

Намаляване на остатъчните напрежения в стоманени отливки чрез неравномерно нагряване

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

Резюме: В тази статия е изследвано влиянието, което оказва неравномерното нагряване върху остатъчните напрежения, формиращи се в процеса на охлаждане на стоманена отливка с формата на правоъгълна двуконтурна рамка. Напреженията са пресметнати чрез термо-механична компютърна симулация, с помощта на метод на крайните елементи. Показано е, че с помощта на компютърното моделиране, при някои отливки може да се избере сполучлива стратегия за неравномерно нагряване, с която едновременно да се намалят остатъчните напрежения и да се постигне икономически ефект спрямо традиционната термична обработка.

Ключови думи: леене в пясъчна форма, стоманена отливка, остатъчни напрежения, компютърна симулация.

Увод

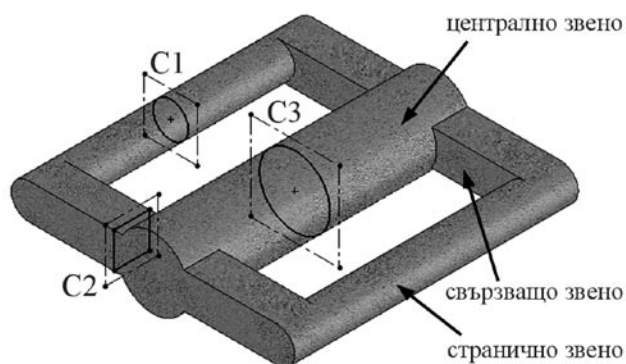
Когато в дадена отливка са налице недопустимо високи остатъчни напрежения, е необходимо да се вземат мерки за тяхното понижаване. Най-разпространеният и ефективен метод е цялостната термична обработка. Ако правилно се подберат параметрите на процеса, чрез тази обработка остатъчните напрежения могат да бъдат почти напълно отстранени [1,2]. Основен недостатък на цялостното нагряване е големият разход на енергия. Методът е особено енергийно неефективен в случаите, когато напреженията с големи стойности са концентрирани в сравнително ограничени обеми. Допълнителни трудности възникват при голямогабаритни и сложни по форма детайли, при които понякога този метод се оказва неприложим. В тези случаи са необходими други методи за обработка, които да са едновременно ефективни и икономически изгодни.

В настоящото изследване ще бъде разгледана възможността за намаляване на остатъчните напрежения чрез неравномерно нагряване на избрани зони от отливката. Ще бъде използвана примерна стоманена отливка, с формата на правоъгълна двуконтурна рамка (фиг.1). В [1] е направен задълбочен анализ на формирането и разпределението на остатъчните напрежения в тази отливка, и неравномерното нагряване е препоръчано като вариант за допълнителна обработка.

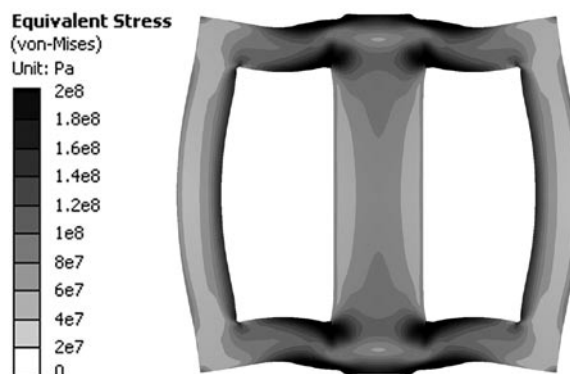
Обект на изследване

Обект на изследване е отливката, показана на фиг.1. Тя се състои от едно централно звено, две странични звена и четири свързващи звена. Централното и страничните звена са с цилиндрична форма, с диаметри съответно 40 мм и 20 мм. Свързващите звена са с квадратно напречно сечение, с размери 20x20 мм. За по-голяма нагледност, ще бъде проследено изменението на напреженията преди и след обработката в три характерни сечения, означени на фиг.1 като C1, C2 и C3. Сечение 1 (C1) и сечение 2 (C3), лежат в една от равнините на симетрия на рамката и са напречни сечения съответно на страничното и централното звено. Сечение 3 (C3) е напречно сечение на свързващото звено, прекарано през зоната с максимални еквивалентни остатъчни напрежения (фиг.2).

На фиг.2 са показани остатъчните деформации и напрежения в рамката след нейното окончателно изстиване [1]. Поради факта, че страничните звена изстиват и се вкоравяват по-бързо от централното звено, в тях се формират натискови напрежения, а в централното – опънови. Натискът в страничните звена е ексцентричен, поради което напреженията се разпределят неравномерно по напречните сечения. Най-товарени са точките откъм централното звено, в които е налице натиск с големина 192 МПа. Свързващите звена са натоварени на огъване и срязване. Огъването поражда в свързващите звена големи нормални напрежения, които достигат до 300 МПа. При това от външната страна на свързващите звена е налице натиск, а от вътрешната – опън. Получените в [1] напрежения и деформации, както и механизмът на тяхното формиране съответстват на резултатите, посочени от други изследователи [2,4,5].



Фиг.1 Общ вид на отливката. Означения.



Фиг.2 Еквивалентни напрежения.

Контролните сечения C1, C2 и C3 са съобразени с описаното разпределение на напреженията и са избрани така, че напреженията в тях да дават най-добра представа ефекта от обработката в отделните звена на рамката.

Описание на обработката

При предлагания метод за понижаване на остатъчните напрежения избрани части от отливката се нагреват за кратко време (1-3 минути) до високи температури (400-800 °C). За целта могат да се използват различни средства, например ръчна газова горелка. Тъй като температурата в нагряваната зона се повишава много бързо, в отливката възникват големи температурни градиенти. Нагряваната зона се разширява, а околните студени обеми метал пречат на това разширение. В нагряваната зона стига до пластично деформиране от натиск. След прекратяване на нагряването отливката се охлажда от контакта с атмосферния въздух, а нагрятата зона се свива. В следствие на протеклите пластични деформации, в нея се формират остатъчни опънови напрежения. Това прави тази обработка е подходяща за обеми, в които първоначално е налице натиск. Намаляването на напреженията в даден обем от отливката води до цялостно им преразпределяне, дори и в зони, в които не е имало съществена промяна на температурата.

При тази обработка се постига значителен икономически ефект, тъй като разходите на енергия и време са несравнимо по-малки спрямо цялостното нагряване. За сметка на това положителния ефект върху остатъчните напрежения е частичен и е най-силно изразен в зоните, в които се повишава температурата, както и в местата с концентрация на напреженията. Необходимо е да се познава добре първоначалното разпределение на напреженията, както и правилно да се подбере мястото и режима на нагряване, в противен случай лесно може да се стигне до отрицателен ефект. Компютърното симулиране е особено полезно в случая, тъй като позволява да се проверят различни стратегии и режими на обработката, и да се избере най-сполучливата от тях.

Числен модел за симулиране на неравномерно отгряване в отливки

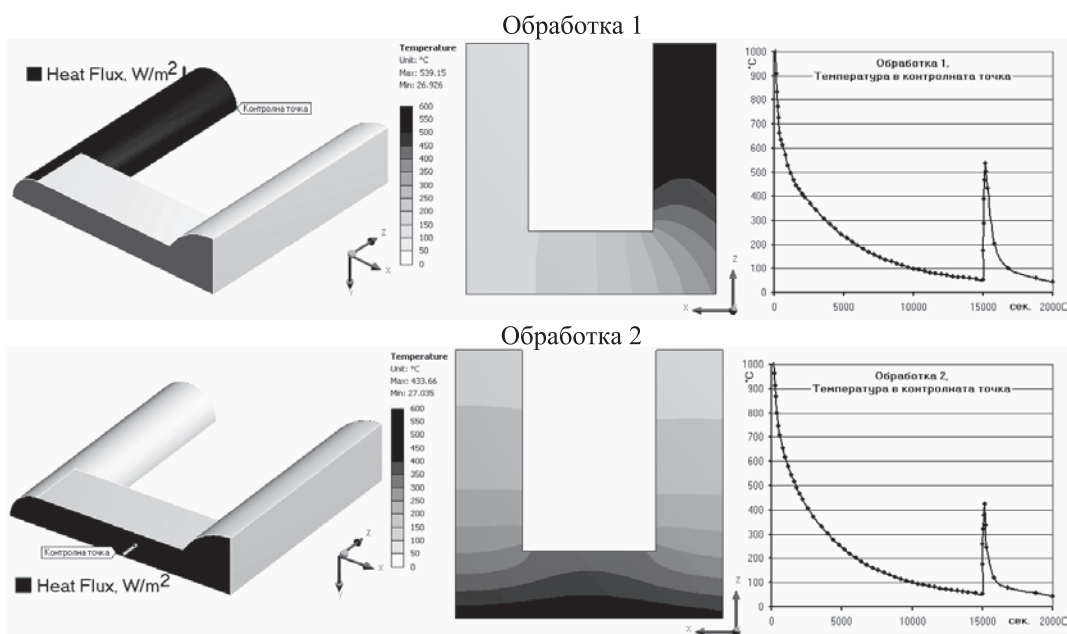
За нуждите на настоящото изследване е разработен специален компютърен модел. Той е базиран на термомеханичния модел за пресмятане на остатъчните напрежения в отливки, описан в [3]. Използван е универсалният пакет за инженерни анализи по метод на крайните елементи ANSYS. Към съществуващия модел е добавена допълнителна функционалност, която позволява след окончателното изстиване на отливката потребителят да зададе следните параметри:

- Повърхнини, които ще се нагреват.
- Стойност на топлинния поток (например сила на пламъка), W/m^2 ;
- Време на нагряване, секунди;
- Време на следващо изстиване, секунди. Избира се стойност, която да позволи отливката да се охлади до стайна температура.

Повърхнините, които ще се нагреват, се избират в зависимост от стратегията за въздействие върху остатъчните напрежения. Топлинният поток и времето за нагряване формират режима на обработката. От тях зависи интензивността на въздействието върху отливката.

Стратегии за неравномерно нагряване

Както беше споменато по-горе, в отливката има две ясно изразени зони с натискови остатъчни напрежения. Възможни са две различни стратегии за неравномерно нагряване – във всяка една от тези зони. Тези стратегии тук са наречени Обработка 1 и Обработка 2, и са илюстрирани на фиг.3 (показана е 1/8 от отливката, като разрезите са през трите равнини на симетрия). В ляво на фигурата са показани нагряваните повърхности, по средата – температурното поле в момента на максимално нагряване, а в дясно – изменението на температурата в контролна точка във времето. При обработка 1 се нагрява цилиндричната повърхност на страничното звено. Нагряването продължава една минута, при което се достига максимална температура в около 540 °C. При обработка 2 се нагрява показаната повърхност на свързващото звено. Нагряването продължава 1 минута, при което се достига максимална температура около 430 °C.

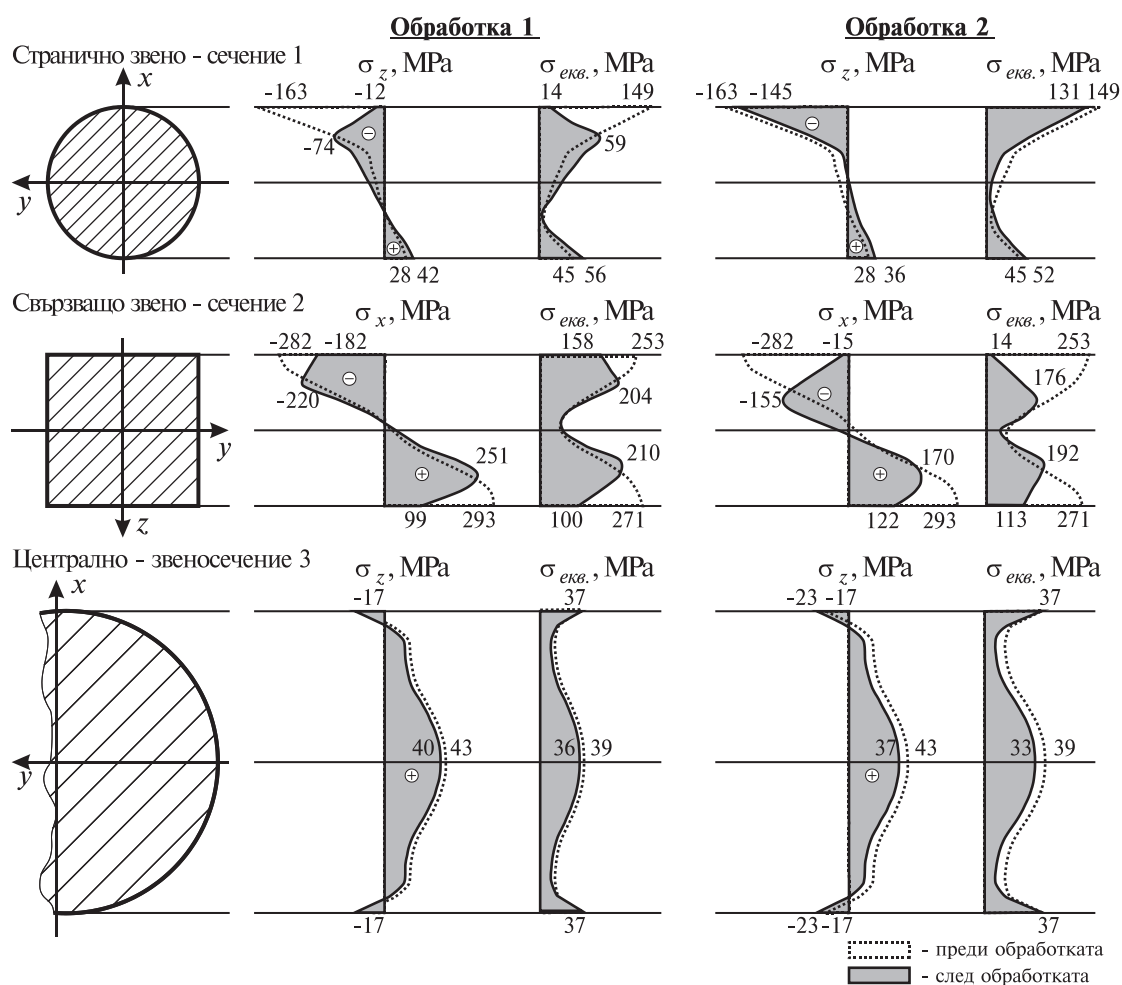


Фиг.3 Стратегии за обработка – зони на нагряване, температурно поле, изменение на температурата в контролна точка.

Анализ на резултатите от неравномерното нагряване

На фиг.4 са показани диаграмите на напреженията в контролните сечения, построени по вертикалната ос на сечението. Ориентацията на координатните оси е както на фиг.3. Показани са нормалните и еквивалентните напрежения за всяко от контролните сечения, за обработка 1 и обработка 2. С пунктир са дадени диаграмите на напреженията преди обработката, а с непрекъснати линии и сив фон – след обработката.

При обработка 1 се нагрява цилиндричната повърхност на страничното звено. Най-голям е ефектът върху това звено, както се вижда от диаграмите за сечение 1. Подбран е такъв режим на нагряване, при който нормалните натискови напрежения да запазят минимални отрицателни стойности (10-15 MPa), което гарантира известен резерв по отношение точността на обработката. Както се вижда от фигурата, първоначално високите натискови напрежения, със стойност -163 MPa са практически напълно елиминирани, което се отразява и на еквивалентните напрежения – те намаляват от 149 на 14 MPa. За сметка на това максималните опъновни напрежения в същото сечение се увеличават от 28 до 42 MPa, което е приемливо. Това нарастване се дължи на факта, че е налице нагряване по цялата цилиндрична повърхност.



Фиг.4 Диаграми на напрежения в контролните сечения

Вследствие на обработка 1 средната стойност на натиска в страничното звено намалява. Това води до намаляване на опъна в централното звено (от 43 на 40 МПа в центъра на тежест на сечение 3), и до намаляване на огъването в страничното звено. Ефектът от обработката в сечение 2 (странично звено) е значителен – в най-отдалечените от ос y точки максималните опънови напрежения намаляват със 35%, а максималните натискови – с 66%. Екстремните стойности на еквивалентните напрежения също намаляват – с 22 %, като максималните стойности се изместват от периферията към центъра на тежест, което е благоприятно от гледна точка на експлоатацията.

При обработка 2 се нагрява една от повърхностите на свързващото звено. Най-голям ефект следва да има върху това звено. Този ефект най-добре може да се прецени по напреженията в сечение 2. Подбран е такъв режим на нагряване, при който нормалните натискови напрежения да запазят минимални отрицателни стойности. В случая те са намалени от -282 до -15 МПа. Това води до цялостно разтоварване на рамката. Максималните опънови напрежения в сечение 2 намаляват чувствително – от 293 до 122 МПа, с 58%. Еквивалентните напрежения добиват значително по-равномерно разпределение, а максималните и средните им стойности намаляват с около 30%.

Цялостното разтоварване на рамката при обработка 2 може да се проследи и по диаграмите на напреженията в сечения 1 и 3. Вижда се, че натискът в страничното звено (сечение 1) и опънът в централното звено (сечение 3) намаляват. Промяната в отделните точки на двете сечения е от порядъка на 10-30% и е в благоприятна за експлоатацията посока.

Заключение

Разгледаните стратегии за неравномерно нагряване имат съществен благоприятен ефект върху стойностите

и разпределението на остатъчните напрежения в отливката, при значително по-малък разход на енергия и време спрямо традиционното цялостно нагряване. За да се получат добри резултати с предлаганата обработка, е необходимо правилно да се подбере мястото и режима на нагряване, което може да стане най-лесно с използването на адекватна компютърна симулация.

References

1. Nikolov N., "Analysis of Residual Stresses in Steel Casting and Selection of Treatment for Their Reduction". AMO 2009 Proceedings, Vol.1, p.87-90, 25 June 2009, Kranevo, Bulgaria.
2. Campbell, J.: *CASTINGS. Second edition*. Butterworth-Heinemann, ISBN-0-7506-4790-6, 2003.
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.