



Determining the Simultaneous Influence of Several Factors on Abrasive Wear after Layer Welding

Daniela SPASOVA

Technical University of Varna, Varna, Bulgaria,
e-mail: danielats@tu-varna.bg

Abstract

Welding with wear-resistant electrodes is a commonly used method that is used in the restoration of parts operating in contact friction conditions. Steel 40X, one of the commonly used structural steels, is medium- carbon, low-alloy steel and with low wear resistance. Its wear resistance can be increased by welding the contact surface with wear-resistant electrodes. In the present paper, 5 types of samples were investigated, 4 of them were welded with wear-resistant electrodes (EH550; Abradur 64; Abradur 66; OK Weartrode 60T;), and the fifth sample is a comparison sample made of 40X steel. Tribological studies of the welded samples were carried out in dry friction mode and the influence of the carbon equivalent and the chromium equivalent on the hardness and dimensional stability (change in mass of the specimen) of the welded surfaces was investigated. Macrohardness was measured along the depth of the welded layer and a metallographic structural analysis was carried out.

Keywords: tribology, welded layers, wear resistance, phase composition.

Определяне на едновременното влияние на няколко фактора върху абразивното износване след наваряване

Даниела СПАСОВА

1. Увод

Абразивното износване е механизъм на износване, който води до разрушаване на повърхностните слоеве на материала, вследствие триене на твърди частици върху контактната повърхност на материала. Когато твърда повърхност или частици взаимодействат или се плъзгат върху по-мека повърхност, причиняват загуба на материал. Това е вид износване, което възниква поради натоварването на твърди частици върху повърхността на материала, който има твърдост, равна или по-малка в сравнение с натоварващите частици [1]. Практически износването е резултат от взаимодействието на работното тяло на машината или конструкцията със съответната част или с обработваната среда. При износването протичат редица механични, химични и структурни процеси в триещите се части [2]. Големината на износване, в зависимост от състоянието на материала, може да се изрази в загубата на материала, в неговата деформация, в изменение на свойствата му и в пренасянето на материал между контактуващите тела [3, 4].

Наваряването с износоустойчиви електроди е сполучлив, често използван метод, който се използва при възстановяване на детайли, работещи в екстремални условия на контактни взаимодействия, каквито са експлоатационните условия на земеделската и строително-пътна техника – висока запрашеност с абразивни микрочастици, наличие на

влага и агресивни компоненти. Сплавта от наваряващите електроди се отлага равномерно върху повърхността на меки материали (обикновено ниско или средно въглеродни стомани) чрез наваряване, с цел увеличаване на твърдостта и устойчивостта на износване, без значителна загуба на пластичността и издръжливостта на основния материал [5].

Един от най-важните параметри, при абразивното износване е химичния състав на наварения материал, определящ структурата и свойствата на наварения слой. Това обстоятелство наложи и идеята на настоящите изследвания, а именно да се изследва влиянието на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху твърдостта и износоустойчивостта (износената маса), след наваряване на стомана 40X с различни видове електроди (EH550; Abradur 64; Abradur 66; OK Weartrode 60T;)

2. Експериментална част

Изследвани са 5 вида образци, като 4 от тях са наварени ръчно електродъгово с износоустойчиви електроди, а петия образец е еталонен образец, изработен от нисколегирана стомана 40X, който се използва за базов при сравнителните изследвания. Образците са предварително подгряти, след което са многослойно наварени [6].

Проведени са трибологични изследвания на наварените образци, в режим на сухо триене, осъществени по кинематична схема – челно триене между неподвижен цилиндричен образец и въртящ се диск. За изпълнение целите на изследването е измерена макротвърдост на образците (по метода на Викерс) по дълбочина на наварения слой, с натоварване 5 kg, съгласно БДС EN-ISO 6507-2006) и е проведен металографски структурен анализ.

2.1 Химичен състав на използваните материали и параметри при режима на наваряване

В табл. 1 е даден химичния състав на електродната тел на електродите за наваряване, както и параметрите на използваните режими на наваряване, а в табл. 2 е даден химичния състав на основния материал- стомана 40X.

Таблица 1. Химичен състав на електродната тел на електродите за наваряване и параметри на използваните режими на наваряване

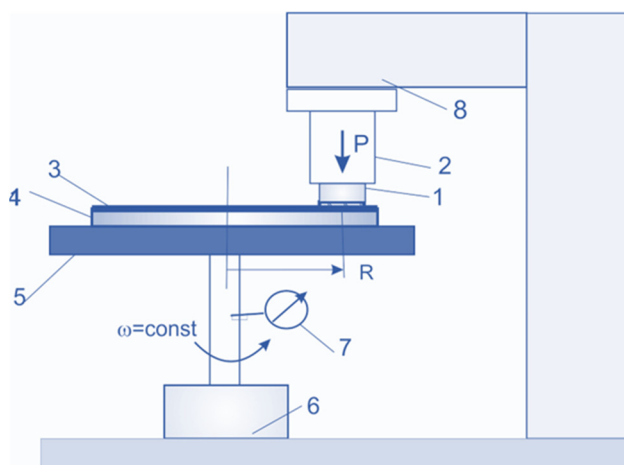
Марка	Химичен състав					D на електрода, mm	I, A (1 слой)	I, A (2 слой)
	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %				
EH 550 / E Fe8/	0.5	2.4	0.4	9.0		3.2	140	170
OK Weartrode 60T / E ZFe14/	4.8	0.7	1.0	34.3		3.2	115	160
Марка	Химичен състав					D на електрода, mm	I, A (1 слой)	I, A (2 слой)
	C, %	Mo, %	Nb, %	Cr, %	W, %			
Abradur 66 /E Fe 16/	6.0	6.0	6.0	22.0	2.0	3.2	100	120
Abradur 64 E Fe 15/	6.0	-	7.5	26.0	-	3.2	110	140

Таблица 2. Химичен състав на стомана 40X

Марка	Химичен състав					
	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	V, %
40X	0,36-0,44	0,2-0,4	0,5-0,8	0,8-1,1	-	-

2.2 Методика за изпитване на абразивно износване в режим на сухо триене

Провеждането на изследванията, осигуряващи условия на изпитване максимално близки до реалните се осъществява на лабораторен стенд (триботестер) показан на фиг. 1. Абразивното износване на образците се изследва в условия на сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици. Изследваният цилиндричен образец 1 се закрепва неподвижно в леглото на държач 2 в натоварващата глава 8, така че челната повърхнина на образца да контактува с абразивната повърхнина 3, захваната неподвижно за диск 4. Дискът 4 се задвижва от електродвигател 6 и се върти вертикално около оста си с ъглова скорост $\omega = \text{const}$. Образца се притиска с натоварваща сила P , осигурявана с тежести с помощта на лостова система в центъра на контактната площадка. С оборотомера 7, чрез броя обороти (цикли), се задава пътят на триене [6].



Фигура 1. Триботестер за изследване на износването при сухо триене

Скоростта на плъзгане може да се регулира чрез изменение на ъгловата скорост на диска от управляващ блок, както и чрез променяне на разстоянието между оста на въртене на диска 4 и оста на образца 1. Абразивната повърхнина 3 на диск 4 се състои от импрегниран корунд (P) с твърдост 9.0 по скалата на Моос.

Основният показател на трибологичното изследване се състои в измерване на износването на масата (Δm) на всеки образец за определен път на триене L (брой цикли на триене) и изчисляване на интензивността на износване V по формула (1)-

$$V = \frac{\Delta m}{L} \quad [\text{g/m}] \quad (1)$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad [\text{g}], \quad (2)$$

където: m_1 – маса на образеца в началото на изпитването, g; m_2 – маса на образеца в края на изпитването, g;

$$L = \pi D \omega t [m], \quad (3)$$

където: D – диаметър на диска, mm; ω – брой обороти на фрикционния диск за минута; t – общо време за изпитване, min. Износоустойчивостта E е реципрочна стойност на интензивността на износване V (4):

$$E = \frac{1}{V} \quad (4)$$

Всички изпитвания са проведени при еднакви условия на абразивно износване, параметрите на които са дадени в табл. 3.

Таблица 3. Параметри на изпитване при абразивно износване

Нормално натоварване	$P = 10,8 \text{ [N]}$
Номинална контактна площ	$A_a = 225 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$
Номинално контактено налягане	$P_a = 4,8 \text{ [N/cm}^2\text{]}$
Средна скорост на плъзгане	$V = 0,155 \text{ [m/s]}$
Абразивна повърхнина	Корунд Р 120
Път на триене	465 m

2.3 Фактори, влияещи на абразивното износване

2.3.1 Въглероден еквивалент

Условен фактор, който отчита степента на влияние на съдържанието на въглерод и основни легиращи елементи, върху характеристиките на шева, е Въглеродният еквивалент. Той е определен по следната формула (5) [7, 8]:

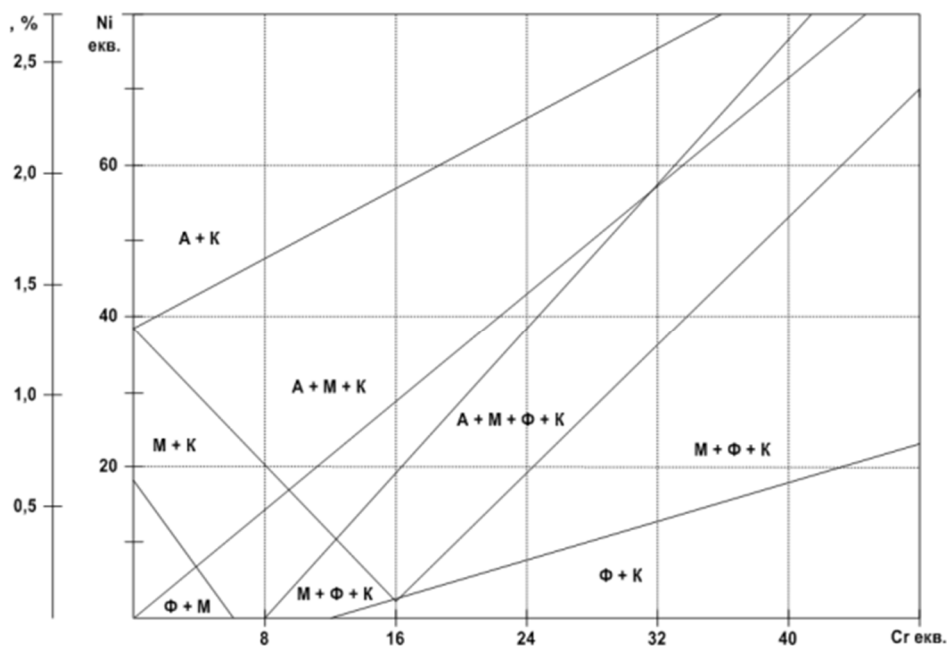
$$C_{eq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (5)$$

2.3.2 Хромов еквивалент

Най-добра устойчивост на абразивно износване се наблюдава при материали богати на карбиди, като определящ химичен елемент е хрома. Връзката между структурата и химическият състав, определен на базата на хромовия еквивалент се изразява чрез диаграмата на Елагина и Попов (фиг. 2). Диаграмата отчита влиянието на най-често използваните карбидообразуващи елементи (V, W, и Ti) в материалите на електродите за наваряване [7].

Хромовият еквивалент се изчислява по следната формула (6) [7, 8]:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 0.75\%W + 5\%V + 1.75\%Nb + 1.5\%Si \quad (6)$$



Фигура 2. Диаграма на Елагина и Попов (А-аустенит, Ф-ферит, М-мартензит, К-карбиди)

2.4. Визуализиране на едновременното влияние на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху износената маса в режим сухо триене

Използвана е софтуерна програма на програмен език Delphi, адаптирана за конкретните условия, която интерполира и визуализира:

- износената маса в зависимост от въглеродния еквивалент и твърдостта на материала.
- износената маса в зависимост от хромовия еквивалент и твърдостта на материала.

Като входящи данни са използвани следните параметри:

- динамиката на износване;
- средната стойност на отчетената твърдост по дълбочина на наварения слой;
- изчисления въглероден еквивалент в различните материали;
- изчисления хромов еквивалент в различните материали;

3. Резултати и анализи

3.1 Резултати и анализи след проведеното абразивно износване в режим на сухо

След проведените изпитвания и изчисления, описани по методиките в т. 2, са обобщени всички получени резултати, като са определени техните средни стойности, които са дадени в табл. 4. От получените резултати се вижда, че при конкретните условия на износване – сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици, най-висока износоустойчивост се получава при образец 4, при който основния материал е наварен с електрод „Abradur 66“, който е комплексно легиран, с висока твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидни включения. При този образец е измерена и многократно по-висока твърдост от тази на еталонния образец 1 (стомана 40Х). С по-ниска стойност на износоустойчивост и съответно измерена твърдост е образец 3 (наварен с електрод „Abradur 64“), което показва, че с повишаване

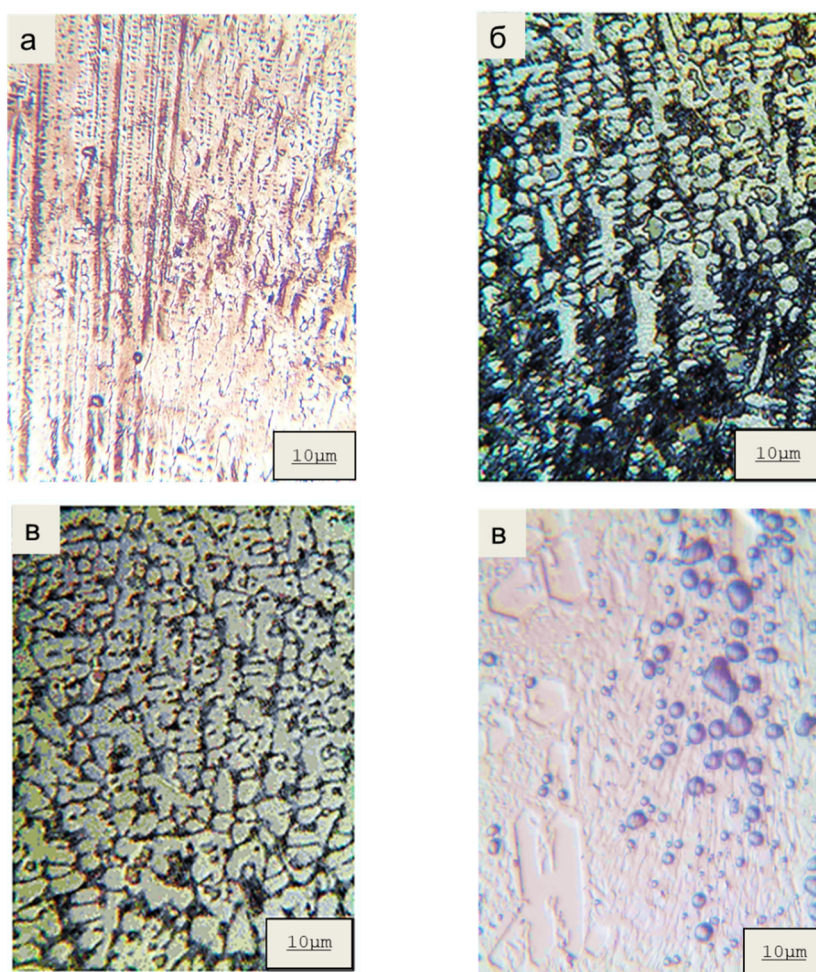
на твърдостта на наварения слой, се повишава износоустойчивостта. Това твърдение се оказва не особено достоверно, т.к. при достигане на стойности на твърдост над 700HV (образец 5, наварен с електрод „Ok Weartrode 60T“), се наблюдава повишаване на износената маса, съответно намаляване на износоустойчивостта. Този факт най-вероятно се дължи на отронване на частици от повърхността на материала (поради високата твърдост, водеща до крехкост), които попадат между абразивния диск и образеца, при което процеса от абразивното износване на две тела преминава в абразивно износване на три тела. При абразивно износване с три тела, степента на износване се увеличава с увеличаване на диаметъра на абразивните частици, което води до намаляване на износоустойчивостта.

Таблица 3. Параметри на износване при режим на сухо триене

Образец №	Вид (материал)	Твърдост HV	Въглероден еквивалент C eq	Хромов еквивалент Cr eq	Износена маса Δm , g	Износоустойчивост E
1	Еталонен образец-стомана 40X	345	0.8	1.5	0.5	995
2	Образец наварен с EN 550	475	2.37	12.6	0.0705	6 667
3	Образец наварен с Abradur 64	526	11.2	39	0.0087	53 476
4	Образец наварен с Abradur 66	695	11.6	40	0.0037	125 628
5	Образец наварен с Ok Weartrode 60T	725	11.83	36.4	0.0385	12 150

3.2 Резултати и анализи от проведения микроструктурен анализ

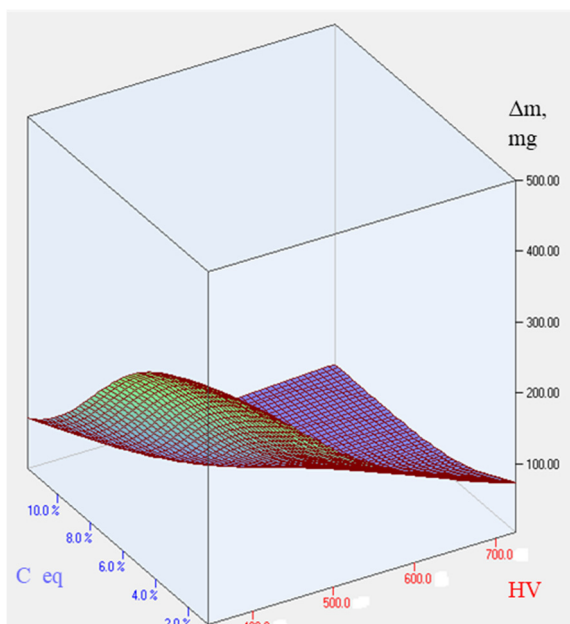
Проведеният микроструктурен анализ допълнително визуализира получените резултати. На фиг. 3 са дадени микроструктури на наварените образци в зоната на наварения слой. При образец 2, наварен с електрод EN 550 (Фиг 3, а) се наблюдават дендритни кристали с образуван мартензит по техните граници, както и неравномерно разпределение на въглерода и хрома в тях, което води и до по-ниските стойности на измераната твърдост, съответно и занижената износоустойчивост. При останалите образци микроструктурата на наварените слоеве е изградена от силно изразена дендритна структура с аустенитно-мартензитна матрица и първични хромови карбиди, формирани в процеса на кристализация. Според химичния състав, определен от високото съдържание на въглерод и хром, може да се предположи, че хромовите карбиди са от типа $(Cr,Fe)_7C_3$ [9]. Те са определящи за високата твърдост и по добрата износоустойчивост на образците. При образец 4, наварен с Abradur 66 (фиг 3, в), се наблюдава равномерно разпределение на фини дисперсни карбиди в аустенитно-мартензитната матрица, което обяснява и резултатите за получена най-висока износоустойчивост.



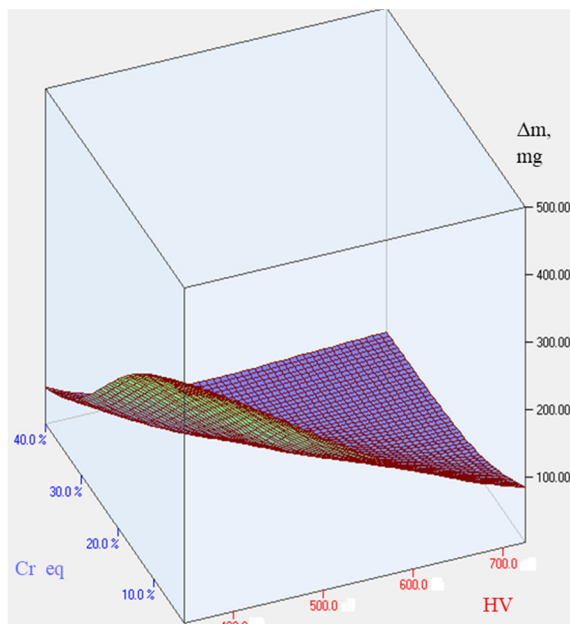
Фигура 3. Микроструктура на наварените слоеве: а- образец 2, наварен с EN 550 x250; б- образец 3, наварен с Abradur 64 x400; в- образец 4, наварен с Abradur 66 x400; г- образец 5, наварен с Ok Weartrode 60T x500

3.3 Резултати от визуализирането на едновременното влияние на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху износената маса в режим сухо триене

След генериране на отделните файлове с въведените входящи данни, на база проведените изследвания, са получени пространствени графичните зависимости между отделните параметри в режим на сухо триене, показани на фиг. 4 и фиг. 5. От представената графична зависимост на фиг. 4 може да се определи степента на влияние на твърдостта (HV) и въглеродния еквивалент (C eq) върху износената маса (Δm), определяща износоустойчивостта на материалите. А от графичната зависимост на фиг. 5 може да се определи степента на влияние на твърдостта (HV) и хромовия еквивалент (Cr eq) върху износената маса (Δm), определяща износоустойчивостта на материалите.



Фигура 4. Зависимост между HV, C eq и износена маса



Фигура 5. Зависимост между HV, Cr eq и износена маса

3. Изводи

След проведените изследвания се установи, че наваряването с абразивно износоустойчиви електроди значително повишава износоустойчивостта в режим на сухо триене. Най-висока износоустойчивост се получава при наваряване на основния материал с електрод „Abradur 66“, който е комплексно легиран, с висока твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидни включвания, а най-ниска износоустойчивост се наблюдава при наваряване с електрод „EH 550“, което се дължи на по-ниското хромово и въглеродно съдържание. Също така се установи, че не винаги високата твърдост води до висока износоустойчивост. Материалите с висока твърдост са крехки и създават предпоставка за изронване на частици, които водят до преминаване в режим на абразивно износване на три тела, и съответно до намаляване на износоустойчивостта.

От интерполираните пространствени графичните зависимости, между отделните параметри в режим на сухо триене, може да се направи извод, че износената маса спада значително при стойност на хромовия еквивалент над 10% и твърдост над 500 HV, както и при стойност на въглеродния еквивалент над 4% и твърдост над 450 HV.

Литература

1. Mahadeshwara, Manoj Rajankunte. Abrasive Wear. <https://www.tribonet.org/wiki/abrasive-wear/?amp=1>
2. Кандева-Иванова М., Цикъл лекции по инженерна трибология, ПРОЕКТ BG051PO001-3.3.06-0046 „Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени в областта на виртуалното инженерство и индустриалните технологии“.
3. Kanjilal P., T.K. Pal, S.K. Majumdar. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal. Journal of Materials Processing Technology, Volume 171, Issue 2, 20 January 2006, Pages 223-231.
4. Горкунов. Д.Н., Триботехника, Москва „Машиностроене“, 1989.

5. Buchely, M. F., et al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *wear*, 2005, 259.1-6: pp 52-61.
6. Yankova R., Spasova, D., Petrov P., „Abrasion of welded layers in dry friction“, „Научни известия“, Година XXV/ Брой 1 (216), J 2017, с. 258-261.
7. Тончев Н., Лазарова Р., Кандева М., Христов Н., „Металографски и механични изследвания на наварени слоеве със специфични свойства“, *Journal of Fundamental Sciences and Applications*, Vol. 15, 2009, с. 92 – 99.
8. Tonchev, N., Kandeва, M., & Hristov, N. Методика за определяне параметрите на качеството на композитни покрития при наваряване на ротационни повърхнини. *Scientific Proceedings VIII International Congress “Machines, Technologies, Materials” 2011, Volume 1, p.p. 141-144.*
9. Konyaeva, M. A., Medvedeva, N. I. (2009). Electronic structure, magnetic properties, and stability of the binary and ternary carbides (Fe, Cr) 3 C and (Fe, Cr) 7 C 3. *Physics of the Solid State*, 51, 2084-2089.