

UTILIZAREA METODEI VOLUMELOR FINITE LA ANALIZA NUMERICĂ A PROCESULUI DE TURNARE. MODELAREA UMLERII FORMELOR DE TURNARE CU COMPLEXITATE MARE

Şef lucr. dr. ing. Ioan-Sorin LEOVEANU
Universitatea „Transilvania”, Braşov



Este absolvent al Universităţii „Transilvania” din Braşov, Facultatea de Tehnologia Construcţiilor de Maşini, Secţia utilajul şi tehnologia sudării. A efectuat stagiul la U. „Tractorul” din Braşov şi la I.P.T. Întorsura Buzăului, apoi a fost inginer proiectant la Institutul de Cercetare pentru Autovehicule şi Tractoare – Braşov, ca inginer proiectant la Departamentul punţi motoare directe. Din 1988 este cadru didactic la Universitatea „Transilvania” din Braşov, la Catedra de ingineria materialelor şi sudării. Este doctor inginer al Universităţii „Politehnica” din Bucureşti, din 2002. A contribuit la proiectarea punţilor motoare cu mare de virare pentru tractoare agricole şi industriale, la proiectarea şi omologarea structurilor de rezistenţă sudate pentru tractoare industriale. A publicat manuale şi monografii pe plan local, central şi în colaborare cu universităţi din străinătate, precum şi articole în reviste şi buletinele unor conferinţe de specialitate din ţară şi din străinătate.

REZUMAT

Pentru a estima efectul procesului de umplere a formei asupra solidificării acestora s-a recurs la utilizarea metodelor numerice de modelare a curgerii fluidului şi a distribuţiei temperaturii din fonta şi aliajele de aluminiu lichide. S-a analizat schimbul de căldură prin convecţie între metalul lichid şi conturul formei ce va fi umplută cu lichid. De asemenea, procesul de solidificare a fost analizat atât în cazul în care procesul se desfăşoară fără implicarea curgerii fluidului cât şi în cazul în care acest fenomen este analizat. Analiza probabilităţii apariţiei turbulenţelor s-a făcut utilizând coeficientul de turbulenţă doar în interiorul domeniului umplut cu lichid, fenomenele de margine între faza lichidă şi cea solidă sau gazoasă a fost neglijat. Programul de calcul a fost realizat în Visual C/C++ pe baza metodei MAC (Markers And Cells) solverul sistemului de ecuaţii neliniare fiind bazat pe îmbunătăţirea dinamică a soluţiilor obţinute cu metoda suprarelaxării, fiind de tip ADI-SOR. Scopul lucrării constă în estimarea posibilităţilor de evitare a defectelor ce pot apărea în urma procesului de solidificare. Metoda dezvoltată poate fi utilizată la examinarea secţiunilor critice ale unei forme de turnare în orice moment al procesului de turnare, ceea ce conduce la micşorarea drastică a încercărilor experimentale.

ABSTRACT

To see the effect of filling on the solidification process, an attempt is made to study numerically the fluid flow and heat transfer characteristics of iron and pure aluminum metal during mold filling and subsequent solidification process simultaneously in complex shape mold. To analyze the fluid flow and heat transfer with free surface motion, in the condition of geometry with interior obstacles, and convection boundary conditions the MAC method in ADI-SOR solver algorithm is used. The aim of this paper consists in made the difference between this method more complexes and the analysis based on the solidification process only. The present work makes possible the prediction of the defects occurring during filling and solidification processes. The method proposed is use to examine all the critical sections of a mold in any moment without difficulty and in this mode of work, the experimental approaches are drastically reduced.

1. INTRODUCERE

Procesul de turnare constă în umplerea formei piesei pe care dorim să o obţinem cu aliajul metalic aflat în stare lichidă, urmată de solidificarea topiturii şi obţinerea caracteristicilor mecanice dorite. Deoarece aceste procese se bazează pe modelarea propagării unei suprafeţe libere ca şi a schimbării de fază, analiza experimentală a acestora devine extrem de dificilă şi costisitoare, în multe

laboratoare şi companii se utilizează modelarea numerică a fenomenului cu ajutorul calculatoarelor electronice. Se analizează astfel curgerea fluidului, transferul termic şi transformările de stare şi alte caracteristici termice. Aceasta se poate realiza prin utilizarea unei multitudini de metode de calcul, bazate pe metoda volumelor finite (FVM), pe metoda elementelor finite (FEM) sau pe alte metode de calcul de tipul metodei diferenţelor finite (MDF) sau (LSM). Astfel, cele mai utilizate metode sunt MAC, SMAC sau SOLA-VOF pentru analiza umplerii formei şi

metoda entalpiei sau a căldurii specifice echivalente pentru analiza procesului de transformare de fază.

În prezent, în cazul în care se dispune de calculatoare cu o capacitate de calcul deosebită, la acest tip de analiză se adaugă și simularea proceselor de nucleație și creștere a grăunților structurii primare, ca și a transformărilor suferite de această structură în procesul de răcire și estimarea microstructurii finale, a segregățiilor care pot apărea, dar și la estimarea tensiunilor și deformațiilor remanente [4–7].

Analiza procesului de formare a tensiunilor mecanice datorate diferențelor de temperatură dintre diferitele zone ale piesei conduce la posibilitatea analizării procesului de fisurare și al celui de formare a tensiunilor remanente [8, 9]. Există programe în care procesul de simulare se limitează la analiza solidificării metalului lichid aflat în interiorul formei, lichid care se consideră în repaus. De fapt, în realitate, solidificarea poate avea loc în același timp cu procesul de umplere a formei, iar efectul de răcire prin convecție, ca și cel datorat apariției direcțiilor secundare de curgere, afectează procesul de solidificare. Aceste efecte sunt de regulă neglijate, cu toate că în multe cazuri afectează fazele finale ale solidificării, în special cristalizarea secundară. Sunt cazuri în care aceste efecte diminuează drastic calitatea produsului.

În ultimul timp, asigurarea unor proprietăți superioare ale pieselor turnate s-a realizat prin obținerea unei structuri caracterizate prin granulație extrem de fină și printr-o dispersie cât mai uniformă a compușilor intermetalici la limita grăunților. Astfel de piese turnate reprezintă de fapt caracteristicile unei noi abordări a tehnologiei de turnare, abordare care, de cele mai multe ori, a impus, cu precădere pe piața aerospațială, auto și nucleară, reperi turnate cu microstructură foarte fin elaborată, deschizând drumul spre nanotehnologii. Numai cunoașterea și analizarea în amănunt a condițiilor în care are loc procesul de umplere a formei piesei ca și cel de cristalizare pot asigura succesul în obținerea de astfel de tehnologii.

Viteza cu care forma este umplută poate afecta, la rândul ei, calitatea piesei obținute prin turnare. De regulă, viteza de umplere a formei trebuie să fie cât mai ridicată, pentru a se obține o cât mai bună productivitate și a fi siguri că, în topitură, în procesul de turnare nu au loc variații prea mari ale temperaturii acesteia. Aceste cerințe sunt însă drastic limitate de condiția ca umplerea formei turnate să aibă loc printr-o curgere cât mai „liniștită”, în care să fie evitată, pe cât posibil, apariția de turbulențe în orice zonă a formei.

Astfel, pentru punerea în evidență a acestor fenomene s-a optat pe utilizarea metodelor numerice de calcul pentru o formă având o configurație geometrică relativ complexă și care prezintă și obstacole interne (miezuri). Atât curgerea fluidului cât și câmpul termic dezvoltat în formă și în pereții acesteia au fost modelate cu ajutorul metodei volumelor finite în varianta MAC, cu solver de tipul ADI-

SOR. Pentru cazul în care am dori și determinarea tensiunilor și a deformațiilor remanente, este posibilă salvarea datelor într-un fișier care poate fi prelucrat cu unul dintre programele consacrate pentru metoda elementelor finite.

Geometria formei este prezentată în figura 1.

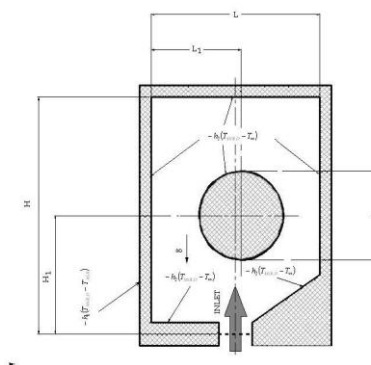


Fig. 1. Geometria piesei analizate și condițiile pe frontieră.

2. ANALIZA NUMERICĂ

Intrarea în forma ce se toarnă se consideră poziționată în centrul laturii de jos a acesteia, astfel încât asupra metalului topit ce umple forma să acționeze forța gravitațională, așa cum apare în figura 1. Gridul pe care se face analiza este de tip complex, grid pe care s-a dezvoltat varianta numerică a metodei MAC.

2.1. Ecuațiile ce guvernează procesul

Pentru a realiza modelul matematic destinat simulării s-au făcut următoarele ipoteze simplificatoare:

- curgerea este 2–D, incompresibilă și laminară;
- proprietățile termice ale topiturii sunt constante, în limita unei variații de temperatură de 20K;
- disiparea de căldură datorită frecării viscoase ca și indicele de turbulență se calculează doar în celulele cu fluid, fiind neglijate în celulele aflate pe frontiera cu marginile formei. Forma generală a ecuațiilor diferențiale ce alcătuiesc sistemul de ecuații este dată în tabelul 1, în conformitate cu [13]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u \phi}{\partial x} + \frac{\partial v \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

unde ϕ , Γ și S au semnificația din tabelul 1.

Tabelul 1

Tipul ecuației	Φ	Γ	S
Ecuția conservării masei.	1	0	0
Ecuția conservării impulsurilor	u Viteza pe direcția X	μ	$-\frac{\partial\phi}{\partial x} + g_x$
	v Viteza pe direcția Y	μ	$-\frac{\partial\phi}{\partial y} + g_y$
Ecuția conservării energiei	T Temperatura	$\frac{\lambda}{\rho \cdot c}$	\dot{q}

2.2. Condițiile pe frontieră și proprietățile fluidului analizat

Condițiile inițiale și pe frontieră sunt prezentate în continuare.

Temperatura atmosferică este de 300K, cu un coeficient de transfer termic având valoarea medie cuprinsă între 1000 W/m²K [2], în cazul contactului între aliajul de aluminiu topit și formă, și 700 W/m²K [2], între fonta lichidă și formă.

Transferul termic, mediu, de căldură pe frontiera liberă, între topitură și gazul existent în formă este de 50 W/m²K pentru aliajele de aluminiu și de 20W/m²K, pentru fonte [12]. Pe frontierele între topitură și pereții formei se consideră un schimb termic de tip convecție, ca și pentru frontiera liberă. Pereții formei sunt ficși pe parcursul umplerii formei. Atunci când topitura intră în contact cu pereții formei, coeficienții de convecție dintre fluid și pereții solizi ai formei se calculează în funcție de numerele **Pr** și **Re_x**, prin rezolvarea cu ajutorul unei metode bazate pe celule automate a curgerii fluidului din celula aflată în contact cu faza solidă. Astfel, sub formă adimensională, sistemul de ecuații în cazul cel mai des întâlnit:

$$u \gg v; \frac{\partial T}{\partial y} \gg \frac{\partial T}{\partial x}; \frac{\partial u}{\partial y} \gg \frac{\partial u}{\partial x}$$

se găsește în tabelul 2.

Tabelul 2

Masa	$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} = 0$	(2)	
x-impuls	$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} = \frac{\mu}{L \cdot u_{\infty}} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} = \frac{1}{Re_L} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2}$	(3)	
Căldura	$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y} = \frac{1}{Re_L \cdot Pr} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial y^2}$	(4)	
	$h_x = \frac{Nus_x \cdot \lambda_f}{L}$	(5)	
Forma soluției:	pentru interfața topitură–perete, forma:	(6)	
	$Nus_x = a \cdot Pr^m \cdot Re_L^n$	(6)	
	pentru interfața topitură–zona solidificată:	(7)	
	$Nus_x = a_1 \cdot Pr^{m1} (Re_L^{n1} - b_1) + c_1 \cdot Pr^{m2}$	(7)	

2.3. Suprafața liberă și schimbarea de fază

Pe suprafața liberă, ca urmare a incapacității aerului aflat în contact cu fluidul de a prelua forțe de forfecare și a valorii scăzute a gradientilor de temperatură se consideră tensiunile tangențiale nule. Tensiunea normală la această suprafață este egală cu presiunea sau tensiunea exterioară aplicată. Astfel, formulele de calcul pentru tensiunile aplicate suprafeței libere se pot calcula cu relațiile din [2].

Tensiunile normale pe suprafața liberă au forma:

$$\mu \left[n_x m_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_x n_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2n_y m_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \phi_a \quad (8)$$

Tensiunile tangențiale au forma:

$$\mu \left[2n_x m_y \frac{\partial u}{\partial x} + (n_x m_y + n_y m_x) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2n_y m_x \frac{\partial v}{\partial y} \right] = 0 \quad (9)$$

unde: cu *u* și *v* s-au notat componentele vitezei pe direcțiile *u* și, respectiv, *v*; cu *m* și *n* – versorii direcțiilor

normale și tangente la suprafața liberă; $\varphi_a = p/\rho + \sigma/R_m$; μ – viscozitatea cinematică; σ – tensiunea superficială; R_m – raza medie descrisă de mijloacele celulelor cu fluid de pe suprafața liberă și care sunt vecine celulei curente.

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

3.1. Influența discretizării asupra soluției

Printre factorii care influențează precizia soluției obținute se numără și finețea gridului utilizat pentru discretizare, mărimea pasului de timp și precizia cu care se calculează soluția.

În programul elaborat, mărimea pasului de timp este stabilită automat în funcție de dimensiunile celulei și de restricțiile impuse de valorile maxime ale vitezelor, iar numărul de zecimale cu care se dorește efectuarea calculului este stabilit în faza de inițiere a programului.

Mărimea celulelor cu care se face discretizarea influențează de asemenea și precizia soluției, de multe ori chiar aspecte importante ale curgerii fiind eliminate în cazul unui grid prea grosier. Cu cât gridul este mai fin, cu atât crește precizia soluției dar timpul de calcul și necesarul de memorie pentru calculator cresc extrem de rapid.

În figura 2 sunt prezentate rezultatele pentru formele geometrice analizate în varianta unui grid format din 30×40, respectiv 60×80 celule. Existența obstacolelor interioare, obstacole reprezentate de miezurile din forme, a condus la imposibilitatea obținerii soluțiilor numerice în cazul unei împărțiri a pieselor în 15×20 celule. Pe timpul procesului de umplere, distribuția vitezelor fluidului este foarte importantă, iar tendințele de formare a vârtejurilor de recirculare apare doar în momentul în care forma este plină, la varianta cu 30×40 celule, în timp ce pentru varianta 80×60, acest fenomen se manifestă la grade de umplere mult mai mici. Astfel, se asigură o mai bună estimare a temperaturilor din interiorul topiturii, deoarece fenomenul de transport de căldură prin convecție este mai bine aproximat. De asemenea, căldura generată în interiorul celulelor cu fluid datorită frecării vâscoase este mai bine pusă în evidență, ceea ce conduce la creșterea preciziei de estimare pentru temperaturile din topitură. O diferență semnificativă pentru cele două griduri se observă în zonele în care există colțuri, ca și în jurul obstacolelor interne, zone în care are loc de regulă inițierea procesului de nucleație și creștere a grăunților. De asemenea, trebuie remarcat faptul că pentru aceleași opțiuni de compilare și pe același calculator (PC-Pentium 4 GHz), timpii de calcul diferă semnificativ: pentru gridul 30×40 rezultatul s-a obținut în 15,52 minute pentru faza de umplere a formei și 1,2 minute pentru faza de solidificare, în timp ce

soluția în cazul 80×60 s-a obținut în cca 64,2 minute pentru faza de umplere și în 2 minute pentru solidificarea topiturii.

3.2. Profilul vitezelor și aspectul suprafeței libere

În figura 3 sunt reprezentate vitezele și suprafața liberă pe parcursul procesului de umplere a formei. Pe parcursul umplerii, metalul topit întâlnește obstacolul intern și o parte a acestuia este deviată către pereții formei. Aspectul frontierei libere nu este neted pe întregul proces de umplere; astfel, pentru grade de umplere de aproximativ 50% apare un aspect ondulatoriu al suprafeței în zona în care a fost depășit obstacolul intern, aspect datorat atât existenței obstacolului cât mai ales efectului gravitațional.

În figura 4 este pusă în evidență sursa de căldură provenită din efectul de frecare vâscoasă, fiind evidențiate zonele în care disiparea de căldură conduce la creșterea temperaturii ca și cele în care fenomenul conduce la micșorarea temperaturii, din interiorul fluidului. Astfel, în imediata apropiere a zonelor în care există obstacole care conduc la modificarea direcției de curgere a fluidului (obstacole interne, colțuri, îngustări ale domeniului etc.), se observă afectarea câmpului termic datorită viscozității fluidului. Pentru cazul formelor cu geometrie simplă, fenomenul se manifestă doar la grade de umplere foarte mari, în timp ce în cazul unor forme cu geometrie mai complexă, acesta poate apărea la grade de umplere mult mai mici. Atunci când în interiorul fluidului există tendințe de formare a vârtejurilor datorate modificării direcției de curgere, în aceste zone tind să se acumuleze bule de aer și impurități care să conducă la defecte interne majore. O cerință majoră a turnării constă în asigurarea unei umpleri cât mai uniforme a formei, fără apariția, pe cât posibil, a vârtejurilor care pot să genereze defecte. Astfel, prin modelarea curgerii pe parcursul umplerii formei, se poate evita procesul de apariție a defectelor primare, cum ar fi pori, impurități și segregatii care pot să fie generate în interiorul piesei sudate.

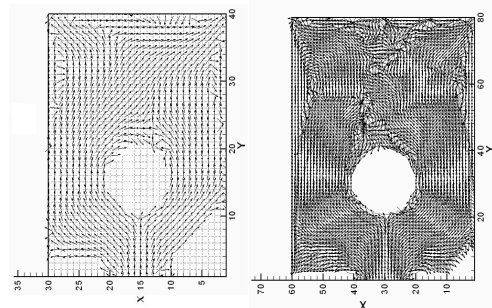


Fig. 2. Aspectul curgerii în momentul umplerii complete a formei pentru gridul cu 30×40 celule și, respectiv, 60×80 celule.

3.3. Distribuția de temperatură și rata de solidificare

În figurile 5 și 6 este reprezentată distribuția de temperatură pe parcursul umplerii forme de turnare pentru cele două cazuri de discretizare considerate. Figura 5 conține distribuția de temperatură pentru cazul unei discretizări în 30×40 celule, în timp ce figura 6 conține

distribuția de temperatură pentru cazul discretizării în 60×80 celule. Se observă că, deși în momentul umplerii forme între temperatura maximă și cea minimă există o diferență de 15K, respectiv 23K, temperatura fluidului nu este constantă și în zona colțurilor piesei și a obstacolului apar diferențe de temperatură semnificative. Acest fapt diferă de metoda clasică, în care se consideră o temperatură constantă în momentul umplerii forme.

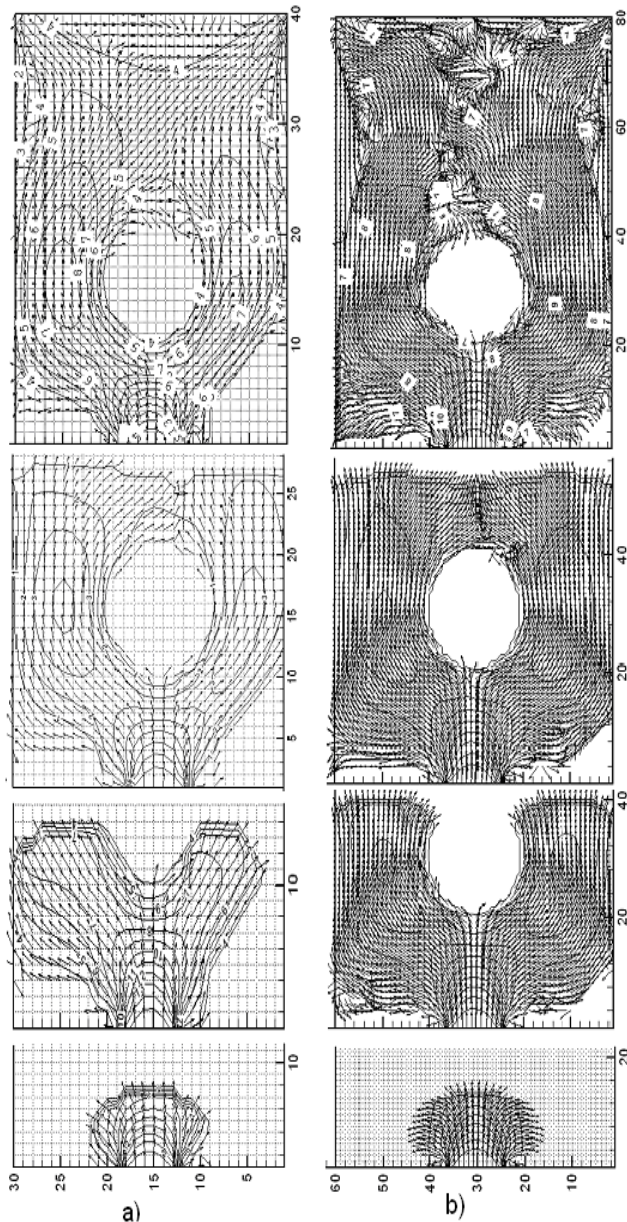


Fig. 3. Vitezele dezvoltate în procesul de umplere a forme:
a – 30×40 celule;
b – 60×80 celule.

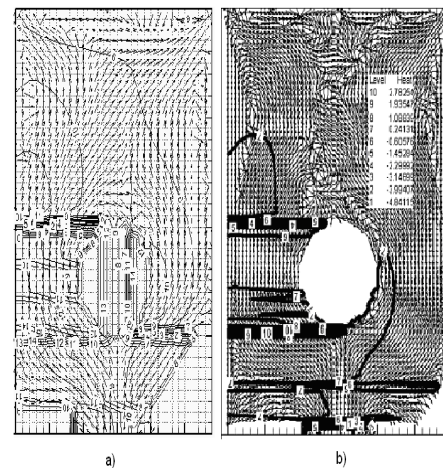


Fig. 4. Căldura disipată în procesul de umplere a forme:
a – 30×40 celule;
b – 60×80 celule.

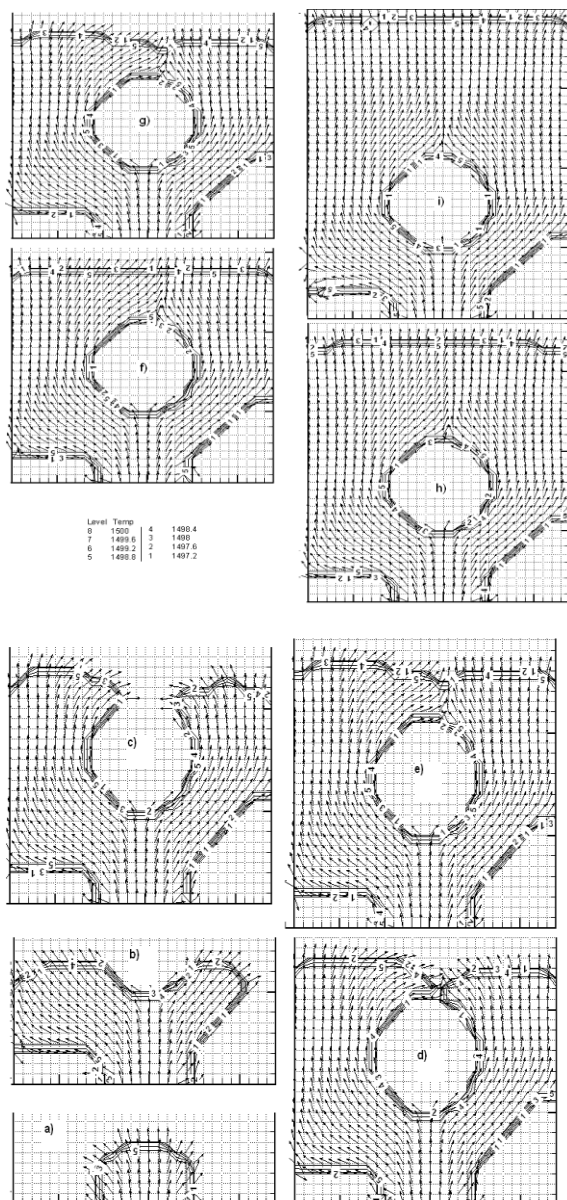


Fig. 5. Distribuția temperaturii în topitură pentru cazul umplerii formei (30×40 celule).

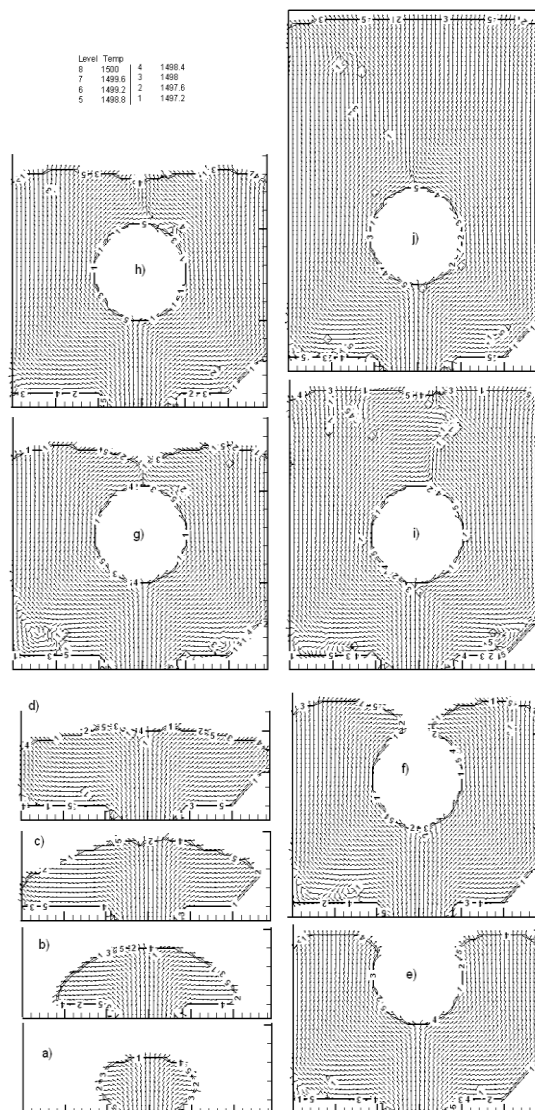


Fig. 6. Distribuția temperaturii în topitură pentru cazul umplerii formei (60×80 celule).

4. CONCLUZII

Rezultatele și observațiile cuprinse în lucrare se bazează pe rezolvarea problemelor legate de curgerea fluidului și distribuția de temperatură obținută în procesul de umplere a formei cu ajutorul metodei volumelor finite. Algoritmul utilizat a fost de tipul markerilor și celulelor, adaptat pentru o rezolvare cât mai rapidă a ecuațiilor Navier-Stokes pentru condițiile dezvoltării unor frontiere libere la umplerea și solidificarea unor forme cu geometrie complexă. Condițiile pe frontieră sunt de convecție atât

între fluid și suprafața solidă ce delimitează domeniul formei cât și între suprafața formei și aerul înconjurător.

Prin utilizarea programului elaborat pe baza algoritmului de calcul descris mai sus se pot trage următoarele concluzii:

- În cazul unui număr **Pr** apropiat de unitate, ceea ce este specific aliajelor metalice topite și pentru numere **Re** mici, indicele de apariție a turbulenței ζ este suficient de mic pentru a asigura o modelare a curgerii metalului lichid fără să fie necesară utilizarea unor algoritmi destinați analizei curgerii turbulente sau unor metode mult mai greoaie de calcul, bazate pe griduri adaptive.

- Caracteristicile principale ale curgerii metalului lichid în procesul umplerii formei ca și distribuția temperaturii din lichid pot fi vizualizate în orice moment al analizei, ceea ce oferă informații extrem de utile în procesul de proiectare a formei de turnare.
- Fluxul de căldură prin suprafața de separație dintre faza lichidă și solidă este analizat în funcție de caracteristicile curgerii, ceea ce conduce la îmbunătățirea soluțiilor obținute pentru câmpul termic față de metodele clasice în care valoarea coeficientului de convecție termică este impus.
- Modificările făcute față de metodele analitice sau numerice anterioare conduc la obținerea unor rezultate mai precise, ceea ce poate asigura un proces de proiectare superior al tehnologiei de turnare.

BIBLIOGRAFIE

1. **Amsden A. A., Harlow F. H.** Report L.A. 4370, Los Alamos Scientific Lab., (1970).
2. **Nichols B. D. and Hirt C. W.** J. Computational Physics, 8 (1971), 434.
3. **Nichols B. D., Hirt C. W. and Hotchkiss R. S.** Tech. Report L.A. 8355, Los Alamos Scientific Lab., (1980).
4. **Heinlein M., Mukherjee S. and Richmond O.** Acta Mech., 59 (1986), 59.
5. **Zabaras N., Ruan Y. and Richmond O.** J. Appl. Mech., 58 (1991), 865.6).
6. **Kangand B. H., Jaluria Y.** J. Thermophys. Heat Transfer, 7 (1993), No. 1, 139.
7. **Krane M. J. M. and Incropera F. P.** ASME, HDT Vol.284/AMD-Vol.182 (1994), 13.
8. **Lee J. and Hwang K. Y.** Int. J. Eng. Sci., 34, (1996), No. 8, 901.
9. **Lee J. and Hwang K Y.** J. Mater. Process. Technol., 57 (1996), 85.
10. **Patankar S. V.** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, (1980).
11. **Mills A. F.** Basic Heat and Mass Transfer, IRWIN, Concord, (1995), 22.
12. **Mizika E. A.** Trans. ASME, 239 (1967), 1747.
13. **Lee Jin-hoo, Mok Jin-hoo, Hong C.P.** Straightforward Numerical Analysis of Casting Process In a Rectangular Mold: From Filling to Solidification. ISIJ International, vol 38, (1999).