

FRI-1.317-1-MEMBT-02

INFLUENCE OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT ON THE END-QUENCH TEST SIMULATION²

Iliyan Danev, PhD Student

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: idanev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Rossen Radev, PhD

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: rradev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

***Abstract:** The simulation of quenching is one of the modern approaches for researching the materials heat treatment processes. The correct input data for simulation are crucial, in order to obtain reliable results. It is commonly accepted that the heat transfer coefficient (HTC) is most significant factor, impacting simulation results. In the specialized literature, there are quite different values of HTC even at equal cooling conditions and a few data regarding its influence on the simulation results. The aim of this paper is to assess the influence of HTC on results obtained by end-quench test simulation. Both simulations and physical experiment have been made in this research and their results have been compared and analysed.*

***Keywords:** Quenching simulation, End-quench test, Heat transfer coefficient, Cooling ability*

ВЪВЕДЕНИЕ

Прокаляемостта на стоманите технологично свойство, свързано със способността им да се закаляват на определена дълбочина от повърхността на изделието. В общия случай тази дълбочина зависи от множество фактори, по-важни от които са: химичен състав на стоманата, определящ до голяма степен устойчивостта на преохлаждения аустенит, а оттам и критичната скорост на охлаждане; температура на нагриване и време на задържане преди закаляване, вид на охлаждащата среда, форма и размери на охлаждаемия обект. (J.S. Kirkaldy, B.A. Thomson, and E.A. Vaganis, 1978).

Съществуват различни подходи за определяне на дълбочината на прокаления слой, като: микроструктурен анализ; разпределение на твърдостта по дълбочина; наблюдаване на лома след разрушаване. Предвид по-горе посочените фактори, оказващи влияние на дълбочината на прокаляване, оценяването и сравняването на прокаляемостта на стомани с различен химичен състав е затруднено. Това е наложило създаването на унифицирани подходи дефиниращи ясно по-горе посочените фактори. Към настоящия момент най-голямо разпространение е намерил методът на челно закаляване (Jominy test). Методът е стандартизиран, като действащия към момента стандарт в България е БДС EN ISO 642:2004 Стомана. Изпитване на прокаляемост чрез челно закаляване (изпитване по Jominy) (ISO 642:1999).

Същността на теста е свързана с охлаждане на пробни тела с определен размер и форма при стандартизирани условия. Пробните тела са с вължина 100 mm и диаметър 25 mm.

² Докладът е представен на заседание на секция „Механика и машиностроителни технологии“ на 28 ноември 2022 с оригинално заглавие на български език: ВЛИЯНИЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ТОПЛОПРЕДАВАНЕ ВЪРХУ РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ СИМУЛИРАНЕ НА МЕТОД НА ЧЕЛНО ЗАКАЛЯВАНЕ

Нагриването е до температура типична за закаляване на изследваната марка стомана. Следва охлаждане при описаните в стандарта условия и определяне на разпределението на твърдостта по дължината на пробното тяло. Поради спецификата на метода, свързана с интензивно топлоотнемане само от челото на пробното тяло скоростта на охлаждане в отделните обеми на пробното тяло се изменя в много големи граници, което води до формиране на различни структури. (Hunkel, M., Lübben, Th., Hoffmann, F., Mayr, P., 2004; Narazaki, M., Kogawara, M., Shiravori, A., Fuchizawa, S., 2003; Hömberg, D., 1996; Kandpal, B.C., & Gulia, A., 2011; Nunura, C.R.N., dos Santos, C.A., Spim, J.A., 2015).

Предвид факта, че скоростта на охлаждане (при фиксиран химичен състав) е основния фактор за получаваната след закаляване структура, нейното определяне е от съществено значение за разбиране на процесите, формиращи новата структура и влиянието им върху качеството на закаляваните изделия. Задачата се усложнява и от факта, че скоростта на охлаждане не е постоянна, както по отношение на температурния интервал, така и в отделните обеми на охлажданите изделия.

Известните подходи за изследване на изменението на температурата в процеса на охлаждане се основават на: непосредственото ѝ измерване, най често посредством поместване на термоелементи в охлажданите обекти; симулиране на процесите на охлаждане, (Sayuad Basim Qamar, 2018).

Изследването на изменението на температурата посредством термоелемент/и има множество недостатъци, основните от които са свързани с: необходимост от поместване на термоелемент/и в избрана/и точка/и от охлажданите обекти; получаване на информация за изменението на температурата само в изследваните точки; необходимост от допълнителна лабораторна апаратура за регистриране и обработване на сигнала от първичните преобразуватели и др.

От друга страна симулирането на процеса на охлаждане създава възможност за определяне на температурата във всяка материална точка от симулираните обекти във всеки момент от охлаждането, (Smoljan, B., Rubeša, D., Tomašić, N., Smokvina Hanza, S., Iljkić, D., 2007).

Като по-важни предимства на симулирането на топлинните процеси (при нагриване или охлаждане) могат да се отбележат:

- съкращаване на времето за проектиране на даден технологичен процес, както и по-добро осмисляне на параметрите на процеса;
- лесна и бърза промяна на симулираните технологични параметри и на геометрията на изследваните (симулираните) тела;
- дава възможност за бързо проиграване на различни варианти на технологичния процес;
- намалява броя на неуспешните резултати от типа „проба – грешка“;
- намалява времето за проектиране;
- подобрява качеството на изделията.

Тук трябва да се отбележат и някои недостатъци на предлаганите на пазара софтуерни продукти за симулиране:

- разходи за закупуване на софтуер и обучение;
- достоверност на получените чрез симулиране резултати, (Trzaska, J., Sitek, W., Dobrzański, L.A, 2006; Kandpal, B.C., Chutani, A., Kandpal, Gulia, A., Harsimran, Sadanna, C, 2011).
- ненадеждност на входните данни от литературни източници;
- необходимост от сериозен изчислителен ресурс, особено при голямогабаритни изделия и изделия със сложна форма.

Установено е, че най-голямо влияние върху получаваните резултати оказва коефициента на топлопредаване (Heat Transfer Coefficient), който определя топлинното взаимодействие между нагретия обект и охлаждащата среда. Този коефициент е температурно зависим, като стойностите му могат да се изменят в много голям интервал, в зависимост не само от

температурата, но и от вида на охладителя, размерите и формата на охлаждания обект и др. Фактори, (Smoljan, B., Pjkić, D., Hanza Smokvina, S., Gržinić, L., Jokić, M., & Štic, L, 2018).

Целта на настоящата работа е да се установи влиянието на коефициента на топлопредаване върху резултатите получени след симулиране на метода на челно закаляване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методика

За верифициране на резултатите от симулациите е проведен натурен експеримент с две марки конструкционни стомани. Информацията за химичния състав на използваните стомани, определен квантометрично, е показана в табл.1 и табл.2. (Popov, A., Popova, L., 1961). Както се вижда стоманите са със сходно въглеродно съдържание, но се отличават съществено по своята прокаляемост, поради наличието на 0.75% хром в химичния състав на стомана 46Cr2. Експерименталното изследване е реализирано в съответствие с изискванията на БДС EN ISO 642:2004.

Таблица 1. Химичен състав на стомана 46Cr2 (1.7006 БДС EN 10083-3:2006)

C	Cr	Mn	P	S	Si	V
wt, %						
0,485	0,75	0,80	0,014	0,0081	0,298	0,0031

Таблица 2. Химичен състав на стомана C45 (1.0503 БДС EN 10083-2:2006)

C	Cr	Mn	P	S	Si	V
wt, %						
0,467	0,178	0,78	0,0017	0,0011	0,259	0,0037

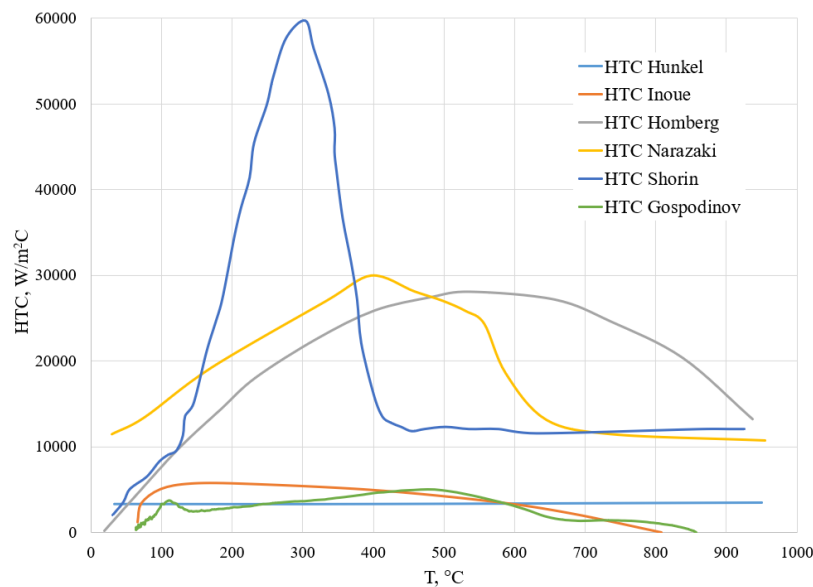
За симулиране на процеса на охлаждане е използван е технологичен софтуер за симулиране на процеси на термично обработване с възможности за: предсказване на изменение на температурата във функция от времето във всяка една точка от обема на изследваните обекти, предсказване на структура, твърдост, големина и разпределение на напреженията, деформации и др.. За реализирането на процес на симулиране продуктът изисква въвеждане от потребителя на входни данни за:

- Геометрията на симулирания обект;
- Химичен състав и фазови превръщания при нагряване и охлаждане (Софтуерът разполага с ограничена база данни. При липса на данни за желан материал той може да бъде добавен);
- Информация за коефициента на топлопредаване, описваща топлинното взаимодействие охлаждаща среда – охладяно изделие.

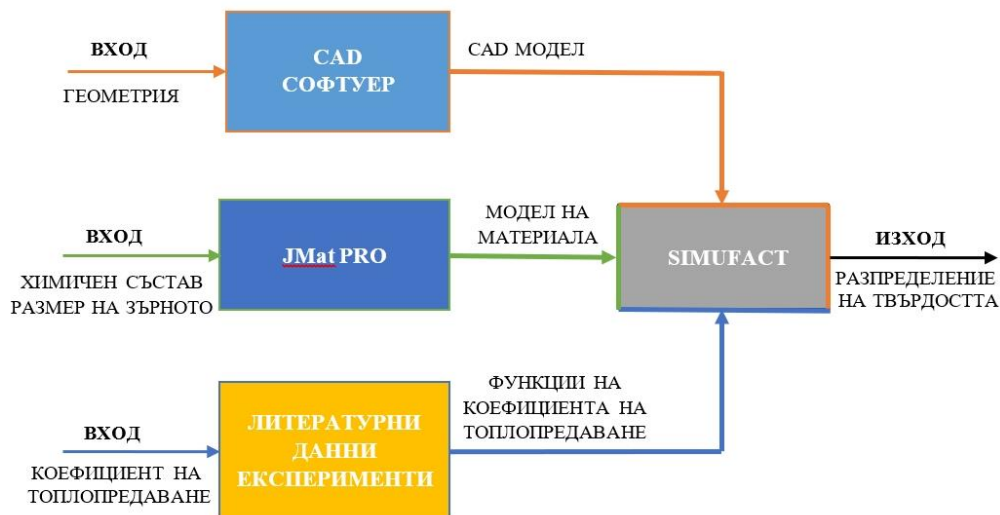
Особеност на симулирането на метода на челно закаляване е използването на две различни гранични условия по отношение на коефициента на топлопредаване. Единият коефициент се асоциира с челото на пробното тяло, а другият с всички останали повърхнини.

В настоящата работа са използвани коефициенти на топлопредаване от литературни източници и от експерименти на авторите (фиг.1), (Sugianto, A., Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A., 2007; Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A., Fuchizawa, S., 2003).

От фигурата се вижда, че както характера на изменение на коефициента, така и неговата големина се различават значително (понякога в пъти) според данните публикувани от различни автори в специализираната литература. Съществуват и принцитни противоречия като например Homberg предполага, че коефициента на топлопредаване почти не зависи от температурата, докато коефициента определен от Shorin се изменя в много широки граници в изследвания температурен интервал. Причините за това са много, като основната от тях е свързана с условията на експерименталното му определяне.



Фиг.1. Изменение на коефициента на топлопредаване във функция от температурата според авторите и литературни източници



Фиг.2. Блок-схема на процеса на симулиране на метода на челно закаляване

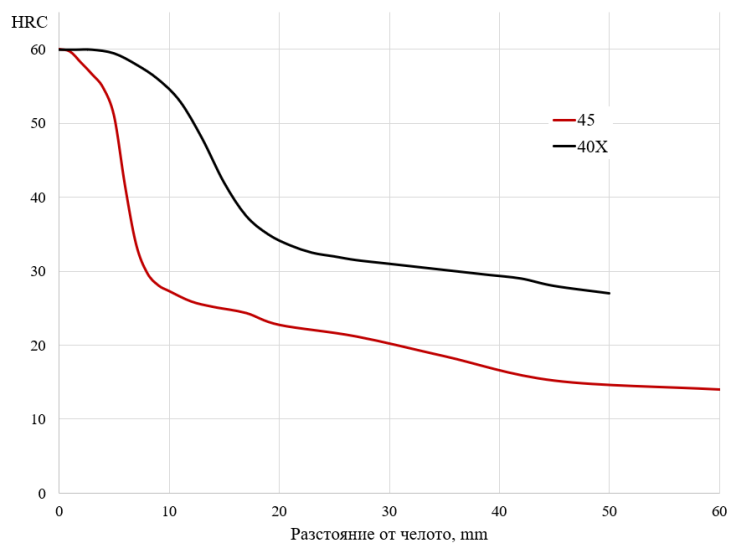
Както е показано на фиг.2 процеса на симулиране започва с въвеждане на информация за: геометрията на обекта от CAD файл; материала, от който е изработен той; условията, при които ще протича охлаждането на различните повърхнини под формата на HTC. Предварително се задават и условията и температурата, от която ще се извърши охлаждането, както и времето за престой при тази температура.

След завършване на изчислителната част софтуерният продукт дава възможност за получаване на множество разнообразни резултати. Интерес в случая представлява разпределението на твърдостта на повърхността на пробното тяло от охлаждането с водна струя чело към задния край.

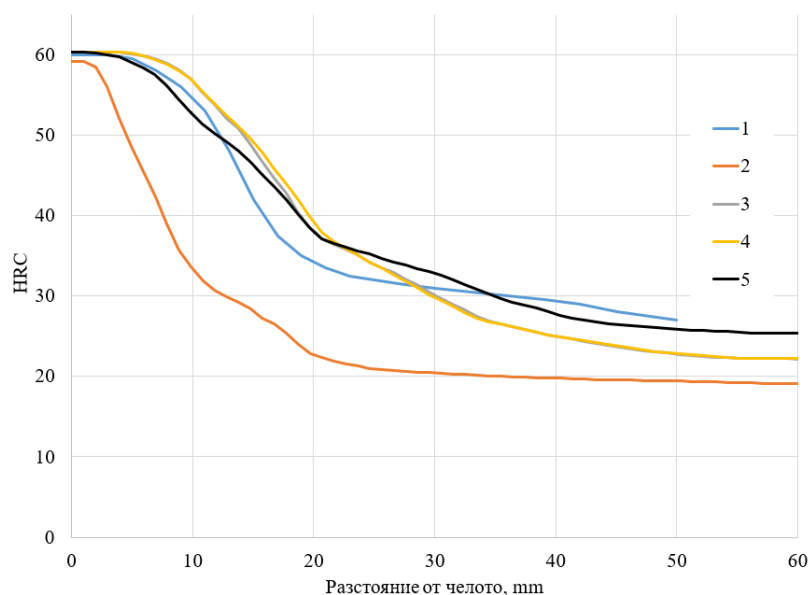
Резултати

Резултатите от натурното изследване за разпределението на твърдостта след челно закаляване са показани на фиг.3. Според изискванията на БДС EN ISO 642:2004 пробните тела са нагрети до температура типична за закаляване на материалите, от които са изработени пробните тела (в случая 860°C и за двата материала), задържани са 1 час при тази температура и след това са охладени, по-описаните по-горе условия. На фиг.3 е показано разпределението

на твърдостта във функция от разстоянието до закаляваното чело. Полученото разпределение е характерно за изследваните стомани и отговаря на данни публикувани от други автори, като същевременно попада в полосата на изменение на твърдостта за изследваните химични състави, според информацията публикувана в БДС EN 10083-2:2006 и БДС EN 10083-3:2006.



Фиг.3. Резултати за разпределението на твърдостта след челно закаляване на избраните стомани



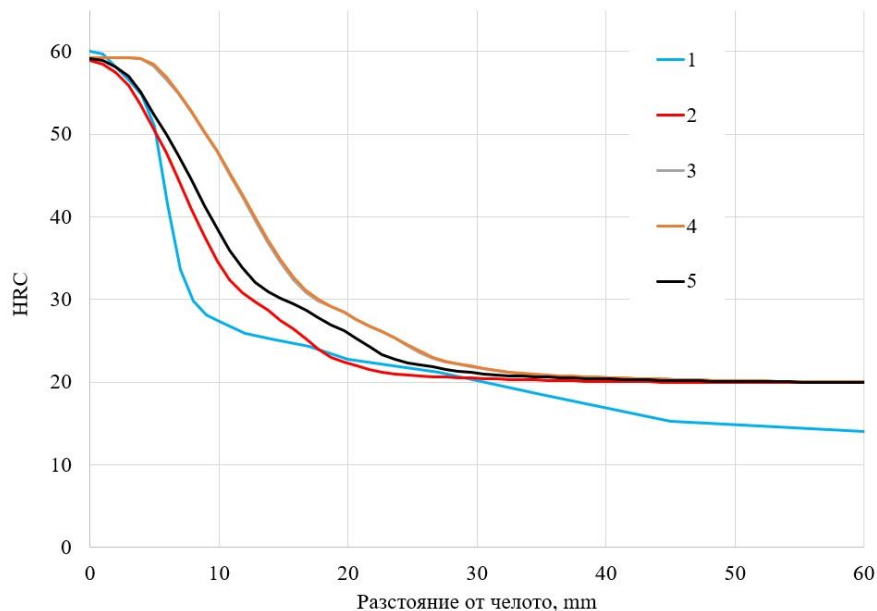
фиг. 4 Разпределение на твърдостта след челно закаляване и след симулация на процеса с различни коефициенти на топлопредаване за стомана 46Cr2

1 – натурен експеримент; 2 – симулация с HTC Inoue; 3 – симулация с HTC Homberg; 4 – симулация с HTC Shorin и 5 – симулация с HTC Gospodinov (фиг.1)

На графиката на фиг. 4 е показано разпределението на твърдостта за стомана 46Cr2, след провеждането на натурен експеримент и след симулации с различни коефициенти на топлопредаване.

Както се вижда от фиг.3 и фиг. 4 в разпределението на твърдостта при отдалечаване от охладаното чело се наблюдават три ясно разграничими зони. Известно е, че дължината им и спецификата на прехода от една зона в друга зависи от химичния състав и особеностите на охлаждане. Закалената зона се намира най-близо до челото и се характеризира с максимална твърдост и структура мартензит. За стомана 46Cr2, която е представител на стоманите с ниска към средна прокаляемост дължината на първата зона е сравнително малка, но преходът от

първа към трета зона е плавен и обхваща голямо разстояние (35-40 mm). След преминаване към последната зона, характеризираща се с ниска твърдост и структура близка до равновесната, се наблюдава стабилизиране на твърдостта и стойностите ѝ се запазват до достигане на горния край на пробата. При симулиране на охлаждането се наблюдава различна степен на съвпадение на резултатите в отделните зони. Тук трябва да се отбележи, че в първата зона основно влияние върху резултата оказва HTC за вода, а в трета зона HTC за въздух. В преходната зона влиянието на двата коефициента е комплексно, което допълнително усложнява задачата. От фиг. 4 и фиг.6а се вижда, че резултатът за първа зона е задоволителен по отношение, както на твърдостта, така и за дължината на зоната за използваните параметри на симулациите с изключение на HTC *Inoue*. Това е логично предвид ниските стойности на коефициента на *Inoue* при високите температури. Основната разлика в твърдостите след сравняване на резултатите от натурния и симулационния експеримент във втората зона се дължат на разликите в интензивността на намаляване на твърдостта. Поради по-малкия наклон на разпределението получено след симулациите във втори участък, в началото на прехода се наблюдава регистриране на твърдост по-малки, а в края на по-големи от реално измерените.



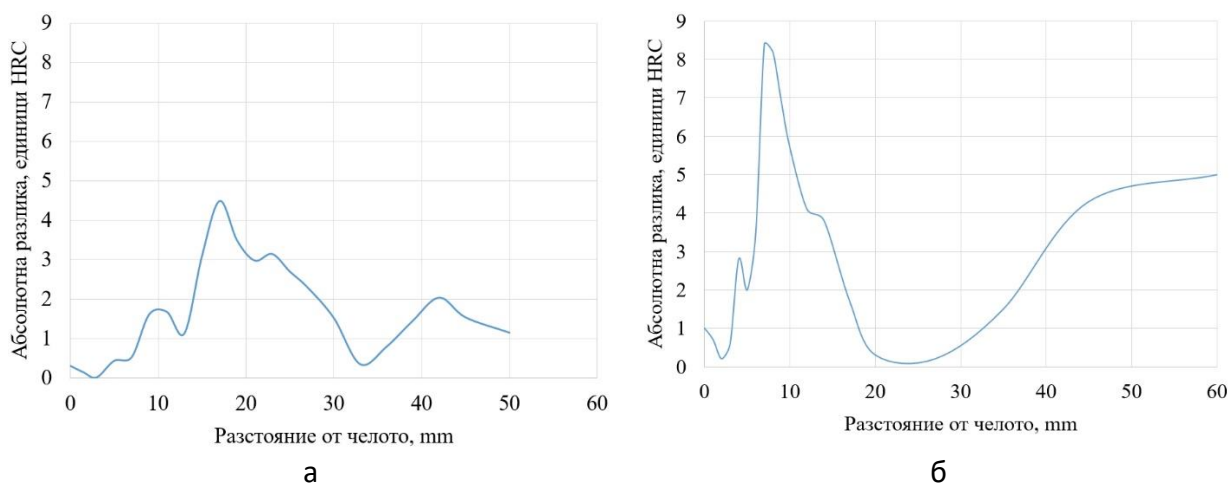
фиг. 5 Разпределение на твърдостта след челно закаляване и след симулация на процеса с различни коефициенти на топлопредаване за стомана 45

1 – натурен експеримент; 2 – симулация с HTC *Inoue*; 3 – симулация с HTC *Homborg*; 4 – симулация с HTC *Shorin* и 5 – симулация с HTC *Gospodinov* (фиг.1)

Интересен е резултата за твърдостта, получен в трети участък. Тук при всички симулации е използван един и същ коефициент на топлопредаване, в случая е избрана константа със стойност $150 \text{ W/m}^2\text{C}$. Въпреки това стойностите за твърдостта в трети участък се различават значително. Една от възможните причини за това е влиянието на коефициента на топлопредаване използван за челото, в комбинация с особеностите на превръщането при охлаждане на тази стомана.

На фиг.5 е показано разпределението на твърдостта за стомана C45. Резултатите са сходни с тези при 46Cr2, като се наблюдават и някои различия. Основната разлика в поведението на този материал при челно закаляване е рязкото намаляване на твърдостта в преходната зона. Дължината на този участък в случая е около 10 пъти по-малка от този за 46Cr2. Подобно разпределение на твърдостта се наблюдава при стомани с ниска прокаляемост. Предсказаното разпределение на твърдостта с всички използвани коефициенти показва значително по-плавно намаляване на твърдостта във втори участък, което е и причина най-големи разлики в твърдостта да се наблюдават в неговия край (фиг.6.б). Друга съществена

разлика е полученото след симулиране разпределение на твърдостта в трети участък. Тук се наблюдава съвпадение за стойностите на твърдостта след симулиране с различни коефициенти за охлаждащото чело и използване на коефициент за въздух $150 \text{ W/m}^2\text{C}$. Същевременно получените стойности са с около 5 единици по-високи от реално измерените.



Фиг. 6. Абсолютна разлика в твърдостите получени от натурния експеримент и симулацията с най-добро съвпадение
а-46Cr2; б-C45

На фиг.6 са показани резултатите, получени след сравняване на измерените твърдости с тези от симулацията с най-добро съвпадение. Вижда се, че за 46Cr2 максимално абсолютно отклонение от резултатите от натурния експеримент се наблюдава в преходната зона и то е 4.5 HRC. За стомана C45 се регистрират два пика на абсолютната разлика, като в преходната зона тя е най-голяма и достига 8.5 HRC.

ИЗВОДИ

В обобщение могат да се направят следните изводи:

1. Използването на различни коефициенти на топлопредаване взети от литературни източници води до резултати за разпределението на твърдостта, съществено различаващи се един от друг.
2. За стомана 46Cr2 най-близки резултати до тези от натурния експеримент се получават след симулация с HTC Gospodinov, а за стомана C45 с HTC Inoue.
3. При симулиране на процеси на термично обработване е необходимо да се избере подходяща функция на изменение на HTC с цел получаване на достоверни резултати.
4. Симулирането на метода на челно закаляване изисква използване на HTC за две охлаждащи среди – вода и въздух, като степента на влиянието им върху резултата от симулацията е различна на различни разстояния от челото. В зоната на рязко намаляване на твърдостта резултата зависи от комплексното влияние на използваните коефициенти на топлопредаване за двете среди.

Благодарности

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2022-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

ЛИТЕРАТУРА

Hömborg, D. (1996). A numerical simulation of the jominy end-quench test. *Acta Materialia*. 44 (11), 4375-4385.

Hunkel, M., Lübben, Th., Hoffmann, F., Mayr, P. (2004). Using the jominy end-quench test for validation of thermo-metallurgical model parameters. *J. Phys. IV France* 120, 571-579.

ISO 642:1999. Steel — Hardenability test by end quenching (Jominy test)

J.S. Kirkaldy, B.A. Thomson, and E.A. Baganis, Hardenability Concepts with Applications to Steel, eds. J.S. Kirkaldy and D.V. Doane, (Warrendale, PA: AIME, 1978), 82.

Kandpal, B.C., & Gulia, A. (2011). A review on Jominy test and determination of effect of alloying elements on hardenability of steel using jominy end quench test. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 1(3), 65-71.

Narazaki, M., Kogawara, M., Shiravori, A., Fuchizawa, S. (2003). Evaluation of Heat Transfer Coefficient in Jominy End-quench Test. *Proceedings of the Fourth International Conference of Quenching and the Control of Distortion*. 23th-35th May, Beijing.

Nunura, C.R.N., dos Santos, C.A., Spim, J.A. (2015). Numerical – Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test. *Materials and Design*. 76, 230–243.

Sayyad Basim Qamar (2018). Manufacturability evaluation: a CFD approach for Jominy hardenability test, *Materials and Manufacturing Processes*, 33 (16), 1881-1888.

Smoljan, B., Iljkić, D., Hanza Smokvina, S., Gržinić, L., Jokić, M., & Štic, L. (2018). An Application of Jominy Test Results in Computer Simulation of Steel Quenching. *Materials Science Forum*, 941, 504–509.

Smoljan, B., Rubeša, D., Tomašić, N., Smokvina Hanza, S., Iljkić, D. (2007). An analysis of application of modified Jominy-test in simulation of cold work tool steels quenching. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 2 (1), 24-34.

Sugianto, A., Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A. (2007). Validity of Heat Transfer Coefficient based on Cooling Time, Cooling Rate, and Heat Flux on Jominy End Quench Test. *Materials Science and Technology (MS&T), STEEL: Recent Developments in Steel Processing*. Detroit, Michigan, September 16-20, pp. 171-180.

Trzaska, J., Sitek, W., Dobrzański, L.A. (2006). Selection method of steel grade with required hardenability. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 17(1-2), 289-292.

Попов, А., Попова, Л., (1961), Справочник термиста, Москва, Машгиз.