



АНАЛИЗИРАНЕ НА ТОПЛОУСТОЙЧИВОСТТА НА ИНСТРУМЕНТАЛНА СТОМАНА ВН11 СЛЕД ЙОННО АЗОТИРАНЕ

Николай Тончев, Илия Зюмбилев, Николай Христов
tontchev@vtu.bg, n_d_hristov@abv.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“
София, ул. „Гео Милев № 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** йонно азотиране, оптимален режим, топлоустойчивост, ВН11, дебелина на свързаната зона при азотиране.*

***Резюме:** При изследването на азотираната стомана ВН11 е проведен планиран експеримент при който, една от изследваните величини е топлоустойчивостта на изследваните инструментални стомани. Този параметър е важен за експлоатационните качества на подобен обект на изследване. Изведени са регресионни уравнения, които с помощта на собствена методика са анализирани. Установена е комплексна връзка между топлоустойчивостта и фазовия състав с помощта на която се обосновава адекватността на използвания подход.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Една от основните тенденции в развитието на машиностроенето е използването на нови конструкционни материали с високи експлоатационни свойства. Към свойствата се причислява и топлоустойчивостта, която обикновено се свързва с основите на легирането и последващото термично обработване. Това свойство е задължително за изделията и инструментите, работещи при по-високи температури. Основни методи на изпитване, вкл. и за топлоустойчивост са подробно обобщени в [1]. Основното при тях е обяснението на разглежданото свойство чрез фазовия състав и другите физико-механични свойства. Обикновено в литературата [2,3] се посочват химични състави на сплави на желязна, никелова и кобалтова основа, на редица труднотопими метали, най-често волфрам, молибден и хром и техните сплави. Симулацията на процесите на термично и химико-термично обработване трябва да включва развитието на микроструктурните фази. Сложността на задачата се състои в прогнозирането на механичното поведение на микроструктура при изменението на температурата. В [4] е разгледан метод за оптимизиране, за да извлече параметрите на кинетиката на трансформацията на фазите на база на експериментални резултати.

При прилагане на технологичните процеси на материалите, без значение дали става въпрос за покрития, слоеве, техен или друг изследван параметър е необходимо да се създаде възможност този процес да се управлява чрез резултата на контролираните индикатори. Те са пряко свързани с търсеното конкретно приложение. Процесът на управление на условия на изменение на технологичните фактори дава възможност

едновременно с групата извършени експерименти да се определят различни полезни решения. Друго предимство на тази идея е, че чрез нея по всеобхватно се анализира разглеждания процес или технология и чрез това се прави оценка на целия комплекс от свойства. Всичко това може да се постигне чрез лабораторни изпитвания или симулирани опити с вариране на комбинациите на режимите, и моделиране в опит да се създаде ново разбиране за това как могат да бъдат проектирани такива оптимизирани процеси или системи. Тези идеи най-подробно са разгледани в [5, 6].

Резултатите от настоящото изследване се получават от собствено разработен в ВТУ софтуер за анализ и оптимизация на технологични процеси. По този начин е надградена технологията на йонно азотиране, чрез установяване на три нови технологични режими, което е и целта на настоящата статия.

2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За изследване са избрана инструменталната стомана ВН11 (4Х5МФС) с повишена топлоустойчивост и жилавост. Химичният състав на изследваната стомана е изследван в уредба за автоматичен анализ "Спектроскоп" и е посочен в табл.1.

Таблица 1 Химичен състав на изследваната стомана ВН11

Стомана	Химични елементи, тегловни процента								
	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Ni	Cu	S
4Х5МФС	0,38	4,50	1,20	0,47	0,98	0,22	0,14	0,11	0,006

За установяване влиянието на по-важните технологични параметри на предварителната термична обработка на йонното азотиране върху топлоустойчивостта на изследваните стомани е проведен и пълен факторен експеримент от типа 24 при входящи (управляващи) фактори: температура на азотиране X1, налягане на амоняка X2, продължителност на процеса X3, температура на отвярщане X4 и целеви параметър – топлоустойчивост T. На базата на така избраните фактори и параметър са използвани следните интервали на вариране и нулево ниво - табл.2.

Таблица 2. Интервал на вариране и фактори

Фактори	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Нива	t _{азот.} , °C	P _{NH₃} , Pa	τ, h	t _{отвр.} , °C
Нулево ниво	530	300	7	650
Интервал на вариране	20	150	3	50
Горно ниво	550	450	10	700
Долно ниво	510	150	4	600

3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛОУСТОЙЧИВОСТ

Определянето на топлоустойчивостта на термично обработените и йонно азотираната стомана е извършена по изменението на твърдостта, която е измерена при стайна температура.

От изследваната стомана са изработени образци с размери: 20x20x10 mm с грапавост на повърхнините Ra = 0.63 μm. За нагриването им е използвана камерна пещ. Пробните тела се нагриват до различни температури (575°, 600°, 625°, 650°, 675°, 700°, 725° и 750° C) с продължителност от 4h. Теплоустойчивостта е определена от пределната температура на нагриване, за която в течение на 4h се съхранява твърдост 45HRC за термично обработените образци и 450HV за йонно азотираните. Твърдостта

е измерена по метода на Викерс с 9,81N и 49,05 N. Направени са по 5 измервания на твърдостта за всеки образец и се взема средната стойност.

На базата на получените резултати от измерената твърдост на пробните тела в зависимост от температурата на изпитване и са изведени следните регресионни модели.

На основата на получените резултати от планирания експеримент са изведени следните значими и адекватни регресионни уравнения за топлоустойчивостта (Т) на азотираната стомана:

$$(1) \quad T = 709 + 19,5 X_1 + 0,9 X_2 - 13,6 X_4 + 0,2 X_1^2 - 0,9 X_1X_2 + 0,9 X_1X_3 + 2,1 X_1X_4 + 0,7 X_2^2 - X_2X_3 - 1,5 X_2X_4 + X_3^2 + 2 X_3X_4 - 0,5 X_4^2;$$

С коефициент на множествена корелация: $R = 0,994$;

Уравнение за свързана зона,

$$(2) \quad \delta_{с.з} = 8,00 + 2,47 X_1 + 0,92 X_2 + 1,47 X_3 - 0,80 X_4 - 1,13 X_1^2 + 0,44 X_1X_2 - 0,06 X_1X_4 - 0,88 X_2^2 + 0,437 X_2X_3 - 0,19 X_2X_4 - 0,13 X_3^2 + 0,31 X_3X_4 - 0,88 X_4^2;$$

С коефициент на множествена корелация: $R = 0,9373$;

Уравнение за фазов състав

$$(3) \quad F_{(\alpha, \gamma, \gamma'+\epsilon)} = 2,01825 + 0,05025 X_1 + 0,17525 X_2 + 0,37079 X_3 - 0,0270649 X_1^2 - 0,0405855 X_1 X_2 + 0,125 X_1X_3 + 0,5 X_1X_4 + 0,0613369 X_2^2 - 0,125 X_2X_4 + 0,0452575 X_3^2 + 0,125 X_3X_4$$

С коефициент на множествена корелация: $R = 0,9131$

Уравненията са изведени за кодирани стойности на променливите.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

С разработен подход и софтуер, подробно описан в [6] са определени резултатите от изследванията.

Еднокритериалната оптимизация на уравнение (1) дава възможност да се определи максималната и минималната прогнозирана топлоустойчивост, както и управляващите параметри при които се срещат тези стойности. В Табл. 3 освен минималната и максималната стойности на топлоустойчивостта са посочени и останалите прогнозни величини, обект на изследването с цел изясняване на взаимовръзка с режима на обработване.

Таблица 3. Връзка на топлоустойчивостта, дебелината на свързаната зона и фазовия състав с параметрите на режима на обработване.

Топлоустойчивост, [°C]	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	δ _{с.з}	F _(α,γ,γ'+ε)
	t _{азот.} , [°C]	P _{ННЗ} , [Pa]	τ, [h]	t _{отвр.} , [°C]	[μm]	
Max 744,8	550	450	4	600	8.26 (70.73%)	γ'+ε
Min 673	510	300	4	700	0.13 (2.47%)	α

За практически цели при използването на изследваната ВН11 стомана е интересно да се определи технологичен режим, който гарантира освен максимална топлоустойчивост, максимална свързана зона и фазов състав γ'+ε. Това може да се реализира с процедура за многокритериална оптимизация, описана в [6]. Резултатът от прилагането на многокритериалната процедура за едновременен максимум на уравнения (1)-(3) е посочен в табл. 4.

Таблица.4. Резултат от
многокритериална компромисна оптимизация за едновременен максимум на уравнения (1)÷(3)

Идентификатор на компромисна максимална оптимизация	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
	t _{азот.,} [°C]	P _{NH₃} , [Pa]	τ, [h]	t _{отвр.,} [°C]
Топлоустойчивост T=730.3 [°C](79.81%)	550	450	10	650
max δ _{с.з} = 11.59 [μm] (98.74%)				
γ'+ε (съгласно уравнение (3))				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

След йонно азотиране на стомана ВН11 се формират слоеве, както без свързана зона, така и с двуфазна $\gamma'+\epsilon$, или монофазна γ' свързана зона. Може да се отбележи, че благодарение на еднокритериалната оптимизация между дебелината на свързаната зона, както и нейния фазов състав е определена топлоустойчивостта на азотирания слой при точно определен режим на йонно азотиране. В азотирания слой, където не е формирана свързана зона, топлоустойчивостта е най - ниска. Причината за това може да се търси в морфологията на формиране на α - фазата (дифузионна зона), която е с по – ниска температура на разякчаване от дисоциация от нитридната зона, както и от вида на кристалната решетка. При определения режим на азотиране в табл.4 е определена топлоустойчивостта на азотирания слой, който съответства и на висока износоустойчивост на стоманата. Това се свързва с получената дебелина на свързаната зона и нейния двуфазен състав.

Положителното влияние на йонното азотиране върху топлоустойчивостта се свързва със значително количество легиращи елементи (Mo, Cr) в твърдия разтвор, повишената устойчивост на разтвора съдържащ азот и бавната коагулация на нитридните и карбидните частици съдържащи молибден и хром. Това забавя процесите на разякчаване на повърхностния (азотиран) слой и обуславя съхранение на твърдост 450HV до по- високи температура.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Тимошенко Н.Н. (ред.) Новые методы испытаний металлов Сборник трудов ЦНИИ чермет им. И.П. Бардина вып. 79. - М.: Металлургия, 1972. - 250 с.
- [2] B.L. Ferguson, Z. Li, A.M. Freborg, Modeling heat treatment of steel parts, Computational Materials Science, Volume 34, Issue 3, 2005, Pages 274-281, ISSN 0927-0256.
- [3] Мулякко Н.М., Долгополова Л.Б. Повышение свойств жаропрочных отливок за счет комплексного модифицирования стали Известиях Челябинского научного центра. - 2001. - Вып 3 (12). - С. 4.
- [4] Prat, J. García, D. Rojas, J.P. Sanhueza, C. Camurri, Study of nucleation, growth and coarsening of precipitates in a novel 9%Cr heat resistant steel: Experimental and modeling, Materials Chemistry and Physics, Volume 143, Issue 2, 2014, Pages 754-764, ISSN 0254-0584.
- [5] J. Lin, S. Carrera, A.O. Kunrath, S. Myers, B. Mishra, P. Ried, J.J. Moore, D. Zhong, Design methodology for optimized die coatings: The case for aluminum pressure die-casting: Invited paper B7-1-1, ICMCTF, presented Monday May 2nd, 2005, San Diego, Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issue 6, 2006, Pages 2930-2941, ISSN 0257-8972.
- [6] Tontchev N., Materials science, Effective solutions and technological variants, - Lambert, Academic Publishing, 2014.
- [7] Kolarov I. Model for Vibro-acoustic Characterization of Discontinuity in Cylindrical Machine Parts . Scientific Proceedings “NDT days 2016”, p. 276 - 279, June 2016. ISSN: 1310-3946.

ANALYSIS OF THE HEAT RESISTANCE OF TOOL STEEL BH11 AFTER ION-NITRIDING

Nikolay Tonchev, Iliya Zyumbilev, Nikolay Hristov
tontchev@vtu.bg, n_d_hristov@abv.bg

*Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

***Key words:** ion nitriding, optimal regime, heat resistance, BH11, thickness of the bound zone during nitriding.*

***Abstract:** In the study of nitrated steel BH11 a planned experiment was carried out, one of the studied quantities being the heat resistance of the steel. This parameter is important for the performance of such a test object. Regression equations are derived, which are analyzed using our own methodology. A complex connection between the heat resistance and the phase composition has been established, with the help of which the adequacy of the used approach is substantiated.*