

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON HARDENABILITY BANDS FOR QUENCHING AND TEMPERING STEELS BY COMPUTER 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: This report explores the possibility of simulating the influence of the chemical composition of steels on their hardenability. The study includes three grades of medium-carbon steels: C45, 41Cr4, and 42CrMo4. Specialized software products, JMatPro and Simufact, were utilized for conducting the simulations. The simulation study in Simufact was carried out following the requirements for determining hardenability using the end-quench test method (BDS EN ISO 642:2004). As a result of the simulations, hardness change curves along the cylindrical surface of the standard test specimen were obtained. An analysis of the influence of alloying elements on hardenability was conducted. The reliability of the simulation results was assessed by comparing them with the results of real-world experiments. Conclusions have been formulated.

Keywords: end-quench test; steels for quenching and tempering; hardenability bands; computer simulation

JEL Codes: L10, L11

ВЪВЕДЕНИЕ

Прокаляемостта на стоманите технологично свойство, свързано със способността им да формират мартензитна структура на определена дълбочина от повърхността на изделиято. 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 нагряване и време на задържане преди закаляване, вид на охлаждащата среда, форма и размери на охлаждаемия обект (Doane, D. V., & Kirkaldy J. S. 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

² Докладът е представен на заседание на секция „Механика и машиностроителни технологии“ на 27 октомври 2023 с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ХИМИЧНИЯ СЪСТАВ ВЪРХУ ПРОКАЛЯЕМОСТТА НА СРЕДНОВЪГЛЕРОДНИ СТОМАНИ ПОСРЕДСТВОМ КОМПЮТЪРНО СИМУЛИРАНЕ

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 дължина 100 mm и диаметър 25 mm. 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.

Получаването на информация за прокаляемостта по метода на челно закаляване е времеемко и изисква наличие на квалифициран персонал, както и наличие на специализирана апаратура (опитна уредба отговаряща на изискванията на стандарта, твърдомер, нагревателни съоръжения). Характерна особеност на метода, отличаваща го от охлаждането чрез потапяне е наличието на две охлаждащи среди: вода, която е със стайна температура и охлажда челото на пробата и въздух със стайна температура, който охлажда останалата част от пробното тяло. Поради спецификата на метода, свързана с интензивно топлоотнемане само от челото на пробното тяло скоростта на охлаждане в отделните му обеми се изменя в много големи граници, което води до формиране на различни структури. Към настоящия момент съществуват голям брой публикации в областта на симулиране на този специфичен процес на охлаждане (Doane D. V., & Kirkaldy, J., 1978; Hunkel, M. Et al., 2004; Hömberg, D., 1996; Hunkel, M., Et al., 2004; Trzaska, Et al., 2006).

Основна цел на настоящото изследване е количественото оценяване на влиянието на химичния състав върху прокаляемостта на качествени конструкционни стомани със съдържание на въглерод 0.35 – 0.45 и определяне на полосите на прокаляемост за всяка от използваните в изследването стомани.

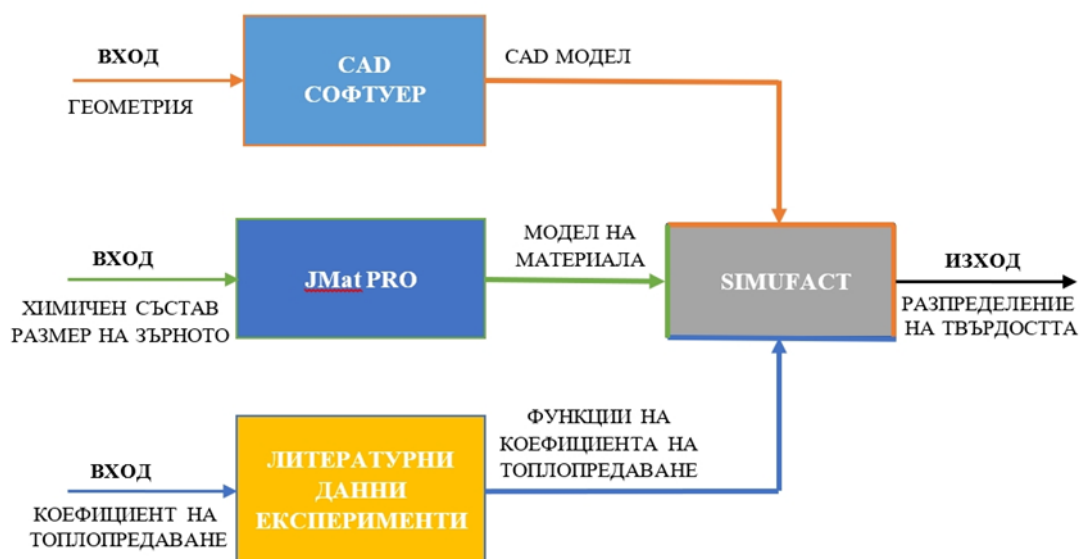
МЕТОДИКА

За постигане на зададената цел са използвани експериментални данни, получени след симулиране на процеса на охлаждане посредством специализиран софтуер за изследване на термични процеси Simufact с неговия специализиран модул Heat Treatment.

Както е показано на фиг.1 за реализиране на симулациите софтуерът изисква въвеждане на информация за геометрията на охлаждаемия обект, неговият химичен състав и условията на охлаждане. В случая е използвана геометрия на стандартно пробно тяло за определяне на прокаляемост по метода на челно закаляване (BIS EN ISO 642:2004) с диаметър 25 mm и дължина 100 mm. Получаването на информация за структурата и механичните свойства на охлаждаемите обекти изисква наличие на диаграми на термокинетично разпадане и познаване на влиянието на химичния състав и получаваните при определени условия на нагриване и охлаждане структури върху механични свойства.

Поради ограничената база данни на използвания софтуер първичната информация за термокинетичните диаграми, изисквана за симулиране, се получава с помощта на JMatPro, след което се добавя към съществуващата база данни на Simufact. В случая като основен критерий за определянето на влиянието на химичния състав върху механичните свойства е използвано разпределението на твърдостта по повърхността на цилиндричното пробно тяло.

Както вече се спомена за симулирането на метода на челно закаляване е необходимо 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 случая за охлаждането с вода чело е използван коефициент на топлопредаване определен при предходни изследвания (Danev, I., R. Radev, D. Gospodinov, 2022), а за останалите повърхнини е използван един от предлаганите в Simufact коефициенти за охлаждане на въздух.



Фиг.1. Блок-схема на процеса на симулиране на метода на челно закаляване

Както е показано на фиг.1 процеса на симулиране започва с въвеждане на информация за: геометрията на обекта от CAD файл; материала, от който е изработен той с неговите топлофизични характеристики и диаграма на термокинетично разпадане; условията, при които ще протича охлаждането на различните повърхнини под формата на НТС. 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 охлажданото с водна струя чело.

Информацията за химичния състав на използваните стомани, според референтните стандарти е показана в табл.1 (BIS EN ISO 683-1:2018; BIS EN 683-2:2018). Избраните стомани са със сходно съдържание на въглерод, като се различават по съдържание на легиращи елементи. По този критерий стоманите могат да бъдат определени като средно въглеродни, нисколегирани стомани за закаляване и отвярщане. В посочените по-горе стандарти е поместена информация и за прокаляемостта на изследваните стомани определени по метода на челно закаляване. Сандартите дават информация за максималната и минимална прокаляемост, които ограничават прокаляемостта на конкретна марка стомана в т. нар. полоса на прокаляемост.

Табл.1. Химичен състав на стоманите според BIS EN ISO 683-1:2018; BIS EN 683-2:2018

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
	wt%					
C45	0.42 – 0.50	max 0.4	0.50 – 0.80	max 0.4	max 0.1	max 0.4
41Cr4	0.38 – 0.45	max 0.4	0.6 – 0.9	0.9 – 1.2	-	-
42CrMo4	0.38 – 0.45	max 0.4	0.6 – 0.9	0.9 – 1.2	0.15 – 0.30	-

Определянето на полосите при симулационното изследване е извършено при граничните стойности на елементите според по-горната таблица. За определяне на влиянието на всеки един от елементите от химичния състав на стоманите са направени допълнителни симулации. Те се провеждат с на-високото и най-ниското съдържание на изследвания елемент, като за останалите се използва средна стойност. Информацията за всеки състав от проведените симулации е показана в табл.2

След получаване на резултатите за разпределението на твърдостта са определени граничните криви на прокаляемост на трите стомани и те са сравнени със стандартните полоси. Получената информация е интегрална и служи като първична за определяне на разстоянието от челото до полумартензитната зона ($L_{\text{пм}}$) и за определяне на идеалните и реални критични диаметри на пълна прокаляемост (табл.2), често служещи за избор на подходяща марка стомана за конкретно приложение.

В случая определянето на критичните диаметри е извършено посредством използване на методика включваща намиране на разстоянието от челото на закалената проба до полумартензитната зона (определено посредством твърдостта на полумартензитната зона) и използване на номограма на Блантер (<https://moodle.nirhtu.ru>) за намиране на критичните диаметри в различни охладители.

РЕЗУЛТАТИ

Резултатите от направените симулации с различни химични състави са показани в табл.2 и на фиг.2 до фиг.4.

Табл.2. Химичен състав на стоманите при провеждане на симулациите и влияние на състава върху $L_{\text{пм}}$ и $D_{\text{кр}}$

№	Марка стомана	C	Ni	Cr	Mn	Si	Mo	L _{пм} , mm	D _{к_роо} , mm	D _{к_р} . масло, mm	D _{к_р} . вода, mm
		wt, %									
1	41Cr4	0,38	-	1,05	0,75	0,27	-	8,99	48	24	
2		0,45	-	1,05	0,75	0,27	-	12	60	33	
3		0,415	-	0,90	0,75	0,27	-	8,99	47	24	
4		0,415	-	1,20	0,75	0,27	-	11,99	59	32,5	
5		0,415	-	1,05	0,60	0,27	-	7,99	43	22	
6		0,415	-	1,05	0,90	0,27	-	10,99	57	31	
7		0,415	-	1,05	0,75	0,17	-	8,99	47	24	
8		0,415	-	1,05	0,75	0,37	-	11,99	59	32,5	
9	42CrMo4	0,38	-	1,05	0,75	0,27	0,225	13	63	34	
10		0,45	-	1,05	0,75	0,27	0,225	19	82	50	
11		0,415	-	0,90	0,75	0,27	0,225	12,99	63	34	
12		0,415	-	1,20	0,75	0,27	0,225	18	79	48	
13		0,415	-	1,05	0,60	0,27	0,225	13,99	68	36	
14		0,415	-	1,05	0,90	0,27	0,225	18	79	48	
15		0,415	-	1,05	0,75	0,17	0,225	13,99	68	36	
16		0,415	-	1,05	0,75	0,37	0,225	19	82	50	
17		0,415	-	1,05	0,75	0,27	0,15	13,99	68	36	
18		0,415	-	1,05	0,75	0,27	0,30	18	79	48	
19	C45	0,42	0,247 5	0,15	0,65	0,30	0,075	6,98	39		29
20		0,50	0,247 5	0,15	0,65	0,30	0,075	8,98	47		34,7
21		0,46	0,165	0,15	0,65	0,30	0,075	7,98	43		33,8
22		0,46	0,33	0,15	0,65	0,30	0,075	7,98	43		33,8
23		0,46	0,247 5	0,10	0,65	0,30	0,075	7,98	43		33,8
24		0,46	0,247 5	0,20	0,65	0,30	0,075	7,98	43		33,8
25		0,46	0,247 5	0,15	0,50	0,30	0,075	6,98	39		29
26		0,46	0,247 5	0,15	0,80	0,30	0,075	8,98	47		34,7
27		0,46	0,247 5	0,15	0,65	0,20	0,075	6,98	39		29
28		0,46	0,247 5	0,15	0,65	0,40	0,075	8,98	47		34,7

29		0,46	0,247 5	0,15	0,65	0,30	0,05	7,98	43		33,8
30		0,46	0,247 5	0,15	0,65	0,30	0,10	8,98	47		34,7
31	41Cr4	0,38	-	0,90	0,60	0,17	-	5,99	35	16	
32		0,45	-	1,20	0,90	0,37	-	18	79	48	
33	42CrMo4	0,38	-	0,90	0,60	0,17	0,15	7,98	43	22	
34		0,45	-	1,20	0,90	0,37	0,30	39	139	117	
35	C45	0,42	0,165	0,10	0,50	0,20	0,05	7,98	42,5		33,8
36		0,50	0,33	0,20	0,80	0,40	0,10	20,99	88		77
37	41Cr4	0,415	-	1,05	0,75	0,27		9,99	53	27,5	
38	42CrMo4	0,415	-	1,05	0,75	0,27	0,225	16	77	45	
39	C45	0,46	0,247 5	0,15	0,65	0,20	0,075	7,99	43		34,1

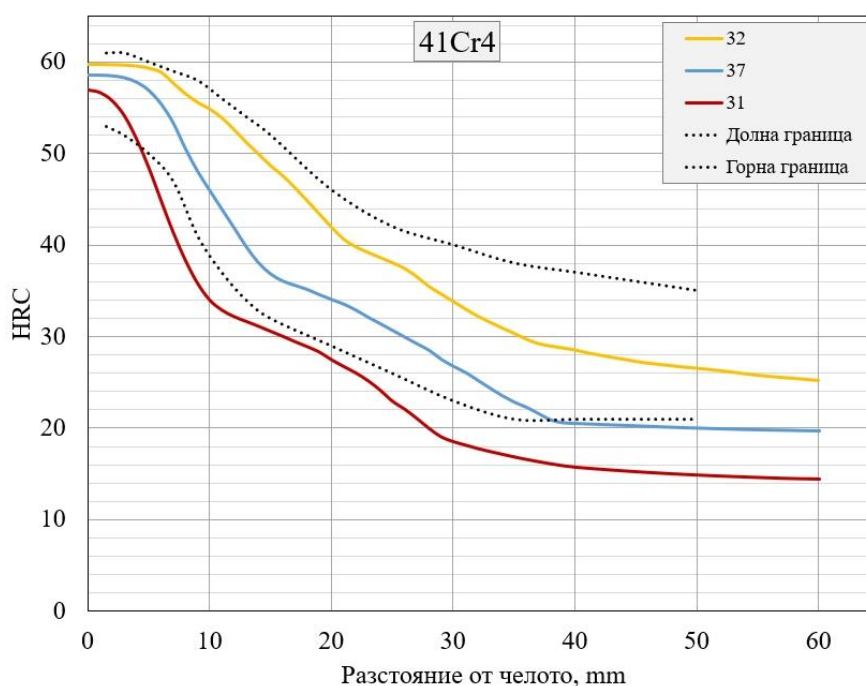
* $D_{крос}$ - идеален критичен диаметър, mm

Анализа на резултатите в табл.2, при изменение на всеки от елементите на горна и долна граница показва, че влиянието им върху прокаляемостта е приблизително едно и също. За нарастването на прокаляемостта на 41Cr4 (оценено по идеалния критичен диаметър) най-съществено влияние оказва мангана, като при него раликата в прокаляемостта между минимално и максимално съдържание е около 33%. При останалите елементи и въглерода тази разлика е приблизително 25%.

Най-силно влияние на въглерода и легиращите елементи се регистрира при стомана 42CrMo4. Както и при 41Cr4 влиянието на елементите е сходно и се изменя в границите 34...48%

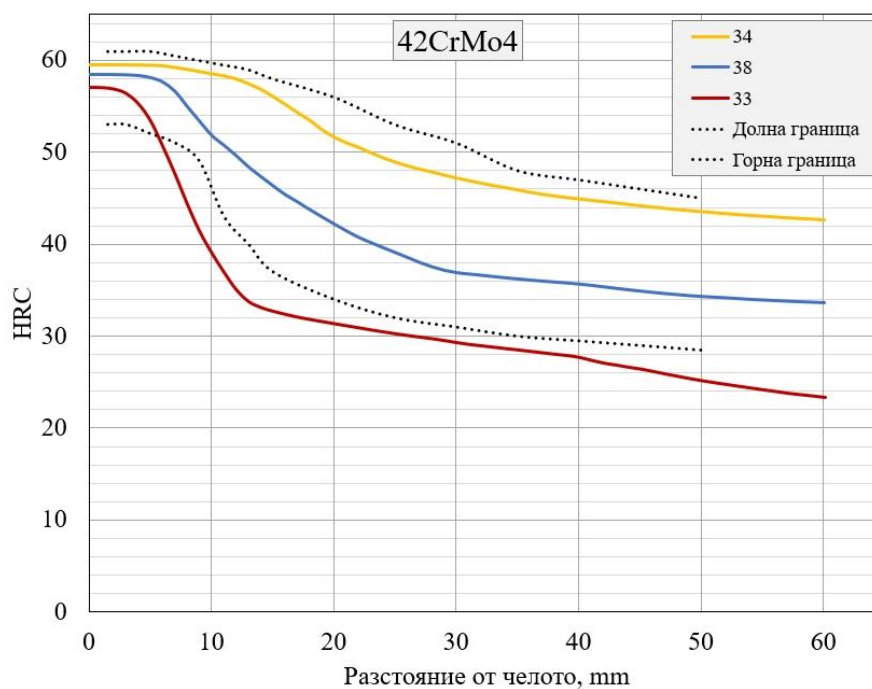
При стомана C45 влияние върху прокаляемостта оказват въглерода, мангана, силиция и молибдена. Степента им на влияние е приблизително една и съща и се изразява в нарастване на прокаляемостта с 23...27%. Тук влиянието на никела и хрома няма практическо значение.

По резултатите за идеалните критични диаметри, показващи комплексното влияние на въглерода и легиращите елементи (опити от 31 до 36, табл.1) се отчита нарастване на прокаляемостта по този критерии над 100%. За стомана C45 това нарастване е 107%, за 41Cr4 е 126%, а за стомана 42CrMo4 – 223%. Това показва, че степента на влияние нараства с нарастване на техния брой и количество в стоманата.



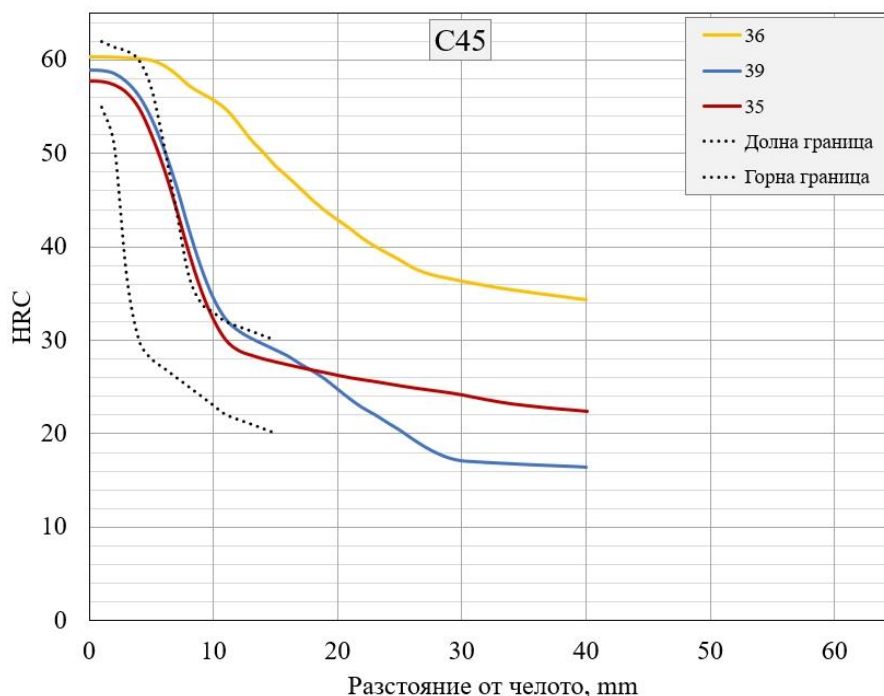
Фиг.2 Разпределение на твърдостта за стомана 41Cr4:

5-средна стойност на въглерода и контролираните елементи; 31-минимална стойност на въглерода и контролираните елементи; 32-максимална стойност на въглерода и контролираните елементи



Фиг.3 Разпределение на твърдостта за стомана 42CrMo4:

13-средна стойност на въглерода и контролираните елементи; 33-минимална стойност на въглерода и контролираните елементи; 34-максимална стойност на въглерода и контролираните елементи



Фиг.4 Разпределение на твърдостта за стомана C45:

39-средна стойност на въглерода и контролираните елементи; 36-максимална стойност на въглерода и контролираните елементи; 35-минимална стойност на въглерода и контролираните елементи

Резултатите от проведените симулации за разпределението на твърдостта по дължината на пробното тяло след челно закаляване са показани на фиг.2, 3 и 4. Според изискванията на БДС EN ISO 642:2004 е симулирано нагряване до температура типична за закаляване на

използваните стомани, от които са изработени пробните тела (в случая 860°C и за трите материала), задържане 1 час при тази температура и охлаждане, по-описаните по-горе условия.

От фиг.2, 3 и 4 се вижда, че най-добро съвпадение между резултатите, получени посредством симулации и литературните източници (BIS EN ISO 683-1:2018; BIS EN 683-2:2018), даващи информация за полосите на прокаляемост, се наблюдава за стомана 42CrMo4. При стомана 41Cr4 се регистрират по-добри резултати близо до охлаждането чело. С отдалечаване от него разликите нарастват, особено за симулациите със състави на горна и средна граница. При стомана C45 резултатите не могат да бъдат приети за достоверни. Предвид използването на едни и същи коефициенти на топлопредаване за всички симулации най-логично е да се предположи, че причините за големите отклонения в резултатите се крият във входните данни за кривите на термодинамично разпадане и тяхното влияние върху получаваните структури, респективно твърдоти.

ИЗВОДИ

Симулирането на метода на челно закаляване може да се използва с успех за определяне на прокаляемостта на конструкционни легирани стомани, наред с методите използвани досега (експериментални и аналитични).

Определянето на прокаляемостта посредством симулиране на процеса на охлаждане по стандартизирания метод на челно закаляване изисква въвеждане на коректни входни данни за коефициентите на топлопредаване и получаваните при охлаждане структури.

Симулирането на прокаляемостта на въглеродни стомани не дава добро съвпадение с литературните данни и с проведени реални експерименти. Вероятна причина за това е недостатъчна коректност на въвежданите входни данни по отношение на кривите на термодинамично разпадане на преохладения аустенит. Необходими са допълнителни изследвания за изясняване на причините за констатитаните при симулирането отклонения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Докладът отразява резултати от работата по проект No 2023 - МТФ - 01, финансиран от фонд „Научни изследвания“ на Русенския университет.

REFERENCES

- BIS EN ISO 642:2004 Steel - Hardenability test by end quenching (Jominy test).
- BIS EN ISO 683-1:2018 Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels - Part 1: Non-alloy steels for quenching and tempering (ISO 683-1:2016)
- BIS EN 683-2:2018 Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels - Part 2: Alloy steels for quenching and tempering (ISO 683-2:2016)
- Danev, I., R. Radev, D. Gospodinov (2022), Influence of Heat Transfer Coefficient on The End-Quench Test Simulation, Proceedings of University of Ruse, vol 61, book 2.1.
- Doane D. V., Kirkaldy, J. (1978). Hardenability Concepts with Applications to Steel, *Metallurgical Society of AIME*, p. 626
- 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.
- 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.
- 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.

<https://moodle.nirhtu.ru/mod/resource/view.php?id=1288> (Accessed on 29.11.2023).