

WYKORZYSTANIE DANYCH PRZYBLIŻONYCH DO MODELOWANIA WŁASNOŚCI STALI

W. SITEK¹

Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny
Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Konarskiego 18a,
44-100 Gliwice, Polska

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono metodę modelowania twardości wtórnej stali szybkoctnących na podstawie składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej. Do opracowania modelu matematycznego zastosowano metodę regresji wielokrotnej i oparto się na wynikach badań eksperymentalnych stali szybkoctnących oraz danych zawartych normie przedmiotowej dotyczącej stali szybkoctnących, mających charakter przybliżony.

Key words: high-speed steel, chemical composition, secondary hardness, modelling

1. WSTĘP

Stale szybkoctnące nadal stanowią ważną grupę materiałów inżynierskich. Ich powszechne zastosowanie w przemyśle sprawia, że prowadzenie badań nad nowymi gatunkami o lepszych własnościach użytkowych jest uzasadnione. Równoczesny szybki postęp w informatyce i upowszechnienie w ostatnich latach jej nowoczesnych technik, sprawia, że są one z powodzeniem stosowane w badaniach z obszaru inżynierii materiałowej. Narzędzia sztucznej inteligencji, w tym np. sieci neuronowe, oraz zaawansowane metody obliczeniowe, umożliwiają rozszerzenie obszaru badań nad stalami szybkoctnącymi m.in. w celu zredukowania kosztów wytwarzania przez zastąpienie pracochłonnych i kosztownych procesów metalurgicznych na rzecz analiz i symulacji wykonywanych z zastosowaniem narzędzi komputerowych. Kolejnym

¹ dr inż., wojciech.sitek@polsl.pl

istotnym czynnikiem jest tutaj znaczne zmniejszenie czasu dokonywanych analiz, bowiem zastosowanie nowych technik umożliwia pominięcie wielu pracochłonnych badań doświadczalnych i zastąpienie ich symulacjami komputerowymi, których poprawne wyniki niejednokrotnie stanowią podstawowe źródło dalej prowadzonych analiz. Współczesne zastosowania technik informatycznych w inżynierii materiałowej, w tym narzędzi sztucznej inteligencji, świadczą o coraz większym zainteresowaniu nimi w środowisku materiałoznawczym. Kolejne lata niewątpliwie przyniosą nowe rozwiązania wskazując kolejne obszary praktycznego wykorzystania tych metod, a prace własne [1-8] są tego przykładem.

W pracy przedstawiono model matematyczny, opracowany przy zastosowaniu metody regresji wielokrotnej, przydatny do obliczania twardości wtórnej stali szybkoctnych po obróbce cieplnej na podstawie składu chemicznego i parametrów obróbki cieplnej.

2. MATERIAŁ BADAWCZY

Podstawę do opracowania modelu matematycznego twardości wtórnej stali szybkoctnych stanowią wyniki badań doświadczalnych stali szybkoctnych z dodatkiem Si jako częściowego substytutu W i/lub Mo, oraz z dodatkami Ti lub Nb jako częściowych substytutów V, których składy chemiczne zestawiono w tabeli 1. Wykonano kompleksowe badania twardości stali poddanych austenityzowaniu w temperaturze 1120°C-1240°C co 30°C i następnemu odpuszczaniu w temperaturze 480°C-630°C co 30°C [9-14]. W efekcie wykonano badania twardości dla 5 wartości temperatury austenityzowania, oraz 6 wartości temperatury odpuszczania, co dało łącznie wyniki dla 30-tu wariantów obróbki cieplnej w przypadku każdego z gatunków analizowanych stali. Uzyskano w ten sposób odpowiedni zbiór danych eksperymentalnych opisujący wartość twardości wtórnej stali w zależności od składu chemicznego oraz od parametrów obróbki cieplnej, zawierający łącznie 540 wyników badań. Dodatkowo, dla uzyskania modelu matematycznego adekwatnego dla szerszego zakresu stężeń pierwiastków stopowych, wykorzystano dane zawarte w normie przedmiotowej PN-86/H-85022 „Stale szybkoctne”, obecnie wycofanej, obejmujące informacje o 10-ciu gatunkach stali szybkoctnych. Norma ta zawiera wymagania dotyczące składu chemicznego przedstawione jako dopuszczalne zakresy poszczególnych pierwiastków stopowych – minimalny i maksymalny (tabela 2). Ponadto przedstawiono w niej orientacyjne wykresy krzywych odpuszczania (dla różnych wartości temperatury odpuszczania) dla optymalnej temperatury austenityzowania dla danego gatunku stali. Należy nadmienić, że z wykresami tymi nie powiązано żadnego konkretnego składu chemicznego dla gatunku stali, przyjmując, że mieści się on w granicach odpowiednich dla każdego z gatunków stali. Te przybliżone dane zostały wykorzystane do rozszerzenia zbioru danych o dodatkowe 171 wyników, a liczba ta wynika z ilości danych na wspomnianych wykresach odpuszczania oraz od przyjętej metody opracowania danych przybliżonych, przedstawionej w dalszej części pracy.

Tabela 1. Składy chemiczne doświadczalnych stali szybko tnących
Table 1. Chemical composition of the experimental high-speed steels

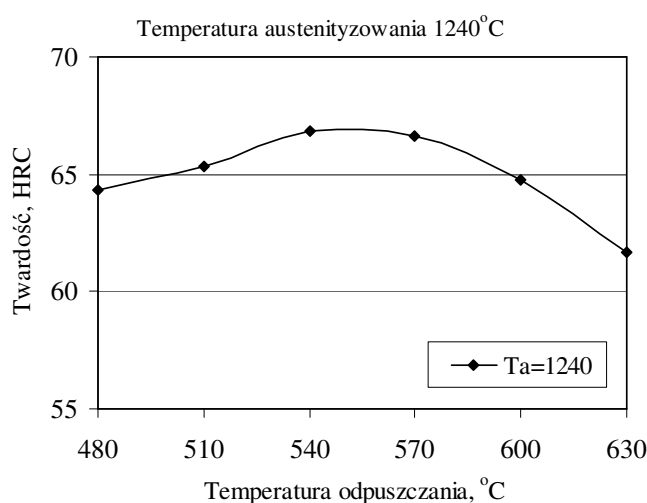
Typ stali	Gatunek stali	Średnie stężenie masowe pierwiastka, %									
		C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ti	Nb	Co
9-2-2+Si	SW9M2S	0,94	0,48	0,58	4,5	9,0	1,72	1,8	0,0	0,0	0,0
9-2-2+Si+Ti	SW9M2STi	0,93	0,46	0,78	4,5	9,0	1,88	1,7	0,23	0,0	0,0
9-2-2+Si+Ti	SW9M2STi1	0,93	0,52	0,63	4,7	8,9	2,0	1,5	0,6	0,0	0,0
9-2-2+Si+Nb	SW9M2SNb	0,94	0,45	0,65	4,5	9,0	1,85	1,67	0,0	0,54	0,0
9-2-2+Si+Nb	SW9M2SNb1	0,92	0,43	0,66	4,5	9,1	1,87	1,3	0,0	0,95	0,0
9-2-2-5	SW9M2K5S	0,94	0,63	0,71	4,4	8,8	2,4	1,6	0,0	0,0	5,2
11-0-2+Si	SW11S	0,93	0,42	0,54	4,5	11,2	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0
11-0-2+Si+Ti	SW11STi	0,98	0,5	0,74	4,6	10,8	0,0	1,6	0,34	0,0	0,0
11-0-2+Si+Ti	SW11STi1	0,93	0,51	0,72	4,4	10,6	0,0	1,4	0,56	0,0	0,0
11-0-2+Si+Nb	SW11SNb	0,94	0,47	0,64	4,5	11,4	0,0	1,6	0,0	0,43	0,0
11-0-2+Si+Nb	SW11SNb1	0,93	0,46	0,63	4,5	11,5	0,0	1,3	0,0	0,85	0,0
11-0-2-5	SW11K5S	0,91	0,51	0,63	4,5	10,9	0,0	1,8	0,0	0,0	5,2
11-2-2+Si	SW11M2S	1,1	0,37	0,64	4,4	11,3	1,88	1,8	0,0	0,0	0,0
11-2-2+Si+Ti	SW11M2STi	1,05	0,44	0,63	4,5	11,2	1,9	1,7	0,3	0,0	0,0
11-2-2+Si+Ti	SW11M2STi1	1,04	0,44	0,69	4,2	11,1	1,8	1,5	0,56	0,0	0,0
11-2-2+Si+Nb	SW11M2SNb	1,0	0,4	0,56	4,4	11,2	1,95	1,7	0,0	0,46	0,0
11-2-2+Si+Nb	SW11M2SNb1	1,02	0,42	0,54	4,5	11,3	1,82	1,4	0,0	0,86	0,0
11-2-2-5	SW11M2K5S	1,03	0,42	0,65	4,5	11,3	1,94	1,8	0,0	0,0	4,9

Tabela 2. Składy chemiczne stali szybko tnących wg normy PN-86/H-85022
Table 2. Chemical composition of the high-speed steels according to PN-86/H-85022 standard

Gatunek stali	Zakres	Stężenie masowe pierwiastka, %									
		C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ti	Nb	Co
SW12	Min	1,05	0,0	0,0	3,5	11,0	0,0	2,2	-	-	0
	Maks	1,15	0,4	0,5	4,5	13,0	0,7	2,7	-	-	0,5
SW18	Min	0,75	0,0	0,0	3,5	17,0	0,0	1,0	-	-	0
	Maks	0,85	0,4	0,5	4,5	19,0	0,7	1,4	-	-	0,5
SW2M5	Min	0,9	0,0	0,0	3,5	1,5	4,5	1,1	-	-	0
	Maks	1,0	0,4	0,5	4,5	2	5,5	1,4	-	-	0,5
SK5M	Min	0,85	0,0	0,0	3,5	6,0	4,6	1,7	-	-	4,5
	Maks	0,95	0,4	0,5	4,5	6,7	5,2	2,1	-	-	5,5
SW7M	Min	0,82	0,0	0,0	3,5	6,0	4,5	1,7	-	-	0
	Maks	0,92	0,4	0,5	4,5	7,0	5,5	2,1	-	-	0,5
SK5MC	Min	1,05	0,0	0,0	3,5	6,4	3,5	1,7	-	-	4,5
	Maks	1,2	0,4	0,5	4,5	7,4	4,5	2,1	-	-	5,5
SK5	Min	1,05	0,0	0,0	3,5	11,0	0,0	2,1	-	-	4,5
	Maks	1,15	0,4	0,5	4,5	13,0	0,7	2,6	-	-	5,5
SK8M	Min	1,05	0,0	0,0	3,5	1,3	9,0	1,0	-	-	7,5
	Maks	1,2	0,4	0,5	4,5	1,9	10,0	1,4	-	-	8,5
SK10V	Min	1,15	0,0	0,0	3,5	9,0	3,0	2,7	-	-	9,5
	Maks	1,3	0,4	0,5	4,5	11,0	3,6	3,2	-	-	10,5
SK5V	Min	1,3	0,0	0,0	3,5	12,0	0,7	4,2	-	-	5,0
	Maks	1,45	0,4	0,5	4,5	13,5	1,2	4,8	-	-	6,0

3. METODYKA OPRACOWANIA DANYCH PRZYBLIŻONYCH

Zaproponowana w pracy metoda pozwala na pozyskanie danych, niezbędnych do opracowania modelu matematycznego, o charakterze przybliżonym. Wykorzystano w niej wykresy krzywych odpuszczania stali szybkołączących zawarte w normie PN-86/H-85022. Przykładowy wykres odpuszczania uzyskany dla stali SK5V, poddanej austenitzowaniu w temperaturze 1240°C, przedstawiono na rysunku 1.

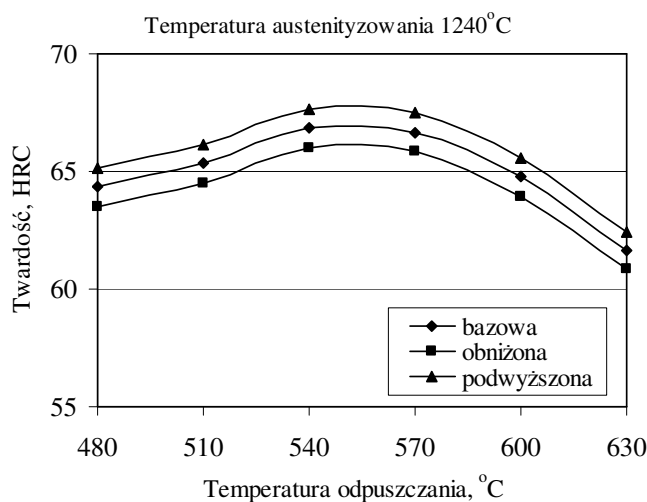


Rys. 1. Wykres krzywej odpuszczania stali SK5V, temperatura austenitzowania 1240°C (wg. normy PN-86/H-85022)

Fig. 1. Tempering curve of the SK5V steel grade austenitising temperature 1240°C (according to PN-86/H-85022 withdraw Polish Standard)

Podobne wykresy zamieszczono dla pozostałych gatunków stali ujętych w normie. Mają one charakter informacyjny, gdyż nie podano dla jakiego składu chemicznego stali zostały one uzyskane. W zaproponowanej w pracy metodzie przyjęto, że wykresy te odpowiadają tzw. średniemu składowi chemicznemu, co odpowiada wartościom ze środka zakresu dopuszczalnego dla stężeń poszczególnych pierwiastków. Ponadto założono, że w przypadku gdy zmienia się skład chemiczny stali, w dopuszczalnych granicach, możliwe są odchylenia twardości dla poszczególnych temperatur odpuszczania o 1,25%, co nie przekracza wartości 1 HRC. W konsekwencji takiego założenia uzyskuje się, zamiast krzywej odpuszczania, szczególnego rodzaju pasmo odpuszczania ograniczone krzywymi „podniesionymi” lub „obniżonymi” o odpowiednią wartość (w jednostkach HRC) w stosunku do bazowej krzywej odpuszczania (rys. 2). Dodatkowo przyjęto, że graniczne krzywe odpuszczania

związane są ze składami chemicznymi stali, gdy stężenia pierwiastków stopowych odpowiadają dolnej dopuszczalnej granicy stężenia (tzw. krzywa „obniżona”) lub górnej granicy stężenia pierwiastka (tzw. krzywa „podwyższona”). W taki sposób założone składy chemiczne przedstawiono w tabeli 3. Należy nadmienić, że w przypadku pierwiastków stopowych występujących w tych stalach, a nie traktowanych jako podstawowe dodatki stopowe, w tym przypadku Mn oraz Si, przyjęto ich stałe stężenia równe Mn=0,24% oraz Si=0,3%. Zaproponowane podejście pozwala na pozyskanie danych opisujących zmiany twardości wtórnej stali, w zależności od zmieniającego się składu chemicznego stali oraz parametrów obróbki cieplnej. Stanowi ono niewątpliwie przyczynek do dyskusji czy poczynione założenia są słuszne, a opisana metoda spełnia założenia. Oczywiście bowiem jest, że możliwe są inne podejścia do opracowania danych zawartych w normach, katalogach lub innych publikacjach, np. z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych [15].



Rys. 2. Wykres pasma odpuszczania stali SK5V dla składów chemicznych zawartych w tabeli 3

Fig. 2. Tempering band of the SK5V steel grade for chemical compositions presented in table 3

Tabela 2. Założone składy chemiczne stali SK5V

Table 2. Assumed chemical compositions of the SK5V steel

Krzywa odpuszczania	Stężenie masowe pierwiastka, %							
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Co
bazowa	1,375	0,24	0,3	4	12,75	0,95	4,5	5,5
dolna	1,3	0,24	0,3	3,5	12	0,7	4,2	5,0
górna	1,45	0,24	0,3	4,5	13,5	1,2	4,8	6,0

4. OPRACOWANIE MODELU TWARDOŚCI STALI

Do opracowania modelu matematycznego umożliwiającego obliczenie twardości analizowanych stali szybkotnących wyłącznie na podstawie składu chemicznego i temperatury austenitowania oraz temperatury odpuszczania wykorzystano metodę statystyczną regresji wielokrotnej. Obliczenia wykonano w programie Statistica v.5.5. Ponieważ analiza zależności fizykalnych związanych z efektem twardości wtórnej nie pozwalają na zdefiniowanie odpowiedniego modelu fizycznego, rozpatrzono wiele postaci modelu fenomenologicznego, opartego wyłącznie na wiedzy, doświadczeniu i intuicji badaczy. Przy ocenie adekwatności opracowanych modeli oparto się na analizie błędu pomiędzy twardością obliczoną, a odpowiadającą jej twardością zmierzoną doświadczalnie (lub odczytaną z normy zgodnie z metodyką opisaną w punkcie 3). Jako kryterium przyjęto średni błąd dla testowanego zbioru danych:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|Y_{oi} - Y_{zi}|) \quad (1)$$

gdzie: N – liczebność zbioru testowego, Y_{oi} – i -ta twardość obliczona, Y_{zi} – i -ta twardość zmierzona.

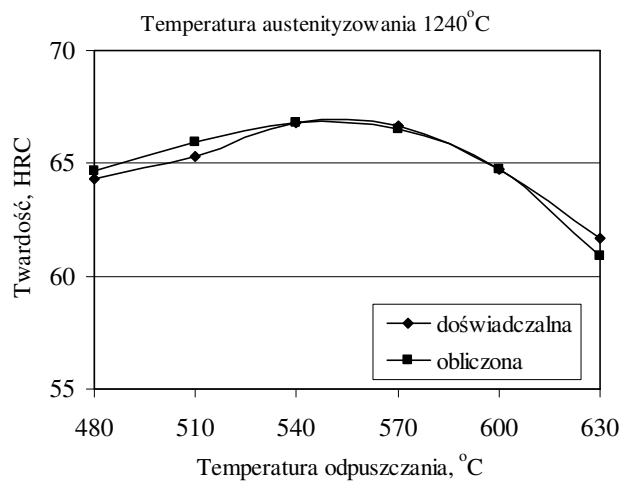
Przyjęto, że adekwatnym jest model, który pozwoli na uzyskanie wartości średniej różnicy twardości w zakresie 0,6-0,9 HRC, a więc odpowiadającym szerokości pasma odpuszczania (rys. 2). W wyniku obliczeń weryfikacyjnych przyjęto następującą postać modelu twardości:

$$\begin{aligned} H = & a_0 + a_1 \cdot \%C + a_2 \cdot \%Mn + a_3 \cdot \%Si + a_4 \cdot \%Cr + a_5 \cdot \%W + a_6 \cdot \%Mo + a_7 \cdot \%V + a_8 \cdot \%Ti + \\ & + a_9 \cdot \%Nb + a_{10} \cdot \%Co + a_{11} \cdot Ta + a_{12} \cdot To + a_{13} \cdot Ta^2 + a_{14} \cdot To^2 + a_{15} \cdot Ta^3 + a_{16} \cdot To^3 \\ & + a_{17} \cdot (To^2 \cdot Ta^2) + a_{18} \cdot (Ta \cdot To) + a_{19} \cdot \% (W \cdot Mo) + a_{20} \cdot \% (C \cdot Mn) + a_{21} \cdot \% (Mn \cdot Mo) \\ & + a_{22} \cdot (To^3 \cdot Ta^3) + a_{23} \cdot \% (W \cdot V) + a_{24} \cdot \% (W \cdot Ti) \end{aligned} \quad (2)$$

Wartości współczynników a_i są następujące:

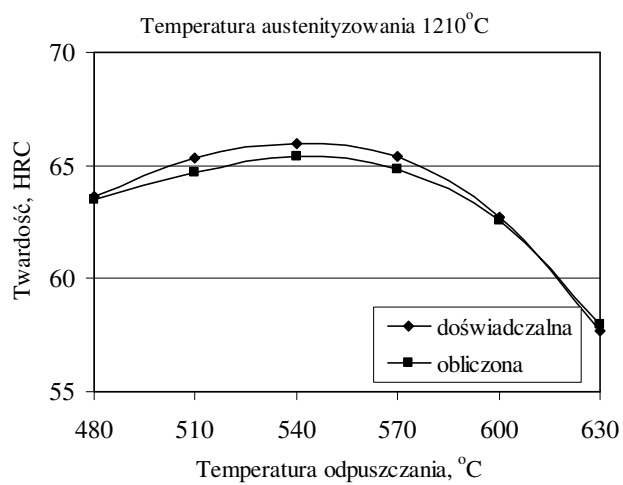
$a_0=2388,15$; $a_1=24,48$; $a_2=54,23$; $a_3=0,407$; $a_4=0,354$; $a_5=0,335$; $a_6=-0,191$; $a_7=1,0972$;
 $a_8=-8,231$; $a_9=-0,984$; $a_{10}=-0,0303$; $a_{11}=-1944,13$; $a_{12}=-11889,61$; $a_{13}=191,25$;
 $a_{14}=15033,36$; $a_{15}=51,69$; $a_{16}=-8208,46$; $a_{17}=-6765,12$; $a_{18}=7831,77$; $a_{19}=0,0018$;
 $a_{20}=-58,7$; $a_{21}=1,55$; $a_{22}=2619,82$; $a_{23}=-0,159$; $a_{24}=0,633$

Obliczenia weryfikacyjne wskazały, że model (2) pozwala na obliczanie twardości wtórnej stali z dokładnością 0,8 HRC. Jest to średni błąd obliczeń, a maksymalne jego wartości nie przekraczają 2 HRC. Ponadto błąd dla 65% wartości obliczonych jest mniejszy niż wartość graniczna 0,8 HRC. Wyniki te pozwalają na przyjęcie, że opracowany model jest adekwatny, a wyniki obliczeń zgodne z wynikami eksperymentalnymi. Na rysunkach 3–6 przedstawiono przykładowe porównanie krzywych odpuszczania obliczonych oraz doświadczalnych odpowiednio dla stali SK5V, SW9M2STi, SW7M, oraz SW11STi.



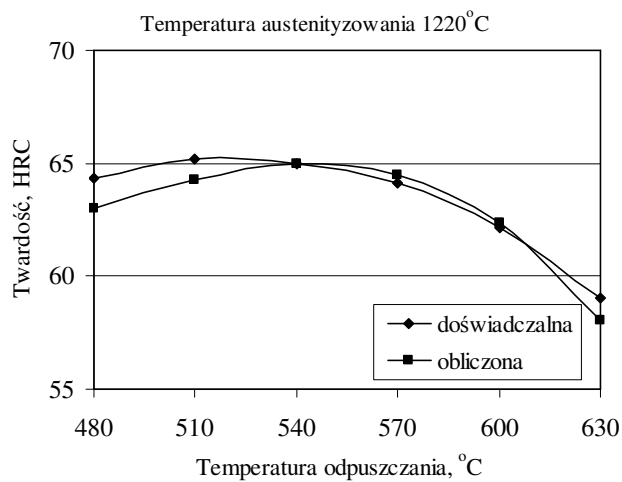
Rys. 3. Porównanie krzywych odpuszczania obliczonej i doświadczalnej dla stali SK5V, błąd obliczeń 0,57 HRC

Fig. 3. Comparison of the tempering curves experimental and calculated ones of the SK5V steel grade, error of calculations 0,57 HRC



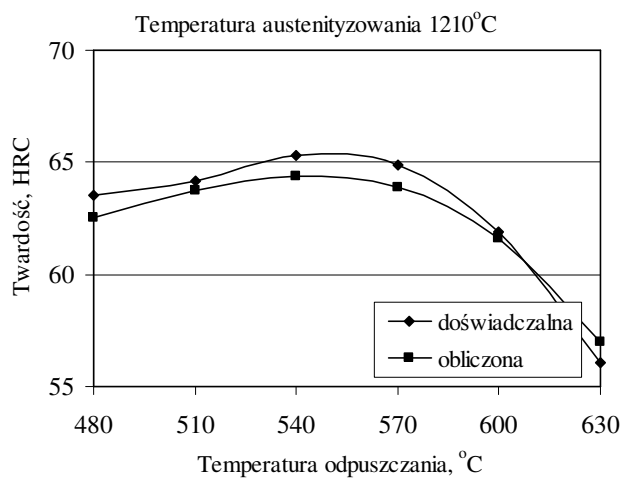
Rys. 4. Porównanie krzywych odpuszczania obliczonej i doświadczalnej dla stali SW9M2STi, błąd obliczeń 0,57 HRC

Fig. 4. Comparison of the tempering curves experimental and calculated ones of the SW9M2STi steel, error of calculations 0,57 HRC



Rys. 5. Porównanie krzywych odpuszczania obliczonej i doświadczalnej dla stali SW7M, błąd obliczeń 0,64 HRC

Fig. 5. Comparison of the tempering curves experimental and calculated ones of the SW7M steel grade, error of calculations 0,64 HRC



Rys. 6. Porównanie krzywych odpuszczania obliczonej i doświadczalnej dla stali SW11STi, błąd obliczeń 0,38 HRC

Fig. 6. Comparison of the tempering curves experimental and calculated ones of the SW11STi steel, error of calculations 0,38 HRC

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono opracowany z wykorzystaniem regresji wielokrotnej model umożliwiający obliczanie twardości stali szybko tnących na podstawie składu chemicznego i parametrów obróbki cieplnej. Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na zadowalającą zgodność modelu z danymi doświadczalnymi, gdyż błąd obliczeń wynosi ok. 0,8 HRC. Przy opracowaniu modelu matematycznego oparto się na wynikach badań eksperymentalnych stali szybko tnących oraz danych zawartych w normie przedmiotowej dotyczącej stali szybko tnących, mających charakter przybliżony. Otrzymane wyniki symulacji komputerowej są zgodne z wynikami badań doświadczalnych wykonanych w pracach źródłowych [9-14].

LITERATURA

- [1] W. Sitek, L.A. Dobrzański: *Application of genetic methods in materials' design*, Journal of Materials Processing Technology, Vols. 164-165, 2005, p. 1607-1611
- [2] W. Sitek, L.A. Dobrzański, J. Załona: *The modeling of high-speed steels properties using neural networks*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.157-158, 2004, p. 245-249
- [3] L.A. Dobrzański, W. Sitek, M. Krupiński, J. Dobrzański: *Computer aided method for evaluation of failure class of materials working in creep conditions*, Journal of Materials Processing Technology, Vols. 157-158, 2004, p. 102-106
- [4] L.A. Dobrzański, W. Sitek: *The modelling of hardenability using neural network*, Journal of Materials Processing Technology, Vols. 92-93, 1999, p. 8-14
- [5] L.A. Dobrzański, W. Sitek: *Designing of the chemical composition of constructional alloy steels*, Journal of Materials Processing Technology, Vols. 89-90, 1999, p. 467-472
- [6] L.A. Dobrzański, W. Sitek: *Application of neural network in modelling of hardenability of constructional steels*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 78 (1-3), 1998, p. 59-66
- [7] W. Sitek, J. Trzaska, L.A. Dobrzański: *An artificial intelligence approach in designing new materials*, Worldwide Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, Vol. 17, p. 277 – 280
- [8] J. Trzaska, W. Sitek, L.A. Dobrzański: *Selection method of steel grade with required hardenability*, Worldwide Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, Vol. 17, p. 289 – 292
- [9] L.A. Dobrzański, A. Zarychta, M. Ligarski i E. Hajduczek: *Znaczenie Nb i Ti jako pierwiastków stopowych w stalach szybko tnących W-Mo-V*, wyd. Zakład Materiałów Narzędziowych i Technik Komputerowych w Metaloznawstwie, Politechnika Śląska, Gliwice, 1994.
- [10] L.A. Dobrzański, A. Zarychta, E. Hajduczek i M. Ligarski: *Obróbka cieplna stali szybko tnących W-Mo-V i W-V z dodatkiem Ti*, wyd. Zakład Materiałów

- Narzędziowych i Technik Komputerowych w Metaloznawstwie, Politechnika Śląska, Gliwice, 1997.
- [11] L.A. Dobrzański: *Structure and properties of high-speed steels*, wyd. Zakład Materiałów Narzędziowych i Technik Komputerowych w Metaloznawstwie, Politechnika Śląska, Gliwice, 1998
- [12] A. Zarychta: *Wpływ Nb na procesy wydzieleniowe w stalach szybkołącznych W–Mo–V o podwyższonym stężeniu Si*, praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1995.
- [13] M. Ligarski: *Wpływ częściowej substytucji wanadu przez tytan na przemiany fazowe w stalach szybkołącznych wolframowo-molibdenowo-wanadowych*, praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1996.
- [14] W. Kasprzak: *Znaczenie Co w stalach szybkołącznych o obniżonym stężeniu W i Mo oraz podwyższonym stężeniu Si*, praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1998.
- [15] Z. Pawlak: *Rough sets*, International Journal of Computer and Information Sciences, 11, 1982, p.341-356

APPLICATION OF ROUGH DATA FOR MODELLING OF PROPERTIES OF HIGH-SPEED STEELS

SUMMARY

The paper presents the method of high – speed steels' secondary hardness modelling, basing on chemical composition and heat-treatment parameters, employing neural network and statistical regression method. The computer modelling were carried out basing on results of investigations of newly developed high – speed steels and rough data included in standards containing informations about these steels.

Recenzował: prof. Jan Szajnar.