

A STUDY INTO HEAT RESISTANCE OF VALVE STEELS

Sławomir Szewczyk

Lublin University of Technology, Department of Materials Engineering
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland
tel.: +48 81 5381212, fax.: +48 81 5250808, e-mail: s.szewczyk@pollub.pl

Abstract

The paper presents the results of a study into the high temperature oxidation of H10S2M and 50H21G9N4 steels, currently the most commonly used valve steels. The study also comprised the low-alloy 40HM steel used for internal-combustion engine intake valves as well as the H23N18 austenitic steel. The study demonstrated a remarkably high decrease of the heat resistance of the chromium manganese 50H21G9N4 steel at temperatures exceeding 800°C. The oxidation rate at 900°C exceeded the arbitrary $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ heat resistance limit by over six times. Such a high decrease of heat resistance of 50H21G9N4 seems related to increased fragility of the scale containing manganese oxides, which was confirmed by a macroscopic study. The austenitic chromium-nickel H23N18 steel revealed the highest level of heat resistance but its low mechanical properties at temperatures exceeding 700°C considerably reduces its potential use in exhaust valves. The present study necessitates future research into the development of ceramic composite coatings that would constitute thermal barriers on valve surfaces exposed to hot exhaust gases.

Keywords: internal-combustion engine, valve steels, high-temperature steel oxidation, heat resistance

BADANIA ŻAROODPORNOŚCI STALI ZAWOROWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad szybkością wysokotemperaturowego utleniania obecnie najczęściej stosowanych stali zaworowych H10S2M i 50H21G9N4. Badaniami objęto również stal niskostopową 40HM stosowaną na zawory dolotowe silników oraz stal austenityczną H23N18. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono zaskakująco duży spadek żaroodporności stali chromowo-manganowej 50H21G9N4 w temperaturach przekraczających 800°C. Szybkość utleniania tej stali w temperaturze 900°C ponad sześciokrotnie przekroczyła umowną wartość $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ wyznaczającą granicę żaroodporności stali. Tak duży spadek żaroodporności stali 50H21G9N4 należy wiązać ze zwiększoną kruchością zgorzeliny zawierającej tlenki manganu, co potwierdziły badania makroskopowe. W przeprowadzonych badaniach najwyższą żaroodporność wykazywała stal austenityczna chromowo-niklowa H23N18, ale możliwości zastosowania tej stali na zawory wylotowe są bardzo ograniczone ze względu na stosunkowo niskie własności wytrzymałościowe w temperaturach przekraczających 700°C. W świetle przeprowadzonych badań w pełni uzasadniona jest konieczność podjęcia prac nad opracowaniem ceramicznych powłok kompozytowych stwarzających bariery cieplne na powierzchniach zaworów narażonych na działanie gorących gazów spalinowych.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, zawory, stale zaworowe, wysokotemperaturowe utlenianie stali, żaroodporność

1. Wprowadzenie

Zawór wylotowy jest jedną z najbardziej obciążonych cieplnie części silnika spalinowego. Największe obciążenia występują w początkowym okresie otwarcia zaworu, w czasie którego gazy spalinowe przepływają przez szczelinę z prędkością przekraczającą 600 m/s przy temperaturze 900-1000°C. Wskutek ograniczonego odprowadzenia ciepła temperatura grzybka osiąga lokalnie wartość 700-800°C, a w najbardziej obciążonych silnikach o zapłonie iskrowym dochodzi do 900°C. Duże znaczenie ma tutaj prędkość obrotowa silnika – im jest ona większa, tym krótszy jest

czas zetknięcia zaworu z gniazdem i tym mniej ciepła zdąży odpłynąć.

Zawory dolotowe pracują w znacznie lepszych warunkach, ponieważ są chłodzone przez powietrze lub mieszaninę palną dopływającą do cylindra. Dzięki czemu temperatury pracy tych zaworów są umiarkowane i przeważnie nie przekraczają 400°C.

Szczególnie istotnym zagadnieniem jest możliwie długotrwałe zachowywanie przez zawory zadowalającej szczelności w okresach zamknięcia. Niedostateczna szczelność zaworów dolotowych powoduje bowiem spadek mocy silnika i wzrost jednostkowego zużycia paliwa. Nieszczelność zaworów wylotowych w mniejszym stopniu wpływa na moc silnika, natomiast głównym problemem jest tutaj gwałtowny wzrost intensywności ich zużycia w wyniku przedmuchu spalin, co często prowadzi do całkowitego zniszczenia grzybków wskutek wypalenia [1-6].

2. Materiały stosowane na zawory

W świetle przedstawionych warunków pracy materiały stosowane na zawory wylotowe silników spalinowych powinny spełniać następujące ważniejsze wymagania:

- dobra odporność na działanie wysokich temperatur oraz wystarczająca wytrzymałość na obciążenia udarowe, szczególnie w przypadku silników o ZI osiągających prędkości obrotowe ponad 5000 obr/min,
- odporność na korozję i erozję zarówno w niskich, jak i wysokich temperaturach, zwłaszcza przy stosowaniu benzyny zawierającej czteroetylen ołowiu $Pb(C_2H_5)_4$,
- stabilność struktury materiału w podwyższonych temperaturach, jak i z upływem czasu,
- względnie duża twardość w podwyższonych temperaturach pracy,
- dobra odporność na ścieranie,
- długotrwałe utrzymywanie szczelności zaworów,
- duży współczynnik przewodnictwa cieplnego z uwagi na konieczność odprowadzenia ciepła przejmowanego od spalin,
- mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, od którego zależy luz między trzonkami zaworów a prowadnicami,
- podatność na obróbkę plastyczną i dobrą skrawalność,
- umiarkowany koszt wytwarzania

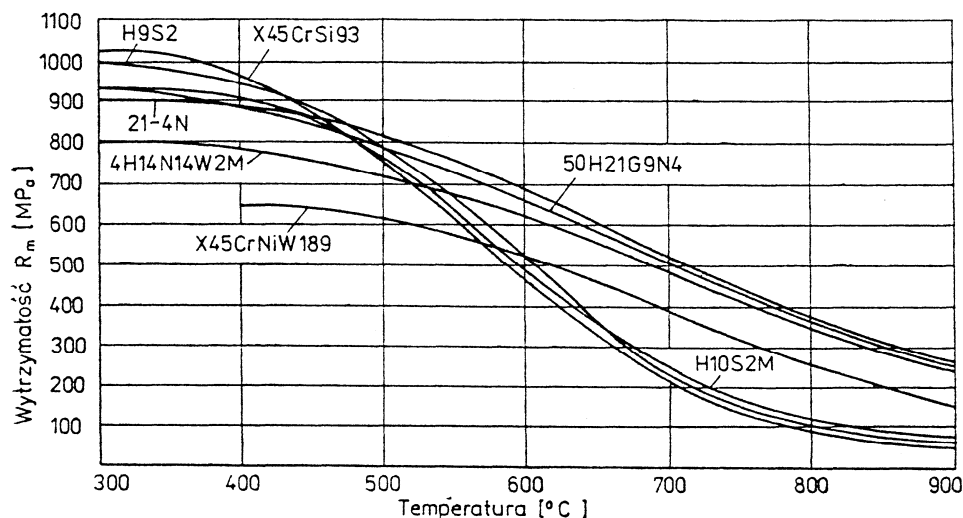
Jednoczesne spełnienie wszystkich podstawowych wymagań stawianych zaworom jest możliwe tylko w przypadku tzw. zaworów składanych, w których grzybek i trzonek są wykonane z dwu różnych materiałów. Jedynie stale stopowe o specjalnie ukształtowanych strukturach swymi właściwościami zbliżają się do właściwości zaworów składanych.

Ze względu na łatwiejsze warunki pracy i temperatury przeważnie nie przekraczające 400°C, zawory dolotowe wykonuje się ze stali konstrukcyjnych niskostopowych. Najczęściej są to stale chromowe lub chromowo-niklowe o zawartości chromu i niklu po około 1%, z ewentualnym dodatkiem molibdenu około 0,2% (tabl. 1). W przypadku występowania podwyższonych temperatur pracy są stosowane również stale żaroodporne przeznaczone w zasadzie na zawory wylotowe, jak np. stale ferrytyczne chromowo-krzemowe, tzw. silchromy zawierające około 9% chromu i około 2,5% krzemu (np. krajowa stal zaworowa H9S2 lub niemiecka X45CrSi93). Poza tym niektóre z nich mają dodatek molibdenu w ilości około 0,8% (np. H10S2M). Ze względu na podwyższoną zawartość Cr i Si zakres temperatur przemiany $\alpha \rightarrow \gamma$ przesunięty jest w tych stalach do ponad 900°C, stąd temperatury austenitowania wynoszą 1010-1060°C, hartowanie w oleju [10-12]. Po odpuszczaniu w zakresie 700-780°C osiąga się wytrzymałość rzędu 880-930 MPa. Ale jak wynika z wykresu przedstawionego na rysunku 1 wytrzymałość doraźna silchromów w temperaturze 800°C jest już dość niska. Na silnie obciążone zawory wylotowe stosuje się stale austenityczne utwardzane wydzieleniowo, jak np. 4H14N14W2M i 50H21G9N4, które jeszcze w zakresie temperatur 800-900°C wykazują wystarczającą wytrzymałość doraźną (rys. 1).

Tab. 1. Skład chemiczny stali zaworowych [8, 9]
 Tab. 1. Chemical composition of valve steels [8, 9]

Lp.	Gatunek stali	Skład chemiczny [%]								
		C	Mn	Si	P max	S max	Cr	Ni	Mo	Inne
1	40HM	0,38	0,40	0,17	0,035	0,035	0,90	max 0,30	0,15	-
		- 0,45	- 0,70	- 0,37			- 1,20		- 0,25	
2	38HNM	0,34	0,50	0,17	0,035	0,035	0,60	0,70	0,15	-
		- 0,43	- 0,80	- 0,37			- 0,90	- 1,00	- 0,25	
3	H9S2	0,35	max 0,7	2,0	0,035	0,030	8,0	max 0,60	-	-
		- 0,45		- 3,0			- 10,0			
4	H10S2M	0,35	max 0,7	1,9	0,030	0,030	9,0	max 0,50	0,70	-
		- 0,45		- 2,6			- 10,5		- 0,90	
5	4H14N14W2M	0,40	max 0,7	max	0,035	0,030	13,0	13,0	0,25	W=2,0
		- 0,50		max 0,8			- 15,0	- 15,0	- 0,40	- 2,75
6	50H21G9N4	0,47	8,0	max 0,5	0,030	0,030	20,0	3,25	-	N=0,38
		- 0,57	- 11,0				- 22,0	- 4,50		

Obróbka cieplna tych stali polega na przesycaaniu i starzeniu, w wyniku czego struktura stali jest austenityczna z węglnikami przeważnie typu $M_{23}C_6$ wydzielonymi z roztworu stałego podczas starzenia [13, 14]. Na przykład krajowa stal zaworowa 50H21G9N4 przesycaana z temperatury 1150-1170°C w wodzie i starzona w 740°C przez 10-14h z chłodzeniem w powietrzu, uzyskuje wytrzymałość około 1050 MPa. Po obróbce cieplnej stal zaworowa 4H14N14W2M wykazuje w temperaturze otoczenia niższe własności mechaniczne w stosunku do stali 50H21G9N4, ale w zakresie temperatur 800-900°C różnice są już małe (rys 1).



Rys. 1. Własności mechaniczne stali zaworowych w podwyższonych temperaturach [7]
 Fig. 1. Mechanical properties of valve steels at elevated temperatures [7]

Stale te można również poddawać obróbce cieplno-plastycznej powodującej to, że podczas następnego starzenia wydzielanie węglików jest bardziej równomierne, a własności wytrzymałościowe i plastyczne korzystniejsze niż stali po obróbce cieplnej zwykłej [15, 16].

Główną zaletą stali 50H21G9N4 (podobny gatunek stali wg oznaczeń amerykańskich 21-4N) jest dobra odporność na korozję powodowaną przez tlenki ołowiu, dzięki czemu jest ona szeroko stosowana w nowoczesnych silnikach samochodowych. Stale austenityczne Cr-Ni pod tym względem zachowują się gorzej, co powoduje niekiedy konieczność zabezpieczenia brzegu grzybka przez napawanie warstwą stellitu [20].

3. Badania szybkości utleniania stali zaworowych.

Konsekwencją wprowadzenia do eksploatacji w silnikach spalinowych o zapłonie iskrowym benzyn bezołowiowych jest zwiększone zużycie przylgni grzybków i gniazd zaworowych, zwłaszcza zaworów wylotowych, spowodowane utleniającym działaniem tlenu zawartego w spalinach [17]. Zagadnienie przyspieszonego zużycia zaworów wylotowych jest o tyle ważne, że w latach 90-tych wzrosło gwałtownie na świecie zapotrzebowanie na benzyny bezołowiowe, a ostatnio wprowadzono nawet zakaz sprzedaży benzyn zawierających związki ołowiu w takich krajach, jak: Austria, Japonia, Kanada, itp.

W związku z tym podjęto badania nad szybkością wysokotemperaturowego utleniania obecnie najczęściej stosowanych stali zaworowych w gatunku H10S2M i 50H21G9N4. Dla porównania badaniom poddano również stal konstrukcyjną niskostopową 40HM oraz żaroodporną stal stopową H23N18 zawierającą około 23% chromu i 18% niklu oraz węgiel w ilości około 0,1%.

W celu zbliżenia się do rzeczywistych warunków pracy zaworów wylotowych, badania szybkości utleniania próbek laboratoryjnych przeprowadzono w warunkach cyklicznych zmian temperatury [18, 19]. Badane próbki utleniano w elektrycznym piecu oporowym o ustabilizowanej temperaturze przez znormalizowany okres czasu wynoszący 120 godzin, podczas którego co 24 godz. wyjmowano i chłodzono próbki w spokojnym powietrzu. Podczas chłodzenia obserwowano zachowanie się zgorzeli na próbkach i sposób utleniania. Badania przeprowadzono dla najwyższych spotykanych temperatur pracy zaworów wylotowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym, tj. 800° i 900°C. Z każdego gatunku materiału badaniom poddano 3 szt. próbek utlenianych w tej samej temperaturze. Szybkość utleniania V pojedynczej próbki wyznaczano wg następującego wzoru [19]:

$$V = \frac{G_0 - G_{120}}{120 \cdot S} \quad [\text{g} / \text{m}^2 \cdot \text{h}], \quad (1)$$

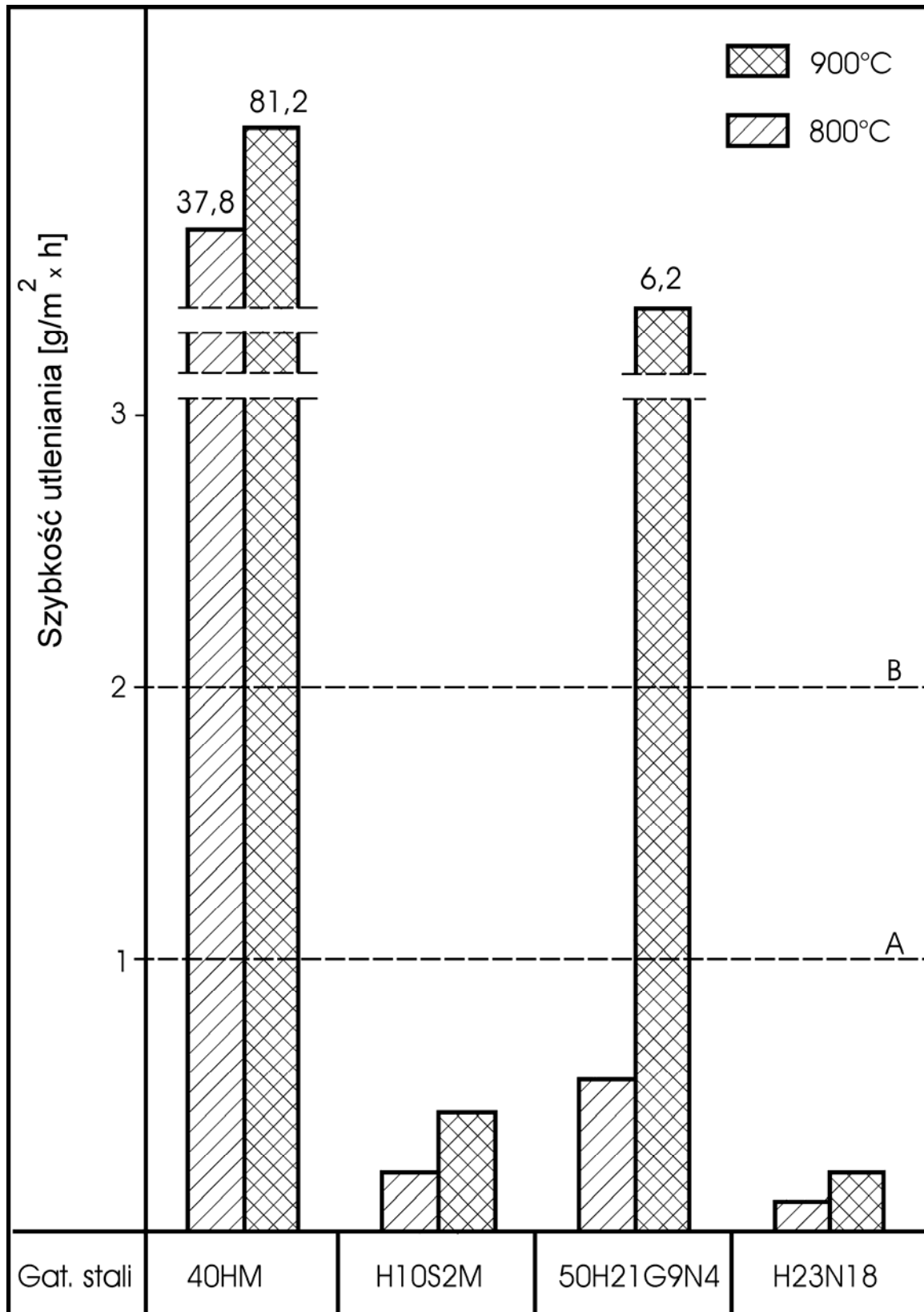
gdzie:

G_0 – masa próbki nie utlenionej [g],

G_{120} – masa próbki utlenionej w czasie 120 godz., po usunięciu zgorzeli [g],

S – całkowita powierzchnia próbki, mierzona przed utlenieniem [m^2].

Po obliczeniu według wzoru (1) szybkości utleniania dla pojedynczych próbek utlenionych przy tej samej temperaturze, wyznaczono średnią wartość szybkości utleniania V_{sr} . Syntezę wyników badań szybkości utleniania stali zaworowych oraz stali 40HM i H23N18 przedstawiono na wykresie z rysunku 2. Zgodnie z przewidywaniami szybkość utleniania stali niskostopowej 40HM przekroczyła kilkudziesięciokrotnie graniczną wartość szybkości utleniania przyjętą dla stali żaroodpornych [19]. Tak duża wartość szybkości utleniania spowodowana jest niezdolnością tej stali do tworzenia zwartej i dobrze przylegającej zgorzeli. Już po 24 godzinnym utlenianiu próbek ze stali 40HM obserwowano wyraźną porowatość i lokalne odpadanie zgorzeli, a w każdym kolejnym cyklu nagrzewania grubość jej znacznie rosła.



Rys. 2. Wyniki badań szybkości utleniania stali zaworowych H10S2M i 50H21G9N4 oraz dla porównania stali konstrukcyjnej niskostopowej 40HM i stali żaroodpornej chromowo-niklowej H23N18:

A i B – umowne wartości szybkości utleniania do wyznaczenia granicy żaroodporności

Fig. 2. Oxidation rates of H10S2M and 50H21G9N4 valve steels compared with low alloy 40HM structural steel and H23N18 heat resistant nickel-chrome steel:

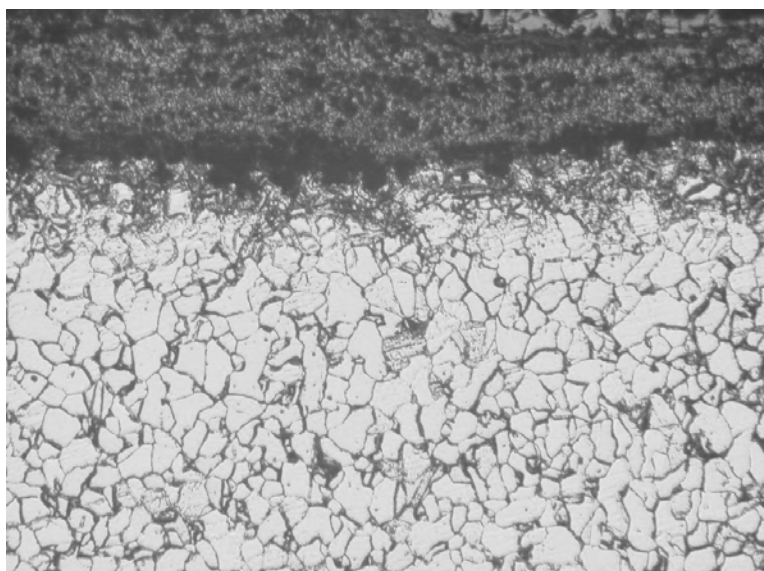
A and B arbitrary corrosion rates used to evaluate heat resistance

Własności ochronne zgorzelin zależą przede wszystkim od ich zwartości. Jeżeli powstająca zgorzelina jest porowata, wówczas nie stanowi ona większej przeszkody dla dopływu tlenu do powierzchni fazy metalicznej i proces korozji przebiega z dużą szybkością. Jeżeli natomiast tworzy się zgorzelina zwarta, to od pierwszej chwili powierzchnia metalu zostaje oddzielona od środowiska agresywnego ciągłą warstwą produktów utleniania i dalszy postęp korozji może zachodzić jedynie wskutek dyfuzyjnego transportu tlenu lub składników stopu przez zgorzelinę.

Taki proces zachodził podczas utleniania w powietrzu próbek ze stali H10S2M, 50H21G9N4 oraz H23N18. W badaniach przeprowadzonych w temperaturze 800°C wymienione gatunki stali wykazały zadowalającą żaroodporność, a szybkość ich utleniania nie przekroczyła umownej wartości $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ wyznaczającej granicę żaroodporności stali (rys. 2). Należy jednak zaznaczyć, że proces korozji stali 50H21G9N4 przebiegał z szybkością ponad dwukrotnie większą w porównaniu do stali H10S2M.

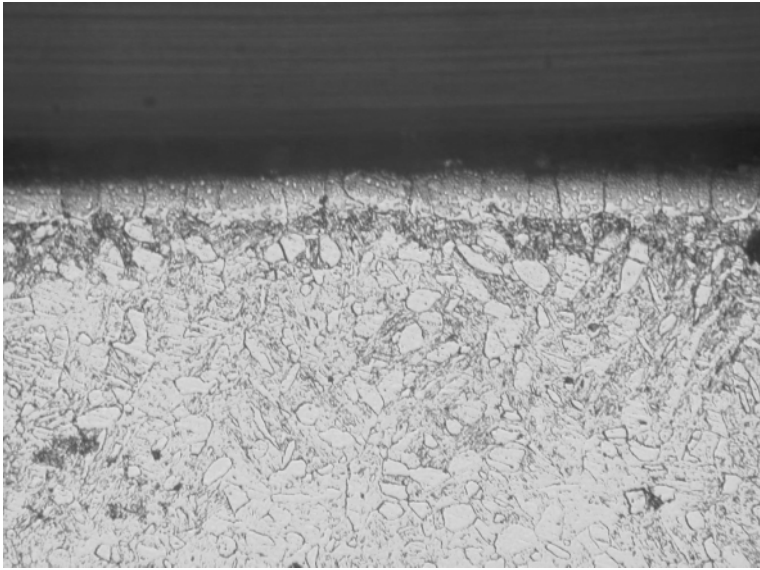
Po podwyższeniu temperatury do 900°C wystarczającą żaroodporność wykazały próbki ze stali H10S2M i H23N18, natomiast dla stali chromowo-manganowej 50H21G9N4 stwierdzono duży spadek odporności na utlenianie. Jak wykazały przeprowadzone pomiary, szybkość utleniania tej stali w temperaturze 900°C ponad sześciokrotnie przekroczyła umowną wartość wyznaczającą granicę żaroodporności stali. Tak duży spadek żaroodporności stali 50H21G9N4 należy wiązać ze zwiększoną kruchością zgorzeliny zawierającej tlenki manganu, co potwierdziły badania makroskopowe. Podczas kolejnych cykli nagrzewania i chłodzenia próbek ze stali 50H21G9N4 obserwowano zmniejszoną przyczepność i lokalne odpadanie zgorzeliny w postaci cienkich łusek. Zaobserwowane zjawisko w istotny sposób ogranicza możliwość stosowania tej stali w temperaturach przekraczających 800°C, szczególnie w warunkach cyklicznych zmian temperatur, jak ma to miejsce w zaworach wylotowych najsilniej obciążonych silników spalinowych o ZI.

W przeprowadzonych badaniach najwyższą żaroodporność wykazywała stal austenityczna chromowo-niklowa H23N18, ale możliwości zastosowania tej stali na zawory wylotowe są bardzo ograniczone. Mała zawartość węgla uniemożliwia utwardzenie wydzieleniowe struktury tej stali za pomocą węglików wydzielonych z roztworu stałego.



Rys. 3.
Mikrostruktura stali 40HM po próbie utleniania w temperaturze 900°C i w czasie 120 h. Struktura ferrytyczna z niewielką ilością perlitu. Od strony powierzchni widoczna gruba warstwa porowatych produktów korozji. Pow. 175x, traw. 3% nital

Fig. 3.
Microstructure of 40HM steel oxidized at 900°C for 120 h. Ferritic microstructure with low pearlite content. Thick layer of porous corrosion products is seen at the surface. Magn. 175x, 3% nital etched

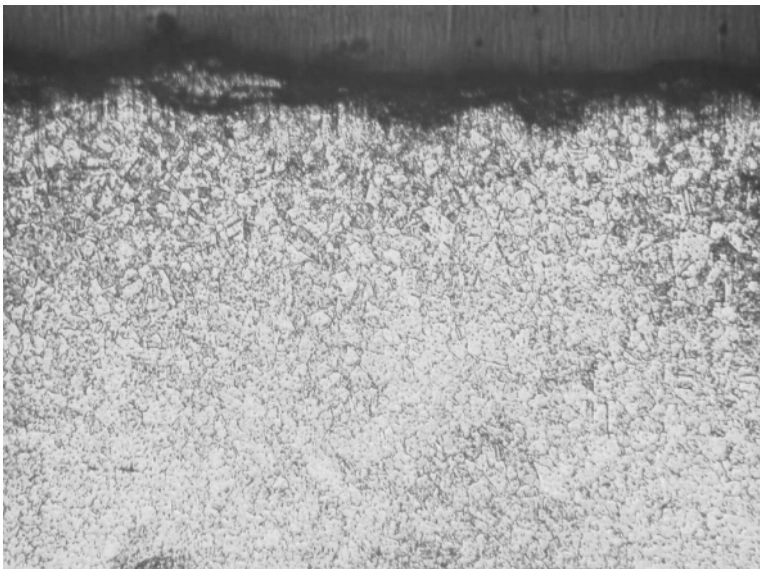


Rys. 4.

Mikrostruktura stali H10S2M po próbie utleniania w temperaturze 900°C i w czasie 120 h. Struktura złożona z ferrytu i częściowo skoagulowanych węglików. Widoczne powierzchniowe odwęglenie próbki. Pow. 175x, traw. HCl-HNO₃

Fig. 4.

Microstructure of H10S2M steel oxidized at 900°C for 120 h. Ferritic microstructure with partly coagulated carbides. Surface decarburization of the specimen is seen. Magn. 175x, HCl-HNO₃ etched

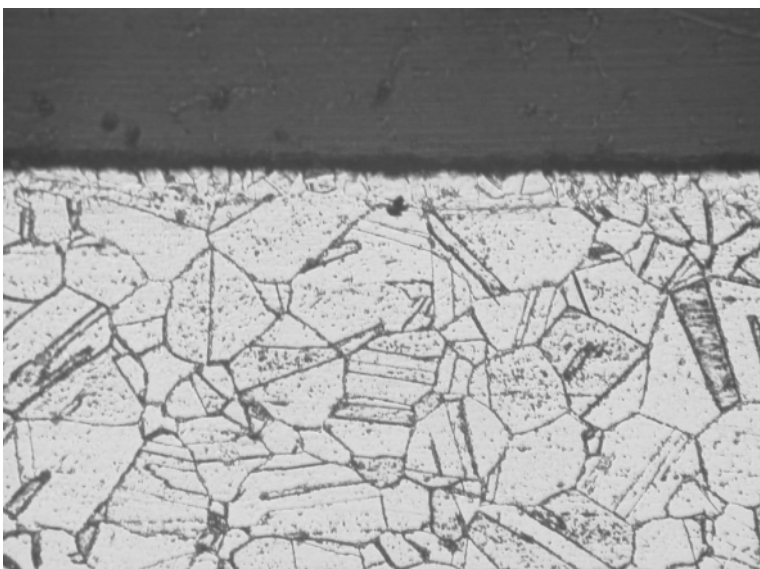


Rys. 5.

Mikrostruktura stali 50H21G9N4 po próbie utleniania w temperaturze 900°C i w czasie 120 h. Struktura austenityczna z licznymi wydzieleniami węglików M₂₃C₆ rozmieszczonymi głównie na granicach ziarn. Od strony powierzchni widoczna cienka warstwa kruchych produktów korozji. Pow. 175x, traw. HCl-HNO₃

Fig. 5.

Microstructure of 50H21G9N4 steel oxidized at 900°C for 120 h. Austenitic microstructure with numerous M₂₃C₆ carbides located mostly at grain boundaries. Thin layer of brittle corrosion products is seen on the free surface. Magn. 175x, HCl-HNO₃ etched



Rys. 6.

Mikrostruktura stali 23N18 po próbie utleniania w temperaturze 900°C i w czasie 120 h. Struktura austenityczna z wydzieleniami węglików M₂₃C₆. Od strony powierzchni widoczna cienka warstwa zwarzonych produktów korozji. Pow. 175x, traw. HCl-HNO₃

Fig. 6.

Microstructure of 23N18 steel oxidized at 900°C for 120 h. Austenitic microstructure with M₂₃C₆ carbides. Thin, compact layer of corrosion product appears at the surface. Magn. 175x, HCl-HNO₃ etched

4. Wnioski z badań

W oparciu o analizę warunków pracy zaworów dolotowych i wylotowych silników spaliny-
wych oraz przeprowadzone badania odporności stali na utlenianie w wysokich temperaturach,
można przedstawić następujące ważniejsze wnioski:

1. Konsekwencją coraz szerszego stosowania w silnikach spalinowych o ZI benzyn bezołowiowych jest zwiększone zużycie grzybków i gniazd zaworowych, zwłaszcza zaworów wylotowych, spowodowane utleniającym działaniem tlenu zawartego w spalinach.
2. W związku z tym podjęto badania nad szybkością wysokotemperaturowego utleniania obecnie najczęściej stosowanych stali zaworowych H10S2M i 50H21G9N4. Dla porównania badaniami objęto również stal niskostopową 40HM stosowaną na zawory dolotowe silników oraz stal austenityczną H23N18.
3. Badania przeprowadzono w warunkach cyklicznych zmian temperatury w celu zbliżenia się do rzeczywistych warunków pracy zaworów wylotowych silników spalinowych.
4. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono zaskakująco duży spadek żaroodporności stali chromowo-manganowej 50H21G9N4 w temperaturach przekraczających 800°C. Szybkość utleniania tej stali w temperaturze 900°C ponad sześciokrotnie przekroczyła umowną wartość 1g/(m²·h) wyznaczającą granicę żaroodporności stali.
5. Zadawalającą żaroodporność podczas utleniania w temperaturze 900°C wykazały próbki ze stali H10S2M i H23N18. Jednak możliwości stosowania tych stali na zawory wylotowe są bardzo ograniczone ze względu na stosunkowo niskie własności wytrzymałościowe w temperaturach przekraczających 700°C.
6. W świetle przeprowadzonych badań w pełni uzasadniona jest konieczność podjęcia prac nad opracowaniem ceramicznych powłok kompozytowych stwarzających bariery cieplne na powierzchniach zaworów narażonych na działanie gorących gazów spalinowych. Opracowanie takich warstw umożliwi znaczne ograniczenie niekorzystnego gradientu temperatur w grzybkach zaworów, a jednocześnie w dużym stopniu zabezpieczy powierzchnie przed utleniającym działaniem spalin.

Literatura

- [1] Bernhard, M., Dobrzyński, S., Loth E., *Silniki samochodowe*, WKiŁ, Warszawa 1988.
- [2] Wajand, J.A., Wajand, J.T., *Tłokowe silniki spalinowe, średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2000.
- [3] Matzke, W., *Projektowanie rozrządu czterosurowych silników trakcyjnych*, WKiŁ, Warszawa 1989.
- [4] Wiśniewski, S., *Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych*, WNT, Warszawa 1983.
- [5] Wiśniewski, S., *Obciążenia cieplne silników tłokowych*, WKiŁ, Warszawa 1972.
- [6] Włodarski, J.K., *Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne*, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [7] Praca zbiorowa pod red. Z. Jaśkiewicza, *Poradnik inżyniera samochodowego – elementy i materiały*, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [8] Polska Norma, *PN-89/H-84030/04, Stal stopowa konstrukcyjna*.
- [9] Polska Norma, *PN-71/H-86022, Stal żaroodporna*.
- [10] Przybyłowicz, K., *Metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2003.
- [11] Blicharski, M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*, WNT, Warszawa 2003.
- [12] Przybyłowicz, K., *Podstawy teoretyczne metaloznawstwa*, WNT, Warszawa 1999.

- [13] Maciejny, A., Hernas, A., *Żarowytrzymałe stopy metali*. PAN, Komisja Hutnictwa, Wyd. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1989.
- [14] Mikułowski, B., *Stopy żaroodporne i żarowytrzymałe – nadstopy*, Wyd. AGH, Kraków 1997.
- [15] Dobrzański, L.A., Hajduczek, E., Marciniak, J., Nowosielski, R., *Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych*, WNT, Warszawa 1990.
- [16] Adamczyk, J., Griner, S., *Wpływ obróbki cieplno-mechanicznej na strukturę i własności mechaniczne stali zaworowej 50H21G9N4*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z. 55, Gliwice 1975 r.
- [17] Janik, R., *Recesja gniazd zaworów wylotowych w silnikach spalinowych ZI – nowa metoda badań*, 22 nd International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'96, Kraków-Zakopane 1996.
- [18] Mrowiec, S., Werber, T., *Nowoczesne materiały żaroodporne*, WNT, Warszawa 1982.
- [19] Polska Norma, *PN-73/H-04631, Laboratoryjne badanie żaroodporności stali w powietrzu*.
- [20] Hejwowski, T., *Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.

