

**Paweł HERMANOWICZ, Jerzy SMOLIK**  
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **MOŻLIWOŚĆ KSZTAŁTOWANIA TWARDOŚCI STALI EN41Cr4 Z WYKORZYSTANIEM POLIMEROWYCH ŚRODKÓW CHŁODZĄCYCH**

### **Słowa kluczowe**

Polimery hartownicze, utwardzanie cieplne.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu stężenia i rodzaju polimerowych ośrodków chłodzących na strukturę oraz twardość stali EN41Cr4 po utwardzaniu cieplnym. Badania przeprowadzono dla wodnych roztworów polimeru Polihartenol-HI w zakresie stężeń 15÷60%. W ramach zrealizowanych prac przeanalizowano możliwości kształtowania twardości stali EN41Cr4 poprzez dobór stężenia polimeru Polihartenol-HI w wodnym roztworze hartowniczym. Na podstawie analizy zmian twardości stali EN41Cr4, w wyniku stosowania wodnych roztworów hartowniczych o różnych stężeniach polimeru Polihartenol-HI, zaproponowano i zweryfikowano eksperymentalnie formułę matematyczną umożliwiającą dobór stężenia badanego polimeru w roztworze wodnym, zapewniającego uzyskanie wymaganej twardości stali EN41Cr4 w wyniku utwardzania cieplnego.

### **Wprowadzenie**

Obserwowane w ostatnich latach wzrastające zainteresowanie kąpielami polimerowymi wynika z wielu korzyści, jakie niesie stosowanie tych mediów,

jako ośrodków chłodzących podczas hartowania stali. Zastosowanie polimerowych kąpiei hartowniczych oprócz korzyści ekonomicznych pozwala uzyskać także korzyści ekologiczne i techniczne [1, 2]. Korzyści ekonomiczne to niższe ceny kąpiei polimerowych w stosunku do olejów hartowniczych, mniejsze nakłady na remont urządzeń chłodniczych i odciągowych, wyeliminowanie kosztów utrzymania systemów ppoż. w wannach hartowniczych. Zastosowanie polimerów zapewnia wysoką trwałość kąpiei hartowniczych oraz pełną kontrolę zmian ich zdolności chłodzących, wyeliminowanie oddziaływania korozyjnego na elementy hartowane, a przede wszystkim pozwala zmniejszyć zanieczyszczenia środowiska. Korzyści techniczne to możliwość sterowania prędkościami chłodzenia przez stosowanie różnych stężeń kąpiei, co w efekcie umożliwia uzyskanie w wielu przypadkach lepszej jakości obrabianych cieplnie detali [3]. Szybkość chłodzenia poprzez wpływ na kinetykę przemian decyduje nie tylko o strukturze hartowanego elementu, ale również determinuje jego stan naprężeń wewnętrznych. Stan naprężeń wewnętrznych ma istotny wpływ na powstawanie krzywizn, deformacji i pęknięć hartowanych elementów [4]. Dlatego też ważną rolę odgrywa prawidłowy dobór ośrodka chłodzącego podczas hartowania różnych gatunków stali.

Badania zaprezentowane w artykule przedstawiają wpływ stężenia i rodzaju wodnych roztworów polimerowych ośrodków chłodzących na strukturę oraz twardość elementów wykonanych ze stali EN41Cr4 w procesie hartowania.

## 1. Metodyka badań

Badaniom poddano próbki ze stali stopowej do ulepszania cieplnego EN41Cr4 o średnicy  $\varnothing 27$  mm i grubości  $g = 12$  mm. Proces austenitizowania przeprowadzono w temperaturze  $850^{\circ}\text{C}$ , w czasie 15 min, w piecu hartowniczym PK 55/12-LAC. Atmosferę ochronną stanowił azot o przepływie 15 l/min. Jako ośrodki chłodzące wybrano roztwory wodne polimeru hartowniczego Polihartenol-HI [5, 6] w zakresie stężeń 15÷60%. Do ustalenia wybranych stężeń polimeru w kąpiei hartowniczej zastosowano dwie metody. W przypadku kąpiei o stężeniach polimeru nieprzekraczających 30% wykorzystano zależność (1) bazującą na stosunku lepkości względnej wodnego roztworu polimerowego, wyznaczonej jako stosunek czasu wypływu kąpiei  $T_k$  do czasu wypływu wody  $T_w$ , z kubka Forda [7].

$$c = -742,7n^4 + 3836,2n^3 - 7453,6n^2 + 6507n - 2146,9 \quad (1)$$

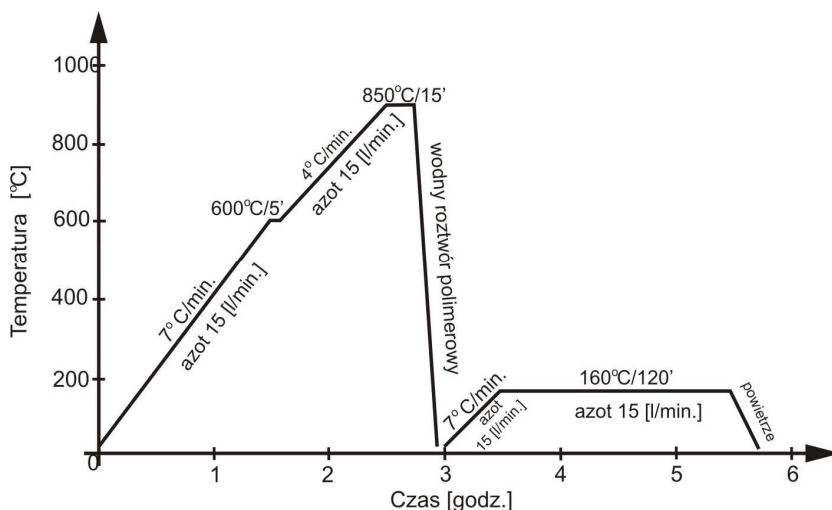
gdzie:  $c$  – stężenie kąpiei w [%],  
 $n = T_k/T_w$  lepkość względna,  
 $T_k$  – czas wypływu kąpiei [s],  
 $T_w$  – czas wypływu wody [s].

W przypadku stężeń przekraczających 30% stężenie procentowe kąpieli wyznaczono korzystając z zależności (3):

$$C_p = \frac{m_s}{m_s + m_{rozp}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:  $C_p$  – stężenie procentowe roztworu [%],  
 $m_s$  – masa polimeru [g],  
 $m_{rozp}$  – masa wody [g].

W celu możliwości porównania twardości uzyskiwanych w procesie utwardzania cieplnego z wykorzystaniem polimerowych mediów chłodzących i typowego oleju hartowniczego, próbki ze stali EN41Cr4 poddano dodatkowo hartowaniu w oleju Houghto-Quench 150. Wszystkie procesy hartowania przeprowadzono w wannie hartowniczej IZO-257 przy stałych parametrach mediów hartowniczych, tj. temperaturze  $T_H = 25^\circ\text{C}$  oraz cyrkulacji  $V_C = 250$  l/min. Po hartowaniu próbki były odpuszczane w temperaturze  $160^\circ\text{C}$ , w czasie 2 h, w piecu hartowniczym PK 55/12-LAC. Przebieg procesu utwardzania cieplnego pokazano na rys.1.



Rys. 1. Przebieg procesu utwardzania cieplnego stali EN41Cr4

Twardość próbek mierzono metodą Rockwella z wykorzystaniem twardościomierza M4R075 firmy EMCO-TEST. Dla każdej z próbek wykonano po 10 pomiarów twardości. Na podstawie uzyskanych wyników wyliczono wartość średnią oraz średnie odchylenie standardowe. Obserwacje struktury stali EN41Cr4 po procesie utwardzania cieplnego przeprowadzono na zglądach

metalograficznych trawionych nitałem 2%, z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Neophot 32.

## 2. Wyniki badań

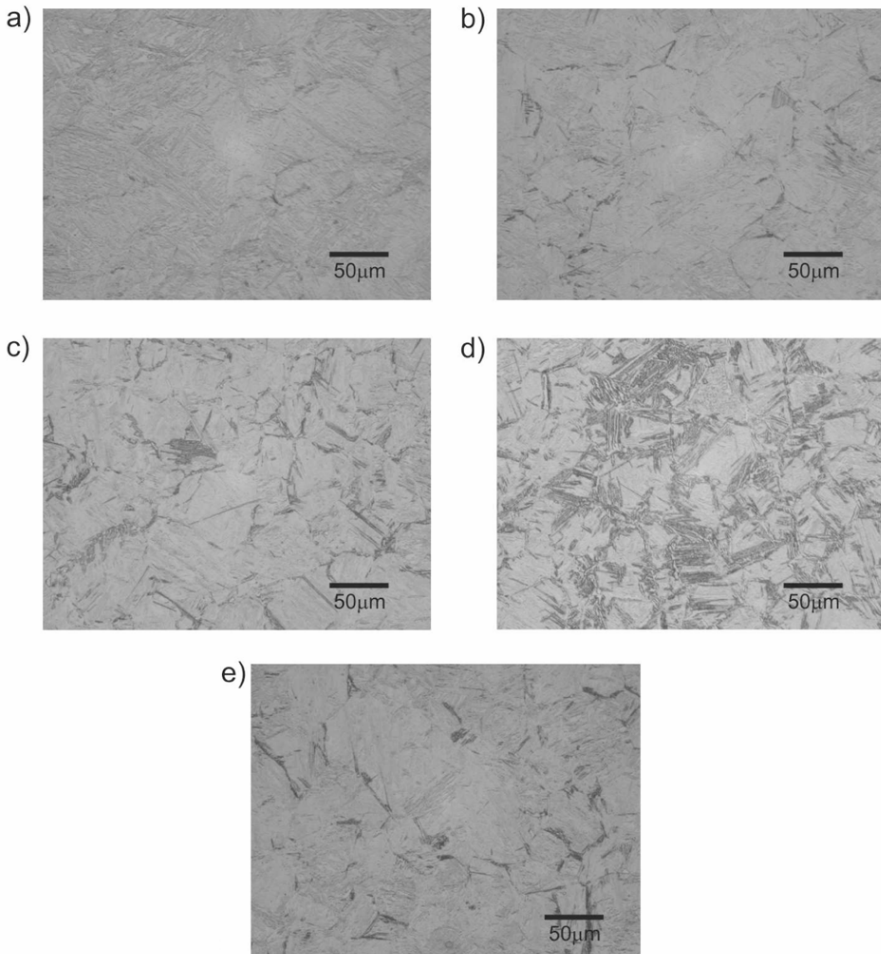
Wyniki badań twardości wykazały, że wzrost stężenia polimeru hartowniczego Polihartenol-HI w roztworze wodnym powoduje spadek twardości stali EN41Cr4, która z  $\approx 54$  HRC dla roztworu o stężeniu 15% polimeru, zmniejszyła się do  $\approx 43$  HRC dla roztworu o stężeniu 60%. Upoważnia to do stwierdzenia, że szybkość chłodzenia roztworów wodnych polimeru hartowniczego Polihartenol-HI zmniejsza się wraz ze wzrostem stężenia polimeru w medium chłodzącym (tabela 1).

Tabela 1. Wyniki pomiarów twardości stali EN41Cr4 – medium hartownicze: roztwór wodny polimeru Polihartenol-HI.

Pomiar	Stężenie polimeru Polihartenol-HI				Olej Houghto-Quench 150 HRCHQ-150
	15%	30%	45%	60%	
	HRCP-15	HRCP-30	HRCP-45	HRCP-60	
1	54,3	53,0	47,6	44,2	48,7
2	54,3	52,1	47,3	44,4	50,8
3	53,9	51,5	47,2	43,7	50,1
4	54,2	53,1	47,6	42,0	51,5
5	54,0	51,0	47,8	44,1	51,4
6	54,5	50,6	47,0	43,7	51,5
7	54,8	51,6	47,3	44,2	51,8
8	54,3	52,6	47,8	43,2	48,4
9	53,7	50,7	47,6	43,0	49,5
10	54,9	50,6	47,8	42,4	48,2
HRC <sub>sr</sub>	54,3	51,7	47,5	43,5	50,2
$\sigma$ HRC <sub>sr</sub>	0,38	0,98	0,28	0,82	1,40

Dla wszystkich próbek poddanych procesom utwardzania cieplnego wykonano badania metalograficzne, pokazane na rys. 2.

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wykazały, że w przypadku zastosowania roztworu wodnego Polihartenol-HI o stężeniu 15% polimeru, uzyskano typową strukturę odpuszczonego martenzytu z austenitem szczątkowym (rys. 2a). Zwiększanie stężenia polimeru w wodnym roztworze hartowniczym powodowało występowanie w badanej stali EN41Cr4 struktury bainitu, którego



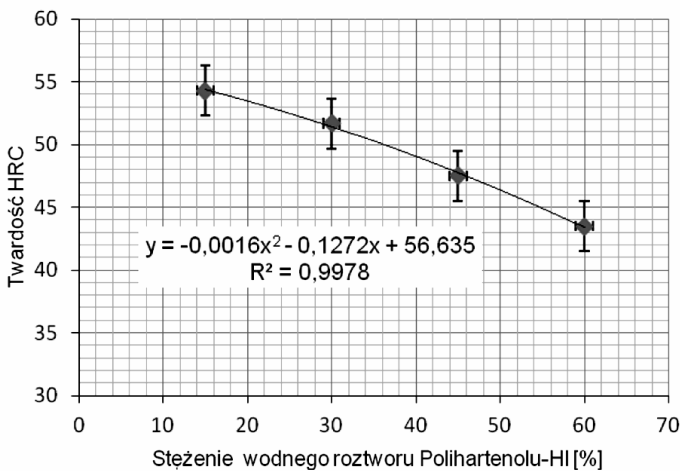
Rys. 2. Mikrostruktura stali EN41Cr4 po procesach utwardzania cieplnego zróżnicowanych ze względu na medium hartownicze: wodne roztwory polimeru hartowniczego Polihartenol-HI – (a) 15%, (b) 30%, (c) 45%, (d) 60%.

ilość wzrastała wraz ze wzrostem stężenia polimeru (rys. 2b–d). Wyniki obserwacji metalograficznych w pełni korelują z wynikami badań twardości (tabela 1), potwierdzając zmniejszanie się szybkości chłodzenia roztworów wodnych polimeru hartowniczego Polihartenol-HI wraz ze wzrostem stężenia polimeru w medium chłodzącym.

Analiza wyników pomiarów twardości (tabela 1), jak również wyników badań metalograficznych (rys. 2e) pozwalają również stwierdzić, że intensywność chłodzenia oleju hartowniczego Houghto-Quench 150 odpowiada intensywności chłodzenia roztworu wodnego o stężeniu pomiędzy 30% i 40% polimeru Polihartenol-HI.

#### 4. Dyskusja i weryfikacja wyników

Uzyskane wyniki twardości stali EN41Cr4 pokazane w tabeli 1 poddano analizie trendu zmian wielomianem 2. stopnia, w funkcji wzrostu stężenia roztworu wodnego polimeru Polihartenol-HI. Uwzględniając dokładność pomiarową twardościomierza M4R075 firmy EMCO-TEST – 1 HRC oraz maksymalną wartość odchylenia standardowego  $\sigma = 0,98$  HRC wyliczoną na podstawie wyników pomiarów twardości, przyjęto dokładność pomiaru twardości na poziomie 2 HRC. Wyniki analizy pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Trend zmian twardości stali EN41Cr4 po utwardzaniu cieplnym w funkcji wzrostu stężenia hartowniczego roztworu wodnego polimeru Polihartenol-HI

Na tej podstawie zaproponowano formułę matematyczną (3) pozwalającą przewidywać twardość stali EN41Cr4 po procesie utwardzania cieplnego, o przebiegu pokazanym na rys.1, w zależności od stężenia roztworu wodnego polimeru Polihartenol-HI wykorzystywanego jako medium hartownicze.

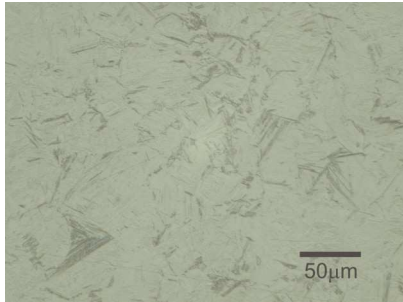
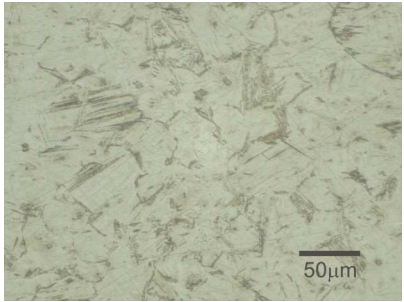
$$\text{HRC}_{\text{EN41Cr4}} = -0,0016 (C_p)^2 - 0,1272 C + 56,635 \quad (3)$$

gdzie:  $C_p$  – stężenie kąpieli w [%].

W celu zweryfikowania zaproponowanej formuły matematycznej wyznaczono z jej wykorzystaniem dwa różne stężenia wodnych roztworów polimeru hartowniczego Polihartenol-HI, tj.  $C_1 = 36\%$  oraz  $C_2 = 54\%$ , umożliwiające uzyskanie twardości stali EN41Cr4 odpowiednio: 50 HRC i 45 HRC. Następnie dla dwóch przygotowanych roztworów hartowniczych, o wyznaczonych stężeniach polimeru Polihartenol-HI, przeprowadzono procesy utwardzania cieplnego

stali EN41Cr4, zgodnie z przebiegiem pokazanym na rys. 1. Wykonane próbki poddano badaniom twardości oraz badaniom metalograficznym zgodnie z opisaną metodyką. Uzyskane wyniki badań twardości oraz obserwacji metalograficznych pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Struktura i wyniki pomiarów twardości stali EN41Cr4 po badaniach weryfikujących

Stężenie polimeru Polihartenol-HI		
	36%	54%
	Twardość planowana: 50 HRC	Twardość planowana: 45 HRC
Struktura		
Pomiar	HRCP-36	HRCP-54
1	49,6	46,7
2	48,9	46,9
3	49,8	45,7
4	48,5	46,0
5	51,1	44,9
6	49,9	45,2
7	50,3	44,5
8	50,2	45,6
9	50,9	44,9
10	48,0	46,6
<b>HRC<sub>sr</sub></b>	<b>49,7</b>	<b>45,7</b>
$\sigma$ HRC <sub>sr</sub>	1,00	0,84

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wykazały, że w przypadku zastosowania roztworu wodnego Polihartenol-HI o stężeniu 36% uzyskano strukturę odpuszczonego martenzytu i austenitu szczytkowego oraz niewielką ilość bainitu. Średnia twardość stali EN41Cr4, wyznaczona na podstawie 10 pomiarów jednostkowych, przy uwzględnieniu podwójnej wartości odchylenia standardowego

wynosiła, w tym przypadku  $49,7 \pm 1$  HRC. Stal EN41Cr4 poddana procesowi hartowania w roztworze wodnym polimeru hartowniczego Polihartenol-HI o stężeniu 54%, charakteryzowała się znacznym udziałem struktury bainitycznej. Wyznaczona średnia twardość stali EN41Cr4 wynosiła w tym przypadku  $45,7 \pm 0,84$  HRC.

Wyniki przeprowadzonych badań weryfikacyjnych potwierdziły poprawność przyjętej formuły matematycznej pozwalającej dobrać stężenie wodnych roztworów polimeru hartowniczego Polihartenol-HI w celu uzyskania oczekiwanej twardości stali EN41Cr4 w zakresie 45–55 HRC.

### Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badań dotyczą analizy wpływu składu i gęstości polimerów hartowniczych na szybkość chłodzenia elementów ze stali do ulepszenia cieplnego EN41Cr4. W tym celu zaprojektowano i przeprowadzono procesy technologiczne utwardzania cieplnego, zróżnicowane pod względem stężenia polimeru Polihartenol-HI w wodnych roztworach hartowniczych. Ocenę wpływu składu i gęstości polimerów na szybkość chłodzenia w poszczególnych procesach obróbki cieplnej przeprowadzono na podstawie wyników badań metalograficznych oraz badań twardości. Uzyskane wyniki badań pozwoliły sformułować następujące wnioski:

1. W przypadku stali stopowej EN41Cr4, na podstawie wyników badań metalograficznych oraz wyników badań twardości po procesie utwardzania cieplnego, obejmującego hartowanie w wodnych roztworach polimeru hartowniczego Polihartenol-HI, wykazano znaczne możliwości sterowania uzyskiwaną twardością w zależności od stężenia polimeru w kąpeli hartowniczej.
2. Stosowanie wodnych roztworów polimeru Polihartenol-HI, o stężeniu w przedziale 15÷30%, umożliwia uzyskanie wyższej twardości obrabianej stali EN41Cr4, tj. 52÷55 HRC, niż w przypadku stosowania oleju hartowniczego Houghto-Quench 150, dla którego uzyskiwane twardości wynosiły  $\approx 50$  HRC.
3. Wyniki przeprowadzonych badań weryfikacyjnych potwierdziły poprawność przyjętej formuły matematycznej, umożliwiającej dobór stężenia wodnych roztworów polimeru hartowniczego Polihartenol-HI, w celu uzyskania oczekiwanej twardości stali EN41Cr4 w zakresie 42–55 HRC.
4. Roztwory wodne polimeru hartowniczego Polihartenol-HI należy uznać za bardzo wygodne technologicznie media chłodzące, bowiem różnicowanie twardości stali EN41Cr4 o  $\approx 1$  HRC wymaga zmian w stężeniu polimeru w roztworze wodnym o  $\approx 4\%$ .



*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## **Bibliografia**

1. Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo, WNT, 1994, s. 214.
2. Sisson R.D., Fuller G.F., Herring D.H.: The Heat Treatment of Fasteners, Tips for Operation, Fastener Technology International, 2008, 28–29.
3. Beitz T.: Woda, sole hartownicze, wysokowydajne oleje hartownicze oraz mieszane z wodą polimerowe ośrodki chłodzące, Materiały XIII Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej, Świebodzin, 2010, 122–123.
4. Han S.W., Kang S.H., Totten G.E. and Webster G.M.: Applications of Polymer Quenchants for High Hardenability, Crack-Sensitive Steels, in 17<sup>th</sup> Heat Treating Society Conference Proceedings Including the 1<sup>st</sup> International Induction Heat Treating Symposium, International Materials Park OH, 1997, 373–379.
5. Materiały informacyjne firmy PRO-IMP.
6. Materiały informacyjne firmy TERMO-IMP.
7. [www.sciteex.com.pl](http://www.sciteex.com.pl).

Recenzent:

**Jerzy MICHALSKI**

## **Possibilities of forming the hardness of EN41Cr4 steel using polymer quenchants**

### **Key words**

Polymer quenchants, quenching and tempering.

### **Summary**

The article presents the research results of the influence of concentration and type of polymer quenchants on the structure and hardness of EN41Cr4 steel after quenching and tempering. Research was carried out for the aqueous solutions of the Polihartenol-HI polymer within the concentration range of 15–60%. Within the scope of the work, the possibilities of forming the hardness of EN41Cr4 steel by the selection of the concentration of aqueous solutions

of Polihartenol-HI polymer are discussed. Based on the analysis of the hardness changes in EN41Cr4 steel caused by the use of aqueous quenching solutions with different concentrations of Polihartenol-HI polymer, a mathematical formula was determined and experimentally verified that allows for the selection of concentrations of aqueous solutions of the tested polymer to obtain the required hardness of EN41Cr4 steel after the quenching and tempering process.