
TEMPERING KINETICS OF Č.1730 STEEL

Ružica ManojlovićFaculty of Technology and Metallurgy, University “Ss Cyril and Methodius”,
Skopje, Republic of Macedonia, ruzica@tmf.ukim.edu.mk**Jon Magdeski**Faculty of Technology and Metallurgy, University “Ss Cyril and Methodius”,
Skopje, Republic of Macedonia,**Blagoj Rizov**Faculty of Technology and Metallurgy, University “Ss Cyril and Methodius”,
Skopje, Republic of Macedonia,**Dafinka Stoevska-Gogovska**Faculty of Technology and Metallurgy, University “Ss Cyril and Methodius”,
Skopje, Republic of Macedonia,**Zagorka Koneska**Faculty of Technology and Metallurgy, University “Ss Cyril and Methodius”,
Skopje, Republic of Macedonia,

Abstract: In this paper, the tempering kinetics of Č.1730 steel was analyzed. The steel grade Č.1730 belongs in the group of steels for quenching and tempering. The chemical composition places it in the category of non-alloyed carbon steels, with carbon content from 0,56 to 0,65 %. The desirable properties of this steel, such as wear resistance, good machinability, high surface hardness and core toughness, are a result, to a great extent, of its subsequent heat treatment. The heat treatment of the Č.1730 steel can be performed with different procedures. Due to the tempering, the internal residual stresses are eliminated, entirely or to a high degree, and the brittleness of the quenched steel is reduced. Another significant advantage of the tempering is the obtaining of the required microstructure and mechanical properties of the steel. The experimental procedure of quenching and tempering of the steel included the following steps: annealing, quenching and tempering. The analysis was done in laboratory conditions. The samples, 36 in total, with identical dimensions, diameter of 20 mm and height of 20 mm, were produced by cutting a spheroidized steel rod. Firstly, austenization was performed, by annealing the samples on a temperature of 840 °C, in duration of 30 minutes. This was followed by quenching, by submerging the samples for 1 minute in oil on a temperature of 18 °C. After the quenching, hardness of the samples of 61,33 HRC was measured. Finally, the tempering of the samples was done, on different temperatures and time intervals. Seven different temperatures, ranging from 100 to 700 °C were applied, and the duration of the tempering varied from 5 to 60 minutes. The samples were left to cool in air, and after the cooling, their hardness was measured again. The results showed good hardenability of the steel samples. Depending on the tempering temperature and duration, various hardness values were attained. With the increase of the temperature and time duration, lower values are achieved. The highest hardness value (61,33 HRC) was obtained on the lowest temperature (100 °C) and shortest time (5 min.), whereas the lowest value (31,67 HRC) was obtained on the highest temperature (700 °C) and longest time (60 min.). The dependences of the hardness on the tempering temperature and duration were mathematically processed, utilizing the Mathcad software. The obtained results are shown graphically, in the shape of exponential dependences, $HRC = k_0 \cdot \exp(k_1 \tau^n)$, where HRC and τ are hardness and time duration, and k_0 , k_1 and n – kinetic parameters determined by mathematical means. The correlation coefficients of these dependences are satisfactory, in the range from 0,839 to 0,993. The attained knowledge can be applied for producing a specific microstructure and final hardness of steel products, by selecting the values of the tempering parameters in advance.

Keywords: Č.1730 steel, tempering, kinetics, hardness, modeling

KINETIKA OTPUŠTANJA ČELIKA Č.1730**Ružica Manojlović**Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet “Sv. Kiril i Metodij”,
Skopje, Republika Makedonija, ruzica@tmf.ukim.edu.mk**Jon Magdeski**

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet “Sv. Kiril i Metodij”,

Skopje, Republika Makedonija,

Blagoj Rizov

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet “Sv. Kiril i Metodij”,

Skopje, Republika Makedonija,

Dafinka Stoevska-Gogovska

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet “Sv. Kiril i Metodij”,

Skopje, Republika Makedonija,

Zagorka Koneska

Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet “Sv. Kiril i Metodij”,

Skopje, Republika Makedonija,

Abstract: U ovom radu je praćena kinetika otpuštanja čelika Č.1730. Čelik sa oznakom Č.1730 spada u konstrukcijske čelike za poboljšanje. Po hemijskom sastavu spada u nelegirane ugljenične čelike, sa sadržajem ugljenika od 0,56 do 0,65 %. Dobre osobine ovog čelika, kao što su otpornost na habanje, dobra obradljivost, velika tvrdoća površinskog sloja i žilavost unutrašnjeg jezgra, dobrim delom su rezultat njegove naknadne termičke obrade. Termička obrada čelika Č.1730 se može izvesti različitim postupcima. Ovde je primenjen postupak poboljšanja. Zahvaljujući otpuštanju, unutrašnji naponi se otklanjaju u potpunosti ili većim delom, a krtost kaljenog čelika se smanjuje. Velika prednost otpuštanja je takođe i postizanje željene mikrostrukture i mehaničkih osobina čelika. Eksperimentalni postupak poboljšanja čelika obuhvata sledeće faze: žarenje, kaljenje i otpuštanje. Ispitivanja su izvedena u laboratorijskim uslovima. Uzorci, ukupno 36, istih dimenzija, prečnika 20 mm i visine od 20 mm, dobiveni su presecanjem meko žarene čelične šipke. Najpre je izvedena austenitizacija, žarenjem uzoraka, na temperaturi od 840 °C, za vreme od 30 minuta. Nakon toga, izvršeno je kaljenje, potapanjem uzoraka 1 minut u ulje na temperaturi od 18 °C. Nakon kaljenja je izmerena tvrdoća uzoraka od 61 HRC. Na kraju je izvedeno otpuštanje uzoraka, pri različitim temperaturama i vremenu. Bilo je primenjeno sedam različitih temperatura, od 100 do 700 °C, a vreme držanja uzoraka je varirano od 5 do 60 minuta. Uzorci su ostavljeni da se hlade na vazduhu, a posle toga im je ponovo izmerena tvrdoća. Rezultati su pokazali dobru prokaljivost čelika. U zavisnosti od temperature i vremena, postignute su različite vrednosti tvrdoće. Sa porastom temperature i vremena, postižu se niže vrednosti tvrdoće. Najviša vrednost tvrdoće (od 61,33 HRC) postignuta je pri najnižoj temperaturi (od 100 °C) i za najkraće vreme (od 5 min.), dok je najniža vrednost (od 31,67 HRC) dobivena pri najvišoj temperaturi (od 700 °C) i za najduže vreme (od 60 min.). Zavisnosti tvrdoće od temperature otpuštanja i vremena otpuštanja su matematički obrađene, primenom kompjuterske alatke Mathcad. Dobiveni rezultati su prikazani grafički, u obliku eksponencijalnih zavisnosti, $HRC = k_0 \exp(k_1 \tau^n)$, gde su HRC i τ tvrdoća i vreme, a k_0 , k_1 i n - kinetički parametri određeni matematičkim putem. Koeficijenti korelacije ovih zavisnosti su zadovoljavajući i kreću se od 0,839 do 0,993. Dobivena saznanja se mogu iskoristiti za postizanje željenih mikrostrukture i konačnih tvrdoća čeličnih proizvoda, unapred birajući vrednosti parametara otpuštanja.

Keywords: čelik C1730, otpuštanje, kinetika, tvrdoća, modeliranje

1. UVOD

Čelik Č.1730 spada u konstrukcijske čelike za poboljšanje [1, 2]. Mehaničke osobine ovog čelika, nakon dobijanja, poboljšavaju se različitim postupcima termičke obrade [3]. Ovde je izvedeno poboljšanje, sa ciljem da se dobiju željena mikrostruktura i odgovarajuće mehaničke osobine čeličnih uzoraka. Nakon kaljenja i otpuštanja, čelik Č.1730 se stiče mnogim dobrim osobinama, kao što su otpornost na habanje, dobra obradljivost, velika tvrdoća površinskog sloja i dobra žilavost unutrašnjeg dela. Zahvaljujući tome, ovaj se čelik koristi za različite namene, a najčešće kao alatni čelik [4]. Od njega se izrađuju različiti ručni alati, poljoprivredni alati, držači alata, delovi za vozila i bicikle, klipnjače, radilice i dr.

2. PODACI O MATERIJALU

Čelik sa oznakom Č.1730 po JUS standardu spada u nelegirane ugljenične čelike, sa sadržajem ugljenika od 0,56 do 0,65 % [5]. Ovaj čelik odgovara čeliku C60, po DIN standardu i čeliku 1C60 po EN standardu (EN 10083-2) [6, 7]. Hemijski sastav i mehaničke osobine čelika Č.1730 prikazani su u tabelama 1 i 2 [5, 6].

Tabela 1. Hemijski sastav čelika Č.1730, %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,56 - 0,65	0,15 - 0,35	0,50 - 0,90	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,4	max. 0,4

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika

Granica razvlačenja, R_{eH} , MPa	Zatezna čvrstoća, R_m MPa	Izduženje, A, %	Tvrdoća, HB	Jungov modul, Pa
350	570 - 595	14	260 - 270	210000

3. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Od meko žarene šipke čelika Č.1730 presečena su 36 jednaka primerka, sa prečnikom i visinom od po 20 mm. Ivice uzoraka su poravnane brušenjem, a uzorci označeni. Svi uzorci su zagrevani na temperaturi od 840 °C za vreme od 30 minuta, a zatim kaljeni jednogminutnim potapanjem u ulje [8]. Nakon kaljenja je izmerena tvrdoća uzoraka od 61,33 HRC, dobivena kao aritmetička srednja vrednost od tri merenja. Ovaj uzorak nije podvrgnut otpuštanju, radi upoređenja vrednosti tvrdoće i izgleda mikrostrukture. Postupak poboljšanja je izveden zagrevanjem po 5 uzoraka na 7 različitih temperatura, i to, na 100, 200, 300, 400, 500, 600 i 700 °C. Vreme otpuštanja uzoraka je variralo od 5 do 60 minuta. Nakon toga, svim uzorcima je izmerena tvrdoća.

4. REZULTATI

Za merenje tvrdoće korišćena je dijamantska kupa sa uglom od 120 ° pri vrhu, sa opterećenjem od 1500 kN i predopterećenjem od 100 kN [9]. Dobivene vrednosti tvrdoće uzoraka prikazane su u tabeli 3.

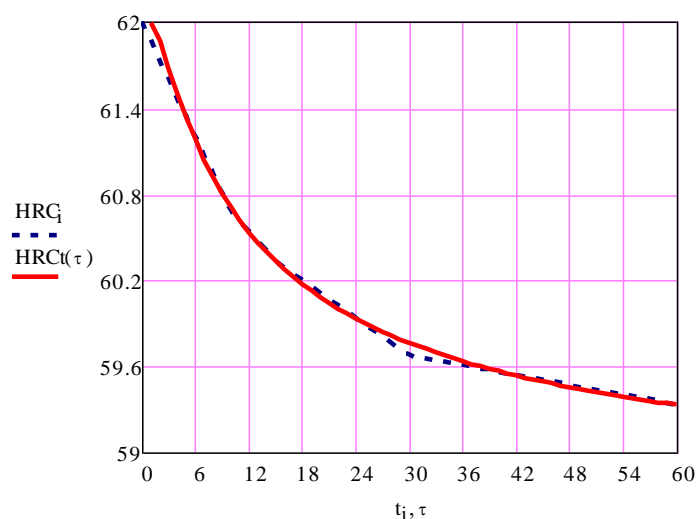
Tabela 3. Vrednosti tvrdoće uzoraka nakon različitih uslova otpuštanja

Vreme, min	Tvrdoća uzoraka, HRC						
	Temperatura, °C						
	100	200	300	400	500	600	700
5	61,33	58,67	56,67	52,83	50,50	42,00	36,50
10	60,67	58,33	55,13	52,67	49,67	40,33	35,00
15	60,33	57,67	54,67	52,33	48,50	39,33	33,33
30	59,67	57,33	54,00	51,50	46,83	38,16	32,33
60	59,33	56,67	53,50	51,33	44,67	37,50	31,67

Kako se vidi iz table 3, tvrdoća uzoraka opada sa porastom temperature i sa povećanjem vremena otpuštanja. Najniže vrednosti su dobivene pri temperaturi od 700 °C i za vreme od 0 minuta.

5. MATEMATIČKO MODELIRNJE EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Realne zavisnosti tvrdoće od temperature otpuštanja i vremena otpuštanja su matematički obrađene i predstavljene eksponencijalnim zavisnostima, koje najbolje opisuju realne, tipa $HRC = k_0 \exp(k_1 \tau^n)$, gde su HRC i τ tvrdoća i vreme, a k_0 , k_1 i n - kinetički parametri određeni matematičkim putem. Pri tome je korišćena kompjuterska alatka Mathcad. Na sl.1. je prikazana promena tvrdoće čelika posle otpuštanja na temperaturi od 100 °C. Isprekidana linija predstavlja realno izmerene vrednosti, a puna linija – matematički modelovane vrednosti tvrdoće.



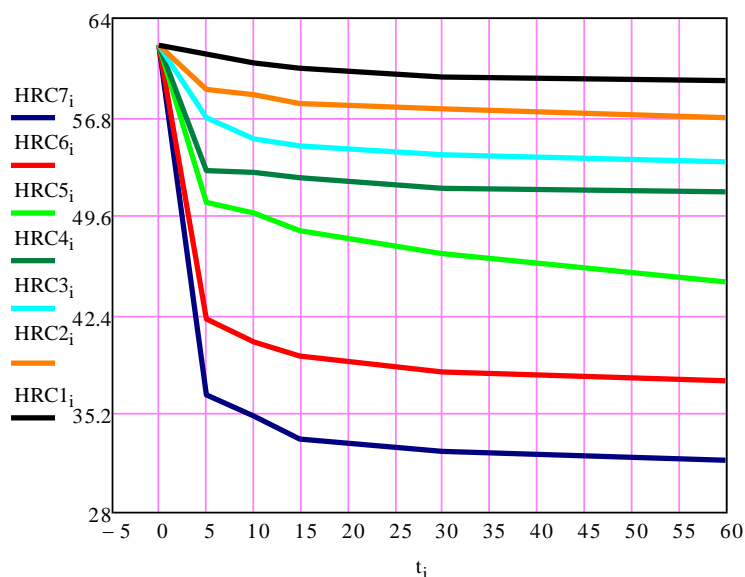
Sl.1. Promena tvrdoće čelika posle otpuštanja na temperaturi od 100 °C u zavisnosti od vremena; isprekidana linija – realne vrednosti, puna linija – matematički modelovane vrednosti tvrdoće

Dobivena je sledeća matematička zavisnost promene tvrdoće čelika posle otpuštanja na temperaturi od 100 °C u zavisnosti od vremena:

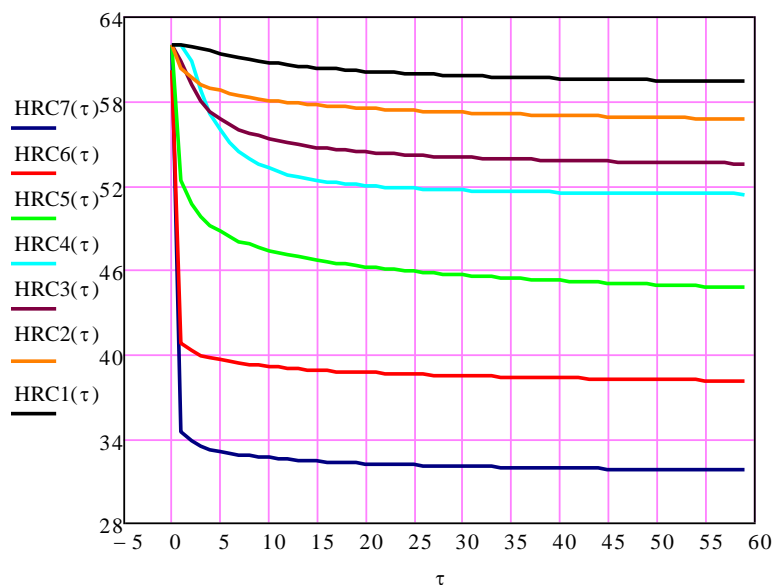
$$HRC(100) = k_0 \cdot \exp(k_1 \tau^n),$$

gde su $HRC(100) = 62$, $k_0 = -3.479$, $k_1 = -5.384$, $n = -0.736$. Koeficijent korelacije ove zavisnosti je 0,982.

Na ovakav način su određene vrednosti kinetičkih parametara i ostale matematičke zavisnosti tvrdoće posle otpuštanja na temperaturama od 200 do 700 °C. One su date u tabeli 4. Koeficijenti korelacije ovih zavisnosti se kreću od 0,839 do 0,993. Na sl.2 su prikazane zavisnosti tvrdoće od vremena otpuštanja sa realnim, izmerenim vrednostima, a na sl.3 sa matematički modelovanim vrednostima.



Sl.2. Promena tvrdoće čelika posle otpuštanja na temperaturi od 100 °C do 700 °C u zavisnosti od vremena (realne vrednosti)



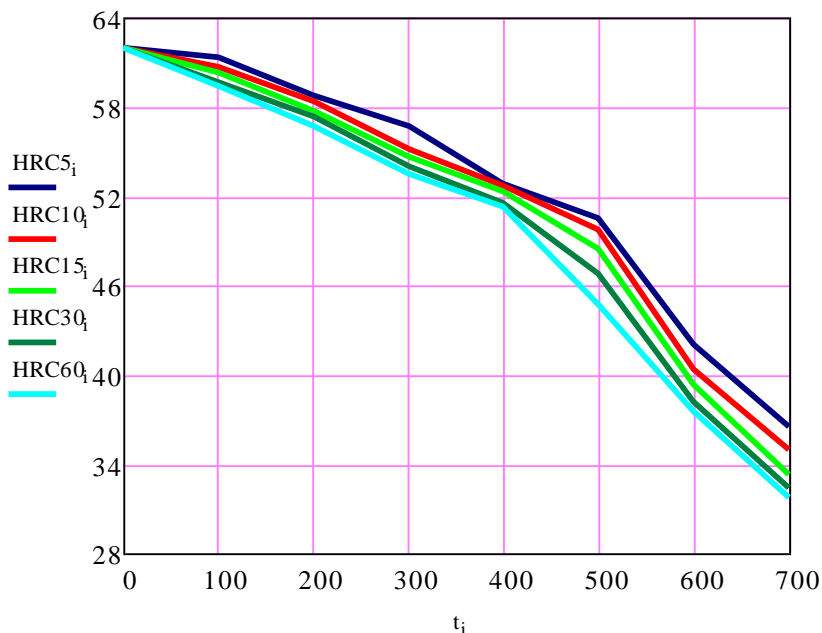
Sl.3. Promena tvrdoće čelika posle otpuštanja na temperaturi od 100 °C do 700 °C u zavisnosti od vremena (modelovane vrednosti)

Tabela 4. Vrednosti kinetičkih parametara i koeficijent korelacije

Temperatura, °C	k_0	k_1	n	Koeficijent korelacije
100	53,700	2,257	-0,065	0,982
200	53,150	0,131	-0,174	0,893
300	52,642	0,196	-0,604	0,993

400	53,812	-0,010	-0,378	0,913
500	54,576	-0,042	-0,381	0,977
600	36,213	0,378	-0,582	0,968
700	30,609	0,509	-0,661	0,951

Promena realnih vrednosti tvrdoće uzoraka u zavisnosti od temperature otpuštanja prikazana je na sl.4.



Sl.4. Promena tvrdoće čelika u zavisnosti od temperature otpuštanja

6. DISKUSIJA DOBIVENIH REZULTATA

Postupak kaljenja sa zagrevanjem na temperaturi od 840 °C, za vreme od 30 minuta i potapanjem u ulje 1 minut se pokazao uspešnim, jer je uzorcima izmerena prosečna tvrdoća od 61,33 HRC. Proces otpuštanja je izveden variranjem vremena i temperature. Analiza dobivenih rezultata nakon procesa poboljšanja čeličnih uzoraka pokazuje opadanje vrednosti tvrdoće. Posle otpuštanja uzoraka na temperaturi od 100 °C tvrdoća uzoraka je opala za 2 HRC jedinica (sa 61,33 HRC na 59,33 HRC), što predstavlja razliku od 3,26 %. Početak procesa otpuštanja se odlikuje difuzijom ugljenika i vakancija i obrazovanjem neravnotežnih karbidnih faza [10]. Do 200 °C, posle 5 minuta otpuštanja, zapaža se blago opadanje vrednosti tvrdoće, a i dalje, do 60 minuta promene su sasvim male. Na temperaturama višim od 200 °C počinje drugi stadijum transformacije otpuštanja, a posle 400 °C počinje delimična anihilacija dislokacija u procesu martenzitne transformacije [11]. Značajniji pad vrednosti tvrdoće se javlja od 500 °C, karakterističan za proces transformacije zaostaloga austenita, a posle temperature od 600 °C završavaju procesi transformacije otpuštanja martenzitne strukture [12]. Konačno, tokom celog procesa otpuštanja, ukupni pad vrednosti tvrdoće, na temperaturi od 700 °C i posle 60 minuta, iznosi 27,66 HRC jedinica (opadajući sa 59,33 HRC na 31,67 HRC), odnosno za 46,62 %. Dobivene matematičke zavisnosti promene tvrdoće čelika posle otpuštanja u zavisnosti od vremena i od temperature otpuštanja dobro opisuju realne zavisnosti. Izabrane su eksponencijalne zavisnosti, tipa $HRC = k_0 \cdot \exp(k_1 \tau^n)$, a dobiveni koeficijenti korelacije se kreću od 0,839 do 0,993.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja i analize dobivenih rezultata, može se zaključiti sledeće: Kaljenje uzoraka čelika Č.1730 je uspešno izvedeno, žarenjem istih na temperaturi od 840 °C za vreme od 30 minuta i njihovim jednominutnim potapanjem u ulje sobne temperature, pri čemu je postignuta prosečna tvrdoća uzoraka od 61,33 HRC.

Praćena je promena tvrdoća uzoraka nakon procesa otpuštanja pri različitim temperaturama i vremenu otpuštanja. Proces se karakteriše opadanjem vrednosti tvrdoće sa povećanjem vremena i temperature otpuštanja. Najviša vrednost tvrdoće od 61,33 HRC se dobija pri najnižoj temperaturi od 100 °C i za vreme od 5 min, a najniža vrednost tvrdoće od 31,67 HRC je dobivena pri temperaturi od 700 °C i za vreme od 60 minuta. Ukupna promena tvrdoće uzoraka otpuštanja je 27,66 HRC jedinica, ili 46,62 %.

Za definisanje kinetike procesa otpuštanja odabrana je eksponencijalna zavisnost $HRC = k_0 \cdot \exp(k_1 \tau^n)$, koja se pokazala odgovarajućom, a dobiveni koeficijenti korelacije ovih zavisnosti su zadovoljavajući i kreću se od 0,839 do 0,993.

Dobivena saznanja se mogu iskoristiti za postizanje željenih mikrostruktura i mehaničkih osobina čeličnih proizvoda, biranjem unapred vrednosti parametara otpuštanja.

LITERATURA

- [1] <https://www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/section1.htm>
- [2] <https://www.totalmateria.com/materials.aspx>
- [3] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala, FSB Zagreb, 2001.
- [4] Handbook of Comparative World Steel Standards, 3th Ed., J.E. Bringas, editor, 2004, USA
- [5] file:///C:/Documents%20and%20Settings/PC/My%20Documents/20160401103105-0601_C60.pdf
- [6] http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/c60een82.pdf
- [7] <http://metalopromet.rs/uporedni-standardi-celika/>
- [8] H.E. Boyer, Practical Heat Treating, 1st ed., Chapter 1, American Society for Metals, 1984.
- [9] K. Herrmann, Hardness Testing: Principles and Applications, Materials Park, ASM International, 2011.
- [10] G. Krauss, Steels: Processing, Structure, and Performance. Materials Park, OH: ASM International, 2005.
- [11] H.K.D.H. Bhadeshia, Martensite and Bainite in Steels: Transformation Mechanism & Mechanical Properties, J. Phys. IV France 7, (1997), 367-376.
- [12] V.K. Murugan, Dr.P.Koshy Mathews, Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 4, (2013), 945-950.