

# Czynniki wpływające na wskaźniki procesu nawęglania

K. Janerka\*, J. Szajnar, J. Jezierski, D. Bartocha

Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: krzysztof.janerka@polsl.pl

Otrzymano 13.07.2011; zaakceptowano do druku 27.07.2011

## Streszczenie

W artykule przedstawiono czynniki wpływające na uzyskiwane wskaźniki nawęglania (szybkość i efektywność) w procesie wytapiania żeliwa. Analiza obejmuje rodzaj nawęglacza (antracyt, grafit naturalny i grafit syntetyczny, koks naftowy) oraz wielkość cząstek. Kolejne czynniki rozpatrywane w pracy to metoda nawęglania (wprowadzanie nawęglacza do stałego wsadu i na powierzchnię kąpieli metalowej) oraz parametry ciekłego metalu (temperatura i skład chemiczny). Analizę przeprowadzono w oparciu o wykonane eksperymenty, wyniki obliczeń symulacji komputerowych oraz dane literaturowe.

**Słowa kluczowe:** Nawęglanie, Nawęglanie stopów żelaza, Parametry nawęglania, Metody nawęglania

## 1. Wprowadzenie

Istotnymi wskaźnikami, charakteryzującymi proces nawęglania z technologicznego punktu widzenia są sprawność (efektywność nawęglania) i szybkość nawęglania. Parametry te decydują o czasie trwania procesu nawęglania oraz o ilości materiału nawęglającego, który należy wprowadzić, aby uzyskać zakładane zwiększenie zawartości węgla. Sprawność (efektywność) nawęglania określana jest zależnością [1]:

$$E = M_m \frac{C_k - C_p}{M_n \cdot C_n} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $C_p$  – zawartość węgla na początku procesu w %,  $C_k$  – zawartość węgla na końcu procesu w %,  $M_m$  – masa metalu w kg,  $M_n$  – masa nawęglacza w kg,  $C_n$  – zawartość węgla w materiale nawęglającym w %.

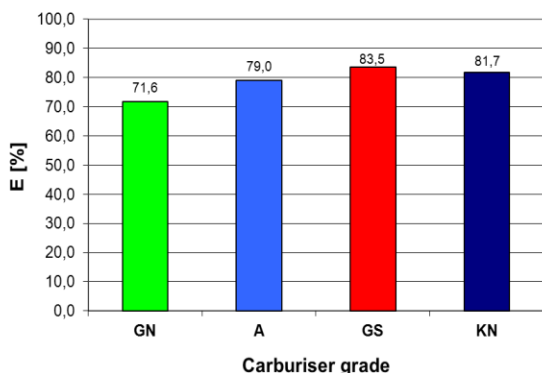
Szybkość nawęglania określa równanie [1]:

$$S = \frac{\Delta C}{t} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta C$  – przyrost zawartości węgla w ciekłym metalu w %,  $t$  – czas nawęglania w s.

## 2. Nawęglacz

Materiały nawęglające powinny zawierać jak najwięcej węgla, małe ilości popiołu i części lotnych oraz niewielkie ilości zanieczyszczeń w postaci siarki, azotu i wodoru. Uwzględniając te kryteria można stwierdzić, że najlepszym nawęglaczem jest grafit syntetyczny. Jednak jego wysoka cena powoduje poszukiwanie innych, tańszych materiałów węglowych, które dla przyjętej metody nawęglania będą cechowały się tylko nieznacznym spadkiem szybkości i efektywności procesu. Duże znaczenie w tej analizie ma również przyjęta metoda wprowadzania nawęglacza. W piecach elektrycznych indukcyjnych najczęściej materiał nawęglający wprowadzany jest do stałego wsadu lub na powierzchnię metalu po jego roztopieniu. Efektywność nawęglania przy wprowadzaniu nawęglacza do stałego wsadu zmienia się w zakresie 71,6-83,5%. Najniższy stopień przyswojenia węgla uzyskano dla grafitu naturalnego – 71,6%. Dla pozostałych materiałów efektywność nawęglania jest bardzo wysoka i zmienia się w zakresie 79-83,5% (rys.1).



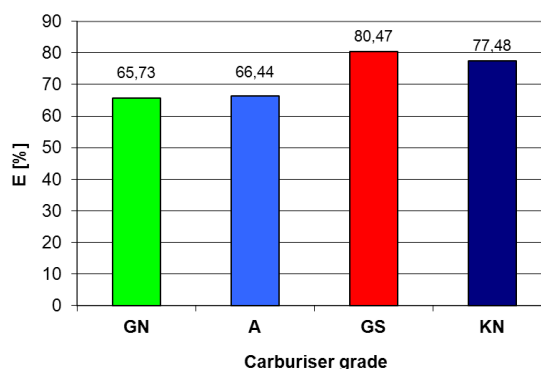
Rys. 1. Efektywność nawęglania przy wprowadzaniu nawęglacza do stałego wsadu [3]

Należy jednak zaznaczyć, że antracyty rozpuszczają się znacznie wolniej i po roztopieniu wsadu część cząstek wypływa na powierzchnię. Ich rozpuszczenie wymaga dodatkowego czasu i podgrzania metalu do wyższej temperatury. Generuje to dodatkowe koszty ze względu na zużycie energii i wydłuża czas wytupu. Najlepiej rozpuszczają się grafity syntetyczne i koks naftowy. Praktycznie po roztopieniu wsadu nie ma na powierzchni kąpieli metalowej cząstek nawęglacza.

Uzyskanie wysokiego stopnia przyswojenia w tej metodzie jest możliwe dla każdego materiału nawęglającego. Należy jednak uwzględnić, że materiały niegrafitowe (szczególnie antracyt) rozpuszczają się wolniej. O wyborze określonego nawęglacza w tej metodzie będzie więc decydował czynnik ekonomiczny. Najtańsze nawęglacze to grafit naturalny i antracyt, następnie koks naftowy. Najdroższy jest grafit syntetyczny.

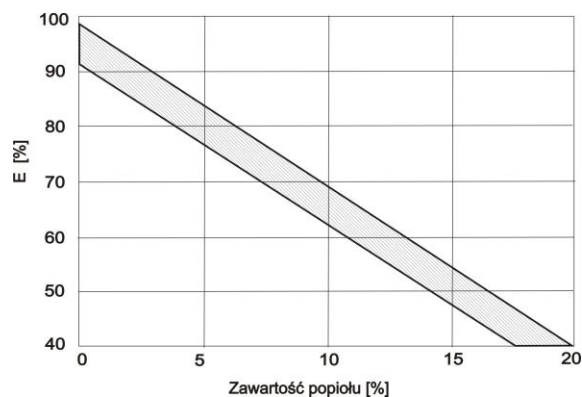
Duże znaczenie przy wprowadzaniu nawęglacza do stałego wsadu ma jego ułożenie w piecu. W miarę możliwości należy zadbać o to, aby materiał nawęglający znalazł się pomiędzy drobnym wsadem stalowym. Zapewni to równoczesne nagrzewanie wsadu i nawęglacza, co pozwoli na zwiększenie wskaźników przyswojenia węgla. Jeżeli nawęglacz będzie za wysoko, to przy stopniowym topieniu będzie wypływał na powierzchnię. Nie należy również wsypywać materiału nawęglającego bezpośrednio na dno pieca, ponieważ w trakcie nagrzewania może nastąpić jego „spiekanie” z wymurówką pieca, co również obniży efektywność i szybkość nawęglania.

Efektywność nawęglania metodą narzucania na powierzchnię ciepłego metalu (rys. 2) jest znacznie niższa niż w metodzie dodawania materiału nawęglającego do stałego wsadu. Porównując wyniki uzyskane dla tych samych materiałów wprowadzanych do stałego wsadu można zauważyć, że spadek ten wynosi do 15%. Najwyższą średnią efektywność uzyskano dla grafitu syntetycznego i koksu naftowego, a następnie dla antracytu i grafitu naturalnego. Czas całkowitego przyswojenia węgla zmienia się od kilku do kilkunastu minut.



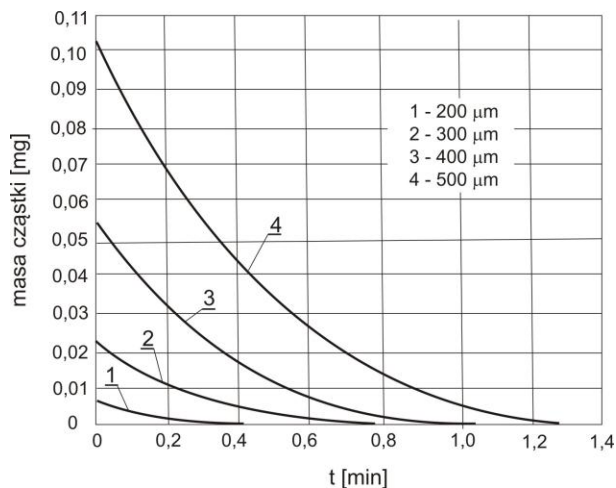
Rys. 2. Efektywność nawęglania przy wprowadzaniu nawęglacza na powierzchnię [3]

Kolejnym czynnikiem, który ma wpływ na szybkość i sprawność procesu nawęglania jest zawartość popiołu w nawęglaczach. Nawęglacz o mniejszej zawartości popiołu rozpuszcza się szybciej (rys. 3), a jest to spowodowane prawdopodobnie tym, że w wysokiej temperaturze popiół tworzy żużel pomiędzy powierzchnią rozdzielu materiału nawęglającego i ciepłego metalu. Ogranicza to powierzchnię kontaktu pomiędzy tymi dwoma fazami [4,5].



Rys. 3. Wpływ zawartości popiołu na efektywność nawęglania

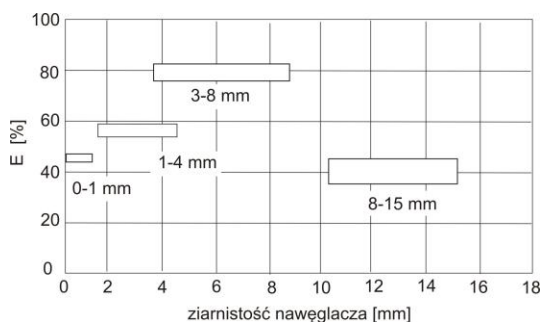
Na rozpuszczalność węgla wpływają także wymiary cząstek nawęglacza wprowadzanych, czy to na powierzchnię czy do stałego wsadu. Szybkość zmiany masy cząstek o wymiarach od 200 do 500  $\mu\text{m}$  w funkcji czasu rozpuszczania pokazano na rys. 4. Są to wyniki obliczeń przy założeniu pełnego kontaktu między cząstkami a cieczą, przez cały czas trwania procesu. Obliczenia przeprowadzono dla 2% zawartości węgla w ciepłym metalu, współczynnika wymiany masy  $k = 0,12 \text{ cm/s}$  oraz temperatury 1450°C [6].



Rys. 4. Obliczony wpływ początkowej średnicy cząstki oraz czasu rozpuszczania wdmuchiwanego grafitu na zmianę masy cząstek [6]

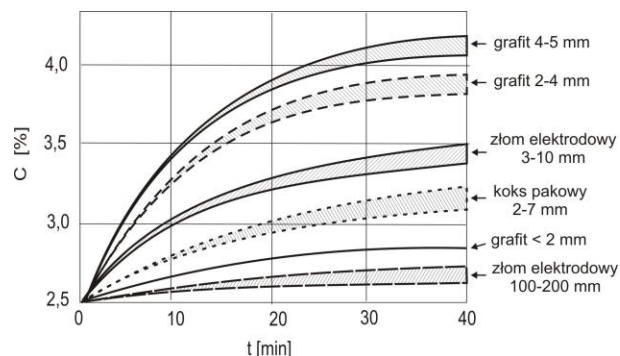
Teoretyczne założenia procesu rozpuszczania określają, że zwiększenie powierzchni  $F$  kontaktu reagujących faz powoduje zwiększenie szybkości rozpuszczania węgla. Zwiększenie powierzchni może być wynikiem zastosowania drobniejszych materiałów. Z rys. 4 wynika, że czas rozpuszczania cząstek o średnicy 200  $\mu\text{m}$  jest kilka razy mniejszy niż nawęglacza o wielkości cząstek 500  $\mu\text{m}$ .

Na rys. 5 przedstawiono zmianę przyrostu zawartości węgla, w zależności od ziarnistości nawęglacza, przy wprowadzaniu go na powierzchnię kąpieli metalowej. Cząstki o bardzo małych wymiarach, wprowadzane do ciekłego metalu, wykazują małe sprawności nawęglania. Największy stopień przyswojenia węgla można zauważyć dla cząstek o średnicy 3-8 mm, dla których efektywność nawęglania wynosi ok. 80%. Przy stosowaniu nawęglacza o mniejszych lub większych ziarnach sprawność nawęglania obniża się do 40% [7].



Rys. 5. Sprawność nawęglania w zależności od średnicy cząstek nawęglacza (nawęglacz wprowadzany na powierzchnię ciekłego metalu) [7]

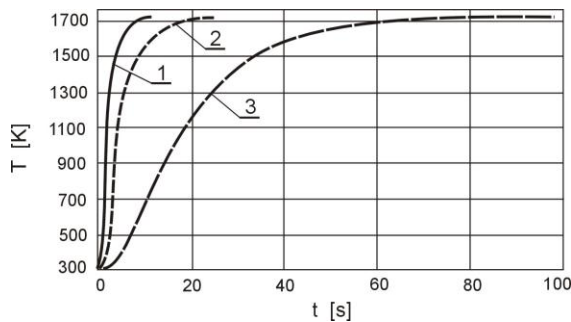
Wpływ wielkości cząstek i rodzaju nawęglacza na przyrost zawartości węgla w czasie procesu nawęglania przedstawiono na rys. 6 [8].



Rys. 6. Wpływ ziarnistości i rodzaju nawęglacza na zwiększenie zawartości węgla z upływem czasu, przy nawęglaniu żeliwa w piecu indukcyjnym [8]

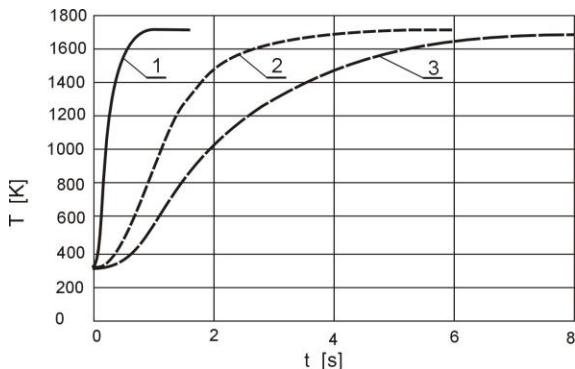
Teoretycznie rzecz ujmując nawęglacze powinny być możliwie najdrobniejsze, co zapewnia bardzo duże wartości szybkości procesu. Takie materiały powinny być stosowane przy pneumatycznym wprowadzaniu nawęglacza do kąpieli metalowej. Drobne cząstki dłużej wypływają na powierzchnię ciekłego metalu, co powoduje, że zdążą się rozpuścić w strefie reakcji. Efektywność procesu jest wtedy największa.

Natomiast nawęglacze wprowadzane ze stałym wsadem i na powierzchnię kąpieli metalowej powinny być pozbawione pyłu. Materiały te wprowadzane są najczęściej ręcznie przez obsługę pieca. Duża ilość bardzo drobnych frakcji powoduje zapylenie na stanowisku pracy lub zabieranie drobnych cząstek przez urządzenia odciągowe pieców. Oznacza to, że mniejsza ilość materiału nawęglającego pozostaje na powierzchni kąpieli metalowej, co w efekcie powoduje spadek sprawności procesu. Można częściowo temu zapobiec w piecach indukcyjnych przykrywając nawęglacz cienką warstwą drobnego złomu stalowego lub obiegowego. Natomiast zbyt duże cząstki nawęglacza będą się dłużej nagrzewały i rozpuszczały, co wydłuża czas wytapiania metalu. Istotnym czynnikiem procesu nawęglania jest czas osiągnięcia temperatury ciekłego metalu przez cząstki do niego wprowadzone. Im jest on krótszy, tym proces nawęglania jest bardziej intensywny. Praktycznie zarówno temperatury cząstki, jak i czasu jej nagrzewania, zmierzyć nie można. Obecnie w tym celu można natomiast wykorzystać komputerowe programy symulacyjne, np. Fluent itp. Na rys. 7 przedstawiono wyniki symulacji komputerowej czasu nagrzewania cząstek antracytu o różnych średnicach, wprowadzanych do ciekłego żeliwa o temperaturze 1723 K [9,10].



Rys. 7. Zależność temperatury cząstek antracytu o różnej średnicy od czasu nagrzewania w ciekłym żelazie: 1-cząstka o średnicy 1 mm, 2-cząstka o średnicy 3 mm, 3-cząstka o średnicy 7 mm (wyniki symulacji za pomocą programu Fluent)

Cząstki o średnicy 7 mm nagrzewają się znacznie dłużej niż cząstki o średnicy 2 mm, co jest zgodne z oczekiwaniem. Ważne są jednak wartości czasu tego nagrzewania oraz ich porównanie dla antracytu, grafitu i koksu naftowego, czego dokonano na rys. 8.



Rys. 8. Czas nagrzewania cząstek różnych materiałów nawęglających o średnicy 7 mm: 1-grafit syntetyczny, 2-koks naftowy, 3-antracyt [9]

Z wykresu można zauważyć, że najszybciej nagrzewa się grafit, następnie koks naftowy i na końcu antracyt. Grafit osiąga temperaturę 1721 K po czasie 1 s, natomiast koks naftowy po upływie 1 s osiąga temperaturę 904 K, a antracyt 556 K. Koks naftowy nagrzewa się do temperatury 1721 K w czasie 5,9 s, a antracyt osiąga tę temperaturę po 9,7 s. Uzyskane wyniki obliczeń wykazują, jak w procesach obliczeń numerycznych istotne znaczenie mają własności termofizyczne, gdyż w rozpatrywanym przypadku tylko te dane się zmieniały. Oznacza to, że w procesach nawęglania najlepszym materiałem nawęglającym powinien być grafit. Najwolniej nagrzewa się antracyt, co potwierdzają wyniki doświadczeń, w których uzyskanie dużej sprawności nawęglania dla antracytu wymaga dłuższego czasu nagrzewania kąpieli.

Jednym z parametrów charakteryzujących nawęglacze jest zawartość części lotnych. Jak wynika z wielu badań zawartość części lotnych nie wpływa znacząco na rozpuszczalność węgla.

Materiały nawęglające cechuje również ich wilgotność. Z punktu widzenia odlewniczego wilgotność nawęglaczy powinna być jak najmniejsza. Duża zawartość wody

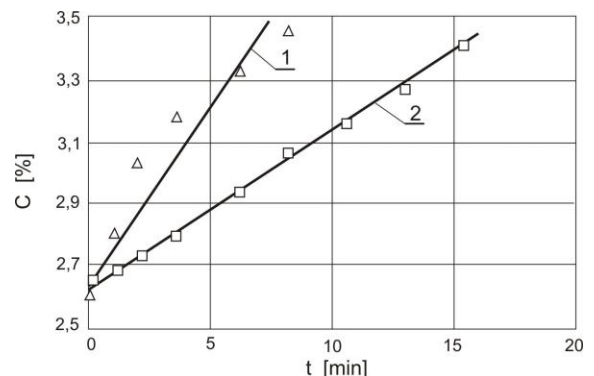
w nawęglaczach powoduje rozpryskiwanie metalu, szczególnie przy pneumatycznym wdmuchiwniu oraz wprowadzaniu ich na powierzchnię kąpieli. Może być również przyczyną wzrostu zawartości wodoru w ciekłym metalu, co jest zjawiskiem niepożądanym.

Kolejnym parametrem określającym materiał nawęglający jest porowatość. Porowatość węgla drzewnego wynosi 70÷80%, koksu odlewniczego około 50%, a grafitu syntetycznego 20÷30%. Jednak w literaturze podawane są sprzeczne informacje na temat wpływu porowatości na rozpuszczanie węgla. Zaobserwowano, że koks o małej porowatości szybko się rozpuszcza. Natomiast można spotkać stwierdzenia, że koks z wysoką porowatością wykazuje wyższe tempo rozpuszczania i zwiększona porowatość jest związana z większą powierzchnią reakcji [11]. W znaczący sposób wpływa to na początkowy okres nawęglania, w którym płynny metal przenika do porów i w ten sposób w reakcji uczestniczy większa powierzchnia. W późniejszym stadium płynny metal zostaje uwięziony w porach i nasycony jest przez węgiel, co zmniejsza szybkość procesu.

### 3. Ciekły metal

Czynniki charakteryzujące ciekły metal i mające wpływ na przebieg procesu nawęglania to: temperatura, początkowa zawartość węgla, zawartość krzemu, siarki oraz ruch metalu w piecu.

Podwyższenie temperatury metalu powoduje zwiększenie rozpuszczalności węgla  $C_{max}$  i współczynnika dyfuzji  $D_c$ , zmniejszenie lepkości  $\eta$ , a w konsekwencji zwiększenie szybkości procesu nawęglania. Założenia teoretyczne (w tym przypadku) pokrywają się z wynikami badań. Na rys. 9 przedstawiono uzyskany przyrost zawartości węgla w czasie, uzyskany przy nawęglaniu grysem elektrodowym w temperaturach 1673 i 1823 K.

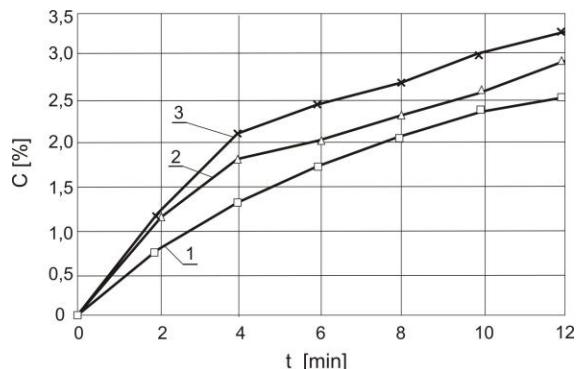


Rys. 9. Zmiana zawartości węgla w czasie przy nawęglaniu grysem elektrodowym w temperaturach: 1-1823 K, 2-1673 K

Można zauważyć, że podwyższenie temperatury kąpieli metalowej z 1673 K do 1823 K powoduje uzyskanie takiego samego stopnia nawęglania w czasie o połowę krótszym [12].

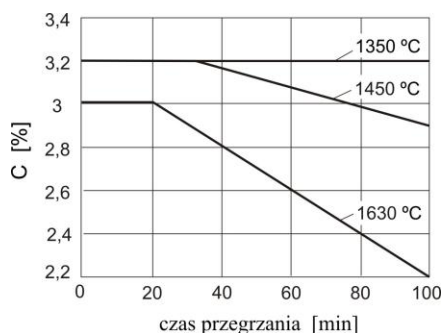
Na rys. 10 przedstawiono zmianę zawartości węgla w kąpieli metalowej, w funkcji jej temperatury i czasu

rozpuszczania. Można zauważyć, że wraz z podwyższeniem temperatury następuje zwiększenie stężenia węgla w żelazie [4].



Rys. 10. Wpływ temperatury na rozpuszczalność grafitu w żelazie elektrolitycznym: 1-T=1823 K, 2-T=1873 K, 3-T=1923 K [13]

Należy jednak zaznaczyć, że wygrzewanie ciekłego metalu w wysokiej temperaturze prowadzi do zgaru węgla, co jest efektem niekorzystnym, prowadzącym do strat. Szybkość procesu utleniania węgla zwiększa się wraz z podwyższeniem temperatury oraz stosunku powierzchni kontaktu metalu z wykładziną do objętości pieca. Przetrzywanie żeliwa w temperaturze przegrzania ponad 1400÷1450°C powoduje szybkie utlenianie się węgla i zwiększenie zawartości krzemu, pochodzącego z wykładziny. Zmianę zawartości węgla, w zależności od czasu przegrzania i temperatury ciekłego metalu w piecach indukcyjnych sieciowej częstotliwości, pokazano na rys. 11 [13].

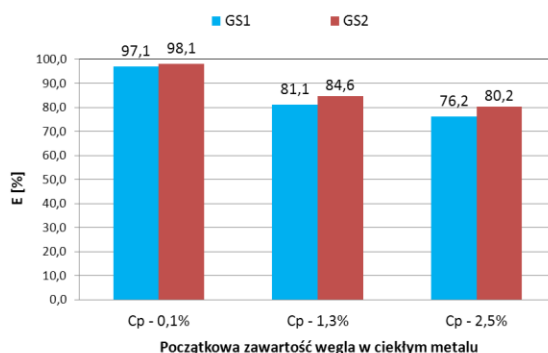


Rys. 11. Wpływ czasu przegrzania żeliwa w piecu indukcyjnym tyglowym sieciowej częstotliwości na zmniejszenie zawartości węgla w kąpieli [13]

Oznacza to, że podwyższenie temperatury żeliwa w procesach nawęglania jest ograniczone przez proces utleniania węgla.

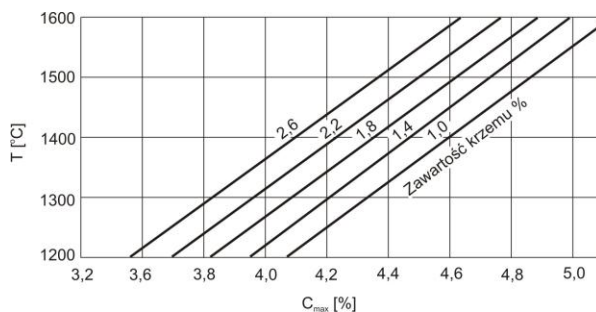
Ważnym zagadnieniem (w procesie nawęglania) jest również początkowa zawartość węgla w ciekłym metalu. Wynika to ze zmniejszenia szybkości nawęglania, wskutek zmniejszenia różnicy między maksymalnym stężeniem węgla a stężeniem węgla w stopie. Wpływ początkowej zawartości węgla na efektywność nawęglania przedstawiono na rys. 12, dla dwóch materiałów nawęglających. Można zauważyć, że wzrost

początkowej zawartości węgla w stopie powoduje spadek efektywności nawęglania.



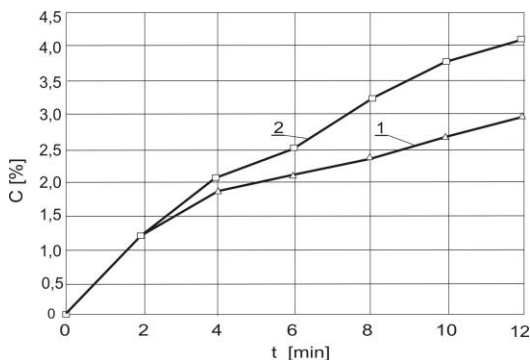
Rys. 12. Wpływ początkowej zawartości węgla na sprawność nawęglania

Spśród wielu pierwiastków, wprowadzanych do żeliwa, na rozpuszczalność węgla duży wpływ wywiera krzem. Wraz z obniżeniem temperatury żeliwa i zwiększeniem w nim zawartości krzemu maleje ilość węgla, jaką można rozpuścić w ciekłym żelazie  $C_{max}$ . Przy zawartości krzemu około 1% i temperaturze 1400°C maksymalna ilość węgla, którą można rozpuścić w ciekłym metalu wynosi 4,6%, natomiast gdy temperatura zmniejszy się do 1200°C, to zawartość rozpuszczonego węgla spadnie do około 4,1% C. Zmiana zawartości krzemu z 1% do 2,6%, przy tej samej temperaturze, powoduje zmniejszenie rozpuszczalności węgla o około 0,6% (rys. 13).

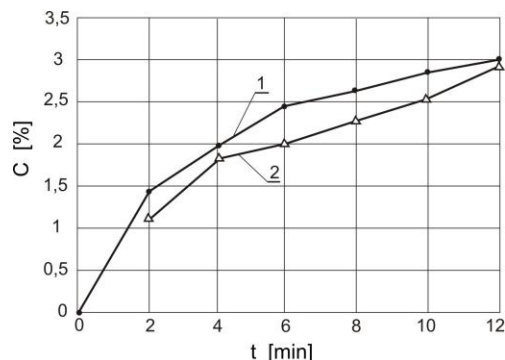


Rys. 13. Rozpuszczalność węgla w żelazie w zależności od zawartości krzemu [7]

Na rys. 14 przedstawiono odmienny wpływ krzemu na zwiększenie zawartości węgla w ciekłym metalu. Zwiększenie zawartości krzemu powoduje tutaj wzrost zawartości węgla w ciekłym metalu. Jest to tłumaczone faktem, że krzem wywołuje zwiększenie płynności ciekłego metalu, w związku z czym cząstki węgla są łatwiej i szybciej otaczane przez ciekły metal. Zwiększenie płynności kąpieli intensyfikuje konwekcyjne mieszanie, co prowadzi do zwiększenia szybkości transportu węgla z najbliższego otoczenia próbki i zwiększonego rozpuszczania. Badania prowadzono w temperaturze 1600°C, bez dodatku i z dodatkiem 0,94% Si [4].



Rys. 14. Wpływ krzemu na rozpuszczalność grafitu w żelazie elektrolitycznym: 1-bez Si, 2-z dodatkiem 0,94% Si [4]



Rys. 15. Wpływ siarki na rozpuszczalność grafitu w żelazie elektrolitycznym: 1-bez siarki, 2-z zawartością 0,05% S [4]

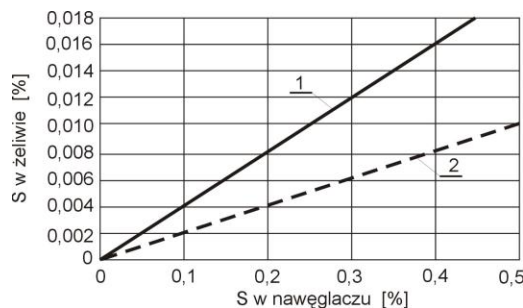
Siarka i fosfor również wpływają niekorzystnie na maksymalną i ogólną rozpuszczalność węgla w ciekłym żelazie (zmniejszają współczynnik wymiany masy k). Zanieczyszczenia te mogą dostać się do ciekłego metalu wraz z materiałem nawęglającym, dlatego ważny jest odpowiedni dobór nawęglacza do realizowanego profilu produkcji.

W technicznych stopach żelaza (w żelazie wytapianym w piecach elektrycznych ze złomu stalowego) zawartość siarki zmienia się w bardzo wąskim zakresie i jej wpływ na przebieg procesu jest znacznie mniejszy. Zmniejszenie współczynnika wymiany masy k może wynikać z tego, że siarka obniża współczynnik dyfuzji węgla w ciekłym żelazie o około 20%, przy zwiększeniu zawartości siarki do 0,12% (dla 2,5% C). Siarka zmniejsza także maksymalną rozpuszczalność węgla w żelazie. W temperaturze 1500°C dodatek 1% siarki (wykraczający znacznie poza wartości występujące w stopach technicznych) do ciekłego stopu żelazo-węgiel zmniejsza poziom nasycenia węgla z zawartości około 5,2 do 5%. Prowadzi to do zmniejszenia siły napędowej procesu nawęglania.

Wpływ zawartości siarki na stopień nawęglania żeliwa w czasie przedstawiono na rys. 15. Eksperymenty prowadzono w temperaturze 1600°C, bez udziału siarki i z zawartością 0,05%, a więc przy stężeniu występującym w stopach technicznych. Jak można zauważyć siarka zmniejsza nieznacznie stopień nawęglania w czasie [4].

Bardzo istotnym zagadnieniem jest więc jak najmniejsza zawartość siarki w nawęglaczach, ponieważ większa część tego pierwiastka jest absorbowana przez metal. Jednoprocentowy dodatek nawęglacza, zawierającego 1,5% siarki skutkuje, przy zakładanym 100% uzysku węgla, przyrostem zawartości siarki w metalu o 0,015%. W przypadku żeliwa szarego nie jest to aż tak istotne, o ile zawartość siarki w końcowym stopie będzie mniejsza od 0,1÷0,12%. Jednakże dla uniknięcia problemów związanych z modyfikowaniem żeliwa jest zalecane, aby zawartość ta była mniejsza od 0,04%. Żeliwo sferoidalne wymaga natomiast możliwie małej zawartości siarki, mniejszej od 0,02%, w sytuacji gdy nie jest ono odsiarczane przed procesem sferoidyzacji.

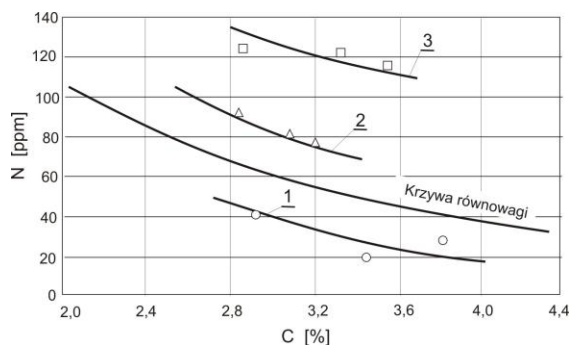
Na rys. 16 przedstawiono wpływ zawartości siarki w nawęglaczu na końcową zawartość tego pierwiastka w żelazie. Analizując wpływ poszczególnych materiałów na zmianę zawartości siarki stwierdzono, że przy nawęglaniu węglem drzewnym nie nastąpił wzrost zawartości siarki, gdyż ten nawęglacz jest jej pozbawiony. Najmniejszy stopień nasiarczenia uzyskano dla grafitu syntetycznego i antracytu, a największy dla koksu naftowego. W wartościach bezwzględnych dla koksu jest to zwiększenie zawartości siarki w zakresie 0,009÷0,032% S. Należy jednak zaznaczyć, że we wszystkich przypadkach prowadzono nawęglanie od poziomu 0,2% C, co wymagało wprowadzenia znacznej ilości nawęglacza (średnio 4% w odniesieniu do wsadu metalowego). Przy uzupełnianiu zawartości węgla o mniejsze wartości zwiększenie zawartości siarki będzie znacznie mniejsze [2].



Rys. 16. Ilość siarki przechodząca do żeliwa w zależności od zawartości siarki w nawęglaczu: 1-4% nawęglacza we wsadzie, 2-2% nawęglacza we wsadzie [14]

Kolejny pierwiastek, występujący w nawęglaczach to azot. Zawartość azotu w nawęglaczach jest zróżnicowana. Na przykład, koks naftowy zawiera go około 120 razy więcej niż grafit syntetyczny, w którym przeciętna zawartość azotu wynosi maksymalnie 0,005%. Przeprowadzona analiza chemiczna nawęglaczy wykazała, że w koksie naftowym zawartość azotu może wynosić od 0,68-1,68%, w antracycie do 0,5%, natomiast w graficie naturalnym ok. 0,1% [14]. Zwiększenie zawartości azotu w przedziale do 0,012÷0,020% powoduje co prawda zwiększenie wytrzymałości o ok. 20÷25%, jednakże po przekroczeniu tej granicy powoduje on skłonność do pęknięć. Istotny jest również fakt, że pozbycie się azotu z żeliwa jest kosztowne [15].

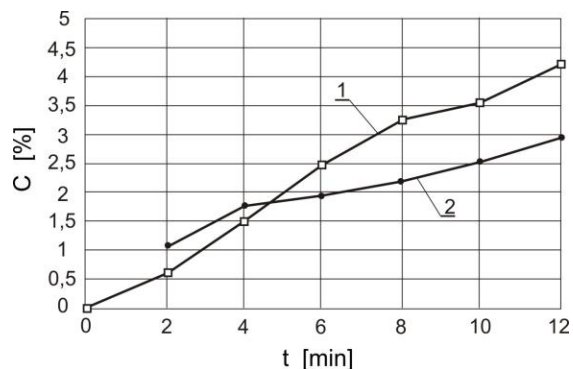
Na rys. 17 przedstawiono wpływ rodzaju nawęglacza na zwiększenie zawartości azotu w ciekłym metalu. Wyraźnie widać, że najmniej wprowadza się go, używając czystego grafitu, a najwięcej stosując koks naftowy.



Rys. 17. Wpływ rodzaju nawęglacza na zawartość azotu w żelazie, w temperaturze 1500°C w różnych fazach nawęglania: 1-grafit, 2-koks metalurgiczny (odzysk azotu od 15÷25%), 3-koks naftowy (odzysk azotu od 30÷50%) [7]

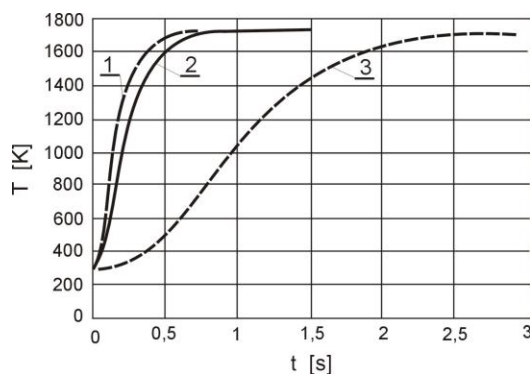
Potwierdzono to w wytopach żeliwa syntetycznego [1, 2], gdzie podstawowym materiałem wsadowym był złom stalowy o zawartości 100 ppm N. Zwiększenie zawartości tego pierwiastka w żelazie jest szczególnie widoczne przy nawęglaniu koksem naftowym (zawartość w zakresie 128÷166 ppm). Nawęglanie grafitami syntetycznym i naturalnym wykazało zawartość azotu na poziomie 70 ppm, a nawęglanie antracytem 90÷120 ppm. Należy jednak zaznaczyć, że podobnie jak w przypadku siarki znaczne zwiększenie zawartości azotu, przy nawęglaniu koksem naftowym uzyskano dla zwiększonej zawartości węgla na poziomie 4%. Natomiast przy dowieglaniu wartości te będą znacznie mniejsze. Może jednak zaistnieć sytuacja, że przy ciągłym nawęglaniu koksem naftowym i przetapianiu złomu obiegowego nastąpi kumulacja tego pierwiastka w żelazie, co może wpłynąć niekorzystnie na jego jakość.

Ważnym czynnikiem, mającym wpływ na szybkość i efektywność procesu nawęglania jest ruch względny ciekłego metalu i nawęglacza. Prowadzono badania wpływu mieszania kąpieli metalowej na zwiększenie zawartości węgla w czasie, przy nawęglaniu żelaza elektrolitycznego (rys. 18) [4]. Próby realizowano w temperaturze 1600°C, przy zastosowaniu nieruchomego i obracającego się z prędkością 35 obrotów na minutę walca grafitowego.



Rys. 18. Wpływ mieszania na rozpuszczalność grafitu w żelazie elektrolitycznym: 1-z mieszaniem, 2-bez mieszania [4]

Prowadząc proces nawęglania, należy więc zapewnić ruch kąpieli metalowej lub wprowadzanego nawęglacza. Można to uczynić przez wymuszenie ruchu metalu w piecu indukcyjnym, stosując odpowiednie parametry jego pracy. Można wprowadzać pneumatycznie nawęglacz lub ręcznie mieszać wprowadzone na powierzchnię nawęglacze (gracami do ściągania żużla, ale jest to bardzo uciążliwe) w piecach elektrycznych łukowych. Potwierdzają to również przeprowadzone obliczenia czasu nagrzewania cząstek grafitu, przy różnej prędkości przemieszczania kąpieli metalowej (rys. 19) [16].



Rys. 19. Zestawienie wyników obliczeń nagrzewania cząstki grafitu o średnicy 7 mm dla trzech prędkości przepływu: 1-v=0,5 m/s, 2-v=0,1 m/s, 3-v=0,01 m/s [9]

Przy słabym, wzajemnym ruchu nawęglacza i kąpieli metalowej (0,01 m/s) wymiana ciepła przebiega bardzo powoli. Zwiększenie prędkości względnej prowadzi do wzrostu gradientu temperatury, co znacznie intensyfikuje przebieg tego procesu. Można zauważyć, że nagrzewanie cząstek grafitu do temperatury 1721 K, przy wzajemnym ruchu nawęglacza i ciekłego metalu, wynoszącym 0,5 m/s trwa około 0,77 s. Zmniejszenie prędkości do 0,1 m/s powoduje wydłużenie czasu nagrzewania do 1 s, a przy prędkości 0,01 m/s do 2,7 s.

## 4. Podsumowanie

Analizując przedstawione wyniki można stwierdzić, że właściwy dobór odpowiedniego nawęglacza i metody nawęglania może powodować wzrost efektywności procesu o kilkanaście procent.

Znacznie mniejsze pole manewru występuje w przypadku ciekłego metalu. Zmiana składu chemicznego lub temperatury może powodować zwiększenie efektywności o kilka procent.

## Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011.

## Literatura

- [1] Janerka K., Nawęglanie ciekłych stopów żelaza, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010
- [2] Janerka K., Bartocha D., Szajnar J., Quality of carburizers and its influence of carburization process, Archives of Foundry Engineering, Wyd. PAN Katowice, vol. 9, 3/2009, s. 249-254
- [3] Janerka K., Jezierski J., Szajnar J., The evaluation of effectiveness of liquid cast iron recarburization process by using different carburizers and methods of recarburization, 20th International Metallurgical & Materials Conference METAL 2011, Brno, TANGER, 2011
- [4] Bandhyopadhyay D., Singh S.D., Sanyal D., i inni, A study on dissolution kinetics of carbon in liquid iron bath, Chemical Engineering Journal 94, 2003, s. 79-92.
- [5] Stercken K.L., Einsatz unterschiedlicher Aufkohlungsmittel bei der Erzeugung hochkohlenstoffhaltiger Stahlsorten, Stahl u. Eisen, nr 2, 1998.
- [6] Wright J.K., Baldock B. R., Dissolution kinetics of particulate graphite injected into iron/ carbon melts, Metallurgical Transactions B 19B, 1988
- [7] Grafe H., Kritische Betrachtungen über Aufkohlungsmittel und die Aufkohlung elektrisch erschmolzener Eisengusslegierungen in Induktions-tiegelöfen, Teil 1,2, Giesserei 68, no 26 – 21, 12/1981
- [8] Warchala T., Metalurgia i odlewnictwo, cz.2. Technologia żeliwa, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1995
- [9] Janerka K., Bartocha D., Computer simulation of carburizers particles heating in liquid metal, Archives of Foundry Engineering, Wyd. PAN Katowice, vol. 10, 1/2010, s. 59-66, Katowice 2010
- [10] Janerka K., Bartocha D., Symulacja komputerowa nagrzewania cząstek grafitowych w procesie wdmuchiwania proszków, Mat. X Międzynarodowej Konferencji Transport Pneumatyczny 2008, s. 82-92, 2008
- [11] Orsten S., Oeters F., Dissolution of carbon in Liquid Iron, Conf. Application of Mathematical a Physical in Liquid Iron a Steel Industry, 1988
- [12] Kosowski A., Kinetyka nawęglania żeliwa w piecu indukcyjnym, Przegląd Odlewnictwa, Nr 1-3, 1982
- [13] Fijał A., Nowoczesne technologie wytapiania żeliwa w piecach indukcyjnych, Prace Instytutu Odlewnictwa, z. 1-2, 1995
- [14] Kuźnicka A., Kuźnicki W., Górny A., Nowoczesne nawęglacze firmy ELKEM serii Elgraph, Przegląd Odlewnictwa, nr 7-8, 2000
- [15] Podrzucki C., Żeliwo – struktura, właściwości, zastosowanie, Wyd. ZG STOP, Kraków 1991
- [16] Janerka K., Bartocha D., Computer simulation of carburizers particles heating in liquid metal, Archives of Foundry Engineering, Wyd. PAN Katowice, vol. 10, 1/2010, s. 59-66, Katowice 2010

# The factors affecting the recarburization process indicators

## Abstract

The article presents the factors affecting the carburizing rates obtained (rate and efficiency) during the process of melting cast iron. The analysis includes the recarburizer type (anthracite, natural and synthetic graphite, petroleum coke) and particle size. Further factors considered in work are the methods of recarburization (recarburizer introduction to a solid charge and on the surface of the metal bath) and the parameters of the melt (temperature and chemical composition). The analysis was based on experiments performed, the calculation results of computer simulations and literature data.