

Kamil Pomykała

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Analiza właściwości chłodzących olejów hartowniczych

W artykule przedstawiono badania właściwości fizykochemicznych wytypowanych olejów bazowych oraz komercyjnych pakietów dodatków funkcyjnych. Następnie dokonano zestawienia próbek olejów hartowniczych i wykonano krzywe chłodzenia. Na podstawie uzyskanych wyników badań wyliczono współczynnik intensywności chłodzenia H oraz współczynniki „hardening power”: HP_1 i HP_2 . Wytypowano oleje hartownicze charakteryzujące się największymi szybkościami chłodzenia.

Słowa kluczowe: oleje hartownicze, krzywe termokinetyczne, współczynnik intensywności chłodzenia H , współczynniki „siły hartowniczej”: HP_1 i HP_2 .

Analysis of quenching oils

The paper presents the investigations of physicochemical properties of selected base oils and commercial packages of functional additives. Then samples of quenching oils were matched and cooling curves were done. Based on the test results, cooling intensity factor H and factors “hardening power” HP_1 and HP_2 were calculated. Hardening oils with the highest rates of cooling were chosen.

Key words: quenching oils, thermokinetic curves, cooling intensity factor H , factors “hardening power”: HP_1 and HP_2 .

Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki analizy właściwości chłodzących wybranych olejów hartowniczych. W kompozycjach zastosowano dwa oleje bazowe w klasach lepkości ISO VG 22 i ISO VG 32, a także trzy komercyjne pakiety dodatków.

W pierwszym etapie wykonano badania właściwości fizykochemicznych wytypowanych surowców oraz zestawiono próbki olejów hartowniczych, czyli mieszaniny pakietów dodatków w olejach bazowych. Następnie przy wykorzystaniu aparatu IVF Smart Quench (angielską metodą próbki cylindrycznej ze stopu Inconel 600) wykonano pomiary właściwości termokinetycznych (krzywe chłodzenia) zestawionych olejów hartowniczych. Porównywano parametry i kompozycję:

- oleju bazowego A z pakietami dodatków: 1, 2, 3,
- oleju bazowego B z pakietami dodatków: 1, 2, 3.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wyliczone zostały:

- współczynnik intensywności chłodzenia H , wprowadzony przez Grossmana [10],
- współczynniki „hardening power”: HP_1 – dla olejów hartowniczych podlegających w trakcie procesu hartowania

ciągłemu mieszaniu, HP_2 – dla olejów hartowniczych niepodlegających mieszaniu.

W końcowym etapie pracy wytypowano oleje hartownicze charakteryzujące się największymi szybkościami chłodzenia.

Zasada pomiaru, angielskiej metody próbki cylindrycznej zgodnie z normą PN-ISO 9950:2014, polega na tym, że wykonaną ze stopu niklowo-chromowo-żelazowego (Inconel klasy 600) cylindryczną sondę wyposażoną w termoparę usytuowaną w jej środku geometrycznym nagrzewa się w piecu do określonej temperatury (przeważnie jest to $850 \pm 5^\circ\text{C}$), a następnie w czasie nie dłuższym niż 2 sekundy przenosi i umieszcza w pojemniku z badanym olejem hartowniczym (objętość oleju w pojemniku wynosi 2 litry). Badany olej nie podlega mieszaniu, natomiast dopuszcza się różne temperatury oleju w zależności od jego rodzaju i przeznaczenia.

W czasie chłodzenia sondy temperatura w jej środku geometrycznym jest rejestrowana w funkcji zależności od czasu. Układ pomiarowy pozwala w sposób ciągły rejestrować szybkość chłodzenia, tworząc zapisy [9, 20]:

- zmiany temperatury w funkcji szybkości chłodzenia, $T = f(v)$,

- zmiany temperatury badanej sondy w funkcji czasu, $T = f(\text{czas})$.

Zapisy są tworzone z zastosowaniem oprogramowania komputerowego. Sygnał wyjściowy z sondy (wyposażonej w termoparę) jest przekształcany w postać numeryczną i zapamiętywany w pamięci rejestratora, którym jest mikroprocesorowe przenośne urządzenie rejestrujące napięcie pomiarowe otrzymywane z sondy pomiarowej. Dane z rejestratora następnie są przesyłane do komputera.

Szybkość chłodzenia oblicza się drogą numerycznego różniczkowania sygnału wyjściowego (z termopary sondy pomiarowej poprzez rejestrator), dokonywanego w zależności od czasu. Szybkość ta wykreślana jest w funkcji temperatury sondy.

Z zapisu zależności temperatury w funkcji szybkości chłodzenia określa się [9, 20]:

- maksymalną szybkość chłodzenia, v_{\max} ,
- temperaturę, przy której występuje maksymalna szybkość chłodzenia, $T_{v_{\max}}$,
- szybkość chłodzenia w temperaturach 300 i 550°C, v_{300} i v_{550} ,
- temperatury początku fazy: wrzenia pęcherzykowego i konwekcyjnej, T_{gw} i T_{wk} .

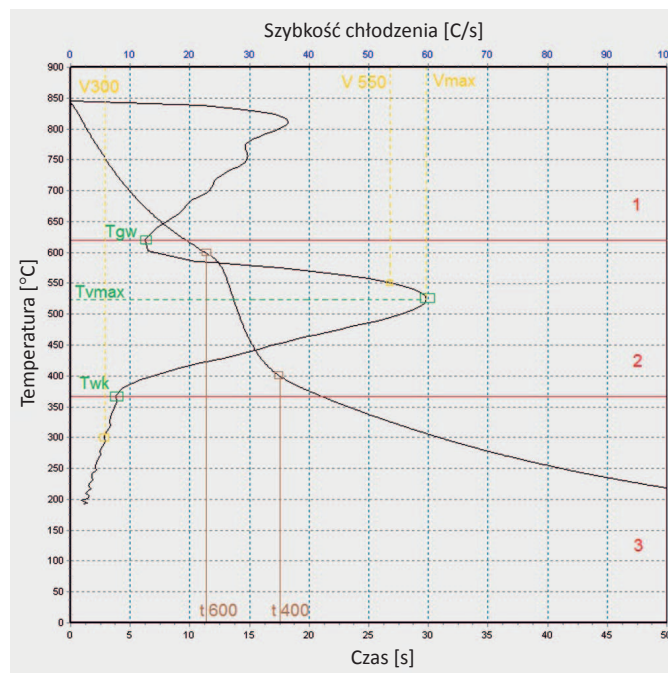
Z zapisu zmiany temperatury badanej sondy w odniesieniu do czasu odczytuje się czas potrzebny do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia do temperatury:

- 600°C, t_{600} ,
- 400°C, t_{400} ,
- 200°C, t_{200} .

Zależność temperatury od czasu chłodzenia środka próbki $T = f(\text{czas})$ jest wykorzystana do obliczenia zależności współczynnika przejmowania ciepła α w funkcji temperatury próbki. Metodyka konwersji funkcji $T = f(\text{czas})$ do funkcji $\mu = f(t)$ została opisana w pracy H. Adriana i współautorów [4]. Zależność $\mu = f(t)$ jest stosowana przy obliczeniu pola temperatury podczas chłodzenia metalowego przedmiotu $T(x, y, z, \text{czas})$ [2, 3]. Znajomość charakterystyk właściwości chłodzących, prezentowanych zależnością współczynnika przejmowania ciepła α od temperatury, może być bardzo pomocna przy doborze odpowiedniego ośrodka hartowniczego. Stanowi również ważne źródło danych fizycznych wykorzystywanych przy komputerowym modelowaniu procesu technologicznej obróbki cieplnej.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy (uzyskiwany w toku badania metodą angielską) wykres zależności szybkości chłodzenia w odniesieniu do temperatury i wykres zmiany temperatury badanej sondy w odniesieniu do czasu (krzywe chłodzenia). Wykresy zostały na siebie nałożone; orientacyjnie zaznaczono na nich parametry uzyskiwane na podstawie krzywych termokinetycznych. Czerwonymi liniami od-

dzielono również obszary (fazy) chłodzenia, jakie obserwuje się w toku oziębienia hartowanego elementu [10–13, 15]. Obszarowi 1 odpowiada faza powłoki parowej, obszarowi 2 – faza wrzenia pęcherzykowego, natomiast obszarowi 3 – faza konwekcyjna. Zaznaczone punkty T_{gw} i T_{wk} to odpowiednio: temperatura początku fazy wrzenia pęcherzykowego i temperatura początku fazy konwekcyjnej.



Rys. 1. Krzywe szybkości chłodzenia przykładowego oleju hartowniczego zarejestrowane na aparacie IVF Smart Quench, zgodna z normą PN-ISO 9950

Opisana metoda oceny olejów hartowniczych jest techniką laboratoryjną i nie może uwzględniać wielu czynników wpływających na właściwości hartownicze kąpieli przemysłowych, tj. np. intensywność i charakter ruchu kąpieli. Mimo to zaobserwowano bardzo dobre korelacje wyników ze znaną przemysłową próbą, według Grossmanna, określającą właściwość hartowniczą kąpieli współczynnikiem H . Zgodnie z tą korelacją równanie regresji obydwu porównywalnych metod ma następującą postać [8, 10, 16, 19, 20]:

$$H = 0,395 \times 10^{-1} \times t_{600} - 0,139 \times 10^{-1} \times t_{400} + 0,123 \times 10^{-2} \times v_{\max} + 0,224 \times 10^{-2} \times v_{300} + 0,224 \times 10^{-4} \times T_{v_{\max}}$$

Współczynnikami, jakie można obliczyć, wykorzystując wyniki otrzymywane metodą angielską, są zaproponowane przez Segerberga współczynniki „siły hartowniczej” (*hardening power*) HP_1 i HP_2 o postaci [1, 5–8, 16, 17]:

$$HP_1 = 3,54 \times v_{500} + 12,3 \times v_{300} - 168$$

$$HP_2 = 91,5 + 1,34 \times T_{gw} + 10,88 \times v_{550} - 3,85 \times T_{wk}$$

Wyrażają one zamiast szybkości chłodzenia zdolność chłodziw do hartowania stali. Zostały wyznaczone przez

autora doświadczalnie, metodą najmniejszych kwadratów, poprzez wykonanie szeregu pomiarów zarówno szybkich, jak i wolnych olejów hartowniczych [5, 6, 15, 16]. Dane na temat twardości uzyskano na podstawie testowych pasków ze stali AISI 1045. Autor stworzył następnie równania regresji HP_1 i HP_2 . Równanie regresji HP_1 zostało wyznaczone dla olejów hartowniczych i wodnych chłodziw hartowniczych, które podczas hartowania podlegają ciągłemu mieszaniu. Natomiast równanie HP_2 odnosi się do niemieszanych olejów hartowniczych. Należy dodać, iż nie ma korelacji pomiędzy współczynnikiem H a współczynnikami HP_1 i HP_2 .

Współczynnikiem, który również wykorzystuje wyniki uzyskane na podstawie zależności $T = f(v)$ oraz $T = f(czas)$ rejestrowanych angielską metodą próbki cylindrycznej, jest wprowadzony przez Tamurę współczynnik V , opisany według równania [1, 18, 20]:

$$V = \frac{T_{gw} - T_{wk}}{A_{c1} - M_s}$$

gdzie temperatury A_{c1} i M_s oznaczają temperatury początku przemiany perlitycznej i martenzytycznej i zależą od składu chemicznego stali.

Parametr V pozwala określić właściwość chłodzącą ośrodka dla danej stali na podstawie danych określonych z krzywej chłodzenia oraz obliczonych wartości temperatur A_{c1} i M_s . Temperatury te zależą od składu chemicznego stali zgodnie z równaniami:

- $A_{c1} = 739 - 22,8 C - 6,8 Mn + 18,2 Si + 11,7 Cr - 15 Ni - 6,4 Mo - 5 V - 28 Cu$
- $M_s = 532,6 - 396,7 C - 33 Mn - 1,4 Si - 14 Cr - 18 Ni - 11 Mo - 49,7 V + 31 Cu$

gdzie symbole pierwiastków oznaczają ich zawartość w % (m/m).

Właściwości wytypowanych surowców

W badaniach zastosowano surowce o czystości technicznej. Próbki olejów bazowych w mieszaninie z pakietem dodatków o masie 1,8 kg wytwarzano w mieszalniku o pojemności 2,5 dm³.

Wytypowane oleje bazowe uzyskiwane są z frakcji próżniowej ropy naftowej, selektywnie rafinowanej, rozpuszczal-

nikowo odparafinowanej i hydrorafinowanej. W tabelicy 1 przedstawiono ich właściwości fizykochemiczne.

W oparciu o przeprowadzoną diagnozę techniczną (wśród czołowych producentów pakietów jakościowych do olejów hartowniczych) do badań wytypowano trzy pakiety dodatków. W tabelicy 2 przedstawiono ich właściwości fizykochemiczne.

Tablica 1. Właściwości fizykochemiczne wytypowanych olejów bazowych

Olej bazowy	A	B	Metodyka
Klasa lepkości	ISO VG 22	ISO VG 32	PN-ISO 3448:2009
Lepkość kinematyczna [mm ² /s]: – w temperaturze 40°C – w temperaturze 100°C	21,790 4,245	33,490 5,621	PN-EN ISO 3104:2004
Wskaźnik lepkości	97	106	PN-ISO 2909:2009
Barwa	0,5	1,0	PN-ISO 2049:2010
Temperatura zapłonu [°C]	204	234	PN-EN ISO 2592:2008
Temperatura płynięcia [°C]	-18	-15	PN-ISO 3016:2005
Gęstość w temperaturze 20°C [g/cm ³]	0,862	0,865	PN-EN ISO 3838:2008P
Odparowalność oleju metodą Noacka [% (m/m)]	26,0	7,3	PN-C-04124:2000
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,01	0,01	PN-ISO 6619:2011P
Zawartość siarki [% (m/m)]	0,35	0,47	PN-EN ISO 8754:2007P
Skład grupowy [% (m/m)]: – węglowodory nasycone – węglowodory aromatyczne – związki polarne	80,9 17,5 1,6	83,8 16,2 –	PN-EN 15553:2009P

Tablica 2. Właściwości fizykochemiczne wytypowanych pakietów dodatków

Pakiet	1	2	3	Metodyka
Zalecane stężenie [% (m/m)]	2,0÷5,0	1,0÷5,0	3,0÷7,0	–
Temperatura komponowania z olejem bazowym [°C]	50÷70	50÷70	70÷90	–
Wygląd zewnętrzny	gęsta ciecz barwy brązowej	gęsta ciecz barwy ciemnobursztynowej	bardzo lepka ciecz barwy czarnej	wizualnie
Gęstość w temperaturze 15°C [g/cm ³]	0,930	0,910	0,998	PN-EN ISO 3838:2008P
Lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C [mm ² /s]	155	104	226	PN-EN ISO 3104:2004
Barwa	5,5	4	7	PN-ISO 2049:2010
Temperatura zapłonu [°C]	170	185	260	PN-EN ISO 2592:2008
Zawartość wapnia [% (m/m)]	0,55	1,30	–*	PN-V-04030:2000
Zawartość azotu [% (m/m)]	1,60	0,78		
Zawartość siarki [% (m/m)]	0,72	0,13		

* Producent w karcie informacji technicznej (TDS) charakteryzuje pakiet dodatków 3 jako mieszaninę węglowodorowych żywic (80%) i węglowodorów niearomatycznych (20%).

Porównanie pod względem właściwości termokinetycznych kompozycji oleju bazowego A z pakietami dodatków: 1, 2, 3

Lepkość kinematyczna oleju bazowego A w temperaturach 40°C i 100°C wynosi odpowiednio: 21,79 mm²/s oraz 4,245 mm²/s. Na podstawie kart informacji technicznych (TDS) producentów olejów hartowniczych, a także w oparciu o wycofaną normę branżową BN-75/0535-40 *Oleje OH do hartowania* (brak aktualnej normy), olej bazowy A zaklasyfikowano jako bazę do produkcji olejów hartowniczych niskotemperaturowych, których zalecana temperatura pracy wynosi od

40°C do 80°C. W porównawczym badaniu stosowano maksymalną temperaturę pracy oleju A, 80°C. Jako dodatek do oleju A wykorzystano pakiety: 1, 2 oraz 3. W kompozycji z olejem bazowym A stosowano zalecane przez producenta maksymalne i minimalne stężenia dodatków. Dla pakietu 1: 1% (m/m) i 5% (m/m), dla pakietu 2: 1% (m/m) i 5% (m/m), dla pakietu 3: 3% (m/m) i 7% (m/m). Dla zestawionych próbek wykonano pomiary termokinetyczne metodą angielskiej próbki

Tablica 3. Uzyskane parametry krzywych termokinetycznych dla odpowiednich kompozycji oleju bazowego A z pakietami dodatków 1–3

Olej bazowy	A					
	1		2		3	
Nazwa pakietu dodatków	1	5	1	5	3	7
Stężenie pakietu dodatków w oleju SN 100 [% (m/m)]	1	5	1	5	3	7
Temperatura pracy oleju [°C]	80					
Maksymalna szybkość chłodzenia [°C/s]	67,8	108,2	71,2	103,8	83,0	119,9
Temperatura przy maksymalnej szybkości chłodzenia [°C]	551,6	623,6	542,1	593,8	600,7	654,5
Szybkość chłodzenia w temperaturze 550°C [°C/s]	66,5	82,2	71,0	93,3	72,7	65,4
Szybkość chłodzenia w temperaturze 300°C [°C/s]	5,8	5,2	6,0	5,3	5,8	6,1
Czas potrzebny do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia do temperatury:						
– 600°C [s]	8,2	5,7	10,0	6,5	7,1	4,8
– 400°C [s]	13,3	9,8	15,1	10,0	11,8	9,7
– 200°C [s]	53,0	48,0	53,0	48,0	54,0	49,0
Temperatura początku fazy wrzenia pęcherzykowego [°C]	681,2	731,9	628,8	709,0	703,9	769,0
Temperatura początku fazy konwekcyjnej [°C]	380,0	382,6	397,8	368,7	381,5	511,3
Współczynnik intensywności chłodzenia <i>H</i>	1,0	1,4	1,1	1,4	1,2	1,6
Współczynnik <i>HP</i> ₁	143,4	187,6	156,8	227,8	161,0	138,8
Współczynnik <i>HP</i> ₂	278,8	494,1	174,6	637,2	356,5	235,1

cylicytrycznej, według PN-9950, a następnie na podstawie uzyskanych parametrów wyliczono współczynniki: H , HP_1 i HP_2 . Wykonano co najmniej trzy pomiary dla jednej próbki. W ta-

blicy 3 przedstawiono uzyskane parametry krzywych termokinetycznych (wartości średnie) dla odpowiednich kompozycji oleju bazowego A z pakietami dodatków 1–3.

Porównanie pod względem właściwości termokinetycznych kompozycji oleju bazowego B z pakietami dodatków: 1, 2, 3

Lepkość kinematyczna oleju bazowego B w temperaturach 40°C i 100°C wynosi odpowiednio: 33,49 mm²/s oraz 5,621 mm²/s. Na podstawie kart informacji technicznych (TDS) producentów olejów hartowniczych, a także w oparciu o wycofaną normę branżową BN-75/0535-40 *Oleje OH do hartowania* (brak aktualnej normy), olej bazowy B zaklasyfikowano jako bazę do produkcji olejów hartowniczych średniotemperaturowych, których zalecana temperatura pracy wynosi od 110 do 130°C. W niniejszym porównawczym badaniu stosowano maksymalną temperaturę pracy oleju B: 130°C. Jako dodatek do oleju B wykorzystano pakiety: 1, 2 oraz 3. W kom-

pozycji z olejem bazowym B stosowano zalecane przez producenta maksymalne i minimalne stężenia dodatków. Dla pakietu 1: 1% (m/m) i 5% (m/m), dla pakietu 2: 1% (m/m) i 5% (m/m), dla pakietu 3: 3% (m/m) i 7% (m/m). Dla zestawionych próbek wykonano pomiary termokinetyczne (metodą angielskiej próbki cylindrycznej), według PN-9950, a następnie na podstawie uzyskanych parametrów wyliczono współczynniki: H , HP_1 i HP_2 . Wykonano co najmniej trzy pomiary dla jednej próbki. W tabelicy 4 przedstawiono uzyskane parametry krzywych termokinetycznych (wartości średnie) dla odpowiednich kompozycji oleju bazowego B z pakietami dodatków 1–3.

Tablica 4. Uzyskane parametry krzywych termokinetycznych dla odpowiednich kompozycji oleju bazowego B z pakietami dodatków 1–3

Olej bazowy	B					
	1		2		3	
Nazwa pakietu dodatków	1	5	1	5	3	7
Stężenie pakietu dodatków w oleju SAE 10/95 [% (m/m)]	1	5	1	5	3	7
Temperatura pracy oleju [°C]	130					
Maksymalna szybkość chłodzenia [°C/s]	65,8	100,1	65,9	96,6	74,6	111,1
Temperatura przy maksymalnej szybkości chłodzenia [°C]	565,2	629,0	554,7	610,2	593,9	667,7
Szybkość chłodzenia w temperaturze 550°C [°C/s]	64,2	70,3	65,6	78,6	64,0	50,2
Szybkość chłodzenia w temperaturze 300°C [°C/s]	4,7	4,2	4,5	4,5	4,7	4,4
Czas potrzebny do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia do temperatury:						
– 600°C [s]	7,5	5,5	8,8	6,1	7,0	4,6
– 400°C [s]	15,3	11,3	16,5	11,4	13,9	11,2
– 200°C [s]	47,0	66,0	49,0	69,0	58,0	70,0
Temperatura początku fazy wrzenia pęcherzykowego [°C]	693,0	733,1	637,5	715,2	693,1	781,1
Temperatura początku fazy konwekcyjnej [°C]	406,1	405,6	414,7	398,9	411,6	525,3
Współczynnik intensywności chłodzenia H	0,9	1,3	1,0	1,3	1,1	1,4
Współczynnik HP_1	117,1	132,1	119,8	165,9	116,4	63,6
Współczynnik HP_2	155,7	277,6	62,9	369,4	132,1	238,0

Dyskusja wyników

W pracy przedstawiono wyniki badań grupy olejów bazowych, a także ich mieszanin w kompozycji z pakietami dodatków. Badane oleje hartownicze cechują się zróżnicowaną zdolnością chłodzącą. Umożliwiają więc hartowanie stali o szerokim zakresie hartowności.

Podczas porównywania termokinetycznych krzywych chłodzenia olejów hartowniczych należy patrzeć kompleksowo

na parametry krzywych chłodzenia oraz wyliczone na ich podstawie współczynniki, ponieważ termokinetyczne krzywe chłodzenia olejów hartowniczych przebiegają w inny sposób. W związku z tym w zależności od oczekiwanej końcowej struktury stali (zawartości bainitu i martenzytu) trzeba zwracać uwagę na inne parametry. Oleje hartownicze o dużych szybkościach chłodzenia charakteryzują się:

- wysoką maksymalną szybkością chłodzenia, temperaturą przy maksymalnej szybkości chłodzenia oraz szybkością chłodzenia w temperaturze 550°C, aby niekorzystne z punktu widzenia hartowania struktury perlitu pojawiły się w stali w niewielkim stopniu,
- krótkim czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatur 600°C i 400°C, ponieważ od około 727°C (temperatura austenizacji stali zależna między innymi od jej składu chemicznego) do około 400°C podczas chłodzenia powstają w stali struktury o charakterze perlitu, niekorzystne z punktu widzenia hartowania,
- niską szybkością chłodzenia w temperaturze 300°C oraz długim czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 200°C, ponieważ w zakresie temperatury od około 400°C do około 200°C podczas chłodzenia stali powstają struktury o charakterze bainitu oraz zaczyna tworzyć się martenzyt, najkorzystniejsze struktury stali z punktu widzenia hartowania,
- wysoką temperaturą początku fazy wrzenia pęcherzykowego. Jest to faza, w której chłodzenie hartowanego elementu przebiega najszybciej. W fazie tej olej hartowniczy chłodzi ze swoją maksymalną szybkością,
- niską temperaturą początku fazy konwekcyjnej, ponieważ jest to faza, w której chłodzenie hartowanego elementu przebiega najwolniej,
- wysokim współczynnikiem intensywności chłodzenia H . Jest to współczynnik korelujący laboratoryjną metodę próbki cylindrycznej według PN-ISO 9950 z przemysłową metodą według Grossmana [10], uwzględniającą wiele czynników wpływających na zdolność hartowniczą kąpielii przemysłowych, a więc obrazującą z innego punktu widzenia niż angielska metoda laboratoryjna właściwości chłodzące olejów hartowniczych,
- wysokimi współczynnikami HP_1 i HP_2 . W związku z tym, że wyniki uzyskiwane w toku badania chłodziw hartowniczych metodą próbki cylindrycznej bezpośrednio nie uwzględniają ruchu cieczy hartowniczej szczególnie istotny jest współczynnik HP_1 .

Porównano pod względem właściwości termokinetycznych wytworzone kompozycje olejów hartowniczych na bazie oleju A. Zestawienia dokonano przy proponowanych przez producentów maksymalnych i minimalnych stężeniach pakietów dodatków w oleju bazowym A, w maksymalnej dla olejów niskotemperaturowych temperaturze pracy, tj. 80°C.

Stwierdzono, że przy zastosowaniu w oleju bazowym A pakietów dodatków w minimalnych proponowanych przez producentów stężeniach (tj. 1% (m/m) pakietu 1, 1% (m/m) pakietu 2 oraz 3% (m/m) pakietu 3) olejem hartowniczym

o największej szybkości chłodzenia jest kompozycja oleju bazowego A z udziałem 3% (m/m) pakietu 3. Olej ten charakteryzuje się:

- najwyższą maksymalną szybkością chłodzenia, wynoszącą 83,0°C/s,
- najwyższą temperaturą przy maksymalnej szybkości chłodzenia, wynoszącą 600,7°C,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 600°C, wynoszącym 7,1 s,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 400°C, wynoszącym 11,8 s,
- najdłuższym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 200°C, wynoszącym 54 s,
- najwyższą temperaturą początku fazy wrzenia pęcherzykowego, wynoszącą 703,9°C,
- najwyższym współczynnikiem intensywności chłodzenia H , wynoszącym 1,2.

Stwierdzono, że przy zastosowaniu w oleju bazowym A pakietów dodatków w maksymalnych proponowanych przez producentów stężeniach, tj. 5% (m/m) pakietu 1, 5% (m/m) pakietu 2 oraz 7% (m/m) pakietu 3, najszybszym olejem hartowniczym jest kompozycja oleju bazowego A z udziałem 7% (m/m) pakietu 3. Olej ten charakteryzuje się:

- najwyższą maksymalną szybkością chłodzenia, wynoszącą 119,9°C/s,
- najwyższą temperaturą przy maksymalnej szybkości chłodzenia, wynoszącą 654,5°C,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 600°C, wynoszącym 4,8 s,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 400°C, wynoszącym 9,7 s,
- najdłuższym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 200°C, wynoszącym 49 s,
- najwyższą temperaturą początku fazy wrzenia pęcherzykowego, wynoszącą 769,0°C,
- najwyższym współczynnikiem intensywności chłodzenia H , wynoszącym 1,6.

Porównano pod względem właściwości termokinetycznych wytworzone kompozycje olejów hartowniczych na bazie oleju B. Zestawienia dokonano przy proponowanych przez producentów maksymalnych i minimalnych stężeniach pakietów dodatków w oleju bazowym B, w maksymalnej dla olejów średnotemperaturowych temperaturze pracy, tj. 130°C.

Stwierdzono, że przy zastosowaniu w oleju bazowym B pakietów dodatków w minimalnych proponowanych przez producentów stężeniach, tj. 1% (*m/m*) pakietu 1, 1% (*m/m*) pakietu 2 oraz 3% (*m/m*) pakietu 3, najszybszym olejem hartowniczym jest kompozycja oleju bazowego B z udziałem 3% (*m/m*) pakietu 3. Olej ten charakteryzuje się:

- najwyższą maksymalną szybkością chłodzenia, wynoszącą 74,6°C/s,
- najwyższą temperaturą przy maksymalnej szybkości chłodzenia, wynoszącą 593,9°C,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 600°C, wynoszącym 7,0 s,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 400°C, wynoszącym 13,9 s,
- najdłuższym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 200°C, wynoszącym 58 s,
- najwyższą temperaturą początku fazy wrzenia pęcherzykowego, wynoszącą 693,1°C,
- najwyższym współczynnikiem intensywności chłodzenia *H*, wynoszącym 1,1.

Stwierdzono, że przy zastosowaniu w oleju bazowym B pakietów dodatków w maksymalnych proponowanych przez producentów stężeniach, tj. 5% (*m/m*) pakietu 1, 5% (*m/m*) pakietu 2 oraz 7% (*m/m*) pakietu 3, najszybszym olejem hartowniczym jest kompozycja oleju bazowego B z udziałem 7% (*m/m*) pakietu 3. Olej ten charakteryzuje się:

- najwyższą maksymalną szybkością chłodzenia, wynoszącą 111,1°C/s,
- najwyższą temperaturą przy maksymalnej szybkości chłodzenia, wynoszącą 667,7°C,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 600°C, wynoszącym 4,6 s,
- najkrótszym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 400°C, wynoszącym 11,2 s,
- najdłuższym czasem potrzebnym do obniżenia temperatury sondy od temperatury zanurzenia (850°C) do temperatury 200°C, wynoszącym 70 s,
- najwyższą temperaturą początku fazy wrzenia pęcherzykowego wynoszącą 781,1°C,
- najwyższym współczynnikiem intensywności chłodzenia *H* wynoszącym 1,4.

Na podstawie uzyskanych wyników badań oraz informacji technicznych zadeklarowanych przez producenta pakietu 3, zauważono, że pakiet dodatków 3 (w przeciwieństwie do pakietów dodatków 1 i 2) jest mieszaniną składającą się z węglowodorowych żywic i węglowodorów niearomatycznych. W swoim składzie nie zawiera pierwiastków typowych dodatków wchodzących w skład pakietów do olejów hartowniczych: sulfonianów metali alkalicznych oraz obojętnych i nadzasadowych sulfonianów i fenolanów ziem alkalicznych [14]. Pomimo tego pakiet 3, w największym stopniu – analogicznie do pakietów 1 i 2, zwiększa szybkość chłodzenia olejów hartowniczych.

Podsumowanie

Właściwości mechaniczne stali po obróbce cieplnej zależą od składu chemicznego stali oraz od parametrów procesu obróbki cieplnej. Obróbkę cieplną większości stali konstrukcyjnych można podzielić na proces hartowania oraz tzw. odpuszczanie. Zadaniem procesu hartowania jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości (twardości) stali, natomiast odpuszczanie ma na celu usunięcie naprężeń hartowniczych oraz przede wszystkim podniesienie udurowienia (odporności na pękanie) zahartowanej stali kosztem zmniejszenia twardości.

Głównym celem procesu hartowania jest uzyskanie w przeważającej części przekroju mikrostruktury martenzytycznej. Od ilości martenzytu w strukturze stali, powstającej podczas hartowania, zależą właściwości mechaniczne po końcowej obróbce cieplnej. Podczas hartowania stali stosuje się ciekłe ośrodki chłodzące (wodę i roztwory wodne soli, wodorotlenków, polimerów oraz oleje hartownicze). Im niższa jest hartowność stali (zdolność do tworzenia w trakcie hartowania struktury martenzytycznej), tym wyższa jest

szybkość chłodzenia pozwalająca uzyskać mikrostrukturę martenzytyczną. Wyższa szybkość chłodzenia przyczynia się jednak do powstawania większych naprężeń cieplnych i strukturalnych, które mogą spowodować pojawienie się wad (pęknięć hartowniczych, zmian kształtu wskutek odkształceń plastycznych wywoływanych powstającymi naprężeniami cieplnymi i strukturalnymi) [19]. Dlatego też ważnym zagadnieniem jest właściwy dobór ośrodka hartowniczego, pozwalającego uzyskać żadaną mikrostrukturę zapewniającą wymagane właściwości mechaniczne po końcowej obróbce cieplnej, przy możliwie niskich naprężeniach cieplnych. Znajomość charakterystyk ośrodków chłodzących jest niezwykle pomocna przy planowaniu procesów obróbki cieplnej. Wśród stosowanych w obróbce cieplnej ciekłych ośrodków hartowniczych ważną rolę odgrywają oleje hartownicze, które umożliwiają uzyskanie mikrostruktury martenzytycznej przy możliwie niskich naprężeniach cieplnych w stali o większej hartowności.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 6, s. 430–437, DOI: 10.18668/NG.2017.06.08

Artykuł nadesłano do Redakcji 16.12.2016 r. Zatwierdzono do druku 31.03.2017 r.

Artykuł opracowano na podstawie pracy statutowej pt.: *Analiza zdolności chłodzącej olejów hartowniczych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0078/TO/16/01, nr archiwalny: DK-4100-72/16.

Literatura

- [1] Adrian H.: *Oleje hartownicze – analiza zdolności chłodzącej*. Stal, Metale i Nowe Technologie, maj–czerwiec 2013, s. 46–52.
- [2] Adrian H., Adrian A., Augustyn-Pieniążek J., Głowacz E.: *Obliczanie własności mechanicznych stali konstrukcyjnych po hartowaniu i odpuszczaniu*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2012, vol. 79, nr 4, s. 232–237.
- [3] Adrian H., Adrian A.: *Numeryczne obliczanie twardości stali konstrukcyjnych po obróbce cieplnej*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2007, vol. 74, nr 4, s. 196–201.
- [4] Adrian H., Osika M., Franek J., Augustyn-Pieniążek J., Marynowski P.: *Analiza współczynnika przejmowania ciepła wybranych olejów hartowniczych*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2013, nr 4, s. 267–273.
- [5] Bodin J., Segerberg S.: *Measurement and evaluation of the power of quenching media for hardening*. Heat Treatment of Metals 1993, vol. 20, nr 1, s. 15–23.
- [6] Bodin J., Segerberg S.: *Measurement and evaluation of the quenching power of quenching media for hardening in Quenching and Carburising*. Proceedings of the Third International Seminar of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, The Institute of Materials, Melbourne, Australia 1993, s. 33–54.
- [7] Chen C., Zhou J.: *Discussions on Segerberg formula concerning the hardening power of quenchants*. Journal of Xi'an Jiaotong University 2002, vol. 36, nr 1, s. 78–82.
- [8] Gęstwa W., Przyłęcka M.: *Ocena zdolności chłodzących różnych ośrodków hartowniczych ze względu na uzyskiwaną twardość węgloutwardzanych elementów*. Inżynieria Materiałowa 2006, vol. 27, nr 3, s. 143–146.
- [9] IVF Smart Quench, Users guide, 4th ed., March 2007.
- [10] Luty W.: *Chłodziwa hartownicze*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986, s. 11–41.
- [11] Łapa M.: *Oleje do hartowania*. Nafta-Gaz 2004, nr 1, s. 26–35.
- [12] Łapa M., Bednarska A.: *Ocena wpływu olejów bazowych oraz charakteru chemicznego dodatków na szybkość chłodzenia olejów hartowniczych*. Instytut Technologii Nafty, Kraków 2000.
- [13] Łapa M., Steinmiec F., Bednarska A.: *Opracowanie technologii olejów do hartowania z zastosowaniem niekonwencjonalnych baz olejowych*. Instytut Technologii Nafty, Kraków 2000.
- [14] Pomykała K., Skibińska A.: *Hartowanie stali, klasyfikacja, skład i charakterystyka olejów hartowniczych*. Nafta-Gaz 2016, nr 4, s. 9–17, DOI 10.18668/NG.2016.04.08.
- [15] *Przemysłowe środki smarne. Poradnik*. Total Sp. z o.o., 2003, rozdział XVIII.
- [16] Przyłęcka M., Gęstwa W.: *The Possibility of Correlation of Hardening Power for Oils and Polymers of Quenching Media*. Hindawi Publishing Corporation, Materials Science and Engineering 2009, nr artykułu 843281.
- [17] Segerberg S.: *Classification of quench oils: a method of comparison*. Heat Treating 1988, s. 30–33.
- [18] Tamura I., Shimizu N., Okadu T.: *A method to judge the quench-hardening of steel from cooling curves of quenching oils*. Journal of Heat Treating 1984, vol. 3, s. 335–343.
- [19] Totten G.E., Bates C.E., Clinton N.A.: *Handbook of quenchants and quenching technology*. 1995, s. 52–86.
- [20] Trzaska J., Dobrzański L.: *Computer programme for prediction steel parameters after heat treatment*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2007, vol. 24, s. 171–174.



Mgr inż. Kamil POMYKAŁA
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie Olejów, Środków Smarowych i Asfaltów
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: kamil.pomykala@inig.pl