

# СЪВРЕМЕННИ ПОДХОДИ И ТЕНДЕНЦИИ ПРИ КОМПЮТЪРНОТО СИМУЛИРАНЕ НА ЛЕЯРСКИТЕ ТЕХНОЛОГИИ

## CONTEMPORARY APPROACHES AND TENDENCIES BY COMPUTER SIMULATION OF FOUNDRY TECHNOLOGIES

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕНДЕНЦИИ КОМПЬЮТЕРНОГО СИМУЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Assoc. Prof. Georgiev G.  
Institute of Metal Science  
Bulgarian Academy of Science, Sofia, Bulgaria

### **Abstract:**

The advantages and capabilities of recent software packages for simulation of foundry technologies are presented. A special attention is paid on the world famous commercial package MAGMASoft. The latest achievements in the field of mathematical modeling of the processes of mould filling, solidification of metal and alloys, phase transformation, crystal growth and optimization are performed. New criteria functions closely related with mechanical properties, quality or defects of the castings are shown and explained. The report shows how we can use the achievements of numerical simulation of casting formation to predict casting quality, to control the processes, to obtain high quality casting – casting with 100% feeding in the entire volume and without porosity and defects, and finally to optimize the casting production.

### **1. Увод**

Леярството е много старо изкуство, но с бурното развитие през последните тридесет години на математическото моделиране и компютърното симулиране в областта на материалознанието, то вече се е превърнало в бързо развиваща се в различни направления наука. Навлизането на компютърния софтуер в световната леярска практика отдавна вече не е екстравагантна украса за ефектно представяне на изделията, а се е превърнало в неразделна част от научно-изследователската, проектантската и развойната дейност, свързана с прецизирането и оптимизирането на леярските технологии, създаването на отливки с високи експлоатационни качества, снижаване на разхода на метал, реализирането на енергийни икономии, рязко съкращаване на времето за цикъла проектиране-реализация, бърза и точна, качествена и количествена диагностика на широка гама от евентуални дефекти.

Един от световно известните софтуерни пакети за такива цели е известен под името **MAGMASOFT**. Той е създаден от фирмата **MAGMA GmbH** със седалище гр. Ахен, Германия. Пакетът се развива и обогатява непрекъснато от сътрудниците на фирмата, посредством разработката на множество съвместни научни проекти с различни звена на водещи немски институти като Института по леярство в гр. Ахен, Макс Планк институт и др. Математическите модели, заложен в програмата, се обновяват непрекъснато като в тях биват отразявани повечето от най-съществените научни разработки в областта на материалознанието, били те обект на докторски дисертации или научни публикации. Разширяват се и се усъвършенстват както математическите модели, обхващайки все по-широк кръг от явления и процеси, така и базата данни, която позволява третирането на все по-широк кръг от материали и сплави, а така също и методите на леене. Общопризнат факт е, че **MAGMASOFT** няма конкуренция по отношение на вградената база от данни в пакета. По такъв начин, тя успешно се конкурира с най-известните и мощни програми от бранша, като **ABBACUS**, **PROCAST**, **ANYCASTING**, **NOVACAST**, **3D-FLOW**, **LM-FLOW**, **PATRAN** и др.

В тази връзка бих искал да отбележа, че в нашата страна и точно в Института по металознание при БАН “Акад. А. Балеvски” (Имет-БАН) в гр. София се разполага с **MAGMASOFT** от повече от 10 годни. Първоначално, програмният пакет бе предоставен за научни изследвания, като резултат от успешно съвместно изпълнение на проект “**COPERNICUS**” – една от водещите европейски програми за научно развитие. От 2005 година насам, Имет-БАН е изключителен и официален дистрибутор на програмните

продукти на **MAGMASOFT** за България и разполага с последните им версии. Той е оторизиран както да продава лицензи за ползване на програмите, така и да сключва договори за оказване на технологична помощ и реализиране на конкретни проекти с извършване на симулации и оптимизации на конкретни леярски технологии.

Настоящото изложение има за цел да представи кратко описание на структурата и възможностите на съвременните софтуерни пакети за симулиране на различните леярски технологии, като наблегне на техните нови възможности, предлагани в последните им версии.

### **2. Общи структурни особености и принципи на работа със софтуерните пакети за симулиране на леярските технологии.**

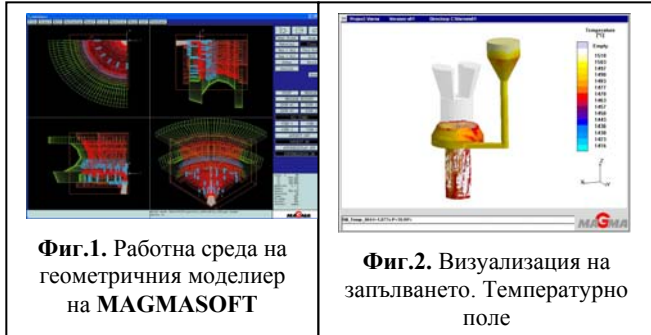
Повечето от съвременните софтуерни пакети предназначени за леярството са широкообхватни програмни продукт за компютърна симулация на физическите процеси при формиране на отливки и позволяват третиране на почти всички използвани в съвременната практика методи на леене. Особено внимание се обръща на:

- запълването на леяковата система и формата със стопилка при условия максимално близки до реалните;
- процесите на топлопренос и кристализация /включително и по време на запълването/;
- оценка на формираната се структура и разпределението на евентуални дефекти на базата на голям набор от критериални функции.

Работата с тях се осъществява на няколко етапа:

- организация и управление на симулационните проекти - модул “Project Manager” (в **MAGMASOFT** този модул носи името **MAGMAproject**);
- геометрично моделиране на системата отливка -форма - леякова система – модул “3-D моделиране”;
- генериране на мрежа от пространствени елементи в 3-D;
- избор на вида на леене и задаване на основните технологични параметри – модул “Пред-процесорна обработка”;
- симулиране на процеса на запълване на леяковата система и формата със стопилка при съвместно решаване на задачата за течението на флуида със задачите за топлопренос и топлопредаване;
- симулиране на процесите, протичащи по време на кристализацията на отливката;
- симулиране на цикличен леярски процес в случаите на леене под ниско налягане, леене с газово противоналягане или леене с машини под високо налягане;

- пространствена, цветно-кодирана визуализация на получените резултати - модул "След-процесорна обработка". Геометричният моделиер на повечето от програмите като правило притежава голяма гама от разнообразни геометрични фигури и широк набор от операции над тях като трансации, ротации, мащабиране и др., които позволяват бързо и точно построяване на обекти и системи с най-сложна геометрия. В същото време се осъществява визуализация на системата от тела едновременно в различни ортогонални проекции и в перспектива – **Фиг.1.**



**Фиг.1.** Работна среда на геометричния моделиер на MAGMASOFT

**Фиг.2.** Визуализация на запълването. Температурно поле

Всяка от програмите е снабдена с автоматичен и бърз генератор на мрежа от елементи, която разбива системата от тела на контролни обеми за целите на използваните числените методи. На всеки от използваните материали с помощта на специално организирана база от данни се присвояват всички параметри и физически константи, необходими за симулацията. В повечето случаи това са сложни функции на времето или температурата. За всяка гранична повърхност на пространствените области, участващи в системата, следва да се зададат подходящи гранични условия, за които се предлага богата библиотека от възможности. Базите данни като правило поддържат няколко вида библиотеки - централна, на потребителя, индивидуална за конкретния проект и др., създавайки удобства и комфорт при ползването им.

Симулирането на леярския процес в повечето случаи е реализирано на модулен принцип. На всеки леярски метод съответства отделен специализиран модул. По този начин, чрез богат модулен набор, програмните пакети поддържат широк клас от леярски методи - гравитационно леене, леене под ниско налягане, леене под високо налягане, течно и полутечно шамповане, цикличен леярски процес и много други.

Всеки вид симулиране се предхожда от пред-симуляционна подготовка, протичаща в диалогов режим, в който потребителят трябва да зададе необходимите параметри.

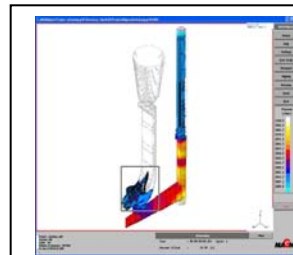
## 2. Основни възможности на софтуерните пакети.

Общи модули:

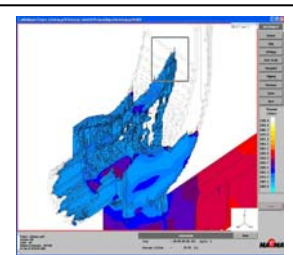
Първият от общите модули (**MAGMafill** при **MAGMASOFT**) симулира процеса на запълване на леяковата система и кухнята на формата със стопилка, като решава едновременно и задачата за топлопренос в цялата система: стопилка, форма, охладителна система и кристализация на стопилката (ако има такава). В резултат потребителят разполага с възможно най-пълната информация за процесите по време на запълването:

- визуализация на движението на флуида и неговото температурно поле във всеки момент от запълването – **Фиг.2;**
- векторно представяне на скоростите на флуидните частици и цветно изображение на налягането по време на запълването – **Фиг.3;**
- многократно увеличение / лупа / на всеки детайл от системата – **Фиг.4;**

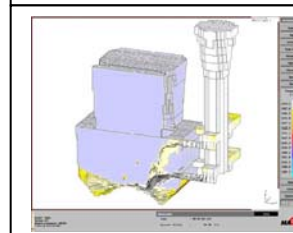
- визуализация на турбулентни или струйни ефекти / най-често нежелателни/ - **Фиг.5;**
- траекторията на предварително избрани частици на стопилката – **Фиг.6;**



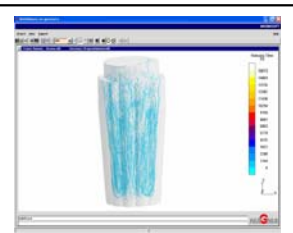
**Фиг.3.** Векторно поле на скоростите и цветно кодирано поле на налягането



**Фиг.4.** Възможност за многократно увеличение на всеки детайл

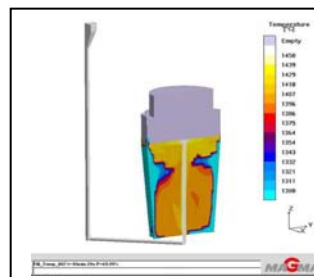


**Фиг.5.** Описание на турбулентност и струйни ефекти

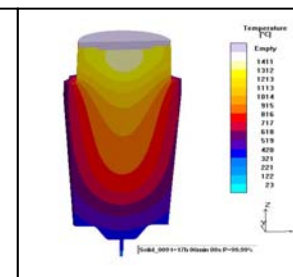


**Фиг.6.** Траектории на отделни частици на стопилката: "Tracer"

Някои от софтуерните пакети като **MAGMASOFT** и **PROCAST** могат да симулират процесите на фазови превръщания още в процеса на запълване на формата – **Фиг.7.** Притежаването на такава възможност е особено важно при леене на тънкостенни отливки в метални форми при относително високо ниво на топлообмена. От една страна, кристализиралата вече фаза променя условията, при които се осъществява течението на стопилката, което е важно да бъде отчетено за да бъдат получени реалистични резултати. От друга страна, преждевременната кристализация може да доведе до блокиране на течението и в крайна сметка до негодна отливка, за което също е важно да бъде получена достоверна информация.



**Фиг.7.** Кристализация по време на запълване на формата



**Фиг.8.** Температурно поле по време на кристализация

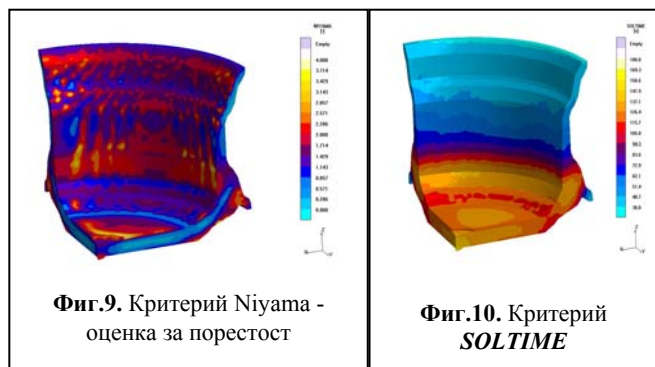
Всички софтуерни пакети, без изключение, предоставят възможност да се следи температурното поле на всички елементи на системата отливка-форма по време на кристализацията след запълване на кухнята на формата (**Фиг.8**). Повечето от тях предлагат специализирани критерии за прогнозиране на качествата на отливката. В повечето случаи това са феноменологични критериални функции, които представляват различни комбинации от производни на температурното поле. Тяхната корелация с различни свойства на отливката е проучена и добре известна отдавна<sup>[1,2]</sup>. **MAGMASOFT** е единствен измежду известните леярски пакети, който предоставя свободата на

потребителя да въвежда критериални функции по собствено осмисленост. Стойностите на тези функции се представят графично във всяка точка на отливката. Най-важните и информативни от тях са:

**Термичен градиент  $G = \partial T/\partial x$  и скорост на охлаждане  $R = \partial T/\partial t$ :** Ниските стойности на двете величини тясно корелират с големината на първичните депдрити. По-грубата дендритна структура понижава механичните качества на отливката и в най-голяма степен - пластическите свойства на материала.

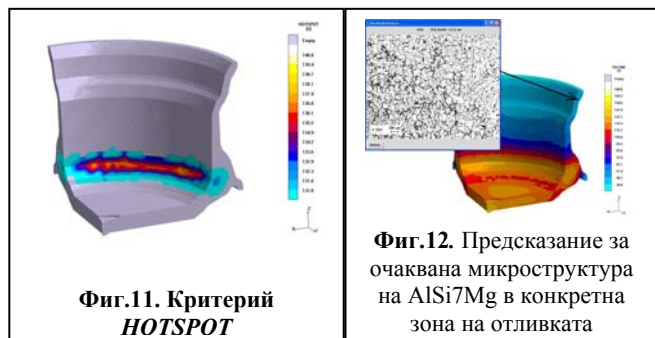
**Критерий *Niyama*** е най-често използвания критерий, който оценява вероятността за възникване на порестост в дадена област на отливката. Представява функция от величините - термичен градиент  $G = \partial T/\partial x$  и скорост на охлаждане  $R = \partial T/\partial t$ , а именно  $N = GR^{1/2}$ . Ниските стойности на  $N$  корелират с висока вероятност за пористост – **Фиг.9.**

**Време за кристализация  $\epsilon$  и свързания с него *SOLTIME*.** Този критерий е свързан с размера на вторичните дендритни разклонения - ***DAS***. За всяка конкретна сплав функционалната връзка между  $\epsilon$  и ***DAS*** има специфичен вид. От друга страна съществува добре установена обратна зависимост между големината на ***DAS*** и якостта на опън (***UTS***). Неговият вид в един конкретен пример за автомобилна джанта може да бъде видян на **Фиг.10.**



**Ефективност на подхранване.** Критерий, който показва каква част от течният метал, необходим за компенсиране на обемното свиване, успява да премине през дендритната мрежа до фронта на кристализацията. Той зависи както от условията, при които протича кристализацията, така и от свойствата на сплавта. Първите се отчитат от физическите модели, заложи в софтуера, а вторите са зададени в базата от данни. Предвидена е възможност обемният дефицит да се интерпретира като обемна порестост и да бъде получено нейното количествено разпределение в обема на отливката. Резултатите от този критерий се визуализират под названието ***HOTSPOT*** и дават отчетлива картина на евентуалните термични възли – **Фиг.11.**

Използайки комплексна критериална оценка за условията на кристализацията във всяка локална област на отливката **MAGMASOFT** предлага предсказание за очакваната микроструктура в тази област. Една визуализация на тази възможност на примера на автомобилна джанта от **AlSi7Mg** може да бъде видяна на **Фиг.12.**



### 3. Специализирани модулни пакети.

По-нататък ще бъдат разгледани няколко специализирани модулни пакети на **MAGMASOFT**, които представляват нейно уникално “ноу-хау” и й дават съществено предимство пред останалите сродни софтуерни пакети.

**1. MAGMAIpdс** е предназначен за леене под ниско налягане.

Той позволява да се реализират специфичните за метода хидродинамични параметри на леене. Най-подходящ е и за третиране на леене по метода с газово противоналягане. Снабден е със всички необходими инструменти за симулиране на цикличния леярски процес във всички негови детайли: гъвкаво и универсално управление на въздушни и водни охлаждения, на евентуални нагреватели, отчита влиянието на основните фактори и операции, влияещи на термодинамичното състояние на всеки от детайлите на прес-формата, когато тя е отворена – опресняване на обмъкката, допълнително охлаждане с въздух или водна емулсия, конвективно охлаждане на въздух към околната среда и много други.

**2. MAGMAiron** е модул за **МИКРОСТРУКТУРНО** моделиране чрез симулиране на кристализацията и **ФАЗОВИТЕ ПРЕВЪРЩАНИЯ В ТЪВРДО СЪСТОЯНИЕ** на чугуни и съпътстващите ги явления. Симулацията на кристализацията се реализира на съвременно ниво за различни видове чугуни. Модулът е специализиран за третиране на евтектичен сив чугун с пластинчатата форма на графита, евтектичен сферографитен чугун и евтектичен бял чугун. Използвани са най-съвременните модели за кинетиката на фазовото израстване и съпътстващите явления при кристализация на чугуни. Модулът използва законите, на които се подчинява кристализацията, за да пресметне формирането на микроструктурата и влиянието на графитизацията или свиването и третира следните процеси:

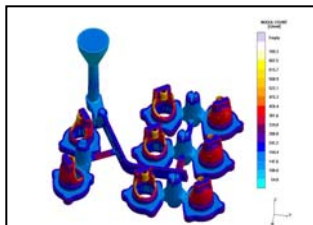
- пластинчато евтектично израстване на А-тип графит;
- пластинчато евтектично израстване на D-тип графит;
- сферографитно евтектично израстване;
- бяло евтектично израстване;
- превръщане в твърдо състояние на аустенита във ферит и перлит;
- разпадане на перлит;
- Смуканатините на ковкия чугун се определят чрез пресмятане на свиванията и разширенията на аустенита и графита по време на кристализационния процес.

За чугун със сферодален графит (**SG** чугун) може да бъде пресметнато следното:

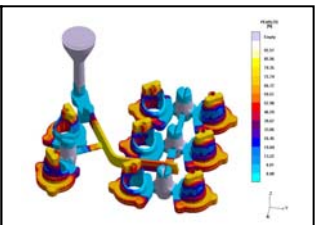
- броят на сфероидите /глобулите / в сферографитен чугун **Фиг.13;**
- фракция на перлит /**Фиг.14/** и ферит /**Фиг.15/;**
- дебелина на ферита в чугун със сферодален графит ( в  $\mu\text{m}$ );
- разпределение на твърдост по Бринел (HB);
- разпределение на минималната граница на якост на опън ( в  $\text{N/mm}^2$ );
- разпределение на минималната граница на провлачане ( в  $\text{N/mm}^2$ );
- разпределение на модула на Юнг ( в  $\text{N/mm}^2$ );
- разпределение на минималното удължение при разрушаване ( в %);
- прогнозиране на застрашените от дефекти области в отливката.

За чугун могат да бъдат пресметнати:

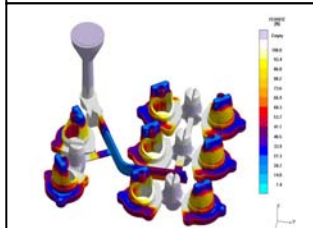
- разпределение на големината на евтектичните клетки ( в  $\text{mm}$ );
- разпределение на размера на пластините ( в  $\text{mm}$ );
- количество и разпределение на преохладен графит;
- разпределение на твърдост по Бринел (HB);
- разпределение на минималната граница на якост на опън ( в  $\text{N/mm}^2$ );
- количество на белия чугун.



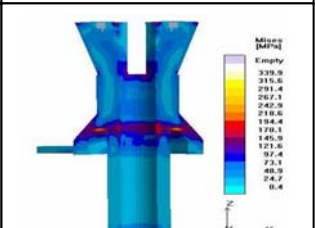
**Фиг.13.** Предсказание за броя на глобулите на  $\text{mm}^2$  за вермикуларен чугун



**Фиг.14.** Разпределение на перлита във вермикуларен чугун

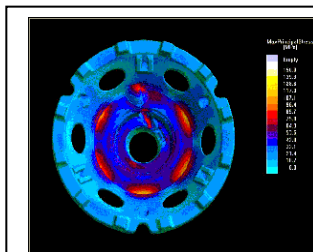


**Фиг.15.** Разпределение на ферита във вермикуларен чугун

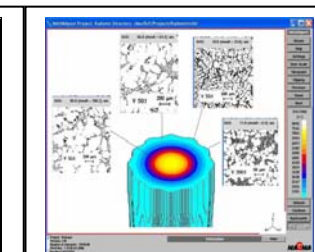


**Фиг.16.** Остатъчни напрежения в отливката

3. **MAGMabatch** - за симулиране на цикличен технологичен процес при формиране на отливки;
4. **MAGMASress** - модул, работещ съвместно с **MAGMASolid**, пресмятащ напрегнато-деформируемостта състояние на системата отливка-форма на базата на термоеластично-пластични математически модели. Позволява симулиране и прогнозиране на текущите и остатъчните напрежения в отливка и форма – **Фиг.16**. На тази база софтуерът предлага специализиран критерий – “**HOTTEAR**” за локализиране на зоните, засрашени от горещи пукнатини – **Фиг.17**. Модулът работи както при леене в пясъчни форми, така и при леене в метални пресформи.

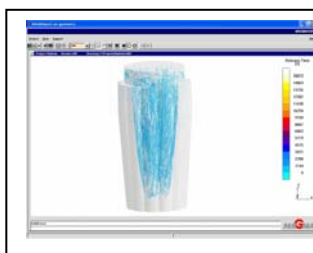


**Фиг.17.** Оценка на риска от горещи пукнатини

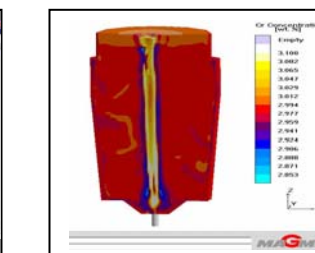


**Фиг.18.** Прогнозиране на формираната структура

5. **MAGMAsteel** – специализиран модул, третиращ проблемите, свързани със симулацията на стоманени отливки, снабден със съответните физически модели за формиране на структурата им – **Фиг.18**. Най-съществените от тях са:
  - описание на термичната конвекция на компонентите в течната фаза – **Фиг.19**;

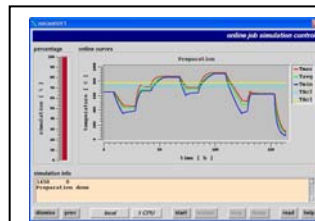


**Фиг.19.** Термична и концентрационна конвекция в течната фаза

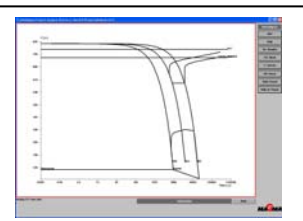


**Фиг.20.** Разпределение на Si в резултат на ликвацията

- отчитане на дифузията на компонентите на сплавта в твърдо състояние;
- описание на ликвацията по време на кристализация – **Фиг.20**;
- симулация на температурното поле и прогнозиране на фазовото разпределение при термообработката на николегирани стомани – **Фиг.21**;
- SST диаграмите на сплавта – **Фиг.22**.



**Фиг.21.** Симулация на термична обработка при стомани

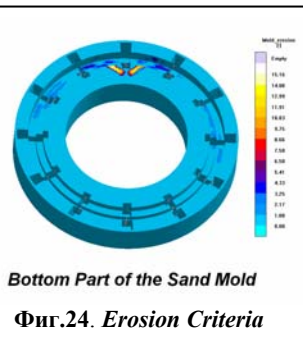


**Фиг.22.** SST диаграми

6. **MAGMAhpdс** - за симулиране на процесите при формиране на отливки при леене с високо налягане – **Фиг.23**.
7. На базата на симулацията на взаимодействието между стопилката и пясъчната форма, софтуерът предлага критерий – “**Erosion Criteria**” за прогнозиране и локализация на зоните от повърхността на отливката, засрашени от разрушаване по време на процеса на запълване – **Фиг.24**.



**Фиг.23.** Формиране на отливки в условия на високо налягане /HPD-casting/



**Bottom Part of the Sand Mold**  
**Фиг.24. Erosion Criteria**

#### 4. Заключение

Съвременните софтуерни пакети за симулация на леярските технологии са базирани на най-съвременни математически модели на физическите процеси, протичащи при формирането на отливките, което го прави изключително полезно средство за: прогнозиране на почти всички леярски дефекти; формиране на висококачествени отливки; оптимизация на структурата и механичните свойства на изделията. Следва да се отбележи обаче, че успешното прилагане на този мощен инструментариум не може да бъде ефективно реализирано без рязко повишаване на професионалната квалификация на кадрите в бранша. Предстои да се извърви още дълъг път на сближаване на натрупания евристичен опит с най-новите модерни научни постижения в материалознанието и от там до успешното прилагане на компютърното симулиране в практиката. Друг важен фактор за получаването на реалистични резултати със софтуерните продукти е щателният и прецизен подбор на необходимите материални параметри, при това в целия актуален температурен диапазон. В противен случай, софтуерните продукти ще дадат много красиви, но безполезни за практиката решения.

#### 5. Литература

1. Huang, H., J., T. Berry, T.S. Pivonka, The use of Criteria Functions to predict Porosity in aluminum Alloy Investment Castings, 40-th Annual Technical Meeting, Investment Casting Institute, (1992).
2. P. R., Sahn, P. N. Hansen, Numerical Simulation and Modeling of Casting and Solidification Processes for Foundry and Cast-House, CIATF, p.106-192, (1984).