



Andrzej POPRZECZKA, Adam LISICA

PRÓBA ILOŚCIOWEGO OPISU WPŁYWU PARAMETRÓW OBRÓBKIE CIEPLNEJ NA TWARDOŚĆ STALI NARZĘDZIOWEJ 102Cr6

Streszczenie

Parametry obróbki cieplnej stali narzędziowej w istotny sposób wpływają na jej strukturę, która z kolei kształtuje właściwości mechaniczne i eksploatacyjne, takie jak np.: twardość, udarność i odporność na zużycie ściernie. Pomimo licznych opracowań na ten temat brak jest w literaturze fachowej ścisłych zależności pomiędzy parametrami obróbki cieplnej stali narzędziowej a jej odpowiednimi właściwościami.

W niniejszej pracy przedstawiono próbę zbadania ilościowego wpływu parametrów obróbki cieplnej na twardość stali 102Cr6 stosowanej na narzędzia do pracy na zimno. Do badań i opracowania wyników zastosowano pełnoczynnikową macierz planowania doświadczeń 2^3 i program komputerowy Statistica.

WSTĘP

Stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno służą do wykonywania narzędzi, które podczas pracy nie osiągają temperatury wyższej niż 200°C. Dodatki stopowe, zwłaszcza Cr, W i V, nadają stali dużą hartowność, drobnoziarnistą strukturę, wysokie właściwości wytrzymałościowe, szczególnie zaś odporność na ścieranie przez tworzenie się węglików stopowych o dużej twardości i dyspersji. Wymienione pierwiastki powodują również zwiększenie odporności na odpuszczanie.

W celu uzyskania wysokiej twardości i odporności na ścieranie stali narzędziowych stopowych do pracy na zimno poddaje się je hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu. Bardzo istotne są parametry tej obróbki cieplnej. Chodzi bowiem o to, aby pozostawić pewną część węglików nie rozpuszczonych w austenicie, co zapewnia stali drobnoziarnistość oraz odporność na ścieranie i zużycie. Z drugiej zaś strony zbyt małe nasycenie austenitu pierwiastkami stopowymi może spowodować zmniejszenie hartowności oraz obniżenie właściwości mechanicznych stali po obróbce cieplnej i ich trwałości w warunkach pracy narzędzia. Podwyższenie temperatury austenitowania (hartowania) wpływa natomiast na wzrost zawartości austenitu szątkowego i spadek twardości po hartowaniu [1÷3].

Skład chemiczny, warunki obróbki cieplnej i twardość stali narzędziowych stopowych do pracy na zimno stosowanych dotychczas w kraju zawierała wycofana norma PN-86/H-85023. Aktualnie obowiązuje nowa norma PN-EN ISO 4957:2004, według której inaczej oznacza się gatunki stali. Norma ta podaje parametry obróbki cieplnej, takie jak temperatura hartowania i temperatura odpuszczania, ośrodek chłodzący oraz minimalną twardość HRC stali, jaką można uzyskać.

W literaturze fachowej brak jest ścisłych zależności pomiędzy parametrami obróbki cieplnej stali narzędziowej stopowej do pracy na zimno a jej odpowiednimi właściwościami mechanicznymi i użytkowymi. W niniejszej pracy przedstawiono próbę zbadania ilościowego wpływu parametrów hartowania i odpuszczania na twardość stali 102Cr6. Stal ta często stosowana jest na narzędzia do drewna i papieru, gwintowniki, narzynki, rozwiertacze, przeciągacze, wiertła, piły tarczowe, stemple, matryce, wykrojniki, sprawdziany, krzywki, mimośrodry, narzędzia pomiarowe i wiele innych.

Według podanej wyżej normy dla stali 102Cr6 zalecane parametry obróbki cieplnej są następujące:

- temperatura hartowania – $830 \div 850^{\circ}\text{C}$,
- temperatura odpuszczania – $170 \div 190^{\circ}\text{C}$,
- ośrodek chłodzący – olej,
- minimalna twardość – 60 HRC.

W innych źródłach [1, 3, 5] podawany zakres temperatur hartowania i odpuszczania stali narzędziowej stopowej do pracy na zimno o zbliżonym składzie chemicznym jest o wiele większy.

1. METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano stal narzędziową stopową do pracy na zimno 102Cr6. Skład chemiczny tej stali przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny badanej stali narzędziowej 102Cr6

| Zawartość pierwiastków, % wag. | | | | | |
|--------------------------------|------|------|-------|-------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr |
| 1,10 | 0,19 | 0,43 | 0,012 | 0,008 | 1,35 |

Próbki do badań pobrano z prętów o średnicy 16 mm walcowanych na gorąco i wyżarzonych zmiękczająco. Wykonano 40 próbek w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $10 \times 10 \times 55$ mm z nadatkiem na szlifowanie. Taki kształt próbek umożliwi w dalszych badaniach zajęcie się zagadnieniem udarności stali.

Tab. 2. Wartości wielkości wejściowych

| Parametr | Zakres zmian parametru | x_i ($\alpha = \pm 1,682$) | | | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----------|
| | | $-\alpha$ | -1 | 0 | +1 | $+\alpha$ |
| $T_a, ^{\circ}\text{C}$ | $785 \div 955$ | 785 | 820 | 870 | 920 | 955 |
| $T_o, ^{\circ}\text{C}$ | $125 \div 295$ | 125 | 160 | 210 | 260 | 295 |
| τ_s, min | $10 \div 310$ | 10 | 55 | 150 | 245 | 310 |

Obróbkę cieplną przeprowadzono w piecu elektrycznym firmy Linn Elektro Therm bez atmosfery ochronnej, typu LM 111.13. Założono, że struktura i twardość stali narzędziowej do pracy na zimno 102Cr6 będą zależały od trzech parametrów obróbki cieplnej (tab. 2):

- temperatury hartowania – T_a ,
- temperatury odpuszczania – T_o ,
- czasu odpuszczania – τ .

Czas austenitizowania ustalono na stałym poziomie 15 min. Chłodzenie przeprowadzono w oleju.

W doświadczeniu wykorzystano plan rotabilny drugiego rzędu 2^3 (tab. 3), zakładając krzywoliniowy charakter zależności [6]. Umożliwia to uzyskanie odpowiedniego równania

regresji i określenie współzależności wymienionych parametrów obróbki cieplnej i twardości stali.

Tab. 3. Macierz planowania rotatabilnego drugiego rzędu 2^3

| | Nr doświadczenia | Nr próbki | x_1 | x_2 | x_3 | HRC |
|--------------------------------|------------------|-----------|--------|--------|--------|------|
| Doświadczenie czynnikowe 2^3 | 1 | 1/2 | -1 | -1 | -1 | 63,8 |
| | 2 | 3/4 | +1 | -1 | -1 | 59,8 |
| | 3 | 5/6 | -1 | +1 | -1 | 62,0 |
| | 4 | 7/8 | +1 | +1 | -1 | 57,5 |
| | 5 | 9/10 | -1 | -1 | +1 | 62,9 |
| | 6 | 11/12 | +1 | -1 | +1 | 57,6 |
| | 7 | 13/14 | -1 | +1 | +1 | 60,4 |
| | 8 | 15/16 | +1 | +1 | +1 | 57,2 |
| 6 punktów „gwiazdnych” | 9 | 17/18 | -1,682 | 0 | 0 | 59,8 |
| | 10 | 19/20 | +1,682 | 0 | 0 | 60,2 |
| | 11 | 21/22 | 0 | -1,682 | 0 | 65,1 |
| | 12 | 23/24 | 0 | +1,682 | 0 | 57,5 |
| | 13 | 25/26 | 0 | 0 | -1,682 | 65,7 |
| | 14 | 27/28 | 0 | 0 | +1,682 | 55,3 |
| 6 punktów centralnych | 15 | 29/30 | 0 | 0 | 0 | 59,4 |
| | 16 | 31/32 | 0 | 0 | 0 | 60,1 |
| | 17 | 33/34 | 0 | 0 | 0 | 61,4 |
| | 18 | 35/36 | 0 | 0 | 0 | 60,4 |
| | 19 | 37/38 | 0 | 0 | 0 | 60,0 |
| | 20 | 39/40 | 0 | 0 | 0 | 61,2 |

Trzy zmienne niezależne (wejściowe) w równaniach regresji, będące zmiennymi kodowymi, zapisano w postaci x_i :

$$x_1 = \frac{T_a - 870}{50}, \quad x_2 = \frac{T_o - 210}{50}, \quad x_3 = \frac{\tau - 150}{95}. \quad (1)$$

Wartości wielkości wejściowych przedstawiono w tabeli 2. Zmienne kodowe x_1 , x_2 i x_3 opisują odpowiednio wpływ temperatury hartowania, temperatury odpuszczania i czasu odpuszczania na twardość stali narzędziowej 102Cr6. Punkty „gwiazdne” dla wybranej macierzy planu rotatabilnego wynoszą $\alpha = \pm 1,682$.

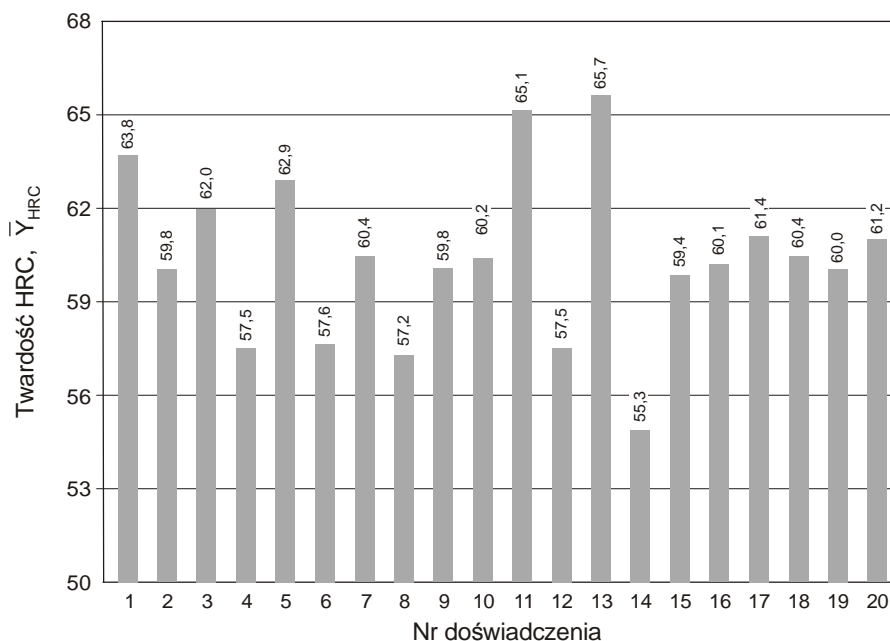
Zmienną zależną (wyjściową) \bar{Y}_{HRC} jest twardość badanych próbek. Istotność równania regresji testowano według kryteriów t-Studenta dla $1-P=0,05$ i adekwatności F-Fishera przy $1-P=0,01$.

Pomiary twardości HRC wykonano sposobem Rockwella (PN-EN ISO 6508-1:2002).

Wybrane próbki, po wytrawieniu 4% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym (nital), poddano badaniom metalograficznym mikroskopowym za pomocą mikroskopu Neophot 21. Zastosowano powiększenia $500\times$ i $1000\times$.

2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań twardości stali narzędziowej 102Cr6 poddanej zabiegom obróbki cieplnej przedstawiono na rysunku 1.



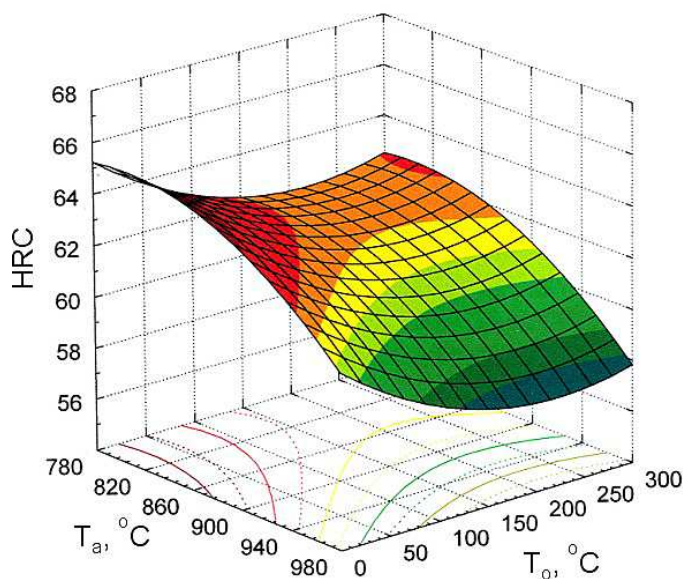
Rys. 1. Twardość próbek po przeprowadzonej obróbce cieplnej

Korzystając ze wspomaganie komputerowego, wyznaczono współczynniki regresji oraz oceniono ich istotność. W rezultacie uzyskano równanie regresji (2), opisujące wpływ parametrów obróbki cieplnej stali na jej twardość. Wartość poszczególnych współczynników tego równania regresji określa kierunek i siłę oddziaływania zastosowanych parametrów obróbki cieplnej na twardość badanej stali.

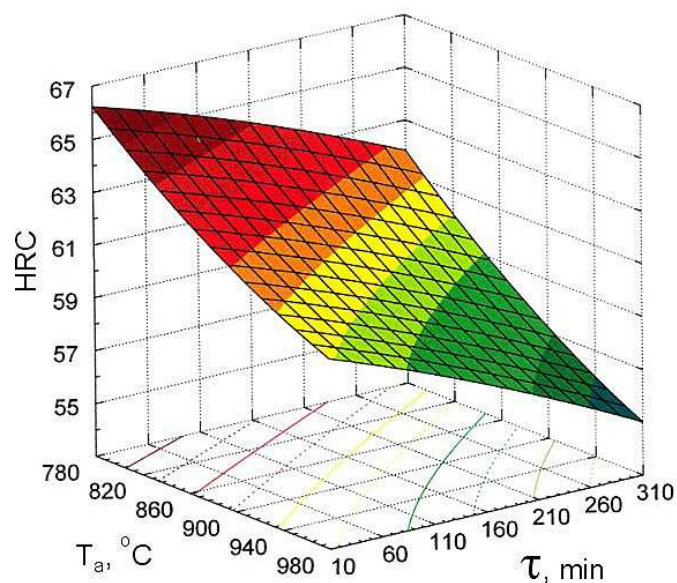
Równanie to przyjęło postać:

$$\bar{Y}_{HRC} = 60,4 - 1,20x_1 - 1,45x_2 - 1,65x_3 - 0,24x_1^2 + 0,22x_2^2. \quad (2)$$

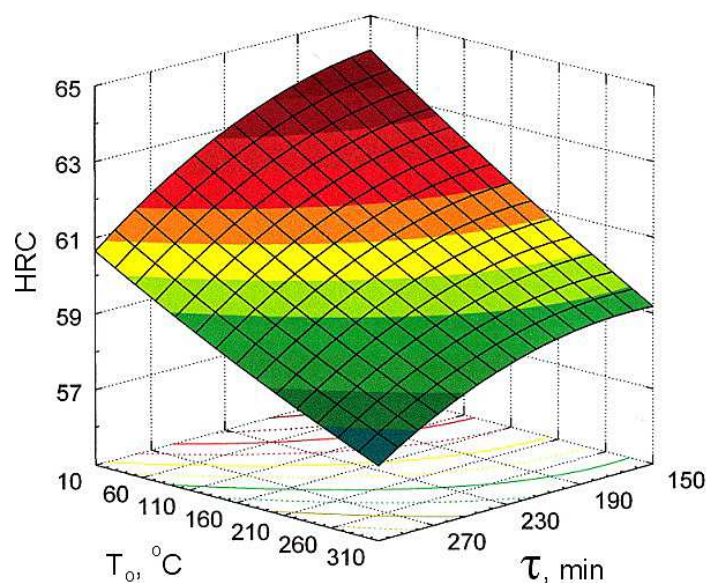
Na rysunkach 2÷4 pokazano elementy graficzne zależności (2).



Rys. 2. Wpływ temperatury hartowania T_a i temperatury odpuszczania T_o na twardość stali 102Cr6 ($\tau = 150$ min)



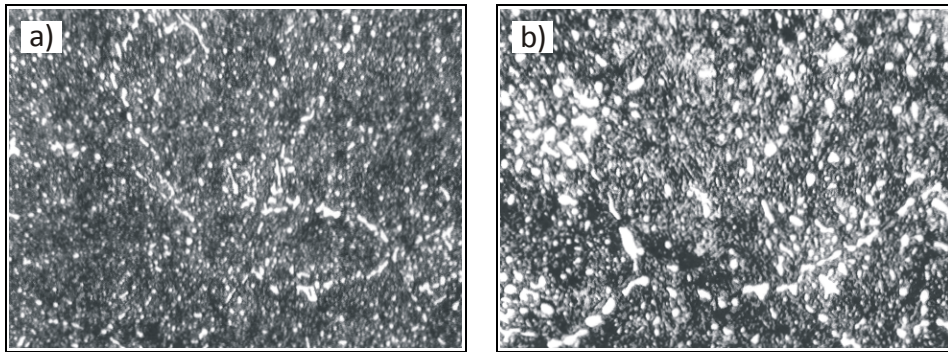
Rys. 3. Wpływ temperatury hartowania T_a i czasu odpuszczania τ na twardość stali 102Cr6 ($T_o = 210^\circ\text{C}$)



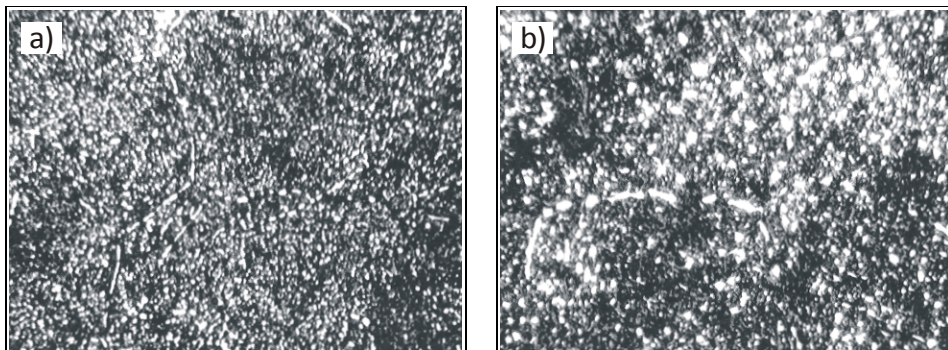
Rys. 4. Wpływ temperatury odpuszczania T_o i czasu odpuszczania τ na twardość stali 102Cr6 ($T_a = 870^\circ\text{C}$)

Na rysunkach 5÷6 pokazano wybrane przykłady struktury stali 102Cr6 po przeprowadzonej obróbce cieplnej. Struktura stali na rysunku 5 dotyczy próbki o najwyższej uzyskanej twardości, a struktura stali na rysunku 6 – o najniższej twardości.

Wyniki badań zestawione w tabeli 3 i na rysunku 1 wskazują, że twardość stali narzędziowej 102Cr6 jest zróżnicowana i zależy od zastosowanych parametrów obróbki cieplnej. Najwyższą średnią twardość, wynoszącą 65,7 HRC, uzyskano w przypadku stali austenitizowanej w temperaturze 870°C i odpuszczonej w temperaturze 210°C w czasie 10 min. Najniższą natomiast twardość stali, wynoszącą 55,3 HRC, uzyskano stosując również austenitizowanie w temperaturze 870°C i odpuszczenie w temperaturze 210°C , ale w czasie 310 min. Świadczy to o bardzo dużym wpływie czasu odpuszczania na twardość stali.



Rys. 5. Struktura stali 102Cr6. Doświadczenie nr 13 (65,7 HRC). Trawiono nitałem; a) pow. 500×, b) pow. 1000×



Rys. 6. Struktura stali 102Cr6. Doświadczenie nr 14 (55,3 HRC). Trawiono nitałem; a) pow. 500×, b) pow. 1000×

Z analizy równania (2) i rysunków 2 ÷ 4 wynika, że zwiększenie temperatury hartowania, temperatury odpuszczania i czasu odpuszczania powoduje obniżenie twardości stali (ujemne współczynniki w równaniu regresji przy zmiennych x_1 , x_2 i x_3). Liniowo najsilniej na obniżenie twardości wpływa czas odpuszczania. Wyrażenia kwadratowe x_1^2 okazały się istotne statystycznie tylko dla temperatury hartowania i temperatury odpuszczania. Są one porównywalne co do siły oddziaływania, lecz przeciwnie skierowane. Wyrażenia te wskazują na krzywoliniowy charakter zależności. Pozostałe wyrażenia równania regresji okazały się nieistotne statystycznie.

Z analizy rysunków 5 i 6 wynika, że struktura stali narzędziowej 102Cr6 po przeprowadzonych zabiegach obróbki cieplnej składa się ze skrytoiglastego martenzytu odpuszczonego i cementytu chromowego $(Fe,Cr)_3C$. Jest to typowa struktura stali narzędziowej obrobionej cieplnie. Węglik $(Fe,Cr)_3C$ są drobne i niezbyt równomiernie rozłożone.

PODSUMOWANIE

Równanie regresji (2) pozwala w sposób ilościowy obliczyć twardość stali narzędziowej 102Cr6 po hartowaniu i odpuszczaniu w zależności od trzech zmiennych x_1 , x_2 i x_3 .

Najsilniejszy wpływ na twardość stali 102Cr6 w badanym zakresie zmienności parametrów obróbki cieplnej wywiera czas odpuszczania.

Wysoką twardość badanej stali uzyskuje się stosując średnią temperaturę hartowania ($x_1 = 0$) i średnią temperaturę odpuszczania ($x_2 = 0$) oraz krótki czas odpuszczania ($x_3 = -\alpha$).

ATTEMPT AT QUANTITATIVE DESCRIPTION OF THE INFLUENCE HEAT TREATMENT PARAMETERS HAVE ON HARDNESS OF 102Cr6 TOOL STEEL

Abstract

Heat treatment parameters of the tool steel significantly affect its structure which in turn shapes such mechanical and operating properties as: hardness, impact strength and wear resistance. In spite of numerous studies in this subject, specialist literature does refer to close dependencies between heat treatment parameters of tool steel and its adequate properties.

This paper presents an attempt at quantitative analysis of the influence heat treatment parameters have on the hardness of 102Cr6 steel used on cold work tools. The analysis and result handling were performed with the use of the 2³ full-factor experiment design matrix and Statistica software.

BIBLIOGRAFIA

1. Staub F., Adamczyk J., Cieślak Ł., Gubała J., Maciejny A.: *Metaloznawstwo*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1979.
2. Dobrzański L., A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. WNT, Gliwice – Warszawa 2002.
3. Przybyłowicz K.: *Metaloznawstwo*. WNT, Warszawa 2003.
4. Wojtkun F., Sołncew J.P.: *Materiałoznawstwo*, T.2. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 1999.
5. Malkiewicz T.: *Metaloznawstwo stopów żelaza*. PWN, Warszawa – Kraków 1978.
6. Nalimow W.W., Czernowa N.A.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*. WNT, Warszawa 1967.

Autorzy:

Dr inż. Andrzej POPRZECZKA – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu

Dr inż. Adam LISICA – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu