

## MODELOWANIE CHŁODZENIA KRĘGÓW TAŚMY W PIECACH KOŁPAKOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

JOLANTA TALAR, JAN KUSIAK

### MODELLING OF COOLING OF COILED STRIPS IN BELL-TYPE ANNEALING FURNACES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

#### Abstract

*The objective of the paper is evaluation of effectiveness of the artificial intelligence methods in modelling of cooling process in bell-type annealing furnaces. Artificial neural networks (ANN) and expert system (ES) - based on the ID3 algorithm - were applied to the approximation of cooling curves in bell-type annealing furnaces. The results of the artificial intelligence approach were compared with the linear and non-linear regression methods. The results of modelling of cooling process by the classical model of heat exchange are also presented in the paper.*

#### 1. WSTĘP

Podjęcie tematyki modelowania chłodzenia w piecach kołpakowych kręgów walcowanej taśmy wynika z wymogów planowania produkcji na wydziale walcowni blach na zimno. Podstawą tworzenia harmonogramów produkcji są czasy trwania poszczególnych operacji technologicznych. W większości walcowni nie ma możliwości opracowywania wiarygodnych planów produkcji, ponieważ czasy chłodzenia w piecach kołpakowych zależą od wielu różnorodnych czynników i są trudne do przewidzenia. W warunkach przemysłowych wyznaczanie czasów chłodzenia jest oparte na doświadczeniu personelu kierowniczego i obarczone jest zazwyczaj dużymi błędami. W literaturze trudno znaleźć przykłady rozwiązania tego problemu. Możliwe jest zastosowanie me-

tody uproszczonej, polegającej na wykorzystaniu zastępczych współczynników wymiany ciepła (Apterman i in., 1965; Senkara, 1981). W przypadku innych przedsiębiorstw hutniczych, jeżeli były prowadzone prace w tym kierunku, to nie znalazły one odzwierciedlenia w publikacjach naukowych. Celem niniejszej pracy jest ocena przydatności metod sztucznej inteligencji do modelowania chłodzenia w piecu kołpakowym kręgów walcowanej taśmy.

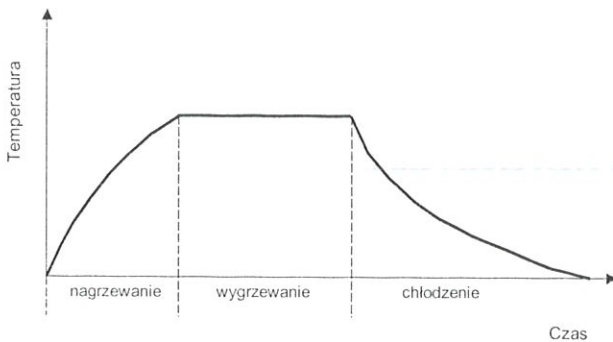
#### 2. WYŻARZANIE KRĘGÓW TAŚMY W PIECU KOŁPAKOWYM

Proces wyżarzania rekrystalizującego (Staub, 1994) prowadzi się po walcowaniu na zimno taśm. Wyżarzanie rekrystalizujące ma na celu usunięcie skutków

zgniotu i przywrócenie pierwotnych własności materiału. Proces wyżarzania składa się z następujących zabiegów (Przybyłowicz, 1994):

- nagrzewanie,
- wygrzewanie,
- chłodzenie.

Schemat przebiegu procesu wyżarzania przedstawiono na rysunku 1.



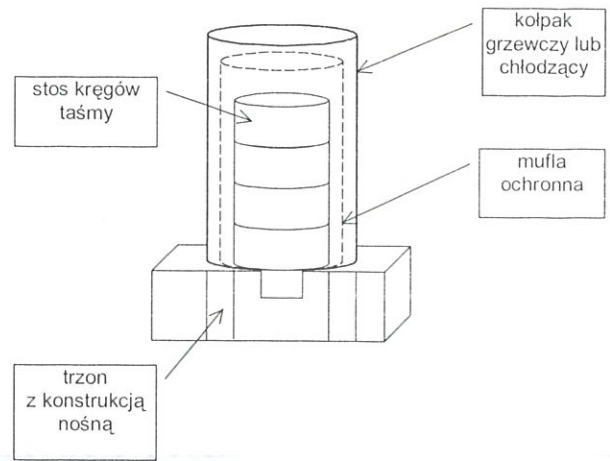
Rysunek 1. Schemat przebiegu procesu wyżarzania.  
Figure 1. Scheme of temperature changes in the annealing process.

Wyżarzanie rekrytalizujące powoduje uzyskanie ziarn o jednorodnej wielkości i rozłożenie cementytu w drobnej postaci wewnątrz zrekrystalizowanych ziarn ferrytu. Zakres temperatur wyżarzania musi być jak najmniejszy z uwagi na dążenie do uzyskania takiej samej struktury w całej objętości wyżarzane go wsadu oraz korzystnych warunków dla wzrostu ziarn ferrytu i dyfuzji węgla. Przekroczenie tego zakresu temperatur powoduje powstanie nierównomiernej wielkości ziarn i wydzieleń cementytu na granicach ziarn. W praktyce przemysłowej temperaturę wyżarzania taśm walcowanych na zimno ogranicza się do 700°C. Powstawaniu wydłużonych ziarn ferrytu sprzyja powolne nagrzewanie wsadu do temperatury wyżarzania z szybkością 45-75°C/h. Czas wygrzewania potrzebny jest dla wyrównania temperatury w całej objętości wyżarzanych kręgów w piecu kołpakowym. Po wyżarzaniu wsad chłodzi się w sposób regulowany (Żugaj, 1978).

## 2.1. Piec kołpakowy – budowa i zasada działania

Wyżarzanie taśm zwiniętych w kręgi odbywa się w piecach kołpakowych z atmosferą ochronną (Krivandin, 1980; Senkara, 1981). Piec kołpakowy składa się z następujących elementów (Instrukcja technologiczna, 1999):

- kołpak grzewczy,
- mufla ochronna,
- kołpak chłodzący,
- trzon z konstrukcją nośną.



Rysunek 2. Ogólny schemat budowy pieca kołpakowego.  
Figure 2. General scheme of the bell-type furnace.

Schemat budowy pieca kołpakowego (jednostosowego) przedstawiono na rysunku 2.

Kręgi taśm ustawione na stanowisku piecowym oddziela się przekładkami konwekcyjnymi. Następnie stos kręgów nakrywa się muflą żaroodporną uszczelnioną piaskiem cyrkonowym fluidyzowanym i kołpakiem grzewczym. Kołpak grzewczy to konstrukcja stalowa w kształcie walca wykonana z blachy, która w części wewnętrznej wyłożona jest materiałem izolacyjnym żaroodpornym, przystosowanym do gwałtownych zmian temperatury. Na zewnątrz kołpaka grzewczego znajdują się rekuperatory, przewody doprowadzające gaz i powietrze oraz odprowadzające spaliny. W dolnej części kołpaka grzewczego umieszczone są palniki grzewcze. Podczas wyżarzania kręgi pod kołpakiem zabezpieczone są przed utlenianiem za pomocą atmosfery ochronnej. Skład atmosfery ochronnej powinien być taki, aby nie powodowała ona utleniania, nawęglania i odwęglania wyżarzane go materiału, zapewniając otrzymanie taśm o powierzchni jasnej bez nalotów i utlenień. Atmosfera ochronna służy ponadto jako czynnik wymiany ciepła drogą konwekcji. Głównymi składnikami atmosfery ochronnej są: azot (94%) i wodór (6%). Wymuszony obieg atmosfery ochronnej w piecu wywołuje wentylator cyrkulacyjny umieszczony w trzonie pieca. Nagrzewanie wsadu w piecu kołpakowym jest procesem stopniowego podnoszenia temperatury kręgów od momentu zapalenia palników kołpaka grzewczego do osiągnięcia zadanej temperatury nagrzewanych kręgów. Po zakończeniu fazy nagrzewania następuje faza wygrzewania stosu kręgów. Wygrzewanie jest to proces wyrównywania temperatury we wsadzie przy stałej temperaturze gazu ochronnego. Kolejnym etapem pracy pieca kołpakowego jest chłodzenie wsadu. Etap chłodzenia obejmuje fazę chłodzenia naturalnego, fazę chłodzenia przyspieszonego oraz fazę koń-

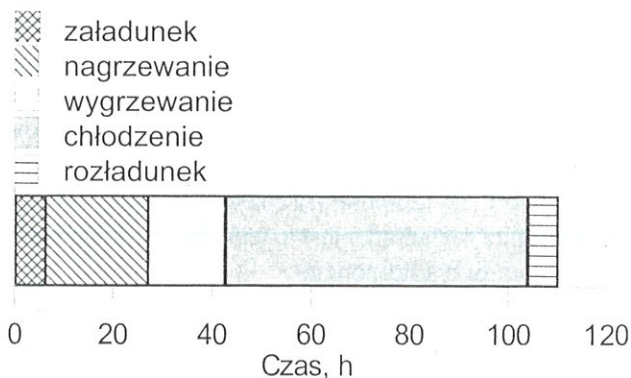
cowego chłodzenia. Podczas chłodzenia przyspieszonego pewna ilość gazu (ok. 40%) zostaje przechwycona przez cztery zawory klapowe zamykające dwa kolejne strumienie gazu w dyfuzorze. Gaz gorący zostaje następnie skierowany do 2-ch wymienników z rurami żebrowanymi gdzie zostaje schłodzony do temperatury 60°C. Obieg gazu przez wymiennik ciepła odbywa się w sposób niewymuszony bez pomocy wentylatora. Dzięki temu omawiany układ nie wymaga dodatkowej energii elektrycznej. Każdy wymiennik utworzony jest z dwóch wiązek rur żebrowanych umieszczonych poziomo w szczelnej obudowie i połączonych z dwoma zaworami klapowymi. Poprzez rury przepływa woda chłodząca. Schłodzony gaz zostaje wprowadzony ponownie pod muflę za pośrednictwem króćca ze stali węglowej zaopatrzonego w zawór sterowany elektrycznie. Dodatkowo, podczas etapu chłodzenia, na stanowisko piecowe przykryte muflą zakładany jest kołpak chłodzący. Kołpak chłodzący, dzięki czterem wentylatorom napędzanym silnikami powoduje intensywną wymianę powietrza otaczającego muflę i tym samym znacznie skraca czas chłodzenia wsadu. Faza końcowego chłodzenia odbywa się poza stanowiskiem piecowym. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury gazu ochronnego następuje zdjęcie mufl i rozładunek kręgów na stanowiska końcowego chłodzenia, gdzie kręgi są chłodzone do temperatury poniżej 40°C.

## 2.2. Cykl pracy pieca kołpakowego

Określenie czasu trwania poszczególnych cykli wyżarzania w piecach kołpakowych jest konieczne dla odpowiedniego planowania produkcji na oddziale wyżarzania, jak i planowania produkcji całego wydziału walcowni blach na zimno. Operacje technologiczne, konieczne do wykonania w ramach jednego cyklu wyżarzania - cyklu pracy pieca kołpakowego, można opisać następująco (Instrukcja technologiczna, 1999):

- załadunek kręgów
- założenie mufl ochronnej
- sprawdzenie szczelności mufl, przedmuchiwanie
- założenie kołpaka grzewczego
- nagrzewanie i wygrzewanie wsadu
- zdjęcie kołpaka grzewczego
- chłodzenie naturalne
- założenie kołpaka chłodzącego
- chłodzenie przyspieszone (kołpak chłodzący oraz układ wychładzania atmosfery ochronnej w chłodnicach wodnych)
- zdjęcie kołpaka chłodzącego
- zdjęcie mufl ochronnej
- rozładunek kręgów.

Z punktu widzenia dostępnych zbiorów danych, ich struktury oraz potrzeb harmonogramowania produk-



Rysunek 3. Schemat cyklu wyżarzania w piecu kołpakowym.  
Figure 3. Schematic cycle of annealing in the bell-type furnace.

cji, przyjęto następujący (uproszczony) schemat cyklu pracy pieca kołpakowego, który przedstawiono na rysunku 3.

Cykl pracy pieca kołpakowego można opisać następująco:

$$t_P = t_Z + t_N + t_W + t_C + t_R \quad (1)$$

gdzie:

$t_Z$  – czas załadunku kręgów

$t_N$  – czas nagrzewania

$t_W$  – czas wygrzewania

$t_C$  – czas chłodzenia

$t_R$  – czas rozładunku.

Istnieje metoda wyznaczania czasu trwania etapu nagrzewania kręgów w piecu kołpakowym, stosowana w praktyce inżynierskiej, która polega na wykorzystaniu odpowiednich wykresów nagrzewania, opracowanych na bazie wieloletnich doświadczeń przemysłowych. Dla etapu chłodzenia kręgów taśmy nie ma wypracowanej podobnej metodyki, dlatego też dla celów dalszej analizy wybrano właśnie etap chłodzenia kręgów taśmy w piecach kołpakowych.

## 2.3. Chłodzenie kręgów taśmy w piecu kołpakowym

W rozważanej walcowni blach na zimno występują dwa rodzaje pieców (Instrukcja technologiczna, 1999): HEURTEY'a (H) i CHUGAI-RO (CH), różniące się przede wszystkim średnicą i masą wyżarzanych kręgów taśmy. Etap chłodzenia w piecu kołpakowym obejmuje fazę chłodzenia naturalnego oraz fazę chłodzenia przyspieszonego. Trzecia faza – faza końcowego chłodzenia – odbywa się poza stanowiskiem piecowym.

Faza chłodzenia naturalnego obejmuje czas od momentu wygaszenia palników kołpaka grzewczego do osiągnięcia temperatury 425°C dla pieców typu (H), a dla pieców typu (CH) do osiągnięcia temperatury 550°C, przy czym wartość temperatury dotyczy gazu ochronnego i jest mierzona za pomocą termopary

umieszczonej pod muflą ochronną oddzielającą stos kręgów od otaczającej atmosfery. *Faza chłodzenia przyspieszonego* obejmuje czas chłodzenia od temperatury 425°C do temperatury rozładunku dla pieców typu (H), a w przypadku pieców typu (CH) od temperatury 550°C do temperatury rozładunku (ok. 100°C). Temperatura rozładunku jest to temperatura końca fazy chłodzenia przyspieszonego.

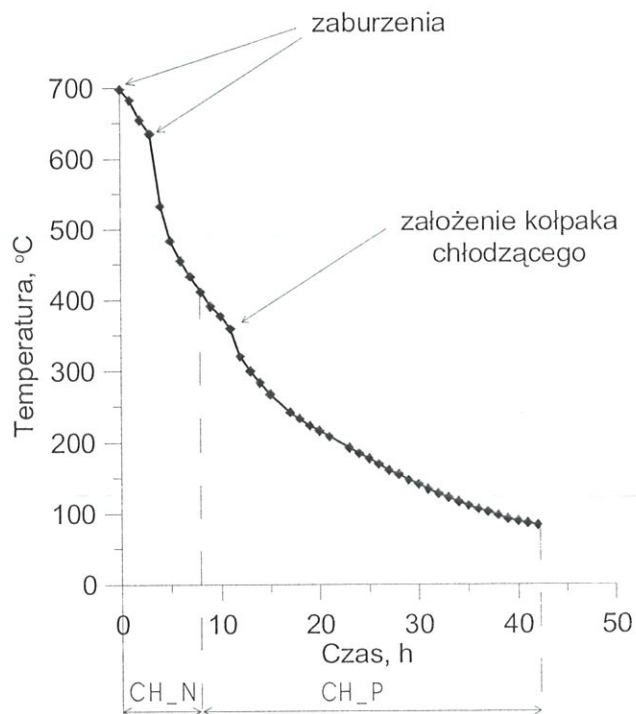
Na stanowisko piecowe zakładany jest także kołpak chłodzący, który powoduje intensywną wymianę powietrza otaczającego muflę i skraca czas chłodzenia wsadu. Na rysunku 4 przedstawiono przykładową krzywą chłodzenia w piecu kołpakowym, z uwzględnieniem fazy chłodzenia naturalnego – (CH\_N), fazy chłodzenia przyspieszonego – (CH\_P), oraz założenia kołpaka chłodzącego. Zaburzenia w pomiarze temperatury gazu ochronnego, występujące w początkowym etapie chłodzenia naturalnego, są efektem zdejmowania kołpaka grzewczego.

### 3. MODELOWANIE CHŁODZENIA W PIECU KOŁPAKOWYM PRZY ZASTOSOWANIU METODY ZASTĘPCZYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW WYMIANY CIEPŁA

Obliczenia cieplne pieców kołpakowych są skomplikowane. Utrudnia je bardzo zróżnicowany kształt wsadu, oraz ruch atmosfery ochronnej pod muflą i powietrza pod kołpakiem chłodzącym (Senkara, 1981). W praktyce przemysłowej stosuje się wiele uproszczonych równań, pozwalających na pewne przybliżone wyznaczanie czasów chłodzenia. Wyniki tych obliczeń obarczone są zazwyczaj wysokimi błędami i służą jedynie do obliczeń szacunkowych.

Do wyznaczenia zmian temperatury podczas chłodzenia kręgów taśmy w piecu kołpakowym, można posłużyć się metodą zastępczych współczynników wymiany ciepła (Apterman i in., 1965). Metoda ta pozwala na wyznaczanie temperatury wsadu i temperatury gazu ochronnego, w warunkach chłodzenia wewnętrznym obiegiem gazu pod muflą ochronną oraz z dodatkowym wymuszonym obiegiem powietrza pod kołpakiem chłodzącym.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń uzyskanych przy zastosowaniu metody zastępczych współczynników wymiany ciepła. Na podstawie tej metody wyznaczono zmianę temperatury wsadu oraz zmianę temperatury gazu ochronnego w czasie, w warunkach przyspieszonego chłodzenia (CH\_P) z wewnętrznym przepływem gazu pod muflą (bez kołpaka chłodzącego). Więcej szczegółów na temat zastosowania metody zastępczych współczynników wymiany ciepła do modelowania chłodzenia w piecu kołpakowym



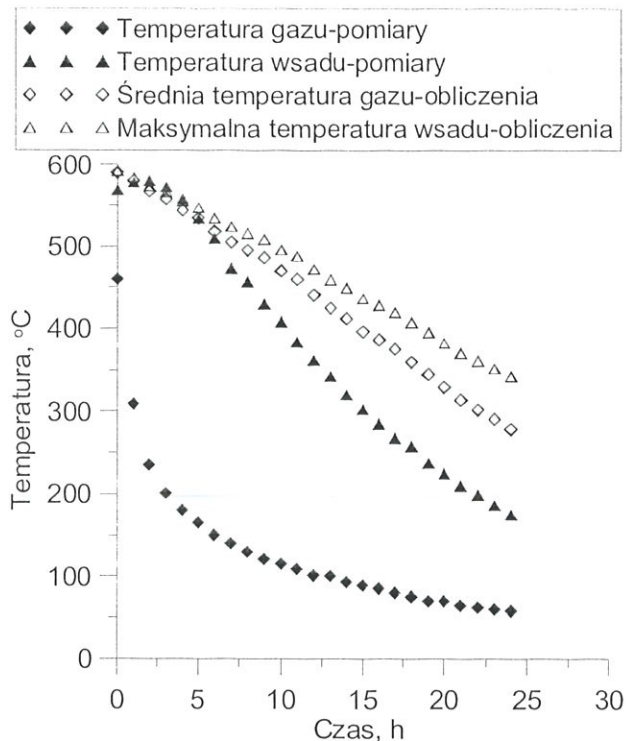
Rysunek 4. Przykładowa krzywa chłodzenia w piecu kołpakowym typu HEURTEY.

Figure 4. Example of the cooling curve for the HEURTEY bell-type furnace.

znaleźć można w pracy (Talar, 2003). Uzyskane wyniki porównano z pomiarami temperatury wsadu oraz temperatury gazu ochronnego, przeprowadzonymi w warunkach przemysłowych (Żugaj, 1978).

Jak widać z rysunku 5, wyniki obliczeń temperatury gazu oraz wsadu znacznie różnią się od danych pomiarowych. Jest to wynikiem przyjęcia wielu uproszczeń we wzorach empirycznych (Apterman i in., 1965). Dodatkowym powodem złej jakości uzyskanych wyników może być różnica między ilością rzeczywistego przepływu gazu ochronnego pod muflą, a ilością określoną w instrukcji technologicznej. Ponadto, należy zauważyć, że algorytm ten wyznacza średnią temperaturę gazu pod muflą, natomiast rzeczywisty pomiar temperatury gazu był dokonywany za pomocą termopary umieszczonej w dolnej części (między kręgami a muflą), blisko strumienia napływającego schłodzonego gazu.

Znaczne rozbieżności, pomiędzy pomiarami a wynikami obliczeń metodą zastępczych współczynników wymiany ciepła, skłoniły Autorów niniejszej pracy do poszukiwania innych metod modelowania chłodzenia w piecu kołpakowym.



Rysunek 5. Obliczone zmiany temperatury w funkcji czasu, uzyskane metodą zastępczych współczynników wymiany ciepła.  
Figure 5. Temperature changes calculated using effective heat transfer coefficients method.

#### 4. APROKSYMACJA KRZYWYCH CHŁODZENIA Z WYKORZYSTANIEM METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

W ramach pracy dokonano aproksymacji całego zestawu krzywych chłodzenia przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji: sztucznych sieci neuronowych (SSN) oraz systemu ekspertowego (SE). Zestaw danych dotyczył pomiarów przeprowadzonych w warunkach przemysłowych i miał następującą strukturę:

- $T_i$  – temperatura gazu ochronnego pod muflą, °C
- $m$  – masa stosu kręgów, kg
- $B$  – średnia grubość taśmy w stosie kręgów, m
- $h$  – średnia szerokość taśmy w stosie kręgów (średnia wysokość kręgów w stosie), m
- $n$  – ilość kręgów w stosie,
- $k$  – występowanie kołpaka chłodzącego, (1-kołpak chłodzący; 0-brak kołpaka chłodzącego),
- $p$  – typ pieca, (1-piec HEURTEY'a; 0-piec CHUGAI-RO)
- $d$  – zaburzenia w danych pomiarowych temperatury gazu, (1-zaburzenia; 0-brak zaburzeń)
- $t$  – czas chłodzenia, h
- $T_o$  – temperatura otoczenia, °C.

Wstępne wyniki aproksymacji krzywych chłodzenia kręgów taśmy w piecu kołpakowym przy wykorzystaniu SSN można znaleźć w pracy (Talar i Kusiak,

2002).

Do aproksymacji krzywych chłodzenia kręgów taśmy w piecu kołpakowym zastosowano wielowarstwową sieć neuronową o topologii: 9 - 12 - 1. Sygnałami wejściowymi sieci były opisane powyżej wielkości:  $m, B, h, n, k, p, d, t, T_o$ , natomiast wyjście sieci stanowiła temperatura gazu ochronnego pod muflą –  $T_i$ . Zbiór uczący stanowił 50% danych zebranych w warunkach przemysłowych, 25% stanowił zbiór walidujący i 25% zbiór testowy.

Do aproksymacji krzywych chłodzenia zastosowano również system ekspertowy (SE) (Mulawka, 1996; Hopgood, 2000) z regułową bazą wiedzy, utworzoną na podstawie algorytmu generowania drzew decyzyjnych. Algorytm ID3 oraz system C4.5 to efektywne metody indukcji drzew decyzyjnych opracowane przez Quinlana (1986; 1993). Algorytmy te są zazwyczaj stosowane do rozwiązywania problemów klasyfikacji. W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania tego podejścia do aproksymacji krzywych chłodzenia. W celu opisu zmian temperatury gazu ochronnego  $T_i$  w czasie, wyszczególniono obiekty, atrybuty i wartości. Innymi słowy, obiektowi – jakim jest stos kręgów taśmy – o atrybutach:  $m, B, h, n, k, p, d, t, T_o$ , przyporządkowano pewną klasę decyzyjną – temperaturę gazu ochronnego  $T_i$ . Szczegółowe omówienie metodyki tworzenia bazy wiedzy systemu ekspertowego na podstawie algorytmu ID3 i jego późniejszej wersji C4.5, można znaleźć w pracy (Talar, 2003).

Zastosowanie modeli regresyjnych (Draper, 1973; Brandt, 1976) do aproksymacji krzywych chłodzenia polegało na dopasowaniu równania regresji (liniowej/nieliniowej) do zbioru punktów (danych empirycznych), poprzez estymację parametrów wybranego modelu. Metodą estymacji parametrów modelu była metoda najmniejszych kwadratów, stosowana do minimalizacji sumy kwadratów odchylenia wartości zaobserwowanych dla zmiennej zależnej od wartości prognozowanej na podstawie modelu. Model regresji liniowej (RL) dla aproksymacji krzywych chłodzenia opisano równaniem pozwalającym obliczyć temperaturę gazu ochronnego  $T_i$ :

$$T_i = a + b_1m + b_2B + b_3h + b_4n + b_5k + b_6p + b_7d + b_8t + b_9T_o \quad (2)$$

gdzie:  $a, b_i$  – parametry.

Model regresji nieliniowej (RNL) przedstawiono w następującej postaci:

$$T_i = C + \exp(a + b_1m + b_2B + b_3h + b_4n + b_5k + b_6p + b_7d + b_8t + b_9T_o) \quad (3)$$

gdzie:  $a, b_i, C$  – parametry.

#### 4.1. Wyniki aproksymacji krzywych chłodzenia

Wyniki uzyskane przez SSN oraz SE porównano z wynikami modeli regresyjnych i przedstawiono w tabelicy 1. W celu oszacowania jakości uzyskanych wyników wykorzystano błąd średniokwadratowy  $\Phi$  oraz błąd E określone równaniami:

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left( \frac{T_{obl} - T_{pom}}{T_{pom}} \right)^2} \quad (4)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^l (T_{obl} - T_{pom})}{l} \quad (5)$$

gdzie:

$l$  – liczba danych pomiarowych,

$T_{obl}$  – temperatura gazu ochronnego (obliczona),

Tablica 1. Wyniki aproksymacji krzywych chłodzenia kręgów taśmy w piecach kołpakowych.

Table 1. Results of approximation of cooling curves for coils in bell-type furnaces.

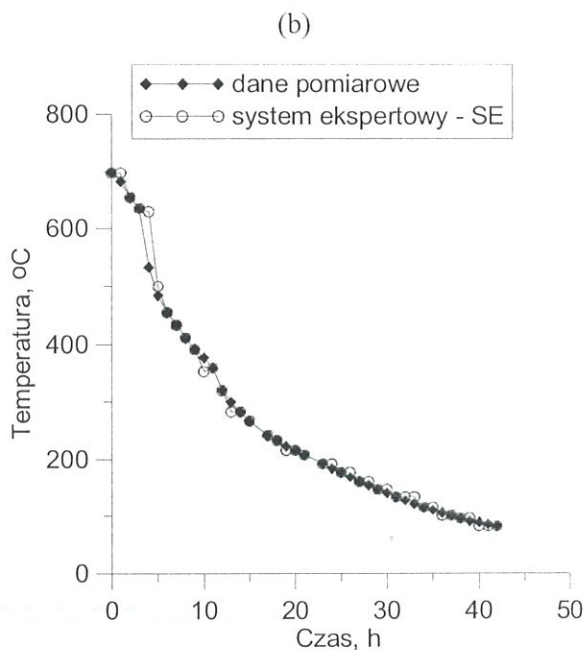
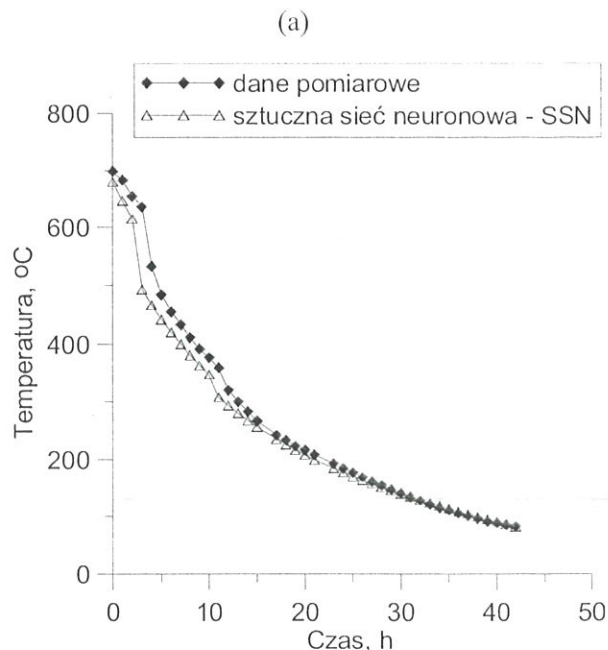
Funkcja: $T_t = f(m, B, h, n, k, p, d, t, T_o)$		
Metoda	Błąd E	Błąd $\Phi$
Sztuczne sieci neuronowe – SSN	22,38	0,13
System ekspertowy – SE	33,64	0,25
Regresja nieliniowa – RNL	41,82	0,28
Regresja liniowa – RL	56,54	0,37

$T_{pom}$  – temperatura gazu ochronnego (zmierzona).

Metody sztucznej inteligencji dają lepsze wyniki aproksymacji krzywych chłodzenia w porównaniu z aproksymacją równaniami regresji liniowej i nieliniowej. Obliczone wartości błędów, zamieszczone w tabelicy 1, dotyczą wyników aproksymacji krzywych ze zbioru testowego, zawierającego do 40 krzywych chłodzenia. Niskie wartości błędów sztucznej sieci neuronowej potwierdzają skuteczność tej metody w aproksymacji funkcji. Błąd SSN na poziomie  $\Phi = 0,13$  jest możliwy do zaakceptowania. Natomiast SE oparty na algorytmie uczenia się maszyn, nie okazał się tak skutecznym narzędziem aproksymacji funkcji chłodzenia (błąd  $\Phi = 0,25$ ).

Na rysunkach 6–8 porównano wyniki aproksymacji metodami sztucznej inteligencji z wynikami pomiarów temperatury gazu ochronnego.

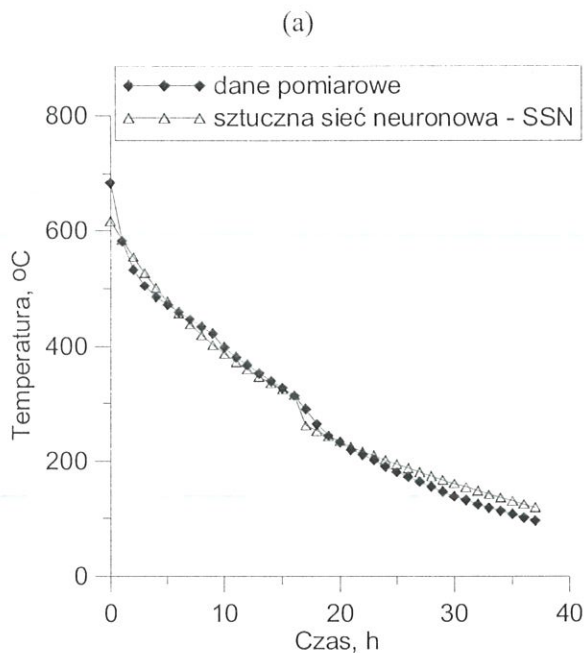
Analizując przykładowe wykresy przedstawione na rysunkach 6–8 oraz biorąc pod uwagę, że w ramach pracy dokonano aproksymacji całego zestawu krzywych chłodzenia (dla materiałów wsadowych o różnych parametrach i warunkach pracy pieca kołpako-



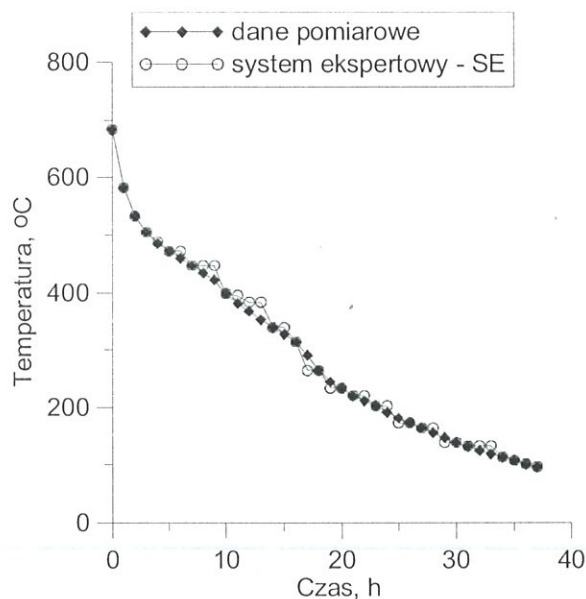
Rysunek 6. Wyniki aproksymacji krzywej chłodzenia kręgów taśmy w piecu kołpakowym, (dla  $m = 42610$  kg,  $h = 1,516$  m,  $B = 0,0007$  m,  $n = 2$ ,  $T_o = 10^\circ\text{C}$ ), przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji: (a) sztucznych sieci neuronowych, (b) systemu ekspertowego.

Figure 6. Results of approximation of the cooling curve for coils in the bell-type furnace obtained from the artificial neural network (a) and from the expert system (b) ( $m = 42610$  kg,  $h = 1.516$  m,  $B = 0.0007$  m,  $n = 2$ ,  $T_o = 10^\circ\text{C}$ ).

wego), można stwierdzić, że SSN i SE uzyskały dobre wyniki w modelowaniu zmian temperatury gazu ochronnego w funkcji czasu. Na rysunku 6 możemy zauważyć, że wyniki SE charakteryzują się dobrą zbieżnością. Natomiast rysunek 8 jest przykładem dokładniejszej aproksymacji SSN w porównaniu do wyników SE. Można stwierdzić, że w przypadku SSN uzyskano lepszy charakter dopasowania krzywych



(a)



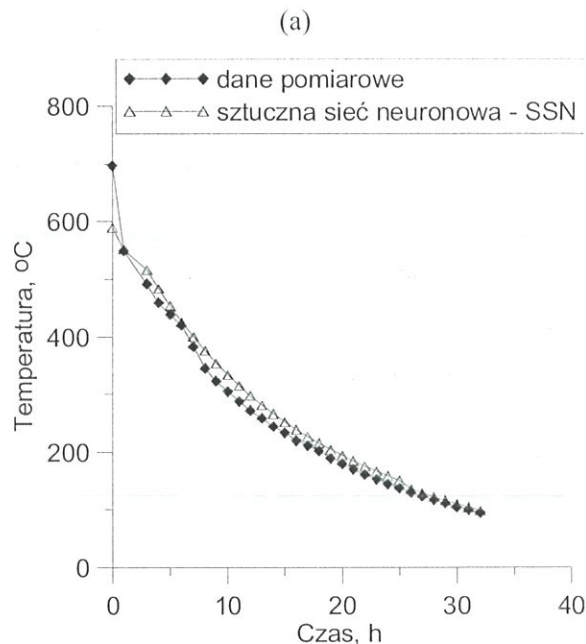
(b)

Rysunek 7. Wyniki aproksymacji krzywej chłodzenia kęgów taśmy w piecu kołpakowym, (dla  $m = 67630$  kg,  $h = 1,018$  m,  $B = 0,001$  m,  $n = 4$ ,  $T_o = 10^\circ\text{C}$ ), przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji: (a) sztucznych sieci neuronowych, (b) systemu ekspertowego.

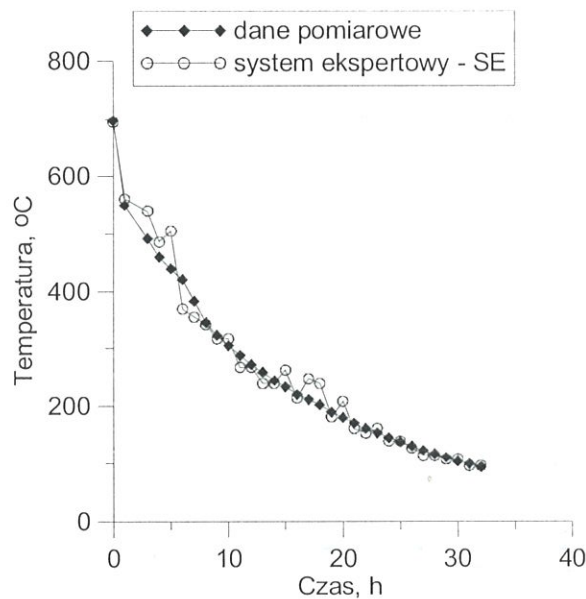
Figure 7. Results of approximation of the cooling curve for coils in the bell-type furnace obtained from the artificial neural network (a) and from the expert system (b) ( $m = 67630$  kg,  $h = 1.018$  m,  $B = 0.001$  m,  $n = 4$ ,  $T_o = 10^\circ\text{C}$ ).

chłodzenia do danych doświadczalnych, a dodatkowo wyniki zawarte w tabelicy 1 potwierdzają, że metoda ta uzyskuje najlepsze wyniki w stosunku do pozostałych metod.

Największe rozbieżności zastosowanych metod można zauważyć w modelowaniu początkowego etapu chłodzenia. Może to być związane z zaburzeniami w pomiarze temperatury gazu ochronnego, które wy-



(a)



(b)

Rysunek 8. Wyniki aproksymacji krzywej chłodzenia kęgów taśmy w piecu kołpakowym, (dla  $m = 49000$  kg,  $h = 1,017$  m,  $B = 0,0006$  m,  $n = 4$ ,  $T_o = 30^\circ\text{C}$ ), przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji: (a) sztucznych sieci neuronowych, (b) systemu ekspertowego.

Figure 8. Results of approximation of the cooling curve for coils in the bell-type furnace obtained from the artificial neural network (a) and from the expert system (b) ( $m = 49000$  kg,  $h = 1.017$  m,  $B = 0.0006$  m,  $n = 4$ ,  $T_o = 30^\circ\text{C}$ ).

stępują podczas zdejmowania kołpaka grzewczego. Ponadto, moment założenia kołpaka chłodzącego jest trudny do przewidzenia w warunkach rzeczywistych i można go w zasadzie uznać za przypadkowy, co dodatkowo komplikuje modelowanie etapu chłodzenia w piecu kołpakowym.

Ze względu na złożone warunki przebiegu procesu, różnorodność asortymentu wyżarzanego wsadu (wy-

miary kręgów, masa stosu kręgów i in.), oraz ze względu na stan techniczny agregatów piecowych, dane zebrane w warunkach przemysłowych mogły okazać się niewystarczające dla odpowiedniego modelowania tego procesu. Tak duża zmienność badanych parametrów i różnorodność stanu technicznego poszczególnych pieców kołpakowych może w znaczący sposób wpływać na przebieg procesu chłodzenia. Poprawy wyników aproksymacji należałoby poszukiwać w dalszych analizach tego procesu i dodatkowych obliczeniach na podstawie zbiorów danych o większej wiarygodności.

## 5. PRZEWIDYWANIE CZASÓW CHŁODZENIA KRĘGÓW TAŚMY W PIECACH KOŁPAKOWYCH

W zagadnieniu aproksymacji krzywych chłodzenia zmienną zależną – prognozowaną na podstawie modelu – była temperatura gazu ochronnego  $T_r$ . Sterowanie pracą pieców kołpakowych na oddziale wyżarzania odbywa się w oparciu o pomiar tego parametru. Natomiast dla harmonogramowania produkcji istotne jest prognozowanie czasu chłodzenia  $t$ , w oparciu o następujące zmienne wejściowe:  $T_r, m, B, h, n, k, p, d, T_o$ . Wyznaczanie czasu chłodzenia w piecu kołpakowym może być użyteczne między innymi dla następujących działań:

- przygotowania kolejnych partii wsadu do załadunku na stanowisko piecowe,
- planowania obciążenia składów międzyoperacyjnych (przed i za oddziałem wyżarzania),
- zagospodarowania powierzchni składów,
- planowania obciążenia poszczególnych stanowisk piecowych,
- planowania remontów,
- planowania produkcji.

Do prognozowania czasów chłodzenia w piecach kołpakowych zastosowano sztuczne sieci neuronowe oraz system ekspertowy. Uzyskane wyniki poddano weryfikacji metodami regresji statystycznej. Opis zastosowanej metodyki badawczej, w zakresie metod sztucznej inteligencji, można znaleźć w pracy (Talar, 2003). Do przewidywania czasów chłodzenia w piecu kołpakowym zastosowano, podobnie jak w przypadku aproksymacji krzywych chłodzenia, zbiór danych o strukturze opisanej w poprzednim rozdziale. W tabelicy 2 przedstawiono wyniki przewidywania czasów chłodzenia uzyskane metodami sztucznej inteligencji oraz wyniki analizy regresyjnej.

Na rysunkach 9–10 przedstawiono ilustrację wyników przewidywania czasów chłodzenia uzyskanych przez sztuczne sieci neuronowe realizujące regresję uogólnioną (rysunek 9) oraz wyniki systemu ekspertowego (rysunek 10). Rysunki te przedstawiają porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów. Na

Tablica 2. Przewidywane czasy chłodzenia kręgów taśmy w piecach kołpakowych.

Table 2. Predicted times of cooling of coils in bell-type furnaces.

$t = f(T_r, m, B, h, n, k, p, d, T_o)$		
Metoda	Błąd E	Błąd $\Phi$
Sztuczne sieci neuronowe – SSN	0,97	0,20
System ekspertowy – SE	1,60	0,27
Regresja nieliniowa – RNL	4,50	0,43
Regresja liniowa – RL	5,16	2,10

wykresach dodatkowo zaznaczono krzywe obrazujące granice błędu  $\tau$ , obliczonego według równania:

$$\tau = \frac{|t_{pom} - t_{obl}|}{t_{pom}} 100\% \quad (6)$$

gdzie:

$l$  – liczba danych pomiarowych,

$t_{obl}$  – czas chłodzenia (obliczony),

$t_{pom}$  – czas chłodzenia (zmierzony).

Wyniki metod sztucznej inteligencji przedstawione na rysunkach 9 i 10 pozwalają wysnuć wniosek odnośnie miary błędu względnego  $\tau$ , że skuteczniejszym narzędziem prognozowania okazała się sztuczna sieć neuronowa. W przypadku SSN 84% uzyskanych wyników uzyskało błąd w granicach  $\pm 10\%$ , podczas gdy jakość wyników systemu ekspertowego mieściła się w granicach błędu  $\pm 10\%$  tylko dla 69% uzyskanych wyników. Największe błędy w przewidywaniu czasów chłodzenia uzyskano dla początkowego etapu chłodzenia w piecu kołpakowym. Podobne problemy w modelowaniu tego etapu pojawiły się przy aproksymacji krzywych chłodzenia, opisanej w poprzednim rozdziale.

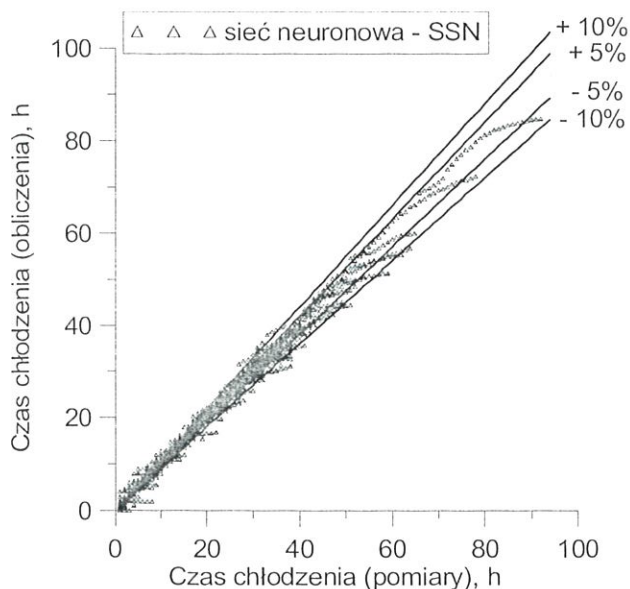
Ponadto, analizując wyniki zamieszczone w tabelicy 2 można stwierdzić, że średni błąd E czasów chłodzenia dla metod sztucznej inteligencji wynosi 1-2 godz., natomiast wyniki modeli statystycznych, regresji liniowej i nieliniowej, charakteryzują się dużymi błędami prognozy (powyżej 4 godz.).

## 6. PODSUMOWANIE

W ramach pracy podjęto próbę zastosowania metod sztucznej inteligencji do modelowania chłodzenia kręgów taśmy w piecach kołpakowych. Do aproksymacji funkcji chłodzenia zastosowano sztuczne sieci neuronowe oraz system ekspertowy. Uzyskane wyniki poddano weryfikacji metodami regresji liniowej i nieliniowej.

Wyniki obliczeń sztucznymi sieciami neuronowymi potwierdzają skuteczność tej metody w aproksymacji złożonych funkcji. Błąd średniokwadratowy sztucznej sieci neuronowej wynosił  $\Phi = 0,13$ . Natomiast wyniki uzyskane przez system ekspertowy nie były aż tak zado-





Rysunek 9. Wielkości błędu przewidywania czasów chłodzenia przez sieć neuronową (65%, 84% i 90% wyników SSN mieści się odpowiednio w granicach  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  i  $\pm 15\%$  błędu).

Figure 9. Error of artificial neural network predictions of cooling time (65%, 84% and 90% of ANN results are within  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  and  $\pm 15\%$  of error, respectively).

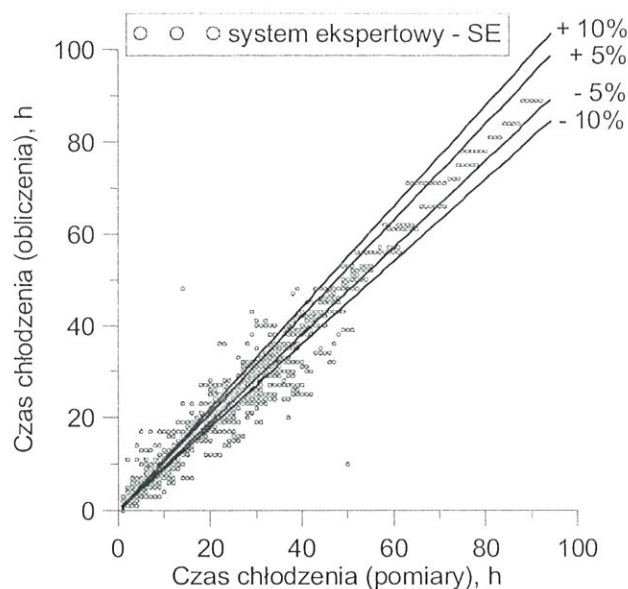
wałające (błąd  $\Phi = 0,25$ ). Metoda zastępczych współczynników wymiany ciepła oraz modele regresyjne nie dały satysfakcjonujących rezultatów. Należy zauważyć, że dla każdej z zastosowanych metod, największe błędy w modelowaniu etapu chłodzenia występowały w fazie chłodzenia naturalnego. Źródłem tych błędów są niewątpliwie zaburzenia w danych pomiarowych, które są wynikiem zdejmowania kołpaka grzewczego. Niemniej jednak metody sztucznej inteligencji uzyskały zdecydowanie lepsze wyniki, w porównaniu z innymi metodami, w modelowaniu tak złożonego procesu jakim jest chłodzenie kręgów taśmy w piecach kołpakowych. Wyniki sztucznych sieci neuronowych charakteryzowały się dobrą zbieżnością i uzyskały one jakościowo najlepszy charakter dopasowania krzywych chłodzenia.

Ponadto, w pracy zastosowano metody sztucznej inteligencji do przewidywania czasu chłodzenia w piecach kołpakowych. W tym przypadku, wyznaczenie czasu trwania cyklu wyżarzania było istotne z punktu widzenia planowania produkcji. Należy podkreślić, że sztuczne sieci neuronowe uzyskały najlepsze wyniki w przewidywaniu czasu chłodzenia w porównaniu do innych metod. Wyniki uzyskane metodami sztucznej inteligencji potwierdzają ich skuteczność w modelowaniu chłodzenia kręgów taśmy w piecach kołpakowych.

Praca finansowana w ramach badań własnych nr 10.10.110.392.

## LITERATURA

Apterman, W.N., Dwiejrin, E.G., Tymczak, W.M., 1965, Kołpakowje pieczy, Metalurgija, Moskwa.



Rysunek 10. Wielkości błędu przewidywania czasów chłodzenia przez system ekspertowy (53%, 69% i 78% wyników SE mieści się odpowiednio w granicach  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  i  $\pm 15\%$  błędu).

Figure 10. Error of expert system predictions of cooling time (53%, 69% and 78% of ES results are within  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  and  $\pm 15\%$  of error, respectively).

- Brandt, S., 1976, Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych, PWN, Warszawa.
- Draper, N.R., Smith, H., 1973, Analiza regresji stosowana, PWN, Warszawa.
- Hopgood, A. A., 2000, Intelligent Systems for Engineers and Scientists, CRC Press.
- Instrukcja technologiczna wyżarzania blachy w piecach kołpakowych w walcowni blach na zimno, 1999, HTS S.A.
- Krivandin, V., Markov, B., 1980, Metallurgical Furnaces, Mir Publishers, Moscow.
- Masters, T., 1996, Sieci neuronowe w praktyce, WNT, Warszawa.
- Mulawka, J., 1996, Systemy ekspertowe, WNT, Warszawa.
- Przybyłowicz, K., 1994, Metaloznawstwo, WNT, Warszawa.
- Quinlan, J.R., 1986, Induction of decision trees, Machine Learning 1, 81-106.
- Quinlan, J.R., 1993, C4.5: Programs for Machine Learning, Morgan Kaufmann.
- Senkara, T., 1981, Obliczenia cieplne pieców grzewczych w hutnictwie, Śląsk, Katowice.
- Staub, E., 1994, Metaloznawstwo, ŚWT, Katowice.
- Tadeusiewicz, R., 1993, Sieci neuronowe, Akad. Ofic. Wyd. RM, Warszawa.
- Talar, J., 2003, Komputerowy model wspomaganie operacyjnych decyzji technologicznych w walcowni zimnej blach, Praca Doktorska, AGH, Kraków.
- Talar, J., Kusiak, J., 2002, Application of the artificial neural network to prediction of cooling time of coils of cold rolled sheets, Proc. Conf. AIMEch2002 (Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering), ed. Burczyński T., Cholewa W., Gliwice, 421-424.
- Żugaj, W., 1978, Rozkład temperatur w kręgu blachy w czasie wyżarzania rekrytalizującego w piecu kołpakowym firmy Heurtey, praca magisterska, AGH, Kraków.

Artykuł otrzymano 10 października 2004 r.