

**МОДЕЛИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КАРБИДО-БЕЙНИТНИ ЧУГУНИ****MODELLING, RESEARCH AND OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF
CARBIDIC AUSTEMPERED DUCTILE IRON****Галя Дунчева** *
ТУ- Габрово**Владимир Тодоров**
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.

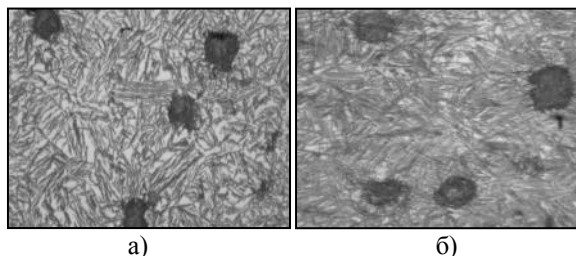
Abstract

An object of this study is the effect of the carbide phase quantity and austempering temperature on the mechanical properties of samples made of carbidic austempered ductile iron (CADI). Analysis of variance and regression analysis have been carried out on the basis of experimental data obtained. On the basis of regression models obtained, three multi- objective optimization tasks have been set out solved. Thus, the optimal values of liquid carbide phase and austempering temperature of CADI have been established.

Keywords: carbidic austempered ductile iron; carbide phase; austempering temperature; optimization.**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

С внедряването на изотермично закалените сферографитни чугуни в практиката са постигнати стойности за якостта, които конкурират успешно по-голяма част от кованите въглеродни и нисколегирани стомани [1]. Оптималната комбинация от високовъглероден аустенит и бейнитен ферит гарантират отлични механични свойства на този вид чугуни.

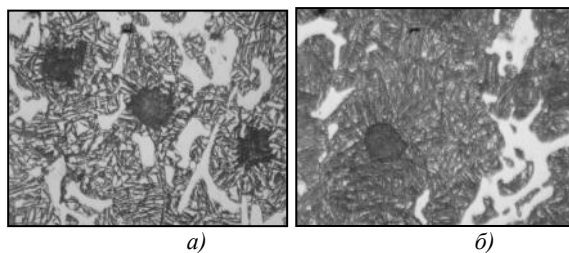
Структурата на металната матрица се осигурява в резултат на двуфазов процес включващ аустенитизиране и изотермично закаляване. В зависимост от реализираната температура на закаляване се образуват фамилия чугуни, с якост - 800÷1000MPa, удължение - 10÷15%, твърдост- 250÷350 НВ и структура горен бейнит (фиг. 1а) или якост 1300÷1500MPa, удължение 2÷4%, твърдост 350÷ 500НВ и структура долен бейнит (фиг. 1б) [2].



Фиг. 1. Структури на АДИ, изотермично закалени при 400°C и 300°C

Нов етап в развитието изотермично закалените сферографитни чугуни се явява получаването на карбидо-бейнитни чугуни т.нар „Carbidic Austempered Ductile Iron” (CADI) [3].

Крайната структура на CADI се формира в резултат на изотермично закаляване в „бейнитната” област , при което се фиксира карбидо-бейнитна метална основа, съдържаща известно количество остатъчен аустенит, сферични графитни включения и карбидна фаза (фиг.2а,б).



Фиг. 2. Структури на CADI, изотермично закалени при 400°C а) и 300°C б)

В сравнение с АДИ тези чугуни притежават висока износоустойчивост, за сметка на понижените удължение и жилавост.

Проведените изследвания в областта на CADI показват, че крайният комплекс от свойства се влияят силно от структуропроявящите фактори: температура на изотермично закаляване, време на задържане при тази температура и количество на карбидната фаза.

Цел на настоящата статия е да се изследва влиянието на количеството карбидната фаза и температура на изотермично закаляване върху комплекса от механични свойства и определяне на тяхните оптимални стойности в CADI.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

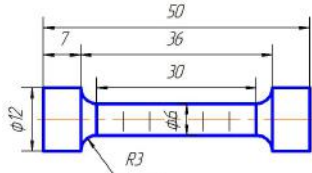
2.1 Детайли на експеримента

За изследване на механичните свойства на CAD1 са отляти пробни тела за изпитване на ударната жилавост и якостта на опън (фиг.3), съдържащи различно количество карбидна фаза- 0%, 9%, 18% и 27%. Същите са разделени на две групи. Първата група са изотермично закалени при температура 300°C, а втората- при 400°C.

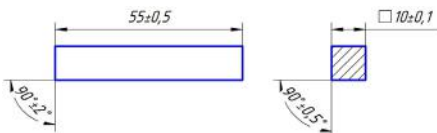


Фиг. 3 Пробни образци за механични изпитания

За определяне на пластичните характеристики: якост на опън, R_m [MPa]; граница на провлачване, $R_{p0.2}$ [MPa] и относително удължение, A_5 (%) са използвани петкратни пробни тела, като върху изчислителната дължина са нанесени отметки през 5mm (фиг. 2). Експерименталният тест е осъществен върху универсално-изпитателна машина тип ZD20, настроена на опън [4]. Твърдостта (HV, kgf/mm^2) и ударната жилавост (KC, J/cm^2) са определени съответно по метода на Викерс [5] и с чук на Чагру [6], като са използвани пробните тела от фиг. 3.



Фиг. 4 Пробно тяло за осъществяване на линейния тест



Фиг. 5 Размери на образец за изпитване на ударна жилавост и твърдост

2.2 Математическо моделиране на механичните характеристики на CAD1

За провеждане на математическото моделиране са използвани получените резултати от проведен в лабора-

торни условия пълен факторен експеримент с два управляващи фактора, съответно на по 4 и 2 нива. В табл.1 са дадени управляващите фактори и техните нива на вариране в кодиран и натурален вид.

Целевите функции са:

- $Y_{Rp0.2}$ - граница на провлачване на материала, МРa;
- Y_{Rm} - якост на опън на материала, МРa;
- Y_{A5} - относително удължение, %;
- Y_{KC} - ударна жилавост, J/cm^2 ;
- Y_{HV} - твърдост, kgf/mm^2 .

В табл. 2 са дадени плана на експеримента и обобщените резултати за механичните характеристики. Последните са получени като средно - аритметична стойност от три повторения в експериментална точка.

Изследване на влиянието на факторите върху целевите функции е проведено в съответствие с алгоритъма, показан на фиг.6.

В табл. 3 са дадени получените посредством QStatLab регресионни модели на целевите функции, а на фиг. 7 са показани диаграмите на т. нар. главни ефекти. Последните позволяват да се изследва влиянието на факторите в качесвен аспект [7].

Управляващи фактори и техните нива Таблица 1

Управляващи фактори		Нива на факторите				
v_1	Карбидна фаза $q_{KF}, \%$	Натурални	0	9	18	27
		Кодирани	-1	0,333	+0,333	+1
v_2	Температура на изотермично закаляване $T_{из}, ^\circ C$	Натурални	300		400	
		Кодирани	-1		+1	



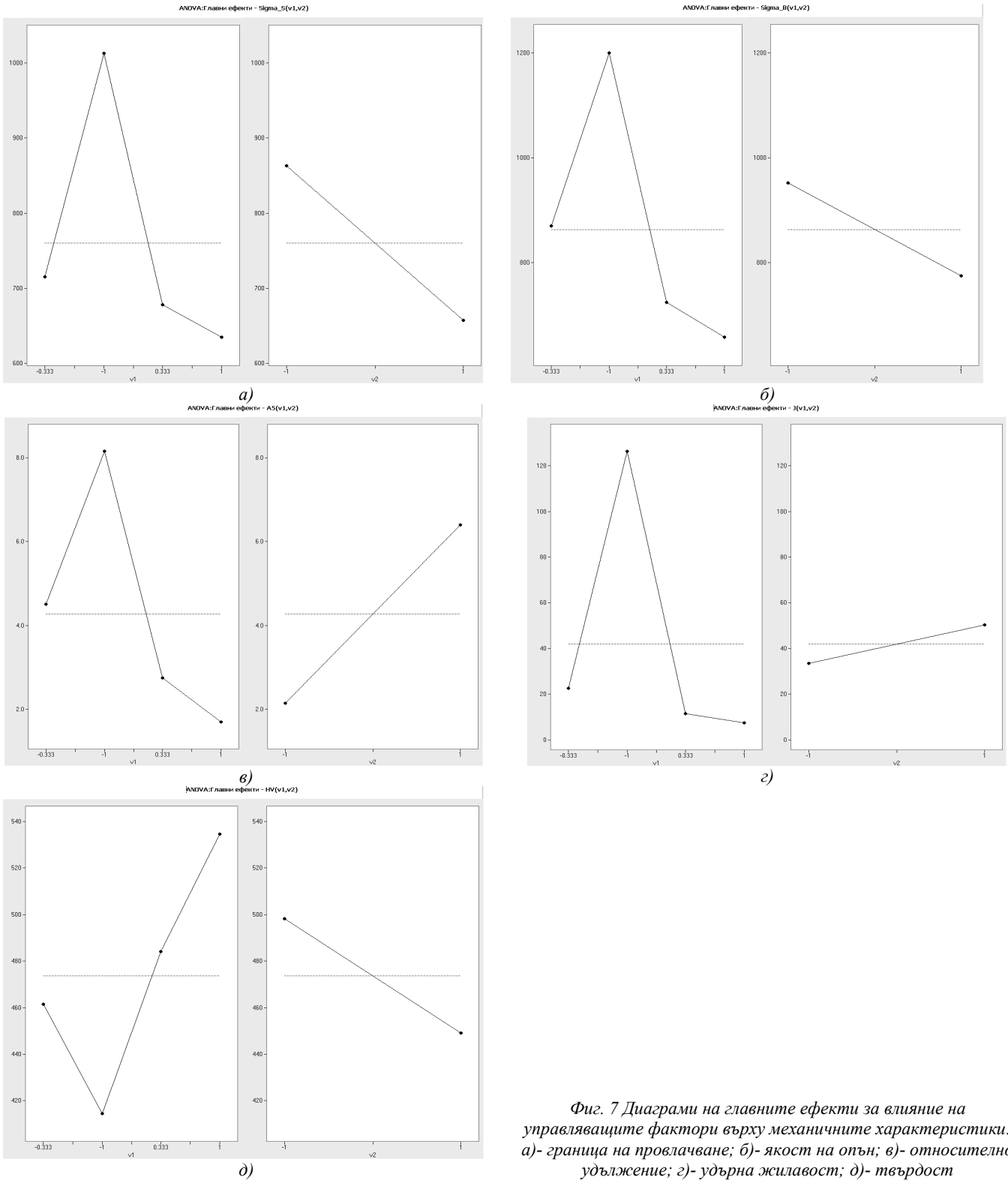
Фиг. 6 Блок-схема за моделиране на механичните характеристики

План на експеримента и резултати за механичните характеристики Таблица 2

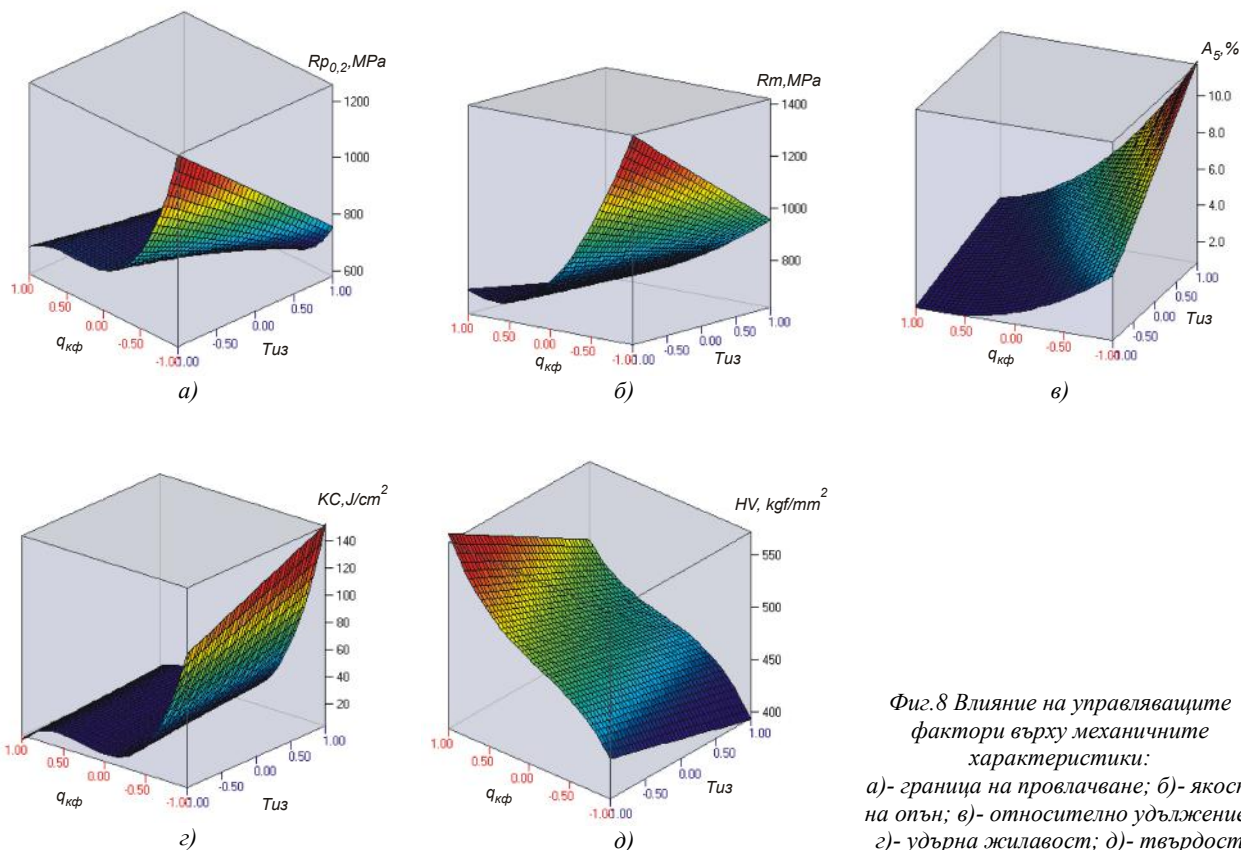
№	Фактори		Механични характеристики				
	Карбидна фаза	Температура на изотермично закаляване	$R_{p0.2}$, МРa	R_m , МРa	A_5 , %	KC , J/cm^2	HV , kgf/mm^2
	v_1	v_2	$Y1$	$Y2$	$Y3$	$Y4$	$Y5$
1	-1	-1	1265	1430	4,5	100,65	433
2	-0,333	-1	780	930	2,0	19,57	481
3	0,333	-1	726	750	1,3	8,42	505
4	1	-1	680	696	0,8	5,25	574
5	-1	1	760	969	11,8	152	396
6	-0,333	1	650	810	7,0	25,4	442
7	0,333	1	630	699	4,2	14,6	463
8	1	1	590	620	2,6	9,6	495

Получени регресионни модели Таблица 3

Целева функция	Регресионен модел
$Y_{Rp0.2}$	$Y_{Rp0.2} = 680,630 + 44,995v_2 + 143,120v_1^2 + 189,175v_1^3 + 95,942v_1v_2 + 103,755v_1^2v_2$
Y_{Rm}	$Y_{Rm} = 780,849 + 265,531v_1 + 31,338v_2 + 147,901v_1^2 + 91,813v_1v_2 + 102,912v_1^2v_2$
Y_{A5}	$Y_{A5} = 3,463 + 3,165v_1 + 1,938v_2 + 1,462v_1^2 + 1,395v_1v_2 + 0,337v_1^2v_2$
Y_{KC}	$Y_{KC} = 10,777 + 11,120v_1 + 1,640v_2 + 56,098v_1^2 + 48,330v_1^3 + 10,551v_1v_2 + 12,285v_1^2v_2$
Y_{HV}	$Y_{HV} = 473,625 + 30,514v_1 + 19,159v_2 + 29,486v_1^3 + 9,677v_1v_2 + 9,841v_1^2v_2$



Фиг. 7 Диаграми на главните ефекти за влияние на управляващите фактори върху механичните характеристики: а)- граница на провлачване; б)- якост на опън; в)- относително удължение; г)- удърна жилавост; д)- твърдост



Фиг.8 Влияние на управляващите фактори върху механичните характеристики:

а)- граница на провлачване; б)- якост на опън; в)- относително удължение; г)- удърна жилавост; д)- твърдост

На фиг. 8 графично е изобразено влиянието на процентното съдържание на карбиди и температурата на изотермично закаляване върху изследваните механични характеристики.

От извършеният дисперсионен и регресионен анализ относно изменението на механичните характеристики във функция от изследваните фактори могат да се обобщят следните изводи:

- Механичните характеристики: граница на провлачване, якост на опън, относително удължение и удърна жилавост са с максимални стойности, когато факторът v_i е в диапазона $(-1; -0,333)$, което съответства на процентно съдържание карбиди в интервала $0-9\%$;

- От диаграмите на главните ефекти и получените регресионни модели прави впечатление, че количеството карбидна фаза (v_i) оказва по-голямо влияние върху: границата на провлачване, удърната жилавост и твърдостта.

- Твърдостта се увеличава с нарастване на процента карбиди. Тя е с най- висока стойност в диапазона $(+0,333; +1)$, което съответства на $q_{kf} = (18-27)\%$;

- Температурата на изотермично закаляване оказва различно влияние върху изследваните целеви функции. За получаване на чугуни с по-добри относително удължение и удърна жилавост е необходимо тя да бъде на горно ниво. т.е $T_{iz} = 400^\circ\text{C}$. При $T_{iz} = 300^\circ\text{C}$ се получават по-високи стойности на якостта на опън, границата на провлачване и твърдостта.

2.3 Постановка на многоцелевите оптимизационни задачи

За определяне на оптимално съотношение между процента карбиди и температура на изотермично закаляване, осигуряващи получаването на CADI с определен комплекс от механични характеристики, са формулирани и решени следните многоцелеви оптимизационни задачи:

- 1) Оптимизация, при която се акцентира върху подобрени пластични свойства на CADI, респ. тегловните коефициенти на целевите функции $Y_{R_{p0.2}}$, Y_{R_m} и Y_{A_5} са по-големи, отколкото тези на останалите целеви функции;

- 2) Оптимизация, при която се акцентира върху подобрена ударна жилавост и твърдост на CADI, респ. Тегловните коефициенти на целевите функции Y_{KV} и Y_{HV} са с приоритет;

- 3) Оптимизация, при която се акцентира върху подобрена твърдост и граница на провлачване на CADI, респ. тегловните коефициенти на целевите функции Y_{HV} и $Y_{R_{p0.2}}$ са по-големи.

Оптимизационните задачи са базирани върху получените регресионни модели (табл. 3), като е използвана системата за управление на качеството QStatLab в съответствие с т.н. „генетичен алгоритъм“ [7]. От намерения парето-фронт и предварително приети ограничения на съответните тегловни коефициенти е избран подходящ вариант. В табл. 4 са дадени получените оптимални стойности на управляващите фактори за конкретната многоцелева задача, както и приетите ограничения.

Получени оптимални стойности на управляващите фактори

Таблица 4

Оптимизационна задача	Ограничения на целевите функции	Оптимални стойности на управляващите фактори			
Многоцелева оптимизация с повишени тегловни коефициенти на целевите функции $Y_{R_{p0.2}}$, Y_{R_m} и Y_{A_5}	$R_m > 700 \text{ MPa}$; $R_{p0.2} > 600 \text{ MPa}$, и $A_5 > 1,5\%$	v_1	Количество карбидна фаза $q_{\text{кф}}$ %	Кодирани	- 0,3597
				Натурални	8,644
		v_2	Температура на изотермично закаляване $T_{\text{из}}$, °C	Кодирани	0,2474
				Натурални	362,37
Многоцелева оптимизация с повишени тегловни коефициенти на целевите функции Y_{K_C} и Y_{H_V}	$K_C > 25 \text{ J/cm}^2$ и $H_V < 500 \text{ kgf/mm}^2$	v_1	Количество карбидна фаза $q_{\text{кф}}$ %	Кодирани	- 0,3597
				Натурални	8,644
		v_2	Температура на изотермично закаляване $T_{\text{из}}$, °C	Кодирани	0,2474
				Натурални	362,37
Многоцелева оптимизация с повишени тегловни коефициенти на Y_{H_V} и $Y_{R_{p0.2}}$	$H_V < 500 \text{ kgf/mm}^2$ и $R_{p0.2} > 600 \text{ MPa}$	v_1	Количество карбидна фаза $q_{\text{кф}}$ %	Кодирани	- 0,3742
				Натурални	8,45
		v_2	Температура на изотермично закаляване $T_{\text{из}}$, °C	Кодирани	-0,9111
				Натурални	304,45

3. ИЗВОДИ

Посредством пълен факторен експеримент е изследвано влиянието на количеството карбидна фаза и температурата на изотермично закаляване върху механичните характеристики на CADI. На тази основа са изведени регресионни модели на якостта на опън, граница на провлачване, относително удължение, ударна жилавост и твърдост. За получаване на различно съчетание от механични свойства са формулирани и решени три многоцелеви оптимизации. Намерените оптимални стойности на управляващите фактори в съответствие с конкретната оптимизационна задача дават основание за следните основни изводи:

- за осигуряване на подобрени пластични свойства на CADI е необходимо количеството карбидна фаза да бъде ~ 9%, а температурата на изотермично закаляване- 362°C;

- за получаване на подобрена ударна жилавост и твърдост на CADI е целесъобразно количеството карбидна фаза да бъде ~ 9%, а температурата на изотермично закаляване- 363°C;

- за получаване на подобрена твърдост и граница на провлачване на CADI: количеството карбидна фаза да бъде 8,5%, а температурата на изотермично закаляване- 305°C.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nofal A. A., Jekova L., 2009. Novel Processing Techniques and Applications of Austempered Ductile Iron. Journal of The University of Chemical Technology and Metallurgy.
- [2] www.wmlee.co.uk/manufacturing/material/a-d-i
- [3] Nayrynen K.L., Brandenburg K.R., 2003. Carbide austempered ductile iron (CADI)—the new wear material, Am. Foundry Soc. 111, 845–850.
- [4] БДС EN ISO 6892-1:2009– Метални материали. Изпитване на опън. Част 1: Метод за изпитване при стайна температура.
- [5] БДС EN ISO 6507-1:2006 - Метали. Изпитване на твърдост по Vickers. Част 1: Метод за изпитване.
- [6] БДС EN ISO 148-1:2011 - Метални материали. Изпитване на удар с чук на Charpy. Част 1: Метод за изпитване.
- [7] Вучков И. Н., И. И. Вучков. 2009. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя. София.