

Анализ на остатъчните напрежения в стоманена отливка и избор на обработка за тяхното намаляване

гл.ас. д-р инж., Николай Д. Николов, Технически университет-София,
e-mail: nyky@tu-sofia.bg, тел. 02 965 3291

Резюме: Анализ на остатъчните напрежения в стоманена отливка и избор на обработка за тяхното намаляване.

В тази статия с помощта на компютърна симулация са получени остатъчните напрежения в примерна стоманена отливка, формирани при изстиването след нейното отливане. Направен е анализ на напрегнатото състояние в отливката и на причините за формиране на напреженията в отделните части, с цел да се прецени необходимостта от намаляване на напреженията и да се избере подходящ метод за борба с тях. Описани са някои от възможните методи за намаляване на остатъчните напрежения и са препоръчани два от тях.

Ключови думи: леене в пясъчна форма, стоманена отливка, остатъчни напрежения, компютърно симулиране.

Увод

Независимо от мерките, които се взимат в конструктивно и технологично отношение, често в готовите отливки има остатъчни напрежения с опасно високи стойности, или недопустимо големи остатъчни деформации. В тези случаи леярите трябва да избират между това да бракуват готовото изделие, или да го подложат на допълнителна обработка, за да стане годно за експлоатация.

В миналото често готовите отливки са били оставяни на открито в двора на леярните за период от 1-3 години. Променливите атмосферни условия ускоряват процеса на пълзене в напрегнатите обеми метал и водят до понижаване на напреженията. Този метод е максимално енергийно ефективен, но твърде бавен. Тъй като якостта на металите намалява с увеличаване на температурата, а пластичността им се повишава, в днешно време най-често използваният метод за борба с остатъчните напрежения е допълнителната термична обработка [1]. При нея отливките се нагряват в пещи, задържат се при избраната температура определено време и се оставят бавно да се охладят. Установено е, че ако стоманени или чугунени отливки се задържат при температура 700 °C за 1-2 часа, а след това бавно се охладят, ще бъдат премахнати почти 100% от остатъчните напрежения в тях.

Поради високата цена на енергията и значителната продължителност на процеса, допълнителната термична обработка оскъпява продукцията. При голямо габаритните отливки възникват и допълнителни трудности, свързани с транспортирането и разполагането им в пещта. В някои случаи цялостната термична обработка се оказва невъзможна. Тя е особено неизгодна, когато остатъчните напрежения имат недопустими стойности само в ограничени области от отливката.

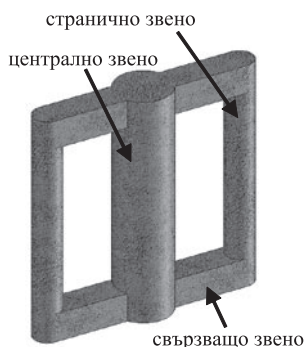
Необходимостта от намаляване на остатъчните напрежения в отговорни отливки и проблемите при цялостната термична обработка са предпоставка за търсенето на иновативни методи, които да са едновременно ефективни и икономически изгодни. В литературата [1] са описани някои възможни обработки – например пластично деформиране на преси, неравномерно нагряване, вибрационно въздействие. За разлика от стандартната термична обработка, тези методи се постига само частичен ефект. Необходимо е много добре да се познава разпределението на напреженията в отливката, за да се изберат правилно зоните и режимите на въздействие, в противен случай лесно може да получат напрежения със стойности, по-високи от тези преди обработката, и даже да се стигне до разрушаване на изделието.

Компютърното симулиране на леярския процес дава възможност да се получи разпределението на остатъчните напрежения и да се проиграват различни варианти за борба с тях. Днес компютърните симулации се използват масово в леярската практика, като обикновено се използват специализирани комерсиални програми [2]. Най-често се симулират процесите на наливане, кристализация и охлаждане на отливката, с цел да се усъвършенства наливната система и системата от мъртви глави. Малка част от тези програми имат модули за пресмятане на остатъчни напрежения и деформации, но цената им е много висока, а

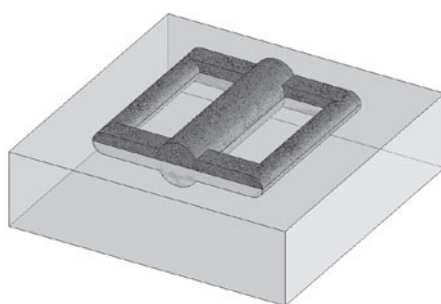
възможностите за адаптиране към специфични задачи не винаги са достатъчни. Поради тази причина съществуват и многобройни разработки, при които изследователите използват универсални програмни пакети за инженерни анализи, в които създават необходимите изчислителни модели. В настоящото изследване ще бъде използвано едно такова решение [3], при което остатъчните напрежения и деформации се пресмятат с програмен пакет ANSYS, по метод на крайните елементи.

Обект на изследване

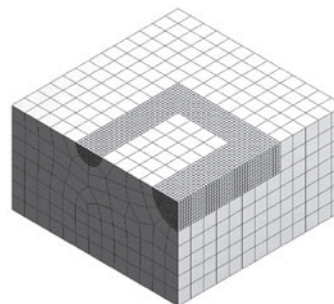
Обект на настоящото изследване е правоъгълната двуконтурна рамка, показана на фиг.1. Рамката се състои от едно централно и две странични звена с кръгово напречно сечение, с диаметри съответно 40 мм и 20 мм. Връзката между тях се осигурява от четири свързващи звена с правоъгълно напречно сечение, с размери 20x20 мм. Габаритите на рамката са 160x160x40 мм. Рамката е отлята от стомана 20Л в пясъчна форма от кварцов пясък. Формата е правоъгълна, съставена от две полуформи (фиг.2), с минимална дебелина 60 мм. Наливната система и мъртвите глави не са моделирани.



Фиг.1 Общ вид на отливката



Фиг.2 Разположение на отливката в долната полуформа



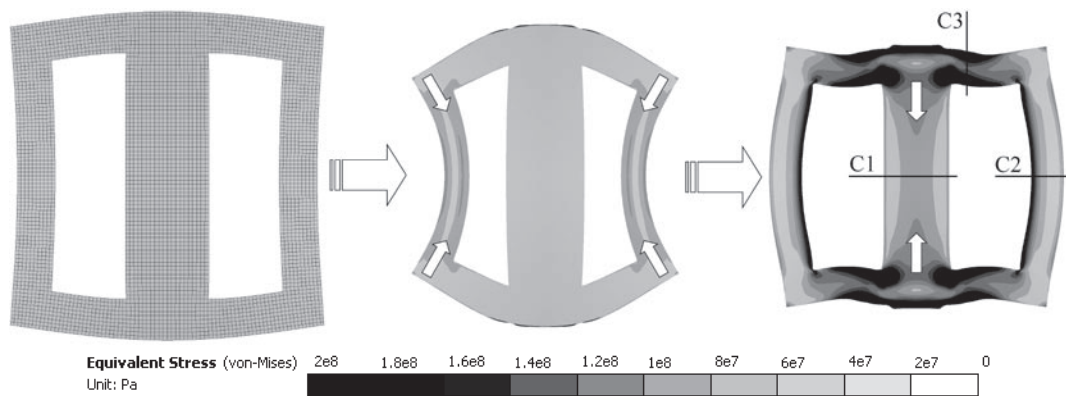
Фиг.3 Мрежа от крайни елементи

Показаните отливка и форма имат три равнини на симетрия. За ускоряване на пресмятанията, е моделирана само 1/8 от тях (фиг.3). Телата са разделени на мрежа от хексагонални крайни елементи, предимно с формата на куб. Елементите на отливката са с размер 2 мм, а на формата – 10 мм.

Този тип рамка не е избран случайно. Тъй като формирането и разпределението на напреженията в нея се обясняват лесно, такива рамки често са ставали обект на различни изследвания. Още през 1913 г. Steiger измерва напреженията в централното звено на подобна рамка, отлята от сив чугун и докладва, че те надвишават 200 MPa, което е достатъчно за настъпване на разрушаване по време на охлаждането [1]. В друго изследване [4], отново от чугун са отлети серия от рамки, за да се изследва експериментално влиянието на различни фактори върху големината на остатъчните напрежения в централното звено. Направени са многобройни измервания, при които са получени стойности в диапазона 40-90 MPa. Тези стойности са установени, като е измерено удължението в централното звено на изстиналата отливка, което се получава при прерязване на страничните звена и премахване на статичната неопределеност. След това напреженията се пресмятат по закона на Хук. Получената стойност е интегрална. Тя не дава никаква информация за разпределението на напреженията по напречните сечения на централното звено и по обема на отливката като цяло.

Напрежения и деформации в рамката

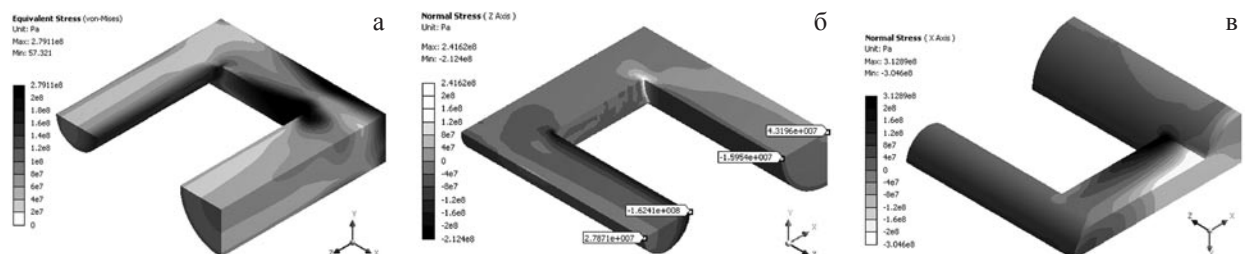
Компютърната симулация протича на последователни стъпки във времето. В първоначалния момент е зададена температура на отливката 1580 °C, а на формата – 28 °C. Симулацията продължава 15000 секунди, за което време отливката се охлажда до около 60 °C. На фиг.4 са показани напреженията и деформациите в три момента от охлаждането на рамката – съответно 10, 400 и 15000 секунди след началото на симулацията.



Фиг. 4 Формиране на деформации и напрежения в хода на изстиването

Хронологията на формиране на остатъчните напрежения и деформации в разглежданата рамка е описана подробно в литературата [1,4,5]. Тъй като страничните звена са с по-малък диаметър, те се охлаждат и свиват най-бързо. Поради високата температура, останалата част от рамката се деформира без да оказва съществена съпротива. Централното звено е подложено на натиск, а страничните – на опън. На следващ етап, страничните и свързващите звена са добили значителна коравина и започват да противодействат на свиването на централното звено. В централното звено се формират напрежения на опън, а в страничните – на натиск.

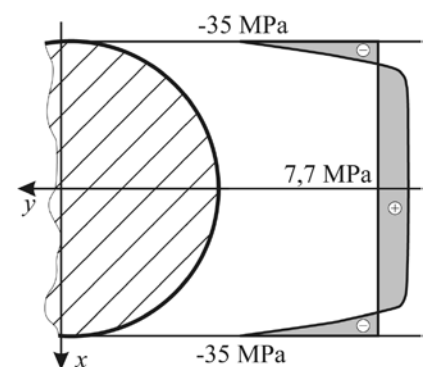
Това обяснение, макар да е логично и лесно разбираемо, дава много груба представа за разпределението на напреженията в рамката. Разпределенията, получени чрез компютърна симулация (фиг.4 и 5), позволяват по-задълбочен анализ, с който да се избере подходящ метод и режим за следваща обработка. Както се вижда от третото изображение на фиг.4, страничните звена са подложени на силно ексцентричен натиск. Централното звено е подложено на центричен (но не осов) опън, а свързващите звена – на огъване и срязване. При това напреженията са разпределени неравномерно по напречните сечения. За оценка на напреженията са избрани три сечения, означени на фиг.4. Сечение 1 (C1) и сечение 2 (C2) са напречни на страничното и централното звено, през една от равнините на симетрия, а сечение 3 (C3) е напречно на свързващото звено, в зоната с максимални еквивалентни напрежения.



Фиг.5 Еквивалентни и нормални остатъчни напрежения

На фиг.5б са показани нормалните напрежения по направление на страничните звена (σ_z). Вижда се, че от вътрешната страна на сечение 1 има натиск с големина 162 MPa , а от външната страна – опън с големина 28 MPa . Това разпределение се дължи на комбинацията от огъване и натиск, породена от ексцентрицитетата на натискащата сила.

Неравномерно са разпределени напреженията и в сечение 2 – те са приблизително -16 MPa по периферията на средното сечение, и около $+43 \text{ MPa}$ в центъра. Причините за това разпределение са две. Първо, опънът в централното звено, макар и центричен, не е осов, а е формиран от четири сили, упражнени от страничните звена. Второ, в хода на изстиването периферията на цилиндъра се охлажда и вкоравява първа, след което противодейства на свиването на по-топлата сърцевина. При това по периферията се формират остатъчни натискови, а в центъра – остатъчни опънови напрежения. Тук за оценка на това


 Фиг.6 Остатъчни напрежения σ_z при охлаждане на проста цилиндрична отливка с диаметър 40 мм

обстоятелство, също описано в литературата [2,5], е направена отделна симулация – на проста цилиндрична отливка, с диаметър 40 мм. Нормалните напрежения по ос z, получени от тази симулация, са показани на фиг.6. Вижда се, че по повърхността на цилиндъра се формират напрежения от -35 МПа, в средата – около +8 МПа. Когато опъновите напрежения в централното звено на двуконтурната рамка не са големи, напреженията по периферията на централното звено могат да останат натискови, въпреки че сумарно звеното е подложено на опън, както е в случая.

Най-големи са напреженията в свързващото звено (фиг.5а), в близост до връзката му с централното звено. Там напречните сечения са подложени на едновременно огъване и срязване. Нормалните напрежения достигат до 300 МПа, като са опънови от вътрешната страна и натискови – от външната (фиг.5в). Концентрирането на напрежения в тази област се дължи и на неравномерното охлаждане на свързващото звено, което по време на изстиването е по-горещо и по-малко кораво откъм централното звено, и претърпява в тази зона по-големи деформации.

Анализ на пресметнатите напрежения и избор на метод за борба с тях

В отливката са налице две зони с нежелателно високи напрежения, видими от фиг.5а. Необходимо е да се извърши допълнителна обработка за тяхното намаляване. Най-сигурен, но и с най-голям разход на енергия е методът на цялостна термична обработка. Тъй като напреженията имат високи стойности в ограничени обеми от отливката, може да се приложи и алтернативен метод. Например, прави впечатление, че от вътрешната страна на страничните звена, както и по външните повърхности на свързващите звена, е налице натиск. Ако бъде приложено бързо локално нагряване само в тези зони, ще се получи локална пластична деформация от натиск, която след охлаждане на отливката ще формира в нагнетите зони опънови остатъчни напрежения. При правилно подбран режим на нагряване, този опън ще компенсира първоначалния натиск, и ще се получи намаляване на напреженията както в натоварените сечения, така и в останалите обеми на отливката. За проверка на това предположение е необходимо допълнително изследване.

Заключение

Компютърното моделиране на остатъчните напрежения позволява да се получи детайлна картина на тяхното разпределение по обема на отливката и да се изясни механизмът на тяхното формиране. На базата на тази информация може да се прецени дали е необходима допълнителна обработка и каква да бъде тя. Освен това, става възможно резултатите от тези симулации да се използват като начални условия при следващи изчисления, които имат за цел да се определят параметрите на избраната допълнителна обработка.

References

1. Kampbell, J.: *CASTINGS. Second edition*. Butterworth-Heinemann, ISBN-0-7506-4790-6, 2003.
2. Beeley, P.: *Foundry Technology. Second edition*. Butterworth-Heinemann, ISBN-0-7506-4567-9, 2001.
3. Nikolov N., "Calculation of the residual stresses and deformations in castings by the finite elements method using the ANSYS software package". "Fundamental Sciences and Applications" – Journal of TU-Sofia, branch Plovdiv, vol. 14, 2009, p.197-202, Plovdiv, Bulgaria.
4. Budić, I., Novoselović, D.: The influence of technological parameters on occurrence of residual stresses in iron castings. *Metalurgija* 44 (2005) 4, p.285-289, ISSN 0543-5846, Zagreb, Croatia.
5. Lewis, R., Setharamu, K., Hassan, A.: Residual Stress Formation during Casting. In: *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, eds. G.Totten, M.Howesand, T.Inoue, p.361-371, ISBN 0-8717-0729-2, ASM International, MaterialsPark, Ohio, USA, 2001.