

# Numeryczne obliczanie własności mechanicznych

## stali do ulepszenia cieplnego

PROF. DR HAB. INŻ. **Henryk Adrian** (ADRIAN@AGH.EDU.PL),

KIEROWNIK PRACOWNI METALOGRAFII ILOŚCIOWEJ I MODELOWANIA OBRÓBKI CIEPLNEJ, WYDZIAŁ INŻYNIERII METALI

I INFORMATYKI PRZEMYSŁOWEJ, AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,

DR INŻ. **Jerzy Stodolny**, REMIX S.A., ŚWIEBODZIN

W pracy zaprezentowano dwa modele fizyczne do obliczania własności mechanicznych niskostopowych stali konstrukcyjnych poddanych ulepszeniu cieplnemu na podstawie składu chemicznego stali i parametrów odpuszczania. Przedstawiono opracowany program komputerowy Quench wykorzystujący modele i pozwalający obliczać własności wytrzymałościowe ( $HV$ ,  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ) oraz plastyczne ( $A$ ,  $Z$ ) stali po ulepszeniu cieplnym. Przeprowadzono eksperymentalną weryfikację wyników obliczeń własności mechanicznych stali niskostopowej 34CrMo4 oraz niestopowej C45 poddanych hartowaniu i odpuszczaniu przy różnych parametrach. Stwierdzono zadowalającą zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi.

Stale konstrukcyjne przeznaczone do ulepszenia cieplnego zawierają od 0,25% do 0,5% C oraz dodatki pierwiastków stopowych, których zadaniem jest podwyższenie hartowności oraz własności mechanicznych po procesie obróbki cieplnej polegającym na hartowaniu z następnym wysokim odpuszczaniem. Podstawowymi pierwiastkami stopowymi są: mangan, chrom, molibden, nikiel i krzem. W celu zapewnienia drobnoziarnistości stali stosuje się niewielkie dodatki takich pierwiastków, jak: V, Nb i Ti, nazywanych mikrodotkami. Pierwiastki te wykazują wysokie powinowactwo chemiczne do węgla i azotu. Z pierwiastkami międzywęzłowymi tworzą trudno rozpuszczalne związki, węgliki i azotki oraz produkty wzajemnego rozpuszczania tych związków – węglikoazotki. W podwyższonych temperaturach wydzielenia tych związków hamują ruch granic ziaren austenitu, zapobiegając ich rozrostowi. Ponadto rozpuszczone w austenicie mikrodotki i pierwiastki międzywęzłowe mogą podczas chłodzenia powodować wydzielenie się w ferrycie drobnodyspersyjnych związków, głównie węglików, powodując efekt umocnienia wydzieleniowego.

W celu podwyższenia hartowności stali stosuje się zazwyczaj dodatki

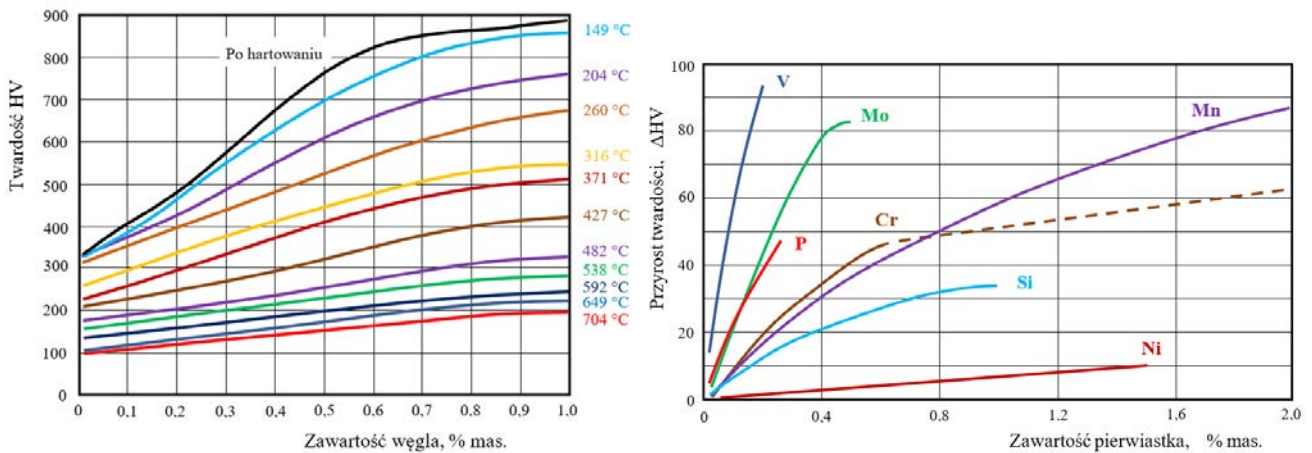
chromu lub manganu, wprowadzane pojedynczo lub kompleksowo. Zawartości tych pierwiastków zazwyczaj nie przekraczają 2%. Na hartowność stali silnie wpływa dodatek Mo, ale ze względu na to, że pierwiastek ten jest stosunkowo drogi, wprowadzany jest do omawianych stali w ilości 0,2-0,3% w celu zapobiegnięcia kruchości odpuszczania drugiego rodzaju (kruchość odwracalna) podczas wysokiego odpuszczania. Krzem w mniejszym stopniu wpływa na hartowność stali, ale podwyższa granicę sprężystości oraz hamuje spadek twardości podczas odpuszczania, gdyż hamuje dyfuzję węgla, podnosząc do wyższych temperatur przemiany zachodzące w trakcie odpuszczania. Zapobiega kruchości nieodwracalnej, która może występować podczas odpuszczania średniego. Ni, podobnie jak Si, słabo wpływa na hartowność stali, ale podnosi odporność na pękanie, obniżając temperaturę przejścia w stan kruchy. Pierwiastki stopowe wpływają również na procesy koagulacji węglików podczas odpuszczania wysokiego. Pierwiastki węglikotwórcze, Cr i Mo, rozpuszczają się w cementycie, a przy większych zawartościach mogą tworzyć węgliki stopowe powodujące efekt twardości wtórnej podczas odpuszczania.

### Obliczanie twardości stali po odpuszczaniu

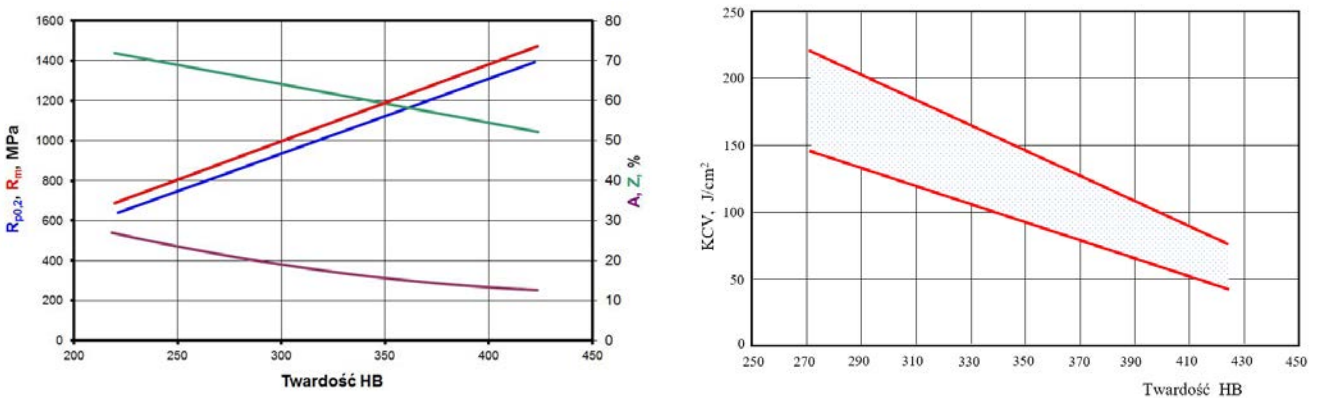
Własności mechaniczne stali po ulepszeniu cieplnym można obliczać na podstawie znajomości składu chemicznego oraz parametrów odpuszczania, wykorzystując modele empiryczne. Jednymi z nich są opracowane przez Grange'a i wsp. model i dane do obliczania twardości średniogłowych stali niskostopowych poddawanych odpuszczaniu w zakresie temperatur 200-700°C przez 1 h [1]. Model ten pozwala obliczać krzywą odpuszczalności [zależność twardości, HV, od temperatury odpuszczania,  $T_o$ ,  $HV = f(T_o)$ ] na podstawie składu chemicznego. Opiera się on na założeniu addytywności wpływu pierwiastków stopowych na twardość po odpuszczaniu:

$$HV(T) = HV_C(T) + \Delta HV_{Mn}(T) + \Delta HV_{Si}(T) + \Delta HV_{Cr}(T) + \Delta HV_{Mo}(Mo) + \Delta HV_{Ni}(Ni) + \Delta HV_V(T) + \Delta HV_P(T) \quad (1)$$

gdzie:  $HV_C(T)$  oznacza twardość związaną z zawartością węgla, a  $\Delta HV_M$  – zmianę twardości stali odpuszczanej przy temperaturze, T, zależną od zawartości pierwiastka M. Zawartości pierwiastków mieszczą się w granicach: C ≤ 1%, Mn ≤ 2%, Ni ≤ 1,5%, Cr ≤ 1%, Si ≤ 1%, Mo ≤ 0,5%, V ≤ 0,2%, P ≤ 0,25%. Poszczególne zależności



Rys. 1. Wpływ składu chemicznego na twardość stali po odpuszczaniu, zależności: a)  $HV_c = f(C, T)$ , b)  $\Delta HV = f(M)$  przy temperaturze  $T = 592^\circ C$



Rys. 2. Zależność własności mechanicznych po odpuszczaniu od twardości, HB a)  $R_m = f(HB)$ ,  $R_c = f(HB)$ ,  $A = f(HB)$ ,  $Z = f(HB)$ , b)  $KCV = f(HB)$  [2, 5]

$HV_c = f(C, T_o)$ ,  $\Delta HV_M = f(M)$  są prezentowane na wykresach dla określonych temperatur odpuszczania.

Wykresy te aproksymowano wielomianami umożliwiającymi komputeryzację obliczeń krzywej odpuszczalności [2]. Na rys. 1a przedstawiono wpływ zawartości węgla i temperatury na twardość stali odpuszczanej, natomiast rys. 1b przedstawia przykład wpływu poszczególnych pierwiastków na twardość przy temperaturze  $592^\circ C$ .

Zależność  $HV = f(T_o)$  jest jedną z podstawowych charakterystyk stali do ulepszenia cieplnego, umożliwiającą obliczanie twardości stali odpuszczanej w danej temperaturze,  $T$ , przy czasie różnym od 1 h, przy wykorzystaniu parametru Holomona-Jaffe'a,  $M$  [3, 4], opisanego wzorem:

$$M = T[C + \lg(\tau)] \quad (2)$$

gdzie:  $T$  – temperatura, K;  $\tau$  – czas, s lub h;  $C$  – stała, zależna od zawartości węgla.

Dla stali, w której nie występuje efekt twardości wtórnej, twardość HV jest monotoniczną funkcją parametru  $M$ ,  $HV = f(M)$ . Oznacza to, że daną wartość twardości, HV, można osiągnąć przy nieskończenie wielu kombinacjach parametrów odpuszczania,  $T$ ,  $\tau$ . Stwarza to możliwość obliczania zależności twardości, HV, od czasu odpuszczania,  $\tau$ , przy danej temperaturze,  $T$ .

### Obliczanie własności mechanicznych stali po odpuszczaniu

Własności mechaniczne stali ulepszonej cieplnie zmieniają się w zależności od parametrów odpuszczania i są ze sobą wzajemnie powiązane. Wzrost twardości wywołuje wzrost własności wytrzymałościowych (granicy plastyczności,  $R_{p0,2}$ , wytrzymałości na rozciąganie,  $R_m$ ) i spadek plastycznych (wydłużenia,  $A$ , przewężenia,  $Z$ ) oraz udarności, KCV. Znajomość twardości po odpuszczaniu zahartowanej stali do ulepszenia cieplnego jest niezwykle cenna, gdyż na jej pod-

stawie można obliczyć inne własności mechaniczne, wykorzystując eksperymentalne dane zamieszczone w pracy [5]. W pracy tej przedstawiono graficznie zależności twardości, HB, granicy plastyczności,  $R_{p0,2}$ , przewężenia,  $Z$ , wydłużenia,  $A$ , oraz udarności, KCV, od wytrzymałości na rozciąganie,  $R_m$ . W pracy [2] dokonano konwersji danych i opisano funkcyjnie zależności  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ ,  $Z$  i KCV od twardości HB, którą można obliczać na podstawie składu chemicznego i parametrów odpuszczania. Przekształcone zależności przedstawiają rys. 2a i b. Warto wspomnieć, że pomiar twardości jest najtańszym i najprostszym spośród metod oceny własności mechanicznych stali.

Jak widać na rys. 2a, zależności  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $Z$  od twardości HB mają charakter liniowy, natomiast zależność  $A = f(HB)$  ma charakter paraboliczny. W przypadku zależności udarności KCV od twardości HB (rys. 2b) przedstawiono zakresy wartości KCV w funk-

STAL	C	Mn	Si	Cr	Al.	Ni	P	S	Cu	Mo
34CrMo4	0,35	0,72	0,39	1,13	0,014	0,088	0,014	0,026	0,14	0,26
C45	0,48	0,71	0,25	0,14	0,023	0,09	0,013	0,023	0,18	0

Tab. 1. Skład chemiczny badanych stali, %mas

cji HB. Należy zauważyć, że udarność stali po odpuszczaniu może wykazywać znaczny rozrzut wartości, jeśli uwzględnić możliwość występowania zjawisk kruchości odpuszczania pierwszego i drugiego rodzaju. Prezentowane dane pozwalają określać wartości  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ , A i Z na podstawie znajomości twardości, HB, stali odpuszczanej, jeśli  $220 \leq HB \leq 430$ .

#### Program komputerowy do obliczania własności mechanicznych stali po ulepszeniu cieplnym

Opracowano program komputerowy Quench, który na podstawie znajomości składu chemicznego stali i wielkości ziarna austenitu oblicza parametry hartowności. Umożliwia on również, na podstawie znajomości składu chemicznego oraz parametrów odpuszczania, obliczanie własności mechanicznych stali [2]. Możliwa

jest analiza porównawcza grupy stali do 20 wytopów. Opis możliwości obliczeniowych programu zamieszczony jest w [2, 6]. Rys. 3 przedstawia ekran wynikowy programu obliczania zależności twardości, HV, od temperatury odpuszczania, T, przy czasie odpuszczania, t, równym 1 h oraz zależności twardości od czasu odpuszczania w założonej temperaturze. Po wprowadzeniu temperatury odpuszczania (T\_odp. C) oraz czasu odpuszczania (Czas\_odp. min) następuje wydruk obliczonych wartości własności mechanicznych wybranego wytopu z prawej strony ekranu. Rys. 4 przedstawia ekran prezentacji graficznej zależności wybranych własności mechanicznych od temperatury i czasu odpuszczania wybranych wytopów stali.

Wyniki obliczeń można zarejestrować jako pliki tekstowe lub graficzne.

#### Weryfikacja obliczeń twardości stali po odpuszczaniu

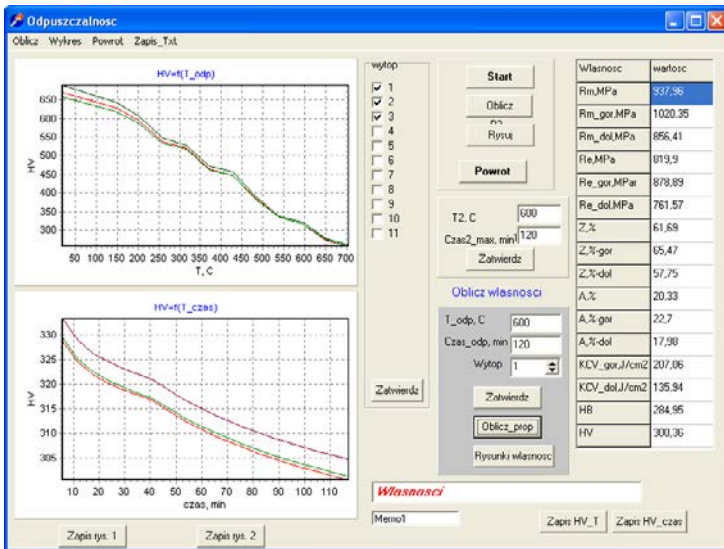
##### Materiał i metodyka

##### badan eksperymentalnych

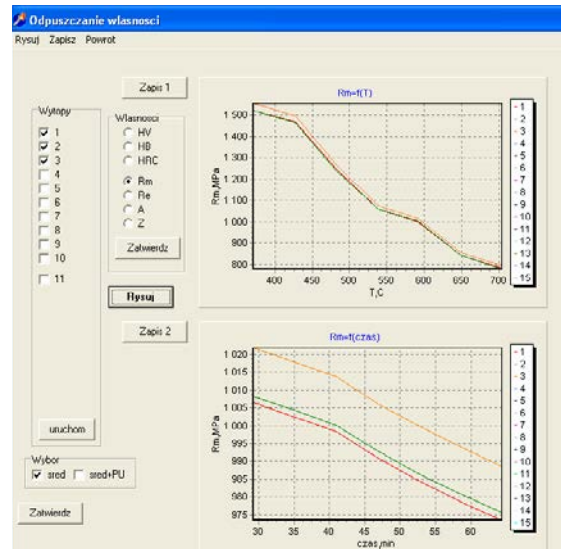
Eksperymentalną weryfikację obliczeń według przedstawionych modeli przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch gatunków stali: niskostopowej **34CrMo4** oraz niestopowej **C45**. Skład chemiczny badanych stali przedstawiony jest w tab. 1.

Dla stali 34CrMo4 przeprowadzono badania zależności twardości, HV, od temperatury odpuszczania, T, stali zahartowanej oraz próbę wytrzymałości na rozciąganie stali po ulepszeniu cieplnym. Do badania zależności  $HV = f(T)$  przygotowano próbki w kształcie sześciangu o boku 20 mm, które austenityzowano w temperaturze 860°C w elektrycznym piecu rurowym z atmosferą ochronną Ar przez 30 min z następnym oziębianiem w wodzie. ❖





Rys. 3. Ekran wynikowy obliczeń własności mechanicznych stali po odpuszczaniu



Rys. 4. Ekran wynikowy graficznej prezentacji własności mechanicznych stali po odpuszczaniu

Po hartowaniu przeprowadzono odpuszczanie przez 1 godzinę w zakresie temperatur 200-700°C. Po obróbce cieplnej jedną z powierzchni próbek szlifowano na papierach ściernych o gradacji od numeru 120 do 800, a następnie przeprowadzono pomiar twardości metodą Vickersa. Liczba pomiarów na każdej próbce wynosiła 10. Następnie obliczano wartości średnie twardości. Do badań własności wytrzymałościowych przygotowano standardową próbkę wytrzymałościową o średnicy  $d = 5$  mm i długości pomiarowej  $l_0 = 25$  mm. Próbkę poddano obróbce cieplnej przy zastosowaniu elektrycznego pieca elektrycznego z atmosferą Ar. Parametry obróbki cieplnej: austenitowanie w temperaturze 860°C przez 30 min, z następnym oziębianiem w wodzie. Po hartowaniu przeprowadzono odpuszczanie w temperaturze 600°C przez 1 h z następnym chłodzeniem na powietrzu. Próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS 850 i określono parametry wytrzymałościowe granicę plastyczności,  $R_{p0,2}$ , i wytrzymałość na rozciąganie,  $R_m$ . Określono również parametry plastyczne: wydłużenie, A, i przewężenie Z.

Dla stali C45 przeprowadzono kompleksowe badania wpływu parametrów odpuszczania na własności mechaniczne określone na podstawie próby rozciągania oraz pomiarów twardości. Przygotowano serię standardowych próbek wytrzymałościowych okrągłych o średnicy  $d = 5$  mm i długości pomiarowej  $l_0 = 25$  mm, które poddano hartowaniu w wodzie od temperatury austenitowania równej 850°C, a następnie odpuszczano przy temperaturach: 50 0°C, 550°C, 600°C i 650°C przez: 15 min, 90 min, 180 min, 270 min, 720 min i 1320 min. Po odpuszczaniu próbki chłodzono na powietrzu. Próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Inspekt 100 table firmy Hagewald & Peschke MPT GmbH, a następnie określono wartości parametrów: granica plastyczności,  $R_{p0,2}$ , wytrzymałość na rozciąganie,  $R_m$ , oraz wydłużenie A. Następnie fragmenty odciętych prostopadle do osi próbek inkludowano w duracrylu i przygotowano zglądy metalograficzne do analizy mikrostruktury. Powierzchnie zglądów trawiono 4-proc. roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym. Na powierzchniach zglądów przeprowadzono również pomiary twardości metodą Vickersa za pomocą twardościomierza

VMHT Auto firmy UHL. Na każdej próbce wykonano po 5 pomiarów i obliczono wartości średnie.

### Porównanie wyników eksperymentalnych i obliczeniowych Stal 34CrMo4

Porównanie eksperymentalnej i obliczonej zależności twardości stali 34CrMo4 od temperatury odpuszczania, T, przy czasie równym 1 h przedstawione jest na rys. 5.

W tab. 2 zamieszczono określone eksperymentalnie i obliczone za pomocą programu Quench wartości parametrów wytrzymałościowych ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ) oraz plastycznych (A, Z).

### Stal C45

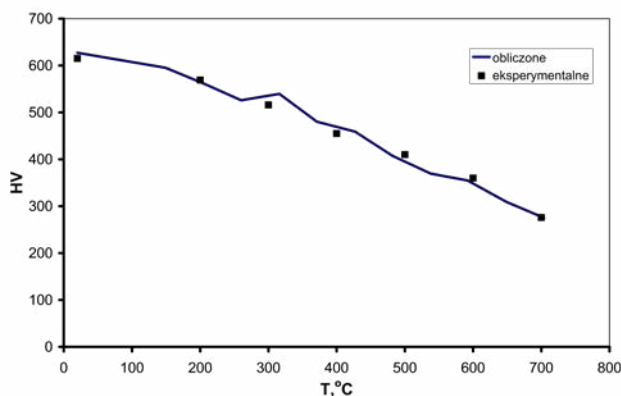
Na rys. 6 przedstawiono porównanie określonej eksperymentalnie i obliczonej zależności twardości stali C45 od temperatury odpuszczania przy stałym czasie równym 1 h. Wyniki badań wpływu temperatury i czasu na własności mechaniczne (HV,  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ) stali C45 przedstawione są w [7].

### Podsumowanie

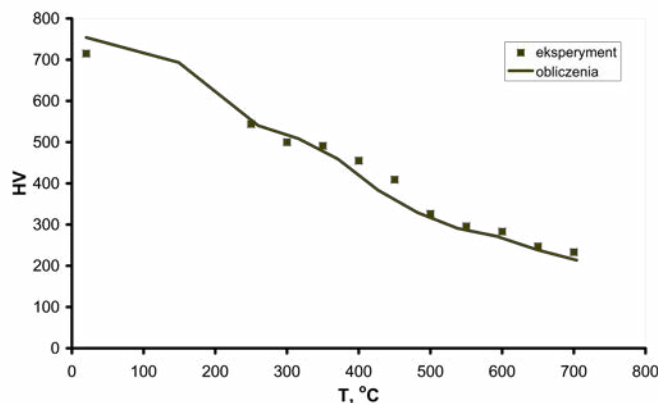
W projektowaniu procesów technologicznych obróbki cieplnej stopów że-

WYNIKI	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	Z, %
Eksperymentalne	669	1105	13	39
Obliczone	988	1112	17	53

Tab. 2. Obliczone i eksperymentalne wyniki badań własności mechanicznych stali 34CrMo4 po ulepszeniu cieplnym



Rys. 5. Porównanie eksperymentalnych i obliczonych zależności twardości, HRC, od temperatury odpuszczania, T, stali 34CrMo4. Czas odpuszczania: 1 h. Punkty przedstawiają dane eksperymentalne, linia ciągła – dane obliczone



Rys. 6. Zależności eksperymentalnych i obliczonych zależności twardości stali C45 od temperatury odpuszczania, czas: 1 h

laza ważną rolę odgrywa modelowanie procesów oparte na modelach fizycznych. Jest najtańszym sposobem optymalizacji procesów technologicznych, jak również składu chemicznego stali dla uzyskania pożądanych własności mechanicznych. Wymaga jednak eksperymentalnej weryfikacji wyników obliczeń własności mechanicznych z danymi uzyskanymi eksperymentalnie. W pracy przedstawiono dwa modele: półempiryczny model Grange'a i wsp. [1] do obliczania twardości stali po hartowaniu i odpuszczaniu oraz empiryczny model Pattona [5] do obliczania własności mechanicznych średniowęglowej stali niskostopowej poddanej hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu na podstawie znajomości jednej z własności mechanicznych. Oryginalne dane Pattona [5] przekształcono do zależności własności wytrzymałościowych: granicy plastyczności  $R_{p0,2}$ , wytrzymałości na rozciąganie,  $R_m$ , oraz plastycznych: wydłużenia,  $A$ , i przewężenia,  $Z$ , od twardości wyrażonej w jednostkach HB. Zaprezentowano opracowany program komputerowy Quench wykorzystujący omawiane modele do prognozowania własności mechanicznych stali ulepszanych cieplnie. Zamieszczono wyniki porównania obliczonych i określonych eksperymentalnie własności mechanicznych stali niskostopowej 34CrMo4 oraz niestopowej C45 poddanych hartowaniu i odpuszczaniu przy różnych parametrach procesu. Na podstawie porównań stwierdzono dobrą zgodność zależności twardości od temperatury odpuszczania przy sta-

łym czasie równym 1 h stali 34CrMo4 (rys. 5). Dobra zgodność występowała również przy porównaniu wytrzymałości na rozciąganie,  $R_m$ , oraz zadowalająca zgodność własności plastycznych - A i Z (tab. 2).

Obszerne badania eksperymentalne przeprowadzone dla stali C45 pozwoliły stwierdzić zadowalającą zgodność obliczonej i określonej eksperymentalnie zależności twardości HV od temperatury T (rys. 6). Na omawianym rysunku można zauważyć, że w przedziale temperatur 350-450°C twardość określona eksperymentalnie jest wyższa w porównaniu z twardością obliczeniową. Porównanie określonych eksperymentalnie i obliczonych zależności twardości, HV, od czasu odpuszczania pozwoliło stwierdzić bardzo dobrą zgodność omawianych zależności przy temperaturach odpuszczania równych 600°C i 650°C. Przy niższych temperaturach (500°C i 550°C) twardość określona eksperymentalnie była wyższa od obliczonej. Podobną zgodność obserwowano dla zależności wytrzymałości na odpuszczanie,  $R_m$ , od czasu odpuszczania. Natomiast w przypadku granicy plastyczności  $R_{p0,2}$  zgodność wyników obliczonych i określonych eksperymentalnie była niższa. Przy wszystkich temperaturach wartości eksperymentalne były wyższe od obliczonych. Należy zauważyć, że różnica pomiędzy porównywanymi wartościami malała wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania [7].

Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że opracowany program komputerowy Quench może być uży-

tecznym narzędziem wspomagającym planowanie procesów obróbki cieplnej stali konstrukcyjnych. Konieczne są jednak dalsze badania zgodności obliczeń i danych eksperymentalnych dla większej grupy stali konstrukcyjnych. □

*Badania wykonano w ramach projektu Nr POIR.01.01.01-00-1637/15 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.*

#### Piśmiennictwo

1. Grange R.A., Hribal C.R., Porter L.F.: *Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low Alloy Steels*. „Met. Trans.”, 1977, 8A, s. 1775-1985.
2. Adrian H.: *Numeryczne modelowanie procesów obróbki cieplnej*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
3. Holomon J.H., Jaffe L.D.: *Ferrous metallurgical design, design principles for fully hardened steel*. John Wiley & Sons Inc., New York 1947.
4. Holomon J.H., Jaffe L.D.: *Time-Temperature Relations in Tempering Steels*. „Trans Am. Inst. Mining Metal Eng.”, 1945, 162, s. 223-249.
5. *Poradnik Inżyniera. Obróbka cieplna stopów żelaza*. Pod red. W. Lutego, WNT, Warszawa 1977, s. 195.
6. Adrian H., Adrian A., Augustyn-Pieniążek J., Głowacz E.: *Obliczanie własności mechanicznych stali konstrukcyjnych po hartowaniu i odpuszczaniu*, „Hutnik -Wiadomości Hutnicze”, 2012, 79 (4), s. 232-237.
7. Adrian H., *Sprawozdanie z badań dla firmy REMIX S.A., Analiza wpływu parametrów odpuszczania na twardość średniowęglowej stali zabartowanej*. Kraków, 2017.