Valorile medii măsurate pentru micro-canalele trapezoidale au arătat că baza mare este de 274,  $1\mu m$ , baza mică de 239,  $2\mu m$  și înălțimea de 159,  $628\mu m$ .

- 6. Efectuarea unor măsurători pentru materialul polisintetic folosit la crearea microrezervorului cu exces de lichid. Când acesta nu este umectat dimensiunile incluziunilor sunt cuprinse între  $26\mu m$  și  $86\mu m$  iar în stare umectată valorile măsurate sunt cuprinse între  $-283.659\mu m$  și  $+282.955\mu m$ , la o abatere medie standard de  $91,093\mu m$ . Se remarcă creșterea semnificativă a dimensiunii incluziunilor atunci când se adaugă lichid.
- 7. Au fost aduse contribuții experimentale prin folosirea profilometriei laser cu scopul de a determina forma și dimensiunile micro-canalelor, modul de aranjare a grăunților din cupru în stratul capilar sinterizat cât și a dimensiunilor acestora. Pentru micro-canalele trapezoidale și stratul sinterizat din cupru s-au obținut valorile:
  - adâncimea micro-canalelor este cuprinsă între 210,726μm și 227,205μm iar lățimea profilului micro-canalelor între 176,8μm și 324,1μm.
  - pentru micro-canalele cu lichid s-au obținut valori pentru unghiul de înclinare a pereților cuprinse între  $36,86^{\circ}C$  și  $40,36^{\circ}C$  și adâncimi ale micro-canalelor cuprinse între  $166,218\mu m$  și  $169,806\mu m$ .
  - materialului polisintetic folosit la realizarea rezervorului cu exces de lichid are pentru intruziuni pline cu lichid valori cuprinse între  $-283.659\mu m$  și  $282.955\mu m$ , cu o medie de  $9,402\mu m$  și o abatere medie standard de  $91,093\mu m$ .
- 8. Standul experimental conceput și realizat, asigură în funcție de tensiunea prescrisă și curentul absorbit, fluxuri termice variabile până la maxim 47W, necesare încălzirii zonei de vaporizare.

Au fost concepute seturi de teste care au vizat obținerea datelor experimentale într-o succesiune logică care să acopere mare parte din problematica răcirii MTTP. Au fost obținute (estimativ) pese 292 mii valori măsurate. Pentru MTTP care utilizează diferite lichide de lucru au fost efectuate măsurători ale parametrilor la *funcționarea normală* la un flux termic de 20W. Zona de condensare este răcită prin insuflare de aer provenit de la un ventilator.

În continuare, funcție de lichidul de lucru sunt precizați parametrii care caracterizează regimul funcțional:

- MTTP cu lichid de lucru acetonă timpul total în care s-a atins regimul de stabilizare funcțională a MTTP este de *320s*; valoarea maximă a temperaturii pe blocul de încălzire (heater) este de *58,12°C*, în zona de vaporizare s-a măsurat o temperatură de *54,42°C* și o valoare minimă de *39,72°C* în zona de condensare 2.
- MTTP cu lichid de lucru metanol timpul total în care s-a atins regimul de stabilizare funcțională a MTTP este de 415s; valoarea maximă a temperaturii pe blocul de încălzire (heater) este de  $67,23^{\circ}C$ , în zona de vaporizare s-a măsurat o temperatură de  $60,89^{\circ}C$  și o valoare minimă de  $46,78^{\circ}C$  în zona de condensare 2.
- MTTP cu lichid de lucru apă distilată timpul total în care s-a atins regimul de stabilizare funcțională a MTTP este de *306*s; valoarea maximă a temperaturii pe blocul de încălzire (heater) este de *67,11°C*, în zona de vaporizare s-a măsurat o temperatură de *58,25°C* și o valoare minimă de *48,72°C* în zona de condensare 2.

Prin *utilizarea extra-fluidului* pentru răcirea MTTP obținut prin presarea unui material polisintetic de un material cu memoria formei, s-au determinat experimental, pentru diferite regimuri termice.

9. Determinările experimentale realizate pe MTTP cu strat capilar realizat din micro-canale trapezoidale și strat sinterizat din cupru, cu sistem de răcire prin adiție de lichid din micro-rezervor polisintetic acționat de o lamelă de metal cu

memoria formei și injecție directă, au pus în evidență că temperaturile scad în toate zonele, după adiția de extra-fluid.

- 10. Monitorizarea câmpului de temperatură folosind camere cu infraroșu au arătat că temperaturile măsurate scot în evidență fenomenul de răcire a MTTP existând o bună concordanță cu rezultatele obținute teoretic și cu datele experimentale.
- 11. Au fost comparate rezultatele obținute analitic cu cele din determinările experimentale, constatându-se că între acestea nu există diferențe de temperatură care depășesc  $5 \div 6^{\circ}C$ . Aceste diferențe sunt puse pe seama faptului că în cazurile teoretice procesele sunt considerate ideale.
- 12. Compararea rezultatelor analitice și experimentale obținute de autor cu cele din alte cercetări similare în domeniu, au arătat o bună concordanță, ne-existând diferențe valorice semnificative sau abateri de la formă a curbelor graficelor.

# 6.4. Concluzii finale

Studiile efectuate, modelele matematice dezvoltate și datele obținute din rezultatele experimentale permit formularea concluziilor finale. Filmările efectuate cu ajutorul microscopului MOTIC SZM-168 asupra micro-canalelor trapezoidale fără și cu strat sinterizat din micro-sfere de cupru, au evidențiat:

- deplasarea lichidului în micro-canale,
- deplasarea lichidului în stratul sinterizat,
- evidențierea convecției monofazice,
- vaporizarea picăturilor dispersate,
- convecție prin filmul de lichid și fierbere,
- fierbere nucleică în toată masa de fluid,
- fierbere nucleică numai lângă perete,
- apariția primelor bule de vapori la suprafața micro-canalelor,
- În figurile care urmează pot fi urmărite etapele procesului de vaporizare.

În figura 6.1 poate fi vizualizată deplasarea lichidului (dreapta) în micro-canalele trapezoidale din zona de vaporizare.



Fig. 6.1. Vizualizarea deplasării lichidului în micro-canalele trapezoidale.

Bulele de vapori se formează inițial conform figurii 6.2 la peretele micro-canalelor.



Fig. 6.2. Formarea bulelor de vapori în micro-canalele trapezoidale.

Din figura 6.3 rezultă că în zona de vaporizare a MTTP continuă procesul de formare a bulelor de vapori.



Fig. 6.3. Continuarea formării bulelor de vapori în micro-canalele trapezoidale.

În zona de vaporizare continuă procesul de vaporizare, putând fi observat debutul convecției monofazice.



Fig. 6.4. Apariția fenomenului de convecție monofazică în micro-canalele trapezoidale.

Pentru o structură capilară compusă din micro-canale trapezoidale (dreapta) și micro-sfere de cupru, în figura 6.5 se poate distinge formarea primară a bulelor de vapori și începutul fierberii nucleice în toată masa de lichid.



Fig. 6.5. Formare bulelor de vapori și fierberea nucleică într-un strat capilar compus.

În figura 6.6 este prezentată dezvoltarea fierberii nucleice în întreaga zonă de vaporizare, evidențiindu-se convecția în filmul de lichid.



Fig. 6.6. Dezvoltarea fierberii nucleice și apariția convecției în filmul de lichid într-un strat capilar compus.

Finalizarea procesului de vaporizare din figura 6.7, arată deplasarea vaporilor în zona de vaporizare a MTTP.



Fig. 6.7. Deplasarea vaporilor într-un strat capilar compus.

Durata procesului de vaporizare depinde de:

- lichidul de lucru utilizat,

- nivelul de vacuum creat,
- alcătuirea structurii capilare interioare,
- materialul din care este confecționat peretele MTTP,
- fluxul termic transmis către MTTP,
- suprafața de contact cu sursa caldă,
- existența micro-canalelor interioare,
- forma micro-canalelor interioare,
- prezența sau absența gravitației.

Fiecare proces termodinamic influențează buna funcționare a MTTP acestea diferind pentru fiecare zonă. În baza rezultatelor experimentale obținute s-au formulat următoarele concluzii finale:

#### Zona de vaporizare:

S-a constatat că imediat după pornirea blocului de încălzire temperatura în zona de vaporizare începe să crească în maxim 10s. Acest lucru arată că nu există o inerție termică semnificativă la încălzire. În funcție de lichidul folosit, temperatura măsurată în zona de vaporizare diferă pentru fiecare caz. S-a constat că pentru lichidele ușor volatile ca acetona și metanolul, temperatura maximă la stabilizarea regimului termic este atinsă într-un timp mai mic decât în cazul apei distilate. Explicația constă în valorile mai scăzute ale căldurii latente de vaporizare și a punctului de fierbere.

Pentru MTTP cu funcționare normală la care s-a aplicat un flux termic în zona de vaporizare și răcirea zonei de condensare cu ventilatorul pornit s-au obținut conform tabelului 6.4 următoarele rezultate:

Capilaritate interioară		Temperaturi maxime
MTTP cu		regim stabilizat [°C]
micro-canale		Vaporizare 1
	Acetonă	54,42
Lichid	(figura 5.19)	
de	Metanol	60,89
lucru	(figura 5.20)	
	Apă distilată	58,25
	(figura 5.21)	

Tab. 6.1. Sinteză rezultate experimentale MTTP în funcționare normală.

Analizând rezultate experimentale din tabelul 6.4, se constată că temperatura măsurată în punctul *vaporizator 1*, pentru MTTP cu lichidele de lucru acetonă și metanol, atinge punctul de fierbere a acestora. Pentru apă distilată folosită ca lichid de lucru, temperatura măsurată în punctul *vaporizator 1* este de numai 58,25°C, valoare mult mai scăzută față de punctul de fierbere. Se poate spune că în cazul lichidelor ușor volatile folosite ca lichide de lucru în MTTP, transportul de căldură realizat prin deplasarea vaporilor este inferior față de cazul lichidelor a căror punct de fierbere este mai ridicat.

În cazul unui MTTP cu micro-canale care folosește ca metodă de răcire în zona de vaporizare adiția de lichid dintr-un material polisintetic presat de o lamelă de metal cu memoria formei, temperaturile măsurate la supra-încălzire în zona *vaporizare 1* sunt sintetizate în tabelul 6.5. Temperaturile maxime au fost măsurate până în momentul în care s-a produs eliberarea de extra-fluid.

	$\cdots$
Capilaritate interioară	Temperaturi maxime
MTTP cu micro-canale,	supra-încălzire [°C]
material polisintetic și lamelă cu	Vaporizare 1
memoria formei	

Tab. 6.2. Sinteză rezultate experimentale MTTP, la supra-încălzire.

	Acetonă	79,62
Lichid	(figura 5.23)	
de	Metanol	73,86
lucru	(figura 5.26)	
	Apă distilată	85,79
	(figura 5.29)	

Din rezultatele experimentale obținute și prezentate în tabelul 6.5, se poate observa că la o supra-încălzire a lichidelor de lucru ușor volatile din MTTP, temperaturile măsurate depășesc punctul de fierbere. În vaporizator există în acest caz o cantitate prea mare de vapori și foarte puțin lichid (sau deloc). Blocarea MTTP în acest caz este iminentă chiar dacă fluxul termic aplicat este unul constant. La supra-încălzirea MTTP cu apă distilată, temperatura nu reușește să atingă punctul de fierbere. În acest caz, se produc vapori în continuare dacă fluxul termic aplicat vaporizatorului nu suportă creșteri semnificative – condensatorul MTTP este răcit constant.

Temperaturile măsurate la *vaporizator 1* prezentate în tabelul 6.6, indică pentru regimul de supra-încălzire, valori apropiate regimului stabilizat prezentate în tabelul 6.5.

Capilaritate interioară		Temperaturi maxime	Temperaturi maxime
MTTP cu micro-canale,		regim stabilizat [°C]	supra-încălzire [°C]
material polisintetic și lamelă cu		Vaporizare 1	Vaporizare 1
memoria formei			
	Acetonă	56,29	69,83
Lichid	(figura 5.24)		
de	Metanol	60,21	71,14
lucru	(figura 5.27)		
	Apă distilată	62,17	82,31
	(figura 5.30)		

Tab. 6.3. Sinteză rezultate experimentale pentru MTTP cu funcționare normală și supra-încălzire

Valorile de temperatură măsurate pentru metanol și apă distilată în cazul regimului de supra-încălzire prezentat în tabelele 6.5-6.6, stabilește că diferența dintre acestea nu este mai mare de  $2^{\circ}C$ . În cazul acetonei se constată o diferență de  $9,79^{\circ}C$  între valorile măsurate, ceea ce conduce la concluzia că odată depășit punctul de fierbere răcirea zonei de vaporizare nu se mai poate face cu condensul format în condensator, fiind necesar un aport suplimentar de lichid.

În tabelul 6.7 au fost sintetizate rezultatele determinărilor experimentale pentru MTTP cu SCSC folosind ca metodă de răcire a zonei de vaporizare adiția de lichid un mini-cilindru cu piston în regim normal și la supra-încălzire.

 Tab. 6.4. Sinteză rezultate experimentale pentru MTTP cu injecție de lichid, funcționare normală și supraîncălzire.

Capilaritate interioară		Temperaturi maxime	Temperaturi maxime
MTTP cu strat capilar sinterizat		regim stabilizat [°C]	supra-încălzire [°C]
și injecție de extra-fluid.		Vaporizare 1	Vaporizare 1
	Acetonă	48,28	57,83
Lichid	(figura 5.34)		
de	Metanol	55,21	69,33
lucru	(figura 5.37)		
	Apă distilată	59,17	80,31
	(figura 5.40)		

Determinările experimentale efectuate pentru un MTTP cu SCSC și mini-rezervor pentru adiția de lichid, în funcționare normală, a pus în evidență că valorile temperaturilor măsurate pentru lichidele de lucru acetonă, metanol și apă distilată sunt sub punctul de fierbere. În funcționarea MTTP la supra-încălzire, la acetonă a apărut o diferență de temperatură de  $12^{\circ}C$ . Acest fapt arată că și acetona, ca lichid de lucru, asigură un transport de căldură eficient dacă este folosit un MTTP cu SCSC.

Pentru celelalte lichide de lucru diferențele de temperatură măsurate conform tabelelor 6.6 și 6.7 au fost de până în  $2^{\circ}C$ .

Determinările experimentale efectuate și analiza datelor obținute arată că la MTTP care utilizează ca lichide de lucru metanol și acetonă, stratul capilar sinterizat din zona vaporizatorului, prezintă importanță (din punct de vedere a structurii interne) în timp ce pentru apa distilată capacitatea de transport nu este semnificativ afectată. Totuși chiar și pentru apă distilată este necesar să se asigure capilaritatea necesară asigurării deplasării lichidului.

## Zona adiabatică:

Zona adiabatică așa după cum indică denumirea este caracterizată de lipsa schimbului de căldură dintre vaporii din interiorul MTTP și pereții acestuia cât și dintre pereți și mediul exterior. Acest lucru se explică prin lipsa unui flux termic perpendicular pe pereții MTTP, fenomen explicat pe seama vitezei de deplasare a vaporilor (extrem de rapidă). Conform unui cod realizat în Mathcad [SS14] viteza de deplasare a vaporilor este apropiată în unele cazuri de limita sonică valori confirmate și de [NP07]. Deși cantitatea de căldură schimbată este nulă – transformare adiabatică – pot exista modificări ale valorii temperaturii în zonă, întrucât nu vorbim de o transformare izotermică. La atingerea pragului critic conform datelor din tabelul 5.2 valorile temperaturii din zona adiabatică la Ch4 și Ch5 sunt de  $44,9^{\circ}C$  respectiv  $40,61^{\circ}C$  pentru ca după pornirea ventilatorului în zona de condensare și stabilizarea regimului de funcționare acestea să fie de  $34,8^{\circ}C$  respectiv  $34,7^{\circ}C$ . În mod evident ultimele două valori sunt apropiate valoric, fapt ce confirmă un schimb de căldură aproape nul.

## Zona de condensare:

Durata procesului de condensare și cantitatea de condens obținută depind de:

- regimul de lucru al vaporizatorului,
- gradul de capilaritate asigurat,
- natura fluidului de lucru,
- debitul de aer vehiculat de ventilator,
- starea pornit/oprit a ventilatorului,
- suprafața efectivă utilă totală a radiatorului,
- alcătuirea structurii capilare interioare a MTTP,
- materialul din care este confecționat peretele MTTP.

Principala caracteristică a zonei de condensare este aceea de a ceda spre mediul ambiant căldura transportată de vapori prin MTTP. Totodată prin condensarea vaporilor în condensator se asigură fluxul de lichid necesar funcționării zonei de vaporizare.

Temperaturile înregistrate de termocuplurile amplasate pe zona de condensare au fost după *10s* (la începutul încălzirii) de 26,43°C la Ch6, 27,83°C *la* Ch7 și de 25,31°C la Ch8. În intervalul de timp în care nu este pornit ventilatorul condensatorului, se observă că în zona de condensare temperaturile înregistrate nu au crescut foarte mult. Acestea au ajuns după *250s* până la 36,95°C la Ch6, 34,36°C *la* Ch7 și 28,25°C la Ch8, constatându-se că în zona de condensare există o creștere a temperaturii de maxim 10,52°C în timp ce blocul de încălzire asigură o creștere de 17,51°C.

Datele experimentale din tabelul 5.2 și graficele din figura 5.17 permit studiul efectului intensificării transferului de căldură prin MTTP cu punerea în evidență a cazului când tubul termic se blochează funcțional.

Determinările experimentale au dovedit că la blocarea funcțională nu se mai asigură răcirea MTTP, datorită lipsei unui transport de căldură între condensator și vaporizator (diferență de temperatură prea mică). Acest fenomen are la bază și faptul că vaporii produși sunt cantitativ atât de puțini încât nu se poate genera lichid prin condensare. Acest lucru se evită prin pornirea ventilatorului pe zona de condensare.

Ventilatorul de răcire din zona de condensare (figura 5.17) are rolul de a intensifica transferul de căldură între condensator și vaporizator lucru sesizabil din modificarea valorilor temperaturii. Un ventilatorul de răcire ne-funcțional conduce la supra-încălzirea MTTP.

Se apreciază că anumite lichide de lucru (acetona ș.a.) care ajung în starea de vapori la temperaturi apropiate de cea a mediului ambiant, asigură un transport parțial al căldurii, datorită masei foarte mici a vaporilor. În acest caz, vaporii ajunși la condensator nu pot condensa total dacă acesta se găsește la temperaturi apropiate de cele ambientale, starea de vapori persistând și datorită presiunii interioare scăzute. Condensul format în acest caz nu mai asigură umplerea totală (plină) a micro-canalelor structurii capilare, caz în care deplasarea acestuia către zona de vaporizare nu mai este deplină.

## Pornirea ventilatorului de răcire a zonei de condensare:

Au fost aduse contribuții în efectuarea determinărilor experimentale acționând asupra regimului de funcționare a ventilatorului destinat răcirii zonei de condensare.

Dacă ventilatorul este pornit apare o scădere a temperaturii în zona de condensare (capătul rece al MTTP) care poate fi explicată prin intensificarea transferului de căldură convectiv către mediul ambiant (radiator plus ventilator) și prin creșterea condensului acumulat datorat răcirii zonei.

Oprirea ventilatorului poate fi făcută din start sau după atingerea și stabilizarea regimului nominal. Ca și în cazul funcționării normale regimul de lucru al ventilatorului influențează inerția termică a MTTP conducând la întârzieri cuprinse între  $10 \div 40s$  în creșterea temperaturii. Efectul vădit al opririi ventilatorului o constituie supra-încălzirea rapidă a MTTP în zona de vaporizare și condensare.

#### Valorile maxime ale temperaturii:

În funcție de valoarea cea mai ridicată a temperaturii atinsă de blocul de încălzire, se modifică și temperatura în zona de vaporizare, cea adiabatică și de condensare a MTTP. Pornind de la valoarea maximă a temperaturii blocului de încălzire de  $96,25^{\circ}C$  s-a atins după 250s în zona de vaporizare, la Ch2 temperatura maximă de  $85,16^{\circ}C$ , la Ch4 zona adiabatică  $81,92^{\circ}C$  iar în zona de condensare la Ch6 o valoare de  $76,49^{\circ}C$ .

## Valorile minime ale temperaturii:

Cele mai scăzute valori ale temperaturii sunt cele înregistrate pentru toate canalele Ch1÷Ch8, după stabilizarea regimului termic. Astfel la Ch1 ce corespunde blocului de încălzire temperatura este de 58,12°C, în zona de vaporizare temperatura minimă este înregistrată de Ch2 ca fiind 54,42°C respectiv în zona de condensare la Ch7 se ating 39,72°C. Temperatura este minimă în partea centrală a zonei de condensare întrucât la o extremitate este zona adiabatică (mai caldă) iar în cealaltă mediul ambiant.

## 6.5. Direcții de cercetare

În cazul micro-tuburilor termice plate care folosesc ca metode de intensificare a transferului de căldură excesul de lichid, se impun următoarele direcții de cercetare:

1. Realizarea unui dispozitiv care să permită injectarea acetonei ca lichid de lucru în zona de vaporizare prin pulverizare, nu prin picurare.

- 2. Presarea micro-rezervorului interior din material polisintetic folosit ca rezervă de extra-fluid să se realizeze prin intermediul unui material piezoelectric.
- 3. Realizarea unui dispozitiv electronic pentru comanda unei electro-valve care printr-o deschidere controlată să permită introducerea unei cantități prestabilite de lichid de lucru pe zona de vaporizare.
- 4. Realizarea unui micro-tub termic plat cu mini-cilindrii montați pe ambele zone (vaporizare, condensare), care să permită injectarea de extrafluid pe vaporizator şi modificarea presiunii interioare prin scoaterea unei cantități de vapori în timpul transferului de căldură.
- 5. Realizarea unui dispozitiv de producere și transmitere a căldurii prin tuburi termice cu ajutorul curenților Foucault și efect Joule.
- 6. Realizarea unui dispozitiv pentru recuperarea excesului de lichid și eliberarea acestuia numai în situațiile când micro-tubul termic plat lucrează cu temperaturi critice.

## BIBLIOGRAFIE

- [AC\*\*] <u>https://www.1-act.com/diode-heat-pipes/</u>
- [AN\*\*] <u>http://www.anandtech.com/show/4008/nvidias-geforce-gtx-580/3</u>
- [AW12] Anderson, G.W., Ellis, C.M., Hartenstine, R.J., Peters, T.C., Walker, L.K., "Variable conductance heat pipes for variable thermal links", Advanced Cooling Technologies, Inc., Lancaster, PA, 17601, U.S.A., 42 International Conference on Environmental Systems (ICES 2012), San Diego, CA, pp.1-13, 2012.
- [BA03] Bejan, A., Kraus, A.D., [Heat transfer handbook], John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, pp.161-571, 2003.
- [BA04] Bhatt, A., [Heat Pipes for Electronics Cooling], ME-211, Mechanical Engineering Department San Jose State University, pp. 1-21, 2004.
- [BA<sup>1</sup>04] Badea, A., [Bazele transferului de căldură și masă], Editura Academiei Române, pp.1-258, 2004.
- [BB99] Boughey, B.W., "Design, construction, and analysis of a flat heat pipe", U.S. Naval Academy, USNA, Trident Scholar project report, Annapolis, pp. 1-102, 1999.
- [BK12] Bodla, K.K., Weibel, J.A., Garimella, S.V., *"Direct simulation of thermal transport through sintered wick microstructures"*, Journal of Heat Transfer, Vol.13, DOI: 10.1115/1.4004804, pp. 012602-1÷012602-10, 2012.
- [BK13] Bodla, K.K., Weibel, J.A., Garimella, S.V., "Advances in fluid and thermal transport property analysis and design of sintered porous wick microstructures", Journal of Heat Transfer, Vol.135, DOI: 10.1115/1.4023569, pp. 061202-1÷061202-13, 2013.
- [BK<sup>1</sup>13] Bodla, K.K., Murthy, J.Y., Garimella, S.V., "Evaporation Analysis of Sintered Wick Microstructures", Purdue University, CTRC Research Publications, Cooling Technologies Research Center, pp.1-42, 2013.
- [BJ87] Bowman, J.W., *"Simulated heat-pipe vapor dynamics*", Air force institute of technology, pp.1-214, 1987.
- [BM03] Berre, M.L., Launay, S., Sartre, V., Lallemand, M., *"Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics"*, Journal Micromechanical Microengineering, Vol.13: Nr.3, pp.436-443, 2003.
- [BM<sup>1</sup>15] Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Atomization of liquid droplets in multipoint injection", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. SPIE 9258, 92581R, doi:10.1117/12.2070428, pp. 92581R -1÷92581R -6, 2015.
- [BM<sup>2</sup>15] Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Friction coefficient influence upon fluid jet atomization", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. SPIE 9258, 92582Q, doi: 10.1117/12.2070430, pp. 92582Q -1÷92582Q -6, 2015.
- [B-O\*\*] Bey-Oueslati, R., Martel, S., ş.a., "*Micro Heat Pipe Fabrication: High Performance*", Deposition Platform for Electronic Industry, pp. 1-4, 2009. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.903&rep=rep1&type=pdf
- [BO15] Borealis Ag, Borealis is a leading provider of innovative solutions in the fields of polyolefins, base chemicals and fertilizers, http://www.borealisgroup.com 10 2 2015.
- [BO08] Benafan, O., "*Design, fabrication and testing of a low temperature heat pipe thermal switch with shape memory helical actuators*", Thesis, College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida, Orlando, Florida, pp. 1-148, 2008.

[BS14]	Beyhaghi, S., Geoffroy, S., Prat, M., Pillai, K.M., "Wicking and Evaporation of
	Liquids in Porous Wicks: A SimplenAnalytical Approach to Optimization of Wick
	<i>Design</i> ", AIChE Journal, vol. 60 (n° 5), pp.1930-1940, 2014.

- [BY15] Bakhsnan, Y., Hajhosseini, A., "Using multi-wall carbone nanotube (MWCNT) based nanofluid in the heat pipe to get better themal performance", IJST, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 39, No. M2, pp. 325-335., 2015.
- [BW16] Becker, W.T., Kaus, B.J.P., [Numerical Modeling of Earth Systems], University of Southern California, Los Angeles CA, USA., pp.1-220., 2016.
- [CB\*\*] Choondal, B.S., "*Modeling of the flow and heat transfer in micro heat pipes*", Departament of mechanical, aerospace and nuclear engineering, 2001.
- [CH06] Camargo, H.V.R., Bazzo, E., "Thermal behavior of microgrooved capillary for different thermal working fluids", Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, pp.1-12, 2006.
- [CT65] Cotter, T.P., [Theory of heat pipes], LA-3246-MS, March 26, 1965.
- [CT84] Cotter, T.P., "*Principees and Prospects of the Micro Heat Pipe*", Proceedings the 5th International Heat Pipe Conference, Tsukuba, Japan, pp. 328-335, 1984.
- [DK08] Do, K.H., Kim, S.J., Garimella, S.V., "A Mathematical Model for Analyzing the Thermal Characteristics of a Flat Micro Heat Pipe with a Grooved Wick", Purdue University, CTRC Research Publications, Cooling Technologies Research Center, pp.1-38, 2008.
- [DK10] Do, K., Jang, S., "Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick", International Journal of Heat and Mass Transfer, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.020., pp.2183÷2192, 2010.
- [DR12] Dean, R., Member, S., Harris, D., Palkar, A., Wonacott, G., "Liquid metal-filled micro heat pipes for thermal management of solid-state devices", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 59: 4888- 94, pp. 4888-4894., 2012.
- [DP04] Davidovits, P., Worsnop, D.R., Jayne, J.T., Kolb, C.E., Winkler, P., Vrtala, A., "*Mass accommodation coefficient of water vapor on liquid water*", Geophysical research letters, vol. 31, 122111, doi:10.1029/2004gl020835, pp.1-4, 2004.
- [DP12] Dussinger, P., Sungtaek, Y.J., Catton, I., Kaviany, M., "High heat flux, high power, low resistance, low cte two-phase thermal ground planes for direct die attach applications", GOMACTech 2012, Las Vegas, NV, pp. 1-5, 2012. <u>https://www.1-act.com/high-heat-flux-high-power-low-resistance-low-cte-two-phasethermal-ground-planes-for-direct-die-attach-applications/</u>
- [EN\*\*] <u>http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\_429.html</u>
- [ET\*\*] EngineeringToolbox, "*Thermophysical properties methanol*" http://www.engineeringtoolbox.com/material-properties-t\_24.html.
- [FA\*\*] http://ro.farnell.com/tme/ka01/sensor-thermocouple-k-1m-250-deg/dp/4920971
- [FA14] Faghri, A., "*Heat pipes: review, opportunities and challenges*", Frontiers in Heat Pipes (FHP), 5,1 DOI: 10.5098/fhp.5.1, pp.1-48, 2014.
- [FA94] Faghri, A., Khrustalev, D., *"Micro-miniature heat pipe analysis"*, Departament of mechanical and materials engineering wright State University Dayton, 1994.
- [FI90] Farrokh, I., [Heat Pipe Vapor Dynamics], University of California, pp.1-135,1990. https://archive.org/details/nasa\_techdoc\_19940019623
- [FL\*\*] <u>www.fluke.com</u>
- [FR\*\*] <u>http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2466.</u>

- [GS10] Garimella, S., Weibel, J., North, M., *"Characterization of evaporation and boiling from sintered powder wicks fed by capillary action",* International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.53, pp. 4204-4215, 2010.
- [HD10] Harris, D., Palkar, A., Woncott, G., Dean, R., Simionescu, F., "An experimental investigation in the performance ofwater-filled silicon micro heat pipe arrays", Journal Electron Packag, 132:; doi:10.1115/1.4001745, pp.021005-1÷8, 2010.
- [HL05] Hua, L., *[Heat exchanger development for waste water heat recovery]*, Master of Engineering Thesis, University of Canterbury, Department of Mechanical Engineering, Christchurch, New Zealand, pp.1-116, 2005.
- [HG07] Hwang, G.S., Kaviany, M., Anderson, W.G., Zuo, J., *"Modulated wick heat pipe"*, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp.1420-1434, 2007.
- [HS14] Hozejowska, S., Piasecka, M., "Equalizing calculus in Trefftz method for solving two-dimensional temperature field of FC-72 flowing along the minichannel", Heat Mass Transfer, 50:, DOI 10.1007/s00231-014-1315-3, pp.1053-1063, 2014.
- [HT11] Hoang, T.T., Baldauff, R.W., Mahony, D.R., "Mathematical Modeling of Variable Conductance Heat Pipes for Steady State and Transient Operation", Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, pp.1-6, 2011.
- [HT12] Han, T., Zhang, Z., "A mathematical model for optimizing the structure of a flat micro heat pipe with fiber wick", Proceedings of the 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Harbin, P.R. China, pp.261-265, 2012.
- [HX08] Huang, X., Franchi, G., *"Design and fabrication of hybrid bi-modal wicki structure for heat pipe application"*, Journal of Porous Materials, pp.635–642, 2008.
- [HY\*\*] Hydrophilic Sponge Material : <u>http://fxi.com/assets/pdf/AquaZoneWD.pdf</u>
- [HY12] Hung, YM., Tio, KK., *"Thermal analysis of optimally designed inclined micro heat pipes with axial solid wall conduction"*, International Community Heat Mass Transfer; Vol.39, pp.1146-1153, 2012.
- [IB07] Iverson, B.D., Davis, W., Garimella, S.V., North, M.T., Kang, S.S., "Heat and Mass Transport in Heat Pipe Wick Structures", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 21, No. 2, pp.392-404, 2007. <u>http://dx.doi.org/10.2514/1.25809</u>
- [IX\*\*] <u>http://ixbtlabs.com/articles2/mainboard/msi-p35-platinum-i35p.html</u>
- [IX79] <u>http://www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?18/31/79</u>
- [JA08] Jiao, A., "Modeling of thin film evaporator heat transfer and experimental investigation of miniature heat pipes", University of Missouri-Columbia, 2008.
- [JK11] Jentung, K., Kleber, P., Marcia, M., <u>"Loop Heat Pipe Transient Behavior Using Heat Source Temperature for Set Point Control with Thermoelectric Converter on Reservoir</u>", American Institute of Aeronautics and Astronautics, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Greenbelt, Maryland, USA, pp.1-13, 2011. <u>http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015224.pdf</u>
- [JS03] Jeong, S., Young, S.P., "Analysis of Thermal Performance in a Micro Flat Heat Pipe with Axially Trapezoidal Groove", Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol.6, No.4, pp.201-206, 2003.
- [JX14] Jinliang, X., Xianbing, J., Wolong, Y., Ziwei, Z., "Modulated porous wick evaporator for loop heat pipes: Experiment", International Journal of Heat and Mass Transfer 72, pp.163-176, 2014.
- [KF08] Korn, F., *"Heat pipes and its applications"*, Project Report MVK160, Heat and Mass Transport, May 07, Lund, Sweden, pp.1-6, 2008.

- [KY05] Kimura, Y., Nakamura, Y., Sotani J., Katsuta, M., *"Steady and transient heat transfer characteristics of flat micro hea tpipe"*, Furukawa Review, No. 27, pp.3-8, 2005.
- [KY06] Koito, Y., Imura, H., Mochizuki, M., Saito, Y., Torii, S., "Numerical analysis and experimental verification on thermal fluid phenomena in a vapor chamber", Applied Thermal Engineering, 26: pp.1669-1676, 2006.
- [LF06] Lefevre, F., Lallemand, M., "Coupled thermal and hydrodynamic models of flat micro heat pipes for the cooling of multiple electronic components"., International Journal Heat Mass Transfer, 49: pp.1375-1383, 2006.
- [LF12] Lefèvre, F., Lips, S., Rullière, R., Conrardy, J.B., Raynaud, M., Bonjur, J., *"Flat plate heat pipes: from obsevation to the modeling of the capillary structure"* Frontiers in Heat Pipes, 2012.
- [LG\*\*] <u>http://www.lanl.gov/science/NSS/issue1\_2011/story6full.shtml</u>
- [LG13] Ling, G., Wenguang, G., Xiaoxu, M., Xiuli, M., Guangliang, L., Xuanyou, L., "An experimental investigation on the heat transfer coefficient of oscillating heat pipes", Advanced Materials Research Vols. 732-733, Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028AMR.732-733.78, pp.78-82, 2013.
- [LI10] Li, X.B., Tang, Y., Li, Y., Zhou, S.Z., Zeng, Z.X., "Sintering technology for micro heat pipe with sintered wick", Journal of Central SouthUniversity of Technology, 17(1)., pp.102–109, 2010.
- [LJ06] Lienhard, J.H., "A heat transfer textbook", 3 rd ed., Cambridge-Massachusetts, pp. 139-519, 2006.
- [LM02] Lee, M., Wong, M., Zohar, Y., *"Design, Fabrication and characterization of an integrated micro heat pipe"*, Departament of Electrical& Electronic Engineering Hong Kong University of Science and Tehnology, pp.85-88, 2002.
- [LM04] Layehgi, M., Borujerdi, A.N., *Vapour flouw analysis in partially-heated concentric annular heat pipes*", International Journal of Computational Engineering Science, pp.235-244, 2004.
- [LM71] LaVerne, M.E., "Performance characteristics of cylindrical heat pipes for nuclear electric space and undersea power plant", Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, Tennessee, pp.1-17, 1971.
- [LJ08] Lim, J-S., Ahn, Y-Min, *"Design and Fabrication of Micro Heat Pipe Heat Spreader"*, Journal of Engineering & Technology, Vol.18, pp.1-10, 2008.
- [LS11] Lips, S., Lefèvre, F., Bonjour J., "*Physical mechanisms involved in grooved flat heat pipes: experimental and numerical analyses*", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, pp.1243-1252, 2011.
- [LX12] Li, X., Wang, J., Hu, Q., Bao, L., Zhang, H., Wang, C., "Capillary Limit of Micro Heat Pipe with Compound Structure of a Sintered Wick on Trapezium-grooved Substrate", Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 No. 9b, pp. 1-144, 2012.
- [LY12] Li, Y., He, T., Zeng, Z., "Analysis of Collapse in Flattening a Microgrooved Heat Pipe by Lateral Compression", Chinese Journal of Mechanical Engineering Vol. 25, No. 6, DOI: 10.3901/CJME.2012.06, pp.1-8, 2012
- [LY<sup>1</sup>12] Liu, Y.B., Huang, Z.G., *"Transfer characteristics of three kinds of micro-groove heat pipes"*, International Journal of Manufacturing Engineering, 2: pp.22-27, 2012.
- [MA\*\*] http://macro.lsu.edu/howto/solvents/acetone.htm
- [MA60] https://www.marks-gmbh.de/Erodierkupfer-2.0060-E-Cu-57.html

- [MA95] Mallik, A.K., Peterson, G.P., Weichold, M.H., *"Fabrication of vapor-deposited micro heat pipe arrays as an integral part of semiconductor devices"*, ASME J.Micromech. Syst. 4, pp.119-131, 1995.
- [ME\*\*] <u>http://www.methanol.org/Technical-Information/Resources/Technical</u> <u>Information/Physical-</u>Properties-of-Pure-Methanol.aspx
- [MC\*\*] Mathcad 14, Licensed to: Stefan cel Mare University, Partially Product Code JE140709XX2311-XXD9-7VXX.
- [MH02] Ma, H.B., Maschmann, M.R., Liang, S.B., *"Heat Transport Capability in Pulsating Heat Pipes*", Proceedings of the 8th AIAA/ASME Joint Thermophysica and Heat Transfer Conference, pp.2-10, 2002.
- [MH03] Mohammed, N., Gerner, F.M., Henderson, H.T., "Steady-state model of the loop heat pipe (LHP) with coherent porous silicon (CPS) wick in the evaporator", Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, DOI: <u>10.1109/STHERM.2003.1194344</u>, pp.88-96, 2003.
- [MH06] Ma, H., [Heat Pipes Chapter 9, Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power], Volume 4, Third Edition. Edited by Myer Kutz Copyright by John Wiley & Sons, Inc., pp.335-360, 2006.
- [MH<sup>1</sup>06] Ma, H.B., Hanlon, M.A., Chen, C.L., "An investigation of oscillating motions in aminiature pulsating heat pipe", Microfluidics and Nanofluidics, Volume 2, DOI: 10.1007/s10404-005-0061-8, pp.171-179, 2006.
- [MI10] Mihai, I., Pîrghie, C., Zegrean, V., <u>"Research Regarding Heat Exchange Through Nanometric Polysynthetic Thermal Compound to Cooler–CPU Interface</u>", Heat Transfer Engineering, ISSN: 1521-0537 (electronic) 0145-7632 (paper), Volume 31, Issue 1, pp.90-97, 2010.
- [MI14] Mihai, I., Olariu, E., *Micro-tub termic plat semi-activ cu extra-fluid*, Patent request No. A/00445, OSIM București, Romania, 16.06.2014.
- [MI<sup>1</sup>16] Mihai, I., Sprinceana, S., "Convection's enhancement in thermal micro pipes using extra fluid and shape memory material", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 1001010, doi:10.1117/12.2242990, pp. 1001010-1÷1001010-10, 2017.
- [MI<sup>2</sup>16] Mihai, I., **Sprinceana, S.**, "*Experimental investigation of micro heat pipe with extra fluid*", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 100101M, doi: 10.1117/12.2242992, pp.
  - 100101M-1÷ 100101M-8, 2017.
- [ML\*\*] *Matlab license 07.02.2012, License number 708456.* R12a: MathWorks R2012a. 7.14.0.739, 2012.
- [MR12] Masoodi, R., Pillai, K.M., "A general formula for capillary suction-pressure in porous media", Journal of Porous Media, 15 (8)., pp.775–783., 2012.
- [NP07] Nemek P., huzvar J., *"Mathematical calculation of total heat power of the sodium heat pipe"*, Project APPV-0517, pp. 77-82, 2007.
- [ND06] Nield, D.A., Bejan, A., [Convection in porous media], Third edition, Springer, pp.1-654, 2006.
- [NO05] Nouri-Borujerdi, A., Layeghi, M., "A Review of Concentric Annular Heat Pipes", Heat Transfer Engineering, 26(6)., pp.45-58., 2005.
- [NO\*\*] <u>http://www.notebookcheck.net/Review-Asus-A52JU-Notebook.46595.0.html</u>
- [NP\*\*] <u>http://www.npowertek.com/downloads/12.LED%20lighting%20cooler/</u> 30W%2050W%20LED%20module%20%5b1%5d.pdf
- [NP13] Nemec, P., Čajal, A., Malcho1, M., "Testing Thermal Properties of the Cooling

*Device with Heat Pipes*", EPJ Web of Conferences, <u>doi:10.1051/20134501066</u>, pp.01066-01070, 2013.

- [NR12] NASA Report, [Heat Pipes], NASA-CR-2508, N75-15320, Unclas H1/54 07805, Midwest research Institute, TECH Library, pp.1-52, 1975.
- [OC12] Oshman, C., Li, Q., Liew, L.A., Yang, R. at al, "*Thermal performance of a flat polymer heat pipe heat spreader under high acceleration*", Journal of micromechanics and microengineering, doi:10.1088/0960-1317/22/4/045018, pp.1-12, 2012.
- [OG14] Odabasi, G., [Modeling of multidimensional heat transfer in a rectangular grooved heat pipe], Middle east Technical University, pp.1-156, 2014.
- [OJ99] Ochterbeck, JM., [*Heat Pipes*], Chapter 16, Department of Mechanical Engineering Clemson University Clemson, South Carolina, 1999.
- [OK08] Ong, K.S., "Heat pipes" JURUTERA, pp.16-18, 2008.
- [PG89] Peterson, G.P., Babin, B.R., "Analitical and experimental investigation of miniature heat pipes - phase II", Mechanical Engineering Department Texas A&M University College Station, pp.1-65, 1989.
- [PG98] Peterson, G.P., [Chapter 12 Heat Pipes], McGraw-Hill Handbook of Heat Transfer 3rd edition, W. M. Rohnsenow, J. P. Hartnett and Y. I. Cho, (eds.), McGraw-Hill Publishing Co., Washington D.C., pp.1-20, 1998.
- [PH08] Peter, H.J. de Bock, Varanasi, K., Chamarthy, P., Deng, T., Kulkarni, A., Rush, B. M., Russ, B.A., Weaver, S.E., "Experimental investigation of micro/nano heat pipe wick structures", Proceedings of the ASME International Mechanica Engineering Congress and Exposition, Boston-Massachusetts, USA, pp.1-6, 2008.
- [PO\*\*] <u>http://www.powerguru.org/cooling-methods-for-power-semiconductor-devices/</u>
- [PS13] Peyghambarzadeh, S.M., Shahpouri, S., Aslanzadeh, N., Rahimnejad M., *"Thermal performance of diferent working fluids in a dual diameter circular heat pipe"* AinShams Engineering Journal, pp.855–861., 2013.
- [PS80] Patankar, S.V., [Numerical heat transfer and fluid flow], Hemisphere, Washington, pp.1-195, 1980.
- [PW12] Per, W., *"Heat Pipe, selection of working fluid"*, Project Report MVK160, Heat and Mass Transfer, Lund, Sweden, pp.1-7, 2012.
- [QJ10] Qu J., Wu H.Y., *"Flow visualization of silicon-based micro pulsating heat pipes"*, Scientific China Technologi Sciences, Vol.53, DOI: 10.1007/s11431-009-0391-y pp.984-990, 2010.
- [RD13] Reay, D., Kew, P., McGlen, R.J., [Heat Pipes Theory, Design and Applications], Sixth Edition, ELSEVIER, 2013.
- [RM12] Manimaran, R., Palaniradja K., Alagumurthi N., Velmurugan K., "An Investigation of Thermal Performance of Heat Pipe Using Di-water", Department of Mechanical Engineering, Pondicherry Engineering College, Puducherry, India, DOI: 10.5923/j.scit.20120204.04, pp.77-80, 2012.
- [RR08] Revellin, R., Rullière, R., Lefèvre, F., Bonjur, J., "Experimental validation of an analytical model for predicting the thermal and hydrodynamic capabilities of flat micro heat pipes", Applied Thermal Engineering, Elsevier, 29 (5-6), pp.1114-1122, 2008.
- [RR11] Ranjan, R., Murthy, J.Y., Garimella, S.V., Vadakkan, U., "A numerical model for transport in flat heat pipes considering wick microstructure effects", International Journal of Heat and Mass Transfer 54, pp.153–168, 2011.
- [RR12] Ranjan, R., Patel, A., Garimella, S.V., Murthy, J., "Wicking and Thermal Characteristics of Micropillared Structures for Use in Passive Heat Spreaders"

*CTRC Research Publications*, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.053, pp.1-35, 2012.

- [R&M12] Ranjan, R., Murthy, J.Y., Garimella S.V., Altman D.H., North, M.T., "Modeling and Design Optimization of Ultra-Thin Vapor Chambers for High Heat Flux Applications", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol.2, No.9, pp.1465-1479, 2012.
- [SB05] Suman, B., De, S., DasGupta, S., *"A model of the capillary limit of a micro heat pipe and prediction of the dry-out length"*, International Journal Heat Fluid Flow, pp.495-505, 2005.
- [SB07] Suman, B., Hoda, N., "On the transient analysis of a V-shaped micro grooved heat pipe", Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, Vol.129: pp.1584-1591, 2007.
- [SC00] Sobhan, C.B., Garimella, S.V., Unnikrishnan, V.V., "A computational model for the transient analysis of flat heat pipes", <u>Thermal and Thermomechanical</u> <u>Phenomena in Electronic Systems</u>, doi:<u>10.1109/ITHERM.2000.866178</u>, pp.178-186, 2000.
- [SG76] Scheinder, G.E., Yovanovich, M.M., <u>Wehrle, V. A.</u>, "*Thermal analysis of trapezezoidal grooved heat pipe evaporator wals*", University of Waterloo, Ontario, pp.69-85, 1976.
- [SK15] Shukla, K.N., *"Heat Pipe for Aerospace Applications An Overview"*, Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, Vol.5, pp.1-14, 2015.
- [SM17] Singh, M., Kondaraju, S., Bahga, S.S., *"Enhancement of thermal performance of micro heat pipes using wettability gradients*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.104, pp.400–408, 2017.
- [SS09] Singh, S.S., [Optimal micro heat pipe configuration on high performance heat spreaders], Master's Theses, *San Jose State University*, pp. 1-69, 2009.
- [SS<sup>1</sup>15] **Sprinceana, S.**, Mihai, I., *"Analysis of the convective heat transfer at flat thermal micro-pipe through Crank-Nicolson's method"*, Tehnomus Journal, The 18<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatronics and Management, USV, pp.244-250, 2015.
- [SS<sup>2</sup>15] Sprinceana, S., Mihai, I., ,, The modeling of the speed, of the friction coefficient and the capillary pressure in the heat convective transfer through porous media", Tehnomus Journal, The 18<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatonics and Management, USV, pp.371-377, 2015.
- [SS<sup>3</sup>15] Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., *"Heat transfer intensification by increasing vapor flow rate in flat heat pipes "*, Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581P, doi: 10.1117/12.2070417, pp. 92581P-1÷92581P-7, 2015.
- [SS<sup>4</sup>15] Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., ,, Capillary structure effect on the heat transfer to flat heat pipes, Proc.SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581Q, doi:10.117/12,2070423, pp.92581Q-1÷92581Q -6, 2015.
- [SS<sup>1</sup>16] Sprinceana, S., Mihai, I., "Heat transfer at the sintered layer polysynthetic material interface inside heat micro pipes", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, Proc. of SPIE Vol. 10010, 100101P, doi: 10.1117/12.2243148, pp.1001010-1÷1001010-7, 2016.
- [SS<sup>2</sup>16] **Sprinceana, S.**, Mihai, I., "*Heat transfer within a flat micro heat pipe with extra liquid*", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 100101Q, doi: 10.1117/12.2243151, pp.100101Q-1÷100101Q-6, 2016.

- [SS13] Sprinceana, S., [Stadiul actual privind performanțele și domeniile de utilizare ale micro-tuburilor termice], Referat I în cadrul tezei de doctorat: Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp.1-70, 2013.
- [SS14] Sprinceana, S., [Studiul transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate], Referat II, în cadrul tezei de doctorat: Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp. 1-100, 2014.
- [SS15] Sprinceana, S., [Contribuții aduse la intensificarea transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate], Referat III, în cadrul tezei de doctorat: Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp.1-107, 2015.
- [TC\*\*] "Thermal Conductivity of Methanol", <u>http://www.ddbst.com/en/EED/PCP/TCN\_C110.php</u>.
- [TH\*\*] <u>http://www.thermodelta.hu/en/mobir-m3.html</u>.
- [TK00] Thomas, K.S., Likins, R.C., Yerkes, L.K., [Fully-developed laminar flow in trapezoidal grooves with shear stress at the liquid-vapor interface], Wright State University, Daiton, OH, pp.1-41, 2000.
- [TY09] Tang, Y., Lu, L., Deng, D., Yuan, D., "Cold welding sealing of copper-water micro heat pipe ends", Transaction of nonferrous metals society of china, pp.568-574, 2009.
- [UN\*\*] UNILAB SRL, "Heat Pipes Part I: from aerospace to air conditioning applications", <u>http://www.unilab.eu/wp-content/uploads/2014/04/Newsletter-15\_Heat-pipes\_Part-I.pdf tp</u>
- [UO\*\*] <u>http://idd.univ-ovidius.ro/tutorials/cursuri/FIM/ING9/11</u>, Anexa1.pdf
- [VK05] Vafai, K., [Handbook of Porous Media], CRC Press, Boca Raton, pp.1-41, 2005.
- [VL05] Vasiliev, L., "*Heat pipes in modern heat exchangers*", Applied Thermal Engineering, No. 25, pp.1-19, 2005.
- [WI1\*] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\_pipe</u>
- [WI2\*] https://en.wikipedia.org/wiki/Methanol
- [WI3\*] <u>http://www.wikiwand.com/en/Heat\_pipe</u>
- [WJ07] Woong, J.H., Hwa, J.Y., Moo, W.S., "Characteristics of Thermal Performance in High Power LED Package with Heat Pipe", Solid State Phenomena, Vol.124-126, pp.85-88, 2007.
- [WW08] Wits, W.W., Kok, J.B.W., "Modeling the transient analysis of flat miniature heat pipes in printed circuit boards using a control volume approach", 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, pp. 398-408, 2008.
- [WY00] Wang, Y., Vafai, K., *"Transient characterization of at plate heat pipes during startup and shutdown operations"*, International Journal of Heat and Mass Transfer No. 43, pp. 2641-2655, 2000.
- [XL12] Xibing, L., Jianjia, W., Qingming, H., Li, B., Hongjun, Z., Cong, W., "Capillary limit of micro heat pipe with compound structure of a sintered wick on trapeziumgrooved substrate", Qiqihar University, Qiqihar, China, ISSN 0033-2097, Electrical Review, R. 88 NR 9b, pp. 141-144, 2012.
- [YD12] Yang, D.J., Yuan, Z.F., Lee, P.H., Yin, H.M., "Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel", International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, pp.1076-1082, 2012.
- [YL08] Yong, L., Hui, X., Bin, L., Yong, T., Zhi-xin, Z., *"Forming method of axial micro grooves inside copper heat pipe"*, Trans. Nonferrous Met. Soc., China18, pp. 1229-1233, 2008.

- [YI12] Yu, I.S., Rhi, S.H., Cha, I.K., "*Micro and nano thermal flow characteristics of a flat plate heat pipe heat spreader*", International Journal of Physical Sciences Vol. 7(11), pp.1762-1772, 2012.
- [ZN98] Zhu, N., Vafai, K., "Analytical modeling of the startup characteristics of asymmetrical flat-plate and diskshaped heat pipes", J. Hear Mass Transfer. Vol. 41, No. 17, pp. 2619-2631, 1998.
- [ZN99] Zhu, N., Vafai, K., "Analysis of cylindrical heat pipes incorporating the effects of liquid-vapor coupling and non-Darcian transport-a closed form solution", International Journal of Heat and Mass Transfer 42, pp.3405-3418, 1999.

## Lista de articole publicate prim-autor și co-autor:

- 1. **Sprinceana, S.**, *[Stadiul actual privind performanțele și domeniile de utilizare ale micro-tuburilor termice]*, Referat I în cadrul tezei de doctorat: *Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate*, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp.1-70., 2013.
- 2. **Sprinceana, S**., *[Studiul transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate]*, Referat II, în cadrul tezei de doctorat: *Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate*, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp. 1-100., 2014.
- 3. **Sprinceana, S.,** [Contribuții aduse la intensificarea transferului de căldură prin micro-tuburile termice plate], Referat III, în cadrul tezei de doctorat: Metode de intensificare a transferului de căldură la micro-tuburile termice plate, Universitatea Stefan cel Mare din Suceava, pp.1-107., 2015.
- 4. **Sprinceana, S**., Mihai, I., *"Analysis of the convective heat transfer at flat thermal micro-pipe through Crank-Nicolson's method"*, Tehnomus Journal, The 18<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatronics and Management, USV, pp.244-250., 2015.
- 5. **Sprinceana, S**., Mihai, I., *"The modeling of the speed, of the friction coefficient and the capillary pressure in the heat convective transfer through porous media",* Tehnomus Journal, The 18<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatonics and Management, USV, pp.371-377, 2015.
- Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., *"Heat transfer intensification by increasing vapor flow rate in flat heat pipes "*, Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581P, <u>doi:</u> <u>10.1117/12.2070417</u>, pp. 92581P-1÷92581P-7., 2015.
- Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., *"Capillary structure effect on the heat transfer to flat heat pipes*, Proc.SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581Q, <u>doi:10.117/12,2070423</u>, pp.92581Q-1÷92581Q -6., 2015.
- MIHAI Ioan, SUCIU Cornel, PATULEANU Liliana, SPRINCEANA Silviu, IR assessment of R134a temperature in circular micro-channels, Conference ATOM-N Constanța, 2014, publicat în ISI Proceedings of SPIE ISBN 9781628413250, Proc. SPIE 9258, Date Published: 20 February 2015, PDF: 8 pages, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, 92581N (20 February 2015); doi: 10.1117/12.2070335, 2015.
- 9. MIHAI Ioan, SUCIU Cornel, PATULEANU Liliana, SPRINCEANA Silviu, Roughness effect upon the flow of R134a refrigerant through rectangular microchannels, Conference ATOM-N Constanța, 2014, publicat în ISI Proceedings

of SPIE, ISBN 9781628413250, PDF: 8 pages Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, 925810 (20 February 2015); doi: 10.1117/12.2070336, 2015.

- Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Atomization of liquid droplets in multipoint injection", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. SPIE 9258, 92581R , <u>doi:10.1117/12.2070428</u>, pp. 92581R -1÷92581R -6., 2015.
- Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Friction coefficient influence upon fluid jet atomization", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. SPIE 9258, 92582Q, doi: 10.1117/12.2070430, pp. 92582Q -1÷92582Q -6., 2015.
- Sprinceana, S., Mihai, I., ,, Heat transfer at the sintered layer polysynthetic material interface inside heat micro pipes", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, Proc. of SPIE Vol. 10010, 100101P, doi: 10.1117/12.2243148, pp.1001010-1÷1001010-7., 2016.
- Sprinceana, S., Mihai, I., "Heat transfer within a flat micro heat pipe with extra liquid", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 100101Q, <u>doi: 10.1117/12.2243151</u>, pp.100101Q-1÷100101Q-6., 2016.
- Mihai, I., Sprinceana, S., "Convection's enhancement in thermal micro pipes using extra fluid and shape memory material", ATOMN-2016, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 1001010, doi:10.1117/12.2242990, pp. 1001010-1÷1001010-10., 2016.
- Mihai, I., Sprinceana, S., "Experimental investigation of micro heat pipe with extra fluid", Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VIII, SPIE Vol. 10010, 100101M, doi: 10.1117/12.2242992, pp. 100101M-1÷ 100101M-8., 2016.
- 16. Sprinceana, S., Mihai, I., "The influence of the meniscus' liquid bending in the case of capillarity at the heat transfer through micro flat heat pipes", Tehnomus Journal, The 19<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatonics and Management, USV, pp.138-144., 2017.
- 1. **Sprinceana, S.,** Mihai, I., "The liquid flow through the capillary structure made of trapezoidal micro channels of the micro flat heat pipe", Tehnomus Journal, The 19<sup>th</sup> International Conference, Department of Mechatonics and Management, USV, pp.160-165., 2017.