

Barbara Halusiak¹, Jarosław Boryca¹

BADANIA PRZYCZEPNOŚCI ZGORZELINY DO PODŁOŻA STALOWEGO DLA RÓŻNYCH Szybkości PODGRZEWANIA

Streszczenie. Artykuł przedstawia badania przyczepności zgorzeliny do podłoża stalowego dla różnych szybkości podgrzewania. Pomiary przeprowadzone zostały w laboratoryjnym piecu rurowym dla szybkości podgrzewania $M = 200, 400, 600$ K/h z uwzględnieniem samego etapu podgrzewania i dwuetapowego nagrzewania. Uzyskane wyniki oraz kontynuacja tych badań w rezultacie mogą pozwolić na opracowanie technologii nagrzewania, zapewniającej optymalną przyczepność.

Słowa kluczowe: przyczepność zgorzeliny, szybkość podgrzewania, nagrzewanie wsadu stalowego

Spis oznaczeń:

- a – początkowy wymiar boku próbki, mm,
- A – powierzchni próbki, m^2 ,
- h – początkowa wysokość próbki, mm,
- m_0 – masa próbki przed nagrzewaniem, g,
- m_1 – masa próbki po nagrzewaniu, g,
- m_2 – masa próbki po zbicciu zgorzeliny, g,
- m_3 – masa próbki po całkowitym oczyszczeniu, g,
- M – szybkość podgrzewania, K/h,
- P – przyczepność zgorzeliny, %,
- z – strata stali na zgorzelinę, kg/m^2 ,
- x_{Fe} – udział żelaza w zgorzelinie ($x_{Fe} = 0,74$),
- α – wartość stosunku nadmiaru powietrza spalania.

WPROWADZENIE

Istotnym zagadnieniem w procesie nagrzewania wsadu stalowego w piecach grzewczych jest przyczepność zgorzeliny do powierzchni stali. Zbyt mała przyczepność zgorzeliny może spowodować uszkodzenia wyłożenia ogniotrwałego trzonu pieca, co jednocześnie związane jest z koniecznością zatrzymania pracy

¹ Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Politechnika Częstochowska, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, e-mail: bhalusiak@wip.pcz.pl

pieca. Z kolei zbyt duża przyczepność może doprowadzić do tego, że nieusunięte pozostałości zgorzeliny w trakcie procesu przeróbki plastycznej zostaną zawalcowane w powierzchnię wyrobów, co może wpłynąć negatywnie na jakość końcową wyrobów [1]. Należy zwrócić uwagę, iż niezbędne są badania, które pozwolą na opracowanie technologii zapewniającej uzyskanie optymalnej przyczepności zgorzeliny.

Dotychczasowe opracowania teoretyczne oraz badania laboratoryjne [2, 3] poruszały problem wpływu czasu i temperatury nagrzewania oraz atmosfery pieca na przyczepność zgorzeliny. Warto zwrócić uwagę, że jednym z ważniejszych czynników wykazującym wpływ na proces nagrzewania oraz na wyniki pracy pieców grzewczych jest szybkość podgrzewania. W pracy wykonano badania przyczepności zgorzeliny do podłoża stalowego dla różnych szybkości podgrzewania.

PRZYCZEPNOŚĆ ZGORZELINY

Eksploatacja urządzeń grzewczych związana jest ściśle ze zjawiskiem przyczepności warstwy zgorzeliny do podłoża stalowego. Przyczepność, czyli siła związania zgorzeliny z podłożem, jest wypadkową wielu czynników. Zależy m.in. od czasu i temperatury nagrzewania, składu atmosfery gazowej oraz składu chemicznego i struktury stali [1, 4].

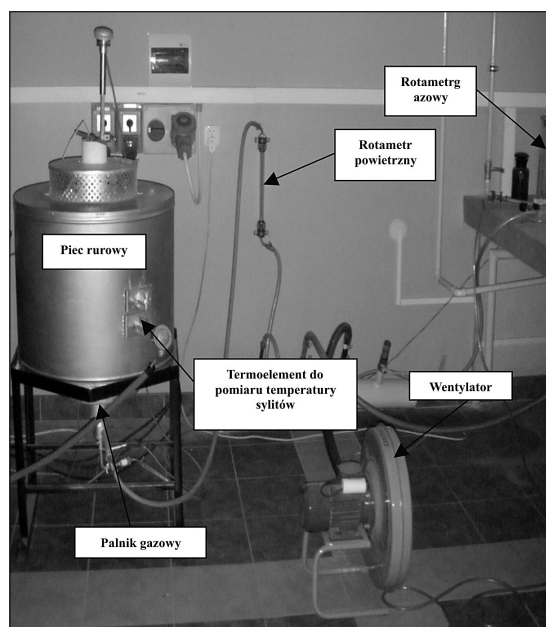
W znaczącym stopniu o przyczepności zgorzeliny do rdzenia stalowego decydują dwa zjawiska: przyczepność mechaniczna oraz adhezja właściwa. Pierwsze z nich jest wynikiem występowania nierówności na powierzchni rdzenia, które konsolidują zgorzelinę z podłożem. Drugi czynnik- adhezja właściwa występuje tylko w warunkach ścisłego przylegania obu faz do siebie, gdyż jest związana z oddziaływaniem sił międzycząsteczkowych. Siły kohezyjne zmniejszają się w toku reakcji, co jest wynikiem procesów na powierzchni rdzenia. Zmniejszanie się sił adhezji wywołane wytrącaniem się pustych węzłów na granicy faz zgorzelina – metal prowadzi do powstania mikro- i makroporów. O adhezji zgorzeliny do podłoża metalicznego decyduje obszar, w którym występuje likwidacja pustych węzłów [5]. Znaczny wpływ na przyczepność zgorzeliny do podłoża wywiera skład fazy metalowej szczególnie, gdy na granicy faz żelazo-zgorzelina pojawiają się dodatki stopowe bądź zanieczyszczenia. W przypadku, gdy składniki stopowe wykazują większe powinowactwo chemiczne z tlenem niż żelazo, ma miejsce znaczne pogorszenie przyczepności zgorzeliny.

ZAKRES ORAZ METODYKA BADAŃ

Pomiary wykonano dla próbek ze stali St4S o przekroju kwadratowym 30x30mm i wysokości 50 mm. Nagrzewanie prowadzono w atmosferze spalin, dla wartości stosunku nadmiaru powietrza spalania $\alpha = 1,2$ do temperatury powierzchni wsadu t

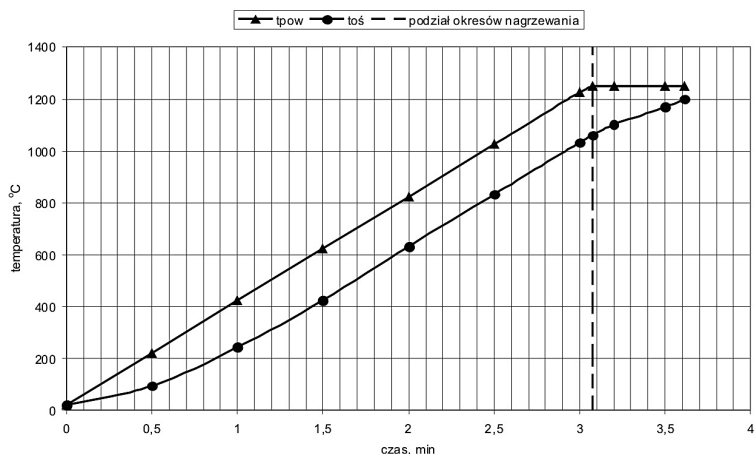
= 1250 °C. Analizie poddano łącznie sześć prób nagrzewania, w tym trzy pomiary nagrzewania wykonano dla etapu podgrzewania przy wybranych szybkościach $M = 200, 400$ i 600 K/h. Pozostałe badania zostały przeprowadzone dla nagrzewania dwuetapowego (podgrzewanie i wygrzewanie) przy tych samych szybkościach podgrzewania.

Nagrzewanie prowadzono w elektrycznym piecu rurowym (z komorą spalania) wyposażonym w regulator programowalny SHIMADEN-FP93 (rys. 1). Uruchomienie stanowiska pomiarowego wymagało wcześniejszego zaprogramowania charakterystyki nagrzewania przy pomocy regulatora programowalnego. Wyznaczenie krzywych nagrzewania polegało na określeniu ilości kroków czasowych oraz ustaleniu maksymalnej temperatury dla danego kroku. Po uruchomieniu programu piec automatycznie realizował proces nagrzewania w ściśle zdefiniowanych krokach czasowych.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe - piec rurowy
Fig. 1. The measuring position - tube furnace

Przyjęto, że sterowanie pracą pieca odbywało się poprzez temperaturę powierzchni próbki. Czasy wygrzewania dla wyznaczonych prób nagrzewania ustalono wykorzystując programy komputerowe do obliczeń dwuetapowego nagrzewania wsadu. Krzywe nagrzewania zostały opracowane dzięki zastosowaniu programów komputerowych do obliczeń rozkładu temperatury w etapie podgrzewania i wygrzewania. Przykładową krzywą nagrzewania dla szybkości podgrzewania $M = 400$ K/h zaprezentowano na rysunku 2.

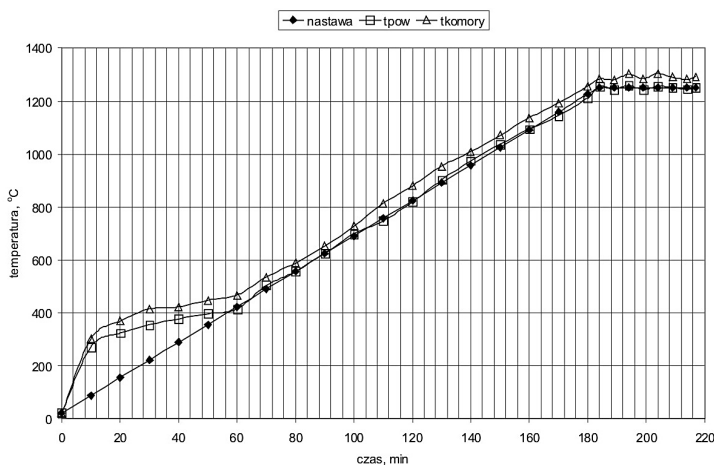


Rys. 2. Krzywa nagrzewania dla M = 400 K/h

Fig. 2. Heating curve for M = 400 K/h

Analizując krzywe nagrzewania dla każdej z omawianych szybkości można zauważyć, że wraz ze wzrostem szybkości podgrzewania będzie rosła różnica temperatur w przekroju wsadu. Aby ta różnica była zbliżona do założonej $\Delta t = 50$ K, konieczne jest zastosowanie etapu wygrzewania.

Podczas badań dla określonych krzywych nagrzewania wykonano pomiary temperatury powierzchni próbki oraz temperatury komory grzewczej. Przykładowe wyniki pomiarów temperatury dla M = 400 K/h zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki pomiarów temperatury dla M = 400 K/h

Fig. 3. Results of measurements of temperature for M = 400 K/h

Dokonując analizy rys. 3, można zauważyć, że istnieje brak liniowego wzrostu temperatury powierzchni wsadu do około 400 °C, po przekroczeniu tej temperatury ustala się niemal liniowy przebieg. Biorąc pod uwagę fakt, iż przyczepność zgorzeliny w temperaturze poniżej 1000 °C jest nieznaczna, widoczne odchylenia temperatury powierzchni od nastawy do temperatury 400 °C (rys. 3), nie wywierają istotnego wpływu na omawiane wyniki przyczepności. Średni przyrost temperatury powierzchni próbki wynosi 66,1 K/10 minut, co daje wartość 397 K/h, czyli niemal równy wartości założonej 400 K/h.

Do usunięcia zgorzeliny z badanych próbek wykorzystano przyrząd do zbijania zgorzeliny. Składa się on z komory zbijania o przekroju okrągłym, zbijaka, zabezpieczenia oraz podstawki pod próbkę. Działanie tego urządzenia polega na tym, że w momencie zwolnienia zabezpieczenia zbijak spadając swobodnie uderza w próbkę, powodując częściowe odbicie zgorzeliny.

Do określenia przyczepności zgorzeliny do podłoża stalowego zastosowano metodę masową, która polega na bezpośrednim wyznaczeniu masy próbek w kolejnych etapach badań. Masa badanych próbek została określona za pomocą wagi elektronicznej WPS 300/C1 dla trzech etapów: przed nagraniem, po zbitiu zgorzeliny oraz po całkowitym jej oczyszczeniu. Dokładność pomiaru masy wynosi $\pm 0,001$ g. Z kolei wymiary próbek mierzono za pomocą suwmiarki z dokładnością $\pm 0,01$ mm. Wyniki pomiarów masy oraz wymiarów próbek przed nagraniem zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów masy i wymiarów początkowych próbek

Table 1. Results of measurements of weight and initial sizes of samples

Sposób prowadzenia nagrzewania	M [K]/h	Nr próbki	m_0 [g]	h [mm]	a [mm]	A [m ²]
Etap podgrzewania	200	4	323,276	51,0	29,0	0,007598
	400	3	323,622	51,0	29,0	0,007598
	600	2	321,470	51,0	28,5	0,007438
Nagrzewanie dwuetapowe	200	5	310,792	50,0	28,0	0,007168
	400	6	324,570	51,0	29,0	0,007598
	600	7	320,295	50,0	29,0	0,007438

Przyczepność warstwy zgorzeliny obliczono korzystając z zależności (1), która opisuje stosunek masy zgorzeliny, jaka pozostaje po zbitiu do całkowitej masy zgorzeliny.

$$P = \frac{m_2 - m_3}{m_1 - m_3} \cdot 100\% \quad (1)$$

Wyznaczenie masy próbki po nagraniu (m_1) przy pomocy ważenia jest niemożliwe, ze względu na wysoką temperaturę. Stosując założenie, że masa próbki po

nagrzewaniu równa jest sumie masy po całkowitym usunięciu zgorzeliny i całkowitej masie zgorzeliny skorzystano z zależności:

$$m_1 = m_0 + \frac{z \cdot A}{x_F} \quad (2)$$

Dokonując obliczeń straty stali skorzystano z zależności:

$$z = \frac{m_0 - m_3}{A} \quad (3)$$

WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ PRZYCZEPNOŚCI ZGORZELINY ORAZ STRATY STALI

Zastosowanie metody masowej pozwoliło na określenie masy próbek po zbijaniu zgorzeliny oraz całkowitym oczyszczeniu (tabela 2). Po zakończonych próbach nagrzewania wykonano obliczenia straty stali, masy próbek po nagrzewaniu oraz przyczepności zgorzeliny dla analizowanych szybkości podgrzewania. Wyniki obliczeń masy próbek po nagrzewaniu zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 2. Wyniki pomiarów masy próbek po zbijaniu i oczyszczeniu

Table 2. Results of measurements of weight of samples after breaking and treatment

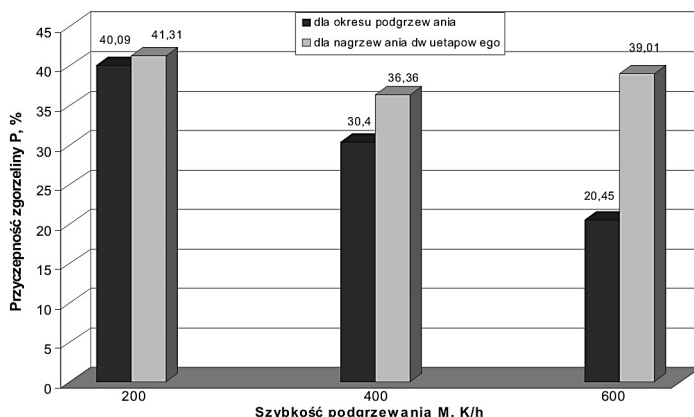
Sposób prowadzenia nagrzewania	M [K/h]	Nr próbki	m_2 [g]	m_3 [g]
Etap podgrzewania	200	4	321,892	299,140
	400	3	319,338	308,605
	600	2	315,915	310,768
Nagrzewanie dwuetapowe	200	5	309,803	276,414
	400	6	320,784	298,492
	600	7	317,596	287,632

Tabela 3. Wyniki obliczeń masy próbek po nagrzewaniu

Table 3. Results of calculations of weight of samples after heating

Sposób prowadzenia nagrzewania	M [K/h]	Nr próbki	m_1 [g]
Etap podgrzewania	200	4	355,896
	400	3	343,911
	600	2	335,934
Nagrzewanie dwuetapowe	200	5	357,248
	400	6	359,808
	600	7	364,430

Graficzną prezentację wyników obliczeń przyczepności zgorzeliny dla okresu podgrzewania oraz dla nagrzewania dwuetapowego przedstawiono na rysunku 4.



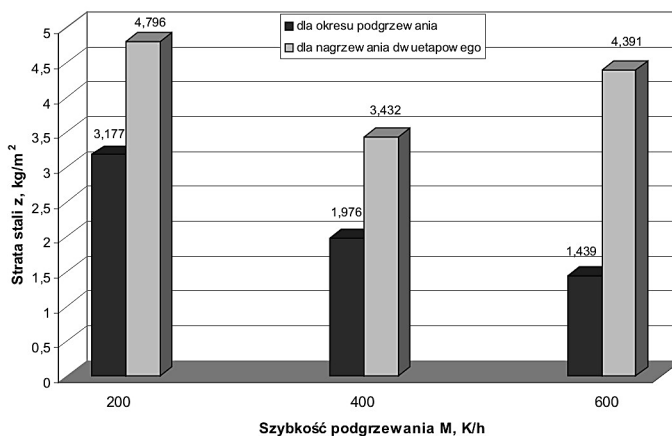
Rys. 4. Wyniki obliczeń przyczepności zgorzeliny
Fig. 4. Results of calculations of scale adhesion

Dokonując analizy rys. 4, można zauważyć, że wraz ze wzrostem szybkości dla okresu podgrzewania maleje przyczepność zgorzeliny do podłoża stalowego. Sytuację tą, można wytłumaczyć faktem, iż czas przebywania próbki w temperaturze wykazującej wpływ na przyczepność (tj. powyżej 1000°C) był najkrótszy. Analizując nagrzewanie dwuetapowe, można stwierdzić, że dzięki uwzględnieniu okresu wyrównania temperatury, najniższą wartość przyczepności otrzymuje się dla szybkości podgrzewania $M = 400$ K/h. W porównaniu z okresem podgrzewania dla szybkości $M = 600$ K/h przyczepność wzrosła niemal dwukrotnie, natomiast dla $M = 200$ K/h wzrosła o wartość niewiele ponad 1%.

Interpretując wyniki dotyczące obliczeń straty stali dla podgrzewania i dla dwuetapowego nagrzewania (rys.5), można zauważyć, że ma miejsce podobna tendencja, jak w przypadku wyników obliczeń przyczepności zgorzeliny. Dla etapu podgrzewania strata stali na zgorzelinę maleje ze wzrostem szybkości podgrzewania. Stosując jednak nagrzewanie dwuetapowe, które ma na celu zniwelowanie różnicy temperatury na przekroju wsadu, można zauważyć, że najniższą wartość straty stali otrzymuje się dla szybkości podgrzewania $M = 400$ K/h.

Można sprecyzować stwierdzenie, że dla nagrzewania dwuetapowego przyczepność zgorzeliny zachowuje się podobnie, jak strata stali. Tym samym, można uznać, że istnieje korelacja pomiędzy stratą stali, a przyczepnością zgorzeliny do podłoża stalowego.

Poszerzenie wykonanych badań o pomiary wpływu wartości stosunku nadmiaru powietrza dla analizowanych szybkości podgrzewania pozwoliłoby, na opracowanie technologii nagrzewania, która zapewniłaby optymalną przyczepność zgorzeliny do podłoża stalowego.



Rys. 5. Wyniki obliczeń straty stali
Fig. 5. Results of calculations of loss of steel

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na sprecyzowanie następujących wniosków:

1. Szybkość podgrzewania wywiera wpływ zarówno na stratę stali, jak i na przyrzepność zgorzeli do podłoża stalowego.
2. Dla etapu podgrzewania przyrzepność zgorzeli maleje wraz ze wzrostem szybkości podgrzewania.
3. Zastosowanie nagrzewania dwuetapowego skutkuje wzrostem przyrzepności w porównaniu do okresu podgrzewania.
4. Wyniki obliczeń świadczą o tym, że racjonalna szybkość podgrzewania będzie zbliżona do $M = 400$ K/h dla założonej grubości wsadu.

LITERATURA

1. Kieloch M.: Racjonalizacja nagrzewania wsadu. Wyd. WIPMiFS Pol. Częstochowskiej, Seria Monografie nr 8, Częstochowa 2010.
2. Kieloch M., Boryca J.: Analiza wpływu temperatury nagrzewania na przyrzepność zgorzeli do podłoża stalowego. Hutnik - Wiadomości hutnicze, nr 12, 2003: 485-488.
3. Kieloch M., Boryca J.: Analiza wpływu atmosfery pieca na przyrzepność zgorzeli do podłoża stalowego. Hutnik - Wiadomości hutnicze, nr 6, 2004: 255-258.
4. Boryca J., Kieloch M., Piechowicz Ł.: Badania przyrzepności zgorzeli powstającej w procesie nagrzewania wsadu stalowego przed przeróbką plastyczną. Archives of Metallurgy and Materials, nr 3, 2006: 451-457.
5. Mrowec S., Werber T.: Korozja gazowa metali, „Śląsk”, Katowice 1975.

MEASUREMENTS OF SCALE ADHESION TO STEEL BASIS FOR DIFFERENT HEATING RATES

Summary

The article presents studies of scale adhesion to steel basis for different heating speeds. The measurements were carried in laboratory tube furnace for heating speed $M = 200, 400, 600$ K/h for heating stage and for two-stage heating. The results and continuation of these studies as a result could lead to the obtainment of heating technology, which provides optimal scale adhesion.

Key words: scale adhesion, heating rate, heating of steel charge.