

МОДЕЛИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТТА НА КАРБИДО-БЕЙНИТНИ ЧУГУНИ ПРИ АБРАЗивно ИЗНОСВАНЕ И СУХО ТРИЕНЕ**MODELLING, RESEARCH AND OPTIMIZATION OF CARBIDIC AUSTEMPERED DUCTILE IRON DURING ABRASION AND DRY FRICTION****Владимир Тодоров***
ТУ- Габрово**Гая Дунчева**
ТУ- Габрово**Милка Атанасова**
ТУ- Габрово**Георги Рашев**
ТУ- Габрово

Статията е постъпила на 04 май 2016 г.; приета за отпечатване на 03 юни 2016 г.

Abstract

This article presents the outcomes from experimental investigation of the wear resistance of specimens made of carbidic austempered ductile iron (CADI) which are isothermally hardened in the fields of upper and lower bainite. The specimens are subjected of abrasive wear and dry friction. A mathematical modeling of the experimental results has been carried out. A regression analysis and analysis of variance (ANOVA) have been fulfilled using QStatLab package. On the basis of the regression models obtained, three single-purpose optimization tasks have been solved in order to determined the maximum wear resistance of CADI.

Keywords: carbidic austempered ductile iron; wear resistance; isothermal hardening; optimization.**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Карбидо-бейнитните сферографитни чугуни (CADI) са нов клас изотермично закалени чугуни със сфероидален графит, предназначени за работа в условията на триене с високи контактни натоварвания и интензивно износване [1- 3].

Съчетаването на жилава бейнито-аустенитна метална матрица с разположени в нея твърда-износоустойчива карбидна фаза и мека-графитна, под формата на сферични графитни включения, правят тези чугуни перспективен анти-фрикционен и износоустойчив материал, конкурирайки успешно скъпите Хатфилдова стомана и високо легираните бели чугуни в: автомобилостроенето, земеделската техника, строителна техника и минно дело, общо машиностроене и др. [4, 5].

Целта на настоящото изследване е на база на експериментални изследвания в условията на сухо триене и абразивно износване да се направи оптимизация на износоустойчивостта, като се определи съотношението между процентно съдържание на карбиди и температура на изотермично закаляване на CADI.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ**2.1 Материали, заготовки и техническо оборудване**

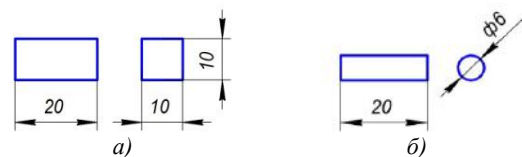
За изследване износоустойчивостта на карбидо-бейнитните чугуни са отляти по метода на „леене по стъпчени модели“ четири състава чугуни с различно съдържание на карбидна фаза: 0%, 9%, 18% и 27%. В качеството на карбидообразуващ елемент е използван бор в количества до 0,15%.

Изпитанията са проведени на две групи образци с квадратно и кръгло сечение (фиг. 1а,б), изотермично закалени по режим:

- аустенитизиране в солна вана при 900°C и време на задържане 1 час:

I^{ва} група - изотермично закалени в солна вана при температура 300° с време на задържане 90min и структура долен бейнит;

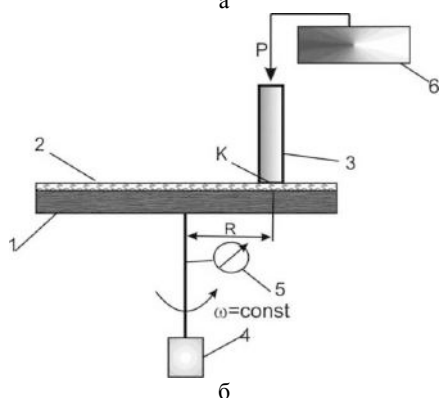
II^{ра} група - изотермично закалени в солна вана при температура 400° С с времена на задържане 60 min и структура горен бейнит.



Фиг. 1. Размери на образци за изпитване на износоустойчивостта
а) с квадратно сечение; б) с кръгло сечение

За изследване на износоустойчивостта при сухо триене е използван стенд за ускорено износване (фиг. 2а), а за абразивно износване – устройство за ускорени изпитвания, работещо по кинематичната схема „палец-диск“ (фиг. 2б).

Износването е оценено на база на загуба на тегло m_i при изминаване на съответен път, респ. време. За всеки изминат час се изчислява абсолютното масово износване Δm_i и по зависимости 1 и 2 се определят



Фиг. 2. Стенд и схема на устройство за определяне на износостойчивостта при сухо триене и абразивно износване

интензивността i и износването I за всеки състав и температура на изотермично закаляване:

$$i = \frac{\Delta m_i}{\rho \cdot A_a \cdot L} \cdot 10^6 \quad (1)$$

където: ρ - плътност на материала, $\rho = 7,2 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$; A_a - номинална контактна площ: $A_a = 1 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$ - за образци с квадратно сечение и $A_a = 0,283 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$ - за образци с кръгло сечение; L - изминал път, респ. време;

$$I = \frac{l}{i} \cdot 10^6 \quad (2)$$

За осъществяване на количествен и качествен анализ е проведен регресионен и дисперсионен анализ и посредством системата QStatLab, като са използвани резултатите, получени от планиран експеримент [6, 7].

2.2 Регресионен и дисперсионен анализи на износостойчивостта при абразивно износване на образци с кръгло и квадратно сечение

Поотделно са моделирани и изследвани функциите на износостойчивостта при: Y1- образци с квадратно сечение и Y2- образци с кръгло сечение. За целта е синтезиран план с три управляващи фактора, чийто нива на вариране са показани в табл. 1.

Управляващи фактори и техните нива Таблица 1

Управляващи фактори		Нива на факторите				
x_1	Изминал път L, m	Натурални	23	69	115	161
		Кодирани	- 1	- 0,333	+ 0,333	+ 1

x_2	Карбидна фаза ЧкФ, %	Натурални	0	9	18	27
		Кодирани	- 1	- 0,333	+ 0,333	+ 1
x_3	Температура на изотермично закаляване $T_{изот}$, °C	Натурални	300		400	
		Кодирани	- 1		+ 1	

Преминаването от натурални x_i в кодирани координати се извършва по формулата:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0,i}}{\lambda} \quad (3)$$

където: \tilde{x}_i е текущата стойност на съответния фактор в натурални единици, а x_i е текущата му стойност кодирани вид; $\lambda = \frac{\tilde{x}_{2,i} - \tilde{x}_{0,i}}{2}$; $\tilde{x}_{2,i}$, $\tilde{x}_{0,i}$ и $\tilde{x}_{1,i}$ са съответно горно, долно и средно нива на i -тия натурален параметър.

В табл. 2 е представен плана на експеримента и получените резултати за целевите функции Y1 и Y2.

План на експеримента и резултати за Y1 и Y2

Таблица 2

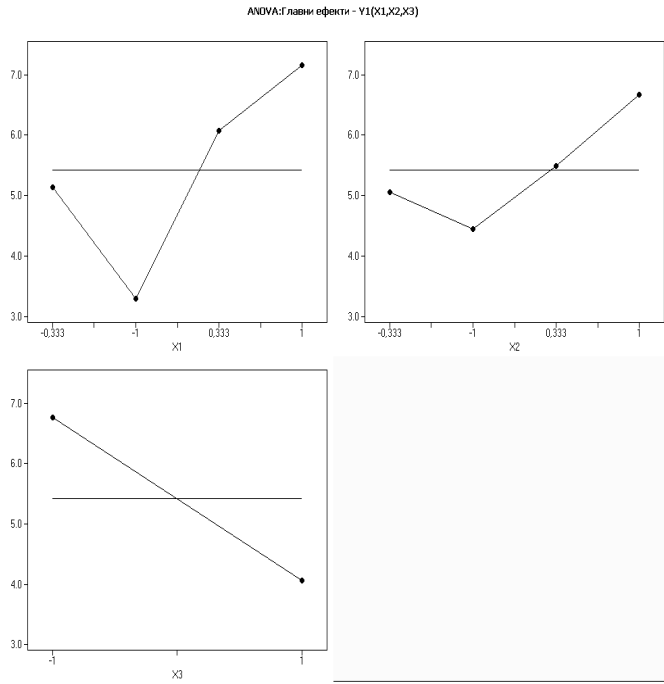
№	x_1	x_2	x_3	Y1.10 ⁶	Y2.10 ⁶
1	- 1	- 1	+ 1	2,2	0,8
2	- 0,333	- 1	+ 1	3,2	1,2
3	+ 0,333	- 1	+ 1	4	1,6
4	+ 1	- 1	+ 1	5	2
5	- 1	- 0,333	+ 1	2,4	0,9
6	- 0,333	- 0,333	+ 1	3,6	1,4
7	+ 0,333	- 0,333	+ 1	4,2	2
8	+ 1	- 0,333	+ 1	5,3	2,2
9	- 1	+ 0,333	+ 1	3	1
10	- 0,333	+ 0,333	+ 1	3,7	1,5
11	+ 0,333	+ 0,333	+ 1	4,3	2,1
12	+ 1	+ 0,333	+ 1	5,5	2,6
13	- 1	+ 1	+ 1	3,8	1,1
14	- 0,333	+ 1	+ 1	4	1,9
15	+ 0,333	+ 1	+ 1	5	2,7
16	+ 1	+ 1	+ 1	5,9	3,1
17	- 1	- 1	- 1	2,8	1,1
18	- 0,333	- 1	- 1	5	1,3
19	+ 0,333	- 1	- 1	6,3	1,9
20	+ 1	- 1	- 1	7,1	2,4
21	- 1	- 0,333	- 1	3,6	1,3
22	- 0,333	- 0,333	- 1	5,9	1,7
23	+ 0,333	- 0,333	- 1	7,1	2,2
24	+ 1	- 0,333	- 1	8,3	2,8
25	- 1	+ 0,333	- 1	4	1,5
26	- 0,333	+ 0,333	- 1	6,6	1,9
27	+ 0,333	+ 0,333	- 1	7,7	2,3
28	+ 1	+ 0,333	- 1	9,1	3
29	- 1	+ 1	- 1	4,5	1,6
30	- 0,333	+ 1	- 1	9,1	2,2
31	+ 0,333	+ 1	- 1	10	2,9
32	+ 1	+ 1	- 1	11,1	3,4

От регресионния анализ за износоустойчивостта при абразивно износване на образци с квадратно и кръгло сечение са получени следните регресионни модели:

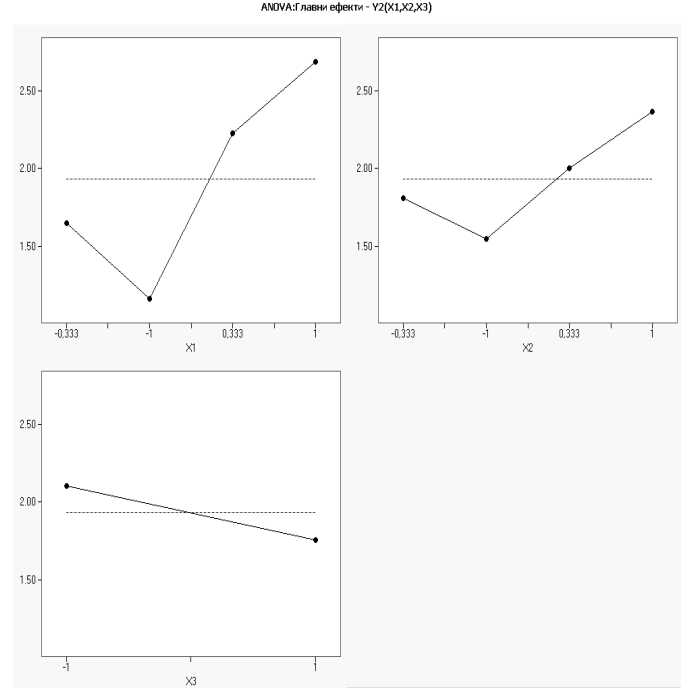
$$Y1 = 5,470 + 1,342x_1 + 1,067x_2 - 1,671x_3 - 0,429x_1^2 + 0,330x_2^2 + 0,596x_3^2 - 0,613x_1x_3 - 0,546x_2x_3 + 0,583x_1^2x_3 - 0,309x_1x_2x_3 \quad (4)$$

$$Y2 = 1,900 + 0,843x_1 + 0,308x_2 - 0,152x_3 + 0,056x_2^2 - 0,113x_1^2 + 0,140x_3^2 + 0,162x_1x_2 - 0,076x_1^2x_2 - 0,084x_1^2x_3 + 0,059x_1x_2^2 + 0,047x_1x_2x_3 + 0,042x_2^2x_3 \quad (5)$$

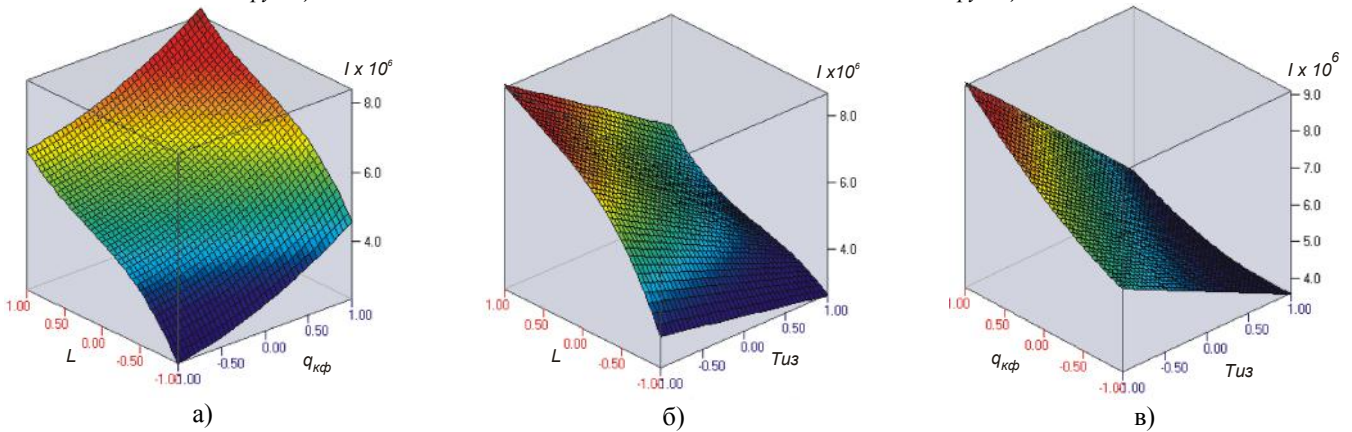
Проведен е дисперсионен анализ - ANOVA, чрез който е изследвано влиянието на управляващите фактори върху съответната целева функция. Получените резултати са визуализирани посредством диаграмите на т.нар. главни ефекти (фиг. 3 и фиг. 4).



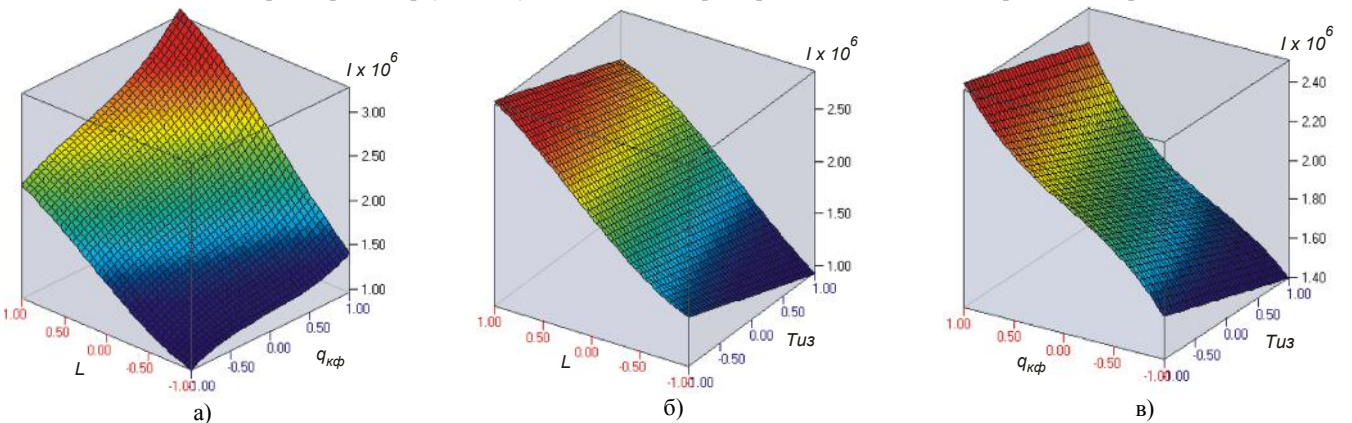
Фиг. 3. Главни ефекти на управляващите фактори върху функцията Y1



Фиг. 4. Главни ефекти на управляващите фактори върху функцията Y2



Фиг. 5. Влияние на факторите върху износоустойчивостта при абразивно износване на образци с квадратно сечение



Фиг. 6. Влияние на факторите върху износоустойчивостта при абразивно износване на образци с кръгло сечение

За изследваните интервали на вариране на факторите върху функциите Y_1 и Y_2 главните ефекти дават основание за следните коментари:

- Наблюдават се едни и същи тенденции за влиянието на факторите върху двете целеви функции Y_1 и Y_2 . От трите управляващи фактора най-голямо влияние върху износоустойчивостта оказва изминатия път (L , m), респ. времето. Износоустойчивостта нараства в долния диапазон на вариране, но с най-голяма степен в интервала $(-1 \div -0,333)$;

- С нарастване на процентното съдържание на карбидната фаза (факторът x_2), износоустойчивостта нараства за изследвания интервал;

- С нарастване на температурата на изотермично закаляване износоустойчивостта намалява. За случая на образци с квадратно сечение факторът x_3 (температура на изотермично закаляване) оказва по-голямо влияние върху износоустойчивостта.

За изследване на влиянието на факторите върху целевите функции Y_1 и Y_2 са направени сечения на хи-

перповърхнината на моделите с различни хиперравнини. Графичното интерпретиране е показано съответно на фиг. 5 и фиг. 6.

Графиките, получени по метода на сечението за влиянието на изследваните фактори върху износоустойчивостта при абразивно износване на квадратни и кръгли образци, потвърждават главните ефекти. За изследвания диапазон на вариране най-голямо влияние оказва изминатия път, респ. времето. Процента карбидна фаза и температурата на изотермично закаляване влияят в почти еднаква степен, но с противоположни тенденции.

2.3 Регресионен и дисперсионен анализ на износоустойчивостта при сухо триене

По същия начин е моделирана и изследвана износоустойчивостта при сухо триене с целева функция Y_3 . Управляващите фактори и техните нива на вариране са показани в табл. 3, а плана на експеримента и резултатите от него - в табл. 4.

Управляващи фактори и техните нива Таблица 3

Управляващи фактори			Нива на факторите							
u_1	Време, h	Натурални	1	2	3	4	5	6	7	8
		Кодирани	- 1	- 0,714	- 0,429	- 0,143	+ 0,143	+ 0,429	+ 0,714	+ 1
u_2	Карбидна фаза $q_{кф}$, %	Натурални	0		9		18		27	
		Кодирани	- 1		- 0,333		+ 0,333		+ 1	
u_3	Температура на изотермично закаляване $T_{из}$, °C	Натурални	300				400			
		Кодирани	- 1				+ 1			

План на експеримента и резултати за Y_3 Таблица 4

№	u_1	u_2	u_3	$Y_3 \cdot 10^6$
1	- 1	- 1	- 1	0,17954
2	- 0,714	- 1	- 1	0,17725
3	- 0,429	- 1	- 1	0,16624
4	- 0,143	- 1	- 1	0,15947
5	+ 0,143	- 1	- 1	0,15863
6	+ 0,429	- 1	- 1	0,15958
7	+ 0,714	- 1	- 1	0,15080
8	+ 1	- 1	- 1	0,15144
9	- 1	- 1	+ 1	0,03556
10	- 0,714	- 1	+ 1	0,04429
11	- 0,429	- 1	+ 1	0,06038
12	- 0,143	- 1	+ 1	0,07346
13	+ 0,143	- 1	+ 1	0,08119
14	+ 0,429	- 1	+ 1	0,09113
15	+ 0,714	- 1	+ 1	0,09719
16	+ 1	- 1	+ 1	0,10364
17	- 1	- 0,333	- 1	0,09095
18	- 0,714	- 0,333	- 1	0,14845
19	- 0,429	- 0,333	- 1	0,19013
20	- 0,143	- 0,333	- 1	0,20281
21	+ 0,143	- 0,333	- 1	0,21386
33	- 1	+ 0,333	- 1	0,30645
34	- 0,714	+ 0,333	- 1	0,38441
35	- 0,429	+ 0,333	- 1	0,28831
36	- 0,143	+ 0,333	- 1	0,37589
37	+ 0,143	+ 0,333	- 1	0,33944
38	+ 0,429	+ 0,333	- 1	0,34773
39	+ 0,714	+ 0,333	- 1	0,35538
40	+ 1	+ 0,333	- 1	0,38153
41	- 1	+ 0,333	+ 1	0,27597
42	- 0,714	+ 0,333	+ 1	0,27900
43	- 0,429	+ 0,333	+ 1	0,27747
44	- 0,143	+ 0,333	+ 1	0,27907
45	+ 0,143	+ 0,333	+ 1	0,25452
46	+ 0,429	+ 0,333	+ 1	0,23551
47	+ 0,714	+ 0,333	+ 1	0,23133
48	+ 1	+ 0,333	+ 1	0,20220
49	- 1	+ 1	- 1	0,44623
50	- 0,714	+ 1	- 1	0,43294
51	- 0,429	+ 1	- 1	0,41209
52	- 0,143	+ 1	- 1	0,42304
53	+ 0,143	+ 1	- 1	0,45393

22	+ 0,429	- 0,333	- 1	0,22520
23	+ 0,714	- 0,333	- 1	0,20942
24	+ 1	- 0,333	- 1	0,24916
25	- 1	- 0,333	+ 1	0,04923
26	- 0,714	- 0,333	+ 1	0,06169
27	- 0,429	- 0,333	+ 1	0,07361
28	- 0,143	- 0,333	+ 1	0,09205
29	+ 0,143	- 0,333	+ 1	0,10348
30	+ 0,429	- 0,333	+ 1	0,11727
31	+ 0,714	- 0,333	+ 1	0,12568
32	+ 1	- 0,333	+ 1	0,13749

54	+ 0,429	+ 1	- 1	0,45760
55	+ 0,714	+ 1	- 1	0,44519
56	+ 1	+ 1	- 1	0,44235
57	- 1	+ 1	+ 1	0,38153
58	- 0,714	+ 1	+ 1	0,30522
59	- 0,429	+ 1	+ 1	0,29348
60	- 0,143	+ 1	+ 1	0,29720
61	+ 0,143	+ 1	+ 1	0,29484
62	+ 0,429	+ 1	+ 1	0,29143
63	+ 0,714	+ 1	+ 1	0,26183
64	+ 1	+ 1	+ 1	0,24214

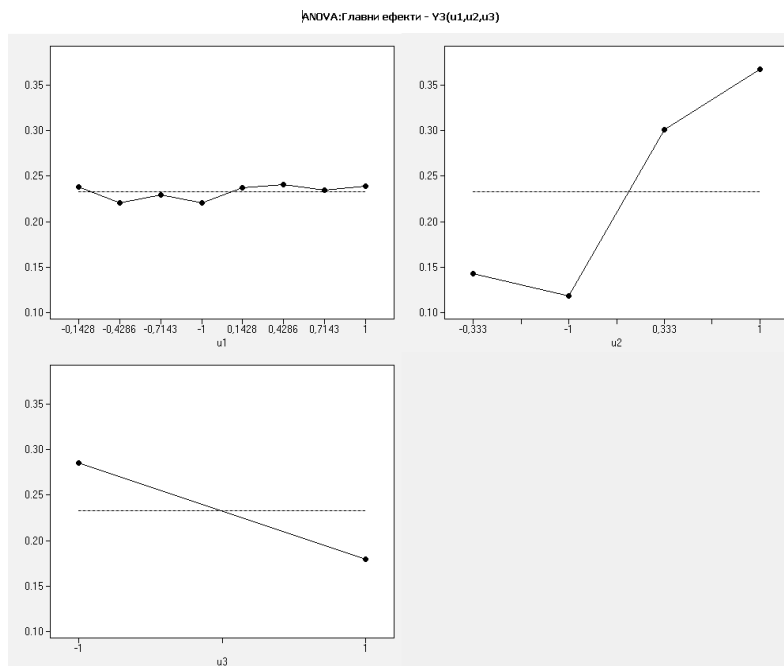
От проведенят регресионен анализ е получен следния модел за целевата функция Y_3 :

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 0,228 + 0,027u_1 + 0,251u_2 - 0,046u_3 - \\
 & - 0,020u_1^2 + 0,013u_2^2 - 0,126u_3^2 - 0,081u_1u_2 - \\
 & - 0,012u_2u_3 - 0,032u_1u_2^2 - 0,027u_1u_2u_3 - \\
 & - 0,012u_2^2u_3 - 0,029u_1^3u_2 - 0,025u_1^3u_3 + 0,025u_1^2u_2^2 + \\
 & + 0,088u_1u_2^3 + 0,016u_1u_2^2u_3
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

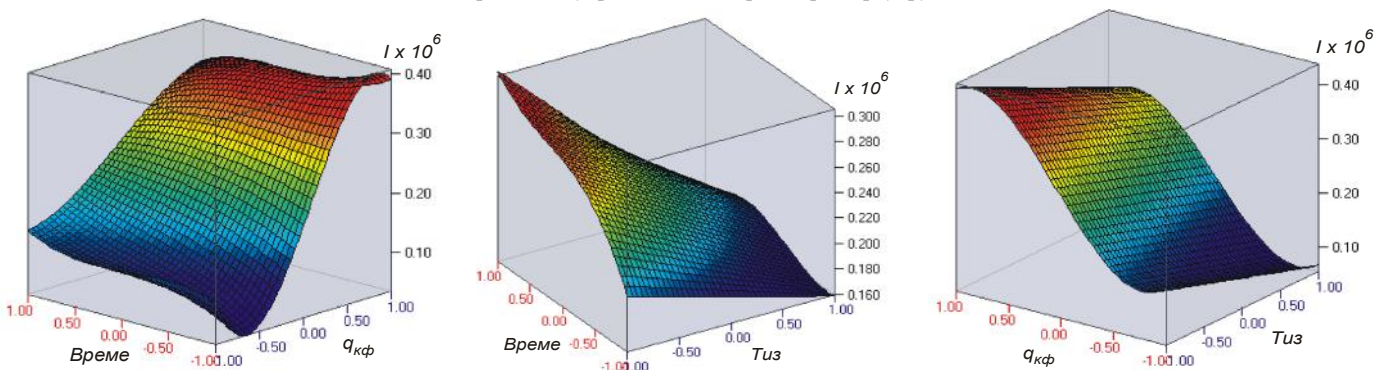
На фиг. 7 и фиг. 8 са дадени диаграмите на главните ефекти на управляващите фактори и графичната интерпретация на влиянието на трите фактора върху износостойчивостта по метода на сечението.

За изследвания интервал на вариране резултатите могат да бъдат обобщени по следния начин:

- От трите изследвани фактора, най-голямо е влиянието на процентното съдържание карбидна фаза (u_2), следващият по влияние фактор е температурата на изотермично закаляване (u_3), най-малко влияние оказва времето h (фиг. 7);
- Процентното съдържание на карбидна фаза влияе в най- голяма степен върху износостойчивостта, когато u_2 се намира в интервала $(0 \div 1)$;
- За постигане на по-висока износостойчивост е целесъобразно да се прилага изотермично закаляване при температура 300 °С.



Фиг. 7 Главни ефекти на управляващите фактори върху функцията Y_3



Фиг. 8 Влияние на факторите върху износостойчивостта при сухо триене

2.4 Оптимизация на износоустойчивостта на CAD I

Основна цел на оптимизацията е: да се определи при какво съчетание от стойности на управляващите фактори ще се осигури най-висока износоустойчивост. За целта са решени следните едноцелеви оптимизационни задачи:

- Определяне на оптималните стойности на факторите x_1 , x_2 и x_3 , за които износоустойчивостта при абразивно износване е максимална;

- Определяне на оптималните стойности на факторите u_1 , u_2 и u_3 , за които износоустойчивостта при сухо триене е максимална.

Оптимизационните задачи са базирани върху получените регресионни модели за износоустойчивостта при абразивно износване (4) и (5) и сухо триене (6).

Получените оптимални стойности на управляващите фактори, осигуряващи максимална износоустойчивост, са показани съответно в табл. 5, табл. 6 и табл. 7.

Оптимални стойности на управляващите фактори, за които $Y1$ е максимална:

Таблица 5

x_1	Изминат път L, m	Кодирани	1
		Натурални	161
x_2	Количество карбидна фаза $q_{кф}, \%$	Кодирани	1
		Натурални	27
x_3	Температура на изотермично закаляване $T_{из}, ^\circ C$	Кодирани	-1
		Натурални	300

Оптимални стойности на управляващите фактори, за които $Y2$ е максимална

Таблица 6

x_1	Изминат път L, m	Кодирани	1
		Натурални	161
x_2	Количество карбидна фаза $q_{кф}, \%$	Кодирани	1
		Натурални	27
x_3	Температура на изотермично закаляване $T_{из}, ^\circ C$	Кодирани	-1
		Натурални	300

Оптимални стойности на управляващите фактори, за които $Y3$ е максимална

Таблица 7

u_1	Време h	Кодирани	1
		Натурални	8
u_2	Количество карбидна фаза $q_{кф}, \%$	Кодирани	1
		Натурални	27
u_3	Температура на изотермично закаляване $T_{из}, ^\circ C$	Кодирани	-1
		Натурални	300

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвано е влиянието на количеството карбидна фаза върху износоустойчивостта на CAD I, изотермично закалени в долно- и горнобейнитната област.

Установено е, че при еднакви количества на карбидна фаза, по-висока износоустойчивост имат чугуните, притежаващи долнобейнитна структура на металната основа, получени при температура на изотермично закаляване $300^\circ C$.

Получени са регресионни модели на износоустойчивостта на CAD I на основата на планирани експерименти.

Проведен е дисперсионен анализ за количествена оценка на влиянието на управляващите фактори върху износоустойчивостта при абразивно износване и сухо триене на изследваните състави CAD I.

От проведените едноцелеви оптимизации на износоустойчивостта в условията на абразивно износване и сухо триене е установено, че за обезпечаване на максимална износоустойчивост е целесъобразно да се използват CAD I чугуни с 27 процентно съдържание карбидна фаза, закалени в долнобейнитната област при температура на изотермично закаляване $300^\circ C$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Laino S., Sikora J. A., Dommarco R. C., 2008. Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CAD I). Wear 265, 1–7.
- [2] Николов Г., Рашев Г., Георгиев Ц., Тодоров В., 2008. Сиви чугуни- възход без падение. Машини, технологии, материали. Година II (2-3).
- [3] Qizhou C., Bokang W. 2008. Recent development of ductile cast iron production technology in China. China Foundry, Vol 5, №2, 82-91.
- [4] Хаджикръстев Л., 2010. Сферографитен чугун с бейнитна структура. Машини, технологии, материали, IV (12).
- [5] www.aditreatments.com
- [6] Вучков И. Н., И. И. Вучков. 2009. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя. София.
- [7] Вучков И. Н., Стоянов С. К., 1986. Математическо моделиране и оптимизация на технологични обекти. „Техника“, София.