

Jerzy DOBRODZIEJ

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

BAZY WIEDZY Z REGULAMI ROZMYTYMI W PREDYKCJI WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTW WYTWARZANYCH W PROCESACH AZOTOWANIA GAZOWEGO

Słowa kluczowe

Bazy wiedzy, procesy ciepłno-chemiczne, azotowanie gazowe, logika rozmyta, wnioskowanie rozmyte, prognozowanie właściwości warstw i powłok.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę budowy baz wiedzy zawierających reguły rozmyte wykorzystywane w zadaniach wnioskowania o właściwościach warstw wierzchnich wytwarzanych w procesach ciepłno-chemicznych, w szczególności procesach azotowania gazowego. Podstawę prezentowanej metodyki stanowi zintegrowane współdziałanie baz danych oraz modeli sztucznej inteligencji opracowanych z użyciem logiki rozmytej. Przedstawiono struktury danych dedykowane do odwzorowywania parametrów i zależności funkcyjnych kompleksowo charakteryzujących materiał podłoża, środowisko procesowe oraz właściwości warstwy wierzchniej. Na przykładzie wybranych właściwości warstw wierzchnich konstytuowanych w rzeczywistych procesach technologicznych przeprowadzono weryfikację opracowanych modeli komputerowych wnioskowania rozmytego.

Wprowadzenie

Celem realizowanych prac jest wykorzystanie danych o właściwościach materiału podłoża oraz informacji o charakterystykach procesowych azotowania gazowego pozyskanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych do opracowania, z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji, heurystycznych modeli umożliwiających wnioskowanie o właściwościach warstw.

Komputerowe metody prognozowania i modelowania symulacyjnego właściwości fizykochemicznych, mechanicznych, eksploatacyjnych warstw i powłok stanowią przedmiot intensywnych, multidyscyplinarnych badań realizowanych w jednostkach naukowych w kraju i na świecie [1, 2, 3]. Intensywnie realizowane prace badawcze i aplikacyjne koncentrują się przede wszystkim na następujących zagadnieniach badawczych mających fundamentalne znaczenie dla rozwoju inżynierii powierzchni:

- identyfikacja i matematyczne modelowanie zjawisk fizycznych i chemicznych, które mają dominujący wpływ na właściwości wytwarzanych warstw [4];
- identyfikacja parametrów materiału podłoża oraz charakterystyk środowiska procesowego, które determinują właściwości warstw wierzchnich [5];
- opracowanie lub adaptacja najnowszych osiągnięć z zakresu modelowania matematycznego, w szczególności statystyki, np. metod CIA (*Cross Impact Analysis*), metod analizy skupień lub nieliniowych metod regresji wieloparametrycznej, do oceny wiarygodności pozyskiwanych danych empirycznych, predykcji właściwości konstytuowanych warstw i powłok oraz poszukiwania cząstkowych zależności heurystycznych zgodnie z paradygmatem von Neumana w celu budowy teorii naukowych [6];
- wykorzystanie metod sztucznej inteligencji, przede wszystkim sieci neuronowych, logiki rozmytej i zbiorów przybliżonych na potrzeby wnioskowania o właściwościach warstw wierzchnich na podstawie charakterystyk materiałowych podłoża oraz charakterystyk środowiska procesowego [6, 7, 8].

Trudności w rozwiązaniu przedstawionych problemów dotyczą zarówno zagadnień metrologicznych występujących w procesach obróbki cieplno-chemicznej, np.: pomiarów *on-line* kinetyki wzrostu warstwy azotków oraz węglazotków, jak również braku adekwatnych modeli, w tym modeli do predykcji właściwości warstw wierzchnich [5]. Jednym z rozwiązań rokującym duże możliwości praktycznych zastosowań jest wykorzystanie danych empirycznych pozyskanych w badaniach eksperymentalnych lub danych faktograficznych o zrealizowanych procesach [9]. Dane mogą być użyte na przykład w do predykcji właściwości warstw wierzchnich wytwarzanych w inżynierii powierzchni oraz wydawnie wspomagać komputerowe projektowanie technologii procesów obróbek cieplno-chemicznych. Możliwość prognozowania właściwości warstwy wierzchniej stwarza realne szanse na ograniczenie często kosztowych i czaso-

chłonnych badań eksperymentalnych, eliminując metody prób i błędów, ale wymaga rozwiązania licznych i złożonych problemów naukowych oraz aplikacyjnych, dotyczących modelowania skomplikowanych zależności funkcyjnych pomiędzy właściwościami warstwy wierzchniej a charakterystykami środowiska procesowego i materiału podłoża. Dlatego też coraz częściej stosowane są metody sztucznej inteligencji [2, 12]. Decyzję o stosowaniu metod sztucznej inteligencji, w tym metod logiki rozmytej, uzasadniają problemy występujące w klasycznym modelowaniu matematycznym procesów konstytuowania warstw wierzchnich oraz ograniczenia numeryczne, występujące w obliczeniach prowadzonych z użyciem modeli analitycznych. Podstawowe problemy w modelowaniu procesów warstwy wierzchniej dotyczyły przede wszystkim:

- wyboru parametrów, które determinują właściwości warstw wierzchnich [9, 12];
- monitorowania kinetyki wzrostu warstwy oraz przemian fazowych [11];
- uwzględnienia parametrów charakteryzujących warstwę skorelowanych ze sobą [3];
- trudności pomiarowych *on-line* wielkości fizycznych, występujących przy opracowywaniu modeli analitycznych, wiążących parametry i charakterystyki podłoża lub środowiska procesowego z własnościami eksploatacyjnymi uzyskiwanych warstw, np.: odpornością na zużycie przez tarcie, adhezją, wytrzymałością mechaniczną, przewodnictwem cieplnym lub elektrycznym [11].

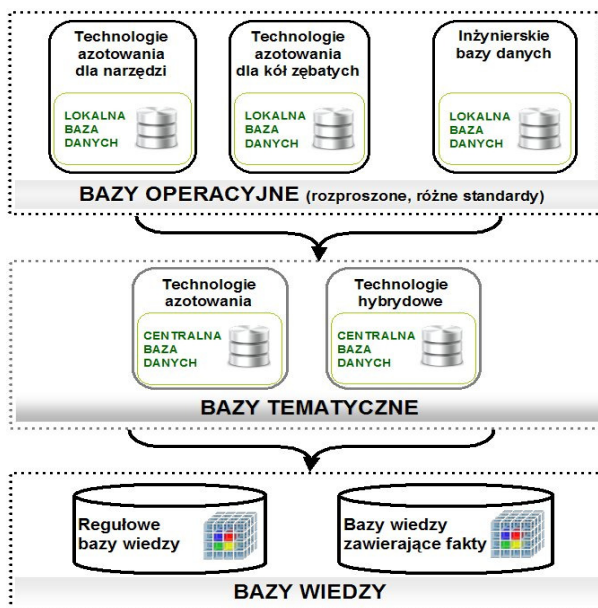
Ograniczenia numeryczne wynikają między innymi z następujących przesłanek:

- złożoności algorytmicznych w przypadku rozwiązywania nieliniowych równań (lub układów równań) różniczkowych z wieloelementowymi wektorami stanu;
- braku zbieżności metod numerycznych, zwłaszcza w przypadku nieciągłości pochodnych (przejść fazowych) lub przy niepoprawnym doborze warunków brzegowych;
- uwarunkowań dotyczących tendencji zbieżności algorytmów do lokalnych ekstremów w przypadku optymalizacji procesu technologicznego.

Te problemy występujące również we wspomaganii prognozowania właściwości warstwy wierzchniej oraz projektowaniu procesów ciepłno-chemicznych, a zwłaszcza brak adekwatnych, w szerokim zakresie zmienności wartości parametrów, modeli analitycznych oraz trudności obliczeniowe były podstawowymi przyczynami podjęcia prac badawczych, których wyniki zaprezentowano w artykule.

1. Model transformacji zasobów danych do regulowych baz wiedzy

Dane o właściwościach warstw wierzchnich, materiałów podłoża oraz charakterystykach środowiska procesowego są często gromadzone w bazach danych i wykorzystywane dla doraźnych potrzeb operacyjnych, w szczególności związanych z modyfikacją już opracowanej technologii konstituowania warstwy wierzchniej (rys. 1). Zwykle są to rozproszone zasoby, które po konsolidacji mogą stanowić źródło informacji umożliwiających wnioskowanie o właściwościach wytwarzanych warstw. W ramach realizacji Programu Wieloletniego PW-004 „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” [10], a następnie Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” pozyskano nowe dane o parametrach warstwy oraz technologiach procesów cieplno-chemicznych, w szczególności procesów azotowania gazowego. Wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w latach 2004–2011 stanowiły źródło informacji o właściwościach fizykochemicznych, tribologicznych, morfologicznych oraz eksploatacyjnych wytworzonych warstw i powłok azotków.



Rys. 1. Model przepływu danych w rozproszonym środowisku baz danych i baz wiedzy

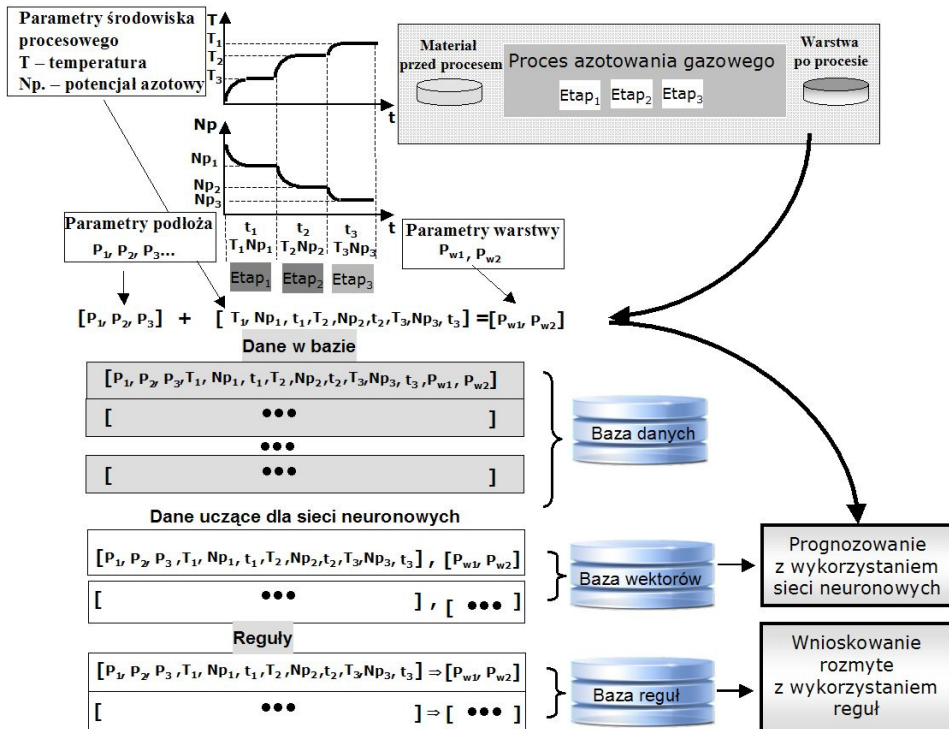
Umożliwia to opracowanie i zasilanie informacyjne tematycznych baz danych. Centralne, tematyczne bazy danych z dostępem przez Internet, w których

skonsolidowano dane z baz operacyjnych, uzupełnione o informacje o urządzeniach wykorzystywanych w procesach azotowania gazowego oraz o informacje pozwalające szacować efektywność ekonomiczną technologii wytwarzania warstw stanowią źródła danych do tworzenia baz wiedzy. W bazach tematycznych zgromadzone zostały dane z blisko 1500 procesów azotowania wykonanych z zastosowaniem różnych urządzeń (np.: pieców PEGat – 700/1, PEGat – 900/1, Nitrex, Remix zintegrowany z oryginalnym, hybrydowym systemem sterowania zbudowanym w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym) oraz różnych gatunków stali stanowiących podłoże do nanoszenia warstw, w tym stali narzędziowych, stali stopowych, stali szybkotnących. Wspólną właściwością wszystkich tych procesów jest możliwość wyodrębnienia sekwencji stanów elementarnych – etapów¹ technologicznych występujących po sobie i ewentualnie powiązanych zależnościami przyczynowo-skutkowymi. Na przykład w procesach azotowania kolejnymi etapami są: nagrzewanie pieca do zadanej temperatury, utrzymanie odpowiedniego potencjału azotowego przez zadany czas w zaprogramowanej temperaturze, a następnie chłodzenie pieca (rys. 2). W procesie brak jest sprzężeń zwrotnych, co oznacza, że rezultaty uzyskane na etapie l nie mają wpływu na rezultaty uzyskane na etapie $l-1$ ($1 \leq l \leq n$). Pozwala to zastosować do opisu procesu konstytuowania warstw strukturę listy uporządkowanej, której elementami są zbiory wartości parametrów charakteryzujących właściwości materiału przed procesem, środowiska procesowego oraz właściwości warstwy (dane w bazie na rys. 2).

Dane zgromadzone w bazie mogą być wykorzystane do dynamicznego:

- generowania zbiorów wektorów w zadaniach uczenia i weryfikacji sieci neuronowych (liczba neuronów w warstwie wejściowej sieci jest równa sumie liczb elementów zbioru parametrów charakteryzujących właściwości materiału oraz zbioru parametrów środowiska procesowego, natomiast liczba neuronów warstwy wyjściowej wyznaczona jest liczbą parametrów właściwości warstwy);
- tworzenia reguł o zmiennej liczbie termów w przesłance i konkluzji. Do budowy przesłanki reguły wykorzystywane są zbiory parametrów i ich wartości charakteryzujące odpowiednio: właściwości materiału podłoża oraz środowisko procesowe. Konkluzję reguły wyznacza zbiór parametrów właściwości warstwy.

¹ operacji technologicznych.



Rys. 2. Model odwzorowania parametrów opisujących materiał, środowisko procesowe i ich wartości w sformalizowane bazy wiedzy

Zastosowanie modelu przedstawionego na rys. 2 umożliwia uzyskanie reguły, która jest implikacją i może być transformowana w regułę rozmytą. Model matematyczny reguły rozmytej przedstawia zależność 1.

$$\begin{aligned} & \text{IF } (p_1 \text{ is } A_1^k) \text{ and } (p_2 \text{ is } A_2^k \dots \text{ and } p_n \text{ is } A_n^k) \\ & \text{THEN } (p_{w1} \text{ is } B_1^l \text{ and } p_{w2} \text{ is } B_2^l \dots \text{ and } p_{wm} \text{ is } B_m^l) \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- $p \in P$ – parametr (np. temperatura etapu procesu, potencjał azotowy, mikrotwardość materiału podłoża),
- P – zbiór parametrów wejściowych (właściwości materiału podłoża i środowiska procesowego),
- $p_{wi} \in P_w$ – parametr wyjściowy,
- P_w – zbiór parametrów wyjściowych (parametry warstwy, np. twardość, odporność na korozję w przypadku warstw wytworzonych w procesach azotowania gazowego),

- A – zbiór rozmyty parametru wejściowego,
- B – zbiór rozmyty parametru wyjściowego.

Użycie reguł rozmytych do wnioskowania o wynikach procesów cieplno-chemicznych uzasadniały następujące przesłanki [8, 12]:

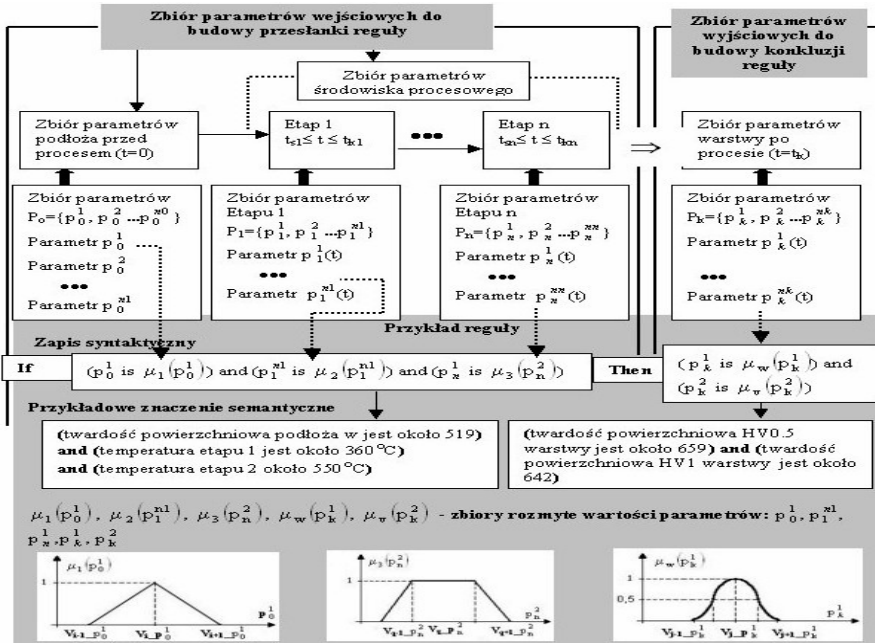
- logika rozmyta udostępnia efektywne metody wnioskowania na podstawie reguł rozmytych, co ma zwłaszcza znaczenie ze względu na trudności pomiarowe *in-situ*, gdzie elementy pomiarowe wprowadzają zaburzenia procesu i pozyskiwane dane eksperymentalne są obciążone błędem pomiarowym, a więc we wnioskowaniu informacje o procesie są niepewne;
- logika rozmyta jest wykorzystana do modelowania nieliniowych zależności funkcyjnych trudnych do odwzorowania innymi metodami; umożliwia ona koherentne wnioskowanie nawet w przypadku wieloetapowych lub hybrydowych procesów wytwarzania warstw wierzchnich.

W zadaniu wnioskowania (predykcji) właściwości warstw wykorzystano t-normę² Mamdaniego oraz wyostrzanie (defuzyfikację) metodą środka ciężkości. Zbiory rozmyte modelowane były z użyciem gaussowskich funkcji przynależności [13].

2. Zastosowanie dynamicznie tworzonych baz wiedzy do predykcji wybranych właściwości warstw wytwarzanych w procesach azotowania gazowego

Prognozowanie właściwości warstwy wierzchniej rozpoczyna się od selekcji procesów i materiałów z tematycznej bazy danych. Wyborowi podlegają procesy oraz materiały spełniające warunki formułowane w kwerendzie formalnie zdefiniowanej z użyciem języka SQL. Zastosowanie zapytań SQL umożliwia przeszukanie tematycznych baz danych. Wyszukane informacje o procesach oraz materiałach stanowią zasilanie informacyjne bazy wiedzy z regułami rozmytymi (rys. 2). Wygenerowane automatycznie bazy wiedzy są optymalizowane, weryfikowane i ewentualnie modyfikowane z wykorzystaniem wiedzy badaczy z inżynierii powierzchni (rys. 3). Po zweryfikowaniu baz wiedzy przeprowadzane jest rozmycie wartości parametrów wejściowych. Następnie wykonywane są operacje składania reguł i defuzyfikacji. Procedury składania reguł wpływają na wyznaczenie zbioru wynikowego. Modele defuzyfikacji umożliwiają obliczenie odpowiedzi ostrej (nierozmytej) na podstawie zbioru rozmytego, wyznaczonego w operacji składania reguł. Wynikiem defuzyfikacji są wartości parametrów wyjściowych warstwy wierzchniej.

² t-norma: funkcja dwóch zmiennych niemalejąca względem obu argumentów, spełniająca warunek przemienności i łączności. W przypadku wnioskowania rozmytego dotyczy operacji przecięcia zbiorów rozmytych.



Rys. 3. Model budowy reguł rozmytych baz wiedzy na podstawie zasobów informacyjnych tematycznej bazy danych o procesach azotowania gazowego

Do weryfikacji poprawności opracowanych modeli i metodyki wnioskowania rozmytego o właściwościach wytwarzanych warstw wykorzystano dane z 1500 procesów azotowania gazowego. Informacje te obejmowały dane charakteryzujące: całkowitą grubość warstwy (węgl)azotków żelaza, twardość powierzchniową, odporność na korozję, rozkład twardości w warstwie dyfuzyjnej oraz skład fazowy warstwy (węgl)azotków.

Tabela 1. Parametry atmosfery procesowej w procesach azotowania gazowego

Nazwa parametru	Proces	Proces 1	Proces 2	Proces 3
Czas trwania procesu [min]		600	120	480
Temperatura [°C]		510	570	540
Zawartość N ₂ w atmosferze [%]		60	40	60
Zawartość NH ₃ w atmosferze [%]		40	60	40
Materiał podłoża		40HM	40HM	38HMJ
Sposób rozmycia		gaussowska funkcja przynależności	gaussowska funkcja przynależności	gaussowska funkcja przynależności

W tabeli 1 zamieszczono informacje o wybranych procesach azotowania gazowego: dwóch zrealizowanych w warunkach przemysłowych do wytworze-

nia warstw na wałkach toczyń, bieżnikach łożysk toczyń (procesy 1 i 3) oraz w procesie laboratoryjnym, w trakcie którego na próbkach, w odstępach godzinnych, badano kinetykę wzrostu warstwy wierzchniej.

Zmierzone oraz prognozowane wartości parametrów charakteryzujących własności uzyskiwanych warstw wierzchnich zaprezentowano w tabeli 2.

W przypadku procesów podanych w tabeli 1 wygenerowano bazę wiedzy zawierającą 47 reguł rozmytych. Zbadano wpływ liczby reguł (rozdzielczość wnioskowania) na błąd predykcji wybranych właściwości warstwy wytworzonej w procesie azotowania.

Tabela 2. Wyniki predykcji jako rezultat wnioskowania w systemie ekspertowym

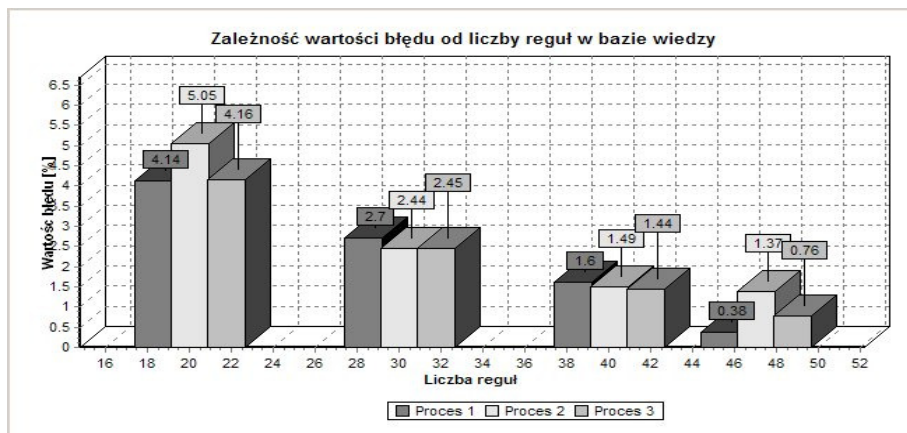
Parametr	Proces 1		Proces 2		Proces 3	
	Uzyskana	Predykcja	Uzyskana	Predykcja	Uzyskana	Predykcja
Grubość efektywna g400 [m μ]	0,191	0,190	0,18	0,184	0,21	0,211
Grubość efektywna g500 [m μ]	0,094	0,093	0,08	0,081	0,11	0,109
Grubość efektywna gr+50 [m μ]	0,372	0,3715	0,23	0,0,232	0,3	0,298
Grubość szarej strefy [m μ]	6	6,06	5	5,025	4,7	4,775
Grubość warstwy azotków [m μ]	11	10,9500	11,5	11,638	11,5	11,523
Twardość maksymalna HV	562	561,1950	542	528,992	557	548,088
Twardość powierzchniowa HV1	671	670,3450	701	684,877	649	647,053
Twardość powierzchniowa HV10	641	641,8900	633	641,862	621	624,105
Twardość powierzchniowa HV0,5	524	524,6450	511	517,643	528	521,136
Twardość powierzchniowa HV5	540	539,5200	554	555,662	560	560,560

Na rys. 4 pokazano wyniki badań adekwatności wnioskowania dotyczące wpływu liczby reguł na jakość wnioskowania.

Zmniejszenie liczby reguł w bazie wiedzy (rys. 4) powodowało zwiększenie błędu³ predykcji. Wy tłumaczeniem tego mechanizmu jest zmniejszenie rozdzielczości wnioskowania – dziedziny parametrów były pokrywane mniejszą liczbą zbiorów rozmytych. Uzyskane błędy wskazują, że opracowany model baz wiedzy z regułami rozmytymi może być wykorzystany z powodzeniem do wnioskowania o różnych parametrach (np. twardości powierzchniowej lub grubo-

³ średnia z sumy błędów względnych predykcji wybranych parametrów.

ściach efektywnych) charakteryzujących właściwości warstw wierzchnich wytwarzanych w procesach azotowania gazowego.



Rys. 4. Błąd względny predykcji w funkcji liczby reguł bazy wiedzy

Podsumowanie

- Opracowany system baz wiedzy w połączeniu z wnioskowaniem rozmytym umożliwia wieloparametryczne prognozowanie (predykcję) właściwości warstwy wierzchniej na podstawie parametrów podłoża oraz parametrów środowiska procesowego, co potwierdziły przeprowadzone testy weryfikacyjne.
- Wykorzystanie tematycznych baz danych oraz zastosowanie oryginalnych algorytmów do generacji baz wiedzy umożliwia ich adaptację do bieżących potrzeb związanych z predykcją właściwości warstw oraz opracowanie modeli uczenia się. Dane wprowadzane na bieżąco do operacyjnych baz danych umożliwiają:
 - zwiększenie liczby parametrów wykorzystywanych we wnioskowaniu,
 - modyfikację dziedzin parametrów (np.: w wyniku zmian wartości minimalnych i maksymalnych dziedzin parametrów),
 - polepszenie rozdzielczości wnioskowania poprzez wprowadzenie nowych wartości do dziedzin parametrów,
 - ograniczenie błędu prognozowania (predykcji).
- Dokładność prognozowania uzależniona od liczby reguł, wykorzystywanych we wnioskowaniu. Testy weryfikacyjne wykazały, że najgorszym przypadkiem uzyskano blisko 95% dokładność predykcji.
- Rezultaty wnioskowania mogą być wykorzystywane do analizy różnych skrajności obejmujących materiały podłoża i warianty procesów azotowania gazowego w celu wyznaczenia wartości parametrów warstwy.

5. Opracowany system baz wiedzy ma charakter rozwojowy. Dalsza rozbudowa systemu kontynuowana będzie w kierunku integracji wyników wnioskowania i metod symulacji w celu budowy efektywnych narzędzi do komputerowego wspomaganie projektowania technologii procesów wytwarzania warstw.

Należy stwierdzić, że bazy wiedzy stanowią efektywne narzędzie w komputerowym prognozowaniu właściwości warstw uzyskiwanych w procesach azotowania gazowego.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomaganie technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. Fauchais P., Montavon G., Vardelle M., Cedelle J.: Developments in direct current plasma spraying, *Surface & Coatings Technology*, Volume: 201, Issue: 5, October 25, 2006, pp. 1908–1921.
2. Mazurkiewicz A.: Mechanisms of knowledge transformation in the area of advanced technologies of surface engineering, 5th IFHTSE and SMT 20 Congress, 25–29 September 2006, Vienna, Austria.
3. Szota M., Jasiński J.: Using neural networks application for prediction of parameters of carbonizing process In fluidized bed, *Inżynieria Materiałowa* 6 (166), rok XXIX, listopad–grudzień 2008, s. 877–880, Wydawnictwo Sigma (7 Konferencja Naukowa Inżynieria Powierzchni – INPO2008, 2–5 grudnia 2008, Wisła).
4. Parfenov E.V., Yerokhin A.L., Matthews A.: Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process, *Surface & Coatings Technology* Volume: 201, Issue: 21, August 25, 2007, pp. 8661–8670.
5. Zhou L., Liu G., Ma X.L., Lu K.: Strain-induced refinement in a steel with spheroidal cementite subjected to surface mechanical attrition treatment, *Acta Materialia*, Volume: 56, Issue: 1, January, 2008, pp. 78–87.
6. Ratajski J., Suszko T., Dobrodziej J., Mazurkiewicz A.: Intelligent tools for support of designing in surface treatments, International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering (IFHTSE) Congress, Brisbane, Australia, 2007.
7. Kanta Abdoul-Fatah, Montavon G., Planche Marie-Pierre, Coddet C.: Artificial neural networks implementation in plasma spray process: Prediction of power parameters and in-flight particle characteristics vs. desired coating structural attributes, *Surface & Coatings Technology* Volume: 203, Issue: 22, August 15, 2009, pp. 3361–3369.
8. Campos I., Islas M., González E., Ponce P., Ramírez G.: Use of fuzzy logic for modeling the growth of Fe₂B boride layers during boronizing, *Surface & Coatings Technology*, Volume: 201, Issue: 6, December 4, 2006, pp. 2717–2723.

9. Mazurkiewicz A., Dobrodziej J.: Model of intelligent database in processing of information concerning data of constitution of surface layers, 4th CONTECSI – International Conference on Information Systems and Technology Management, Sao Paulo, 30 May–01 July 2007.
10. Raport z realizacji Programu Wieloletniego PW-004 „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.
11. Ratajski J., Olik R., Suszko T., Dobrodziej J., Michalski J.: Design, Control and *in Situ* Visualization of Gas Nitriding Processes. *Sensors*. 2010; 10(1):218–240.
12. Mazurkiewicz A., Dobrodziej J., Wojutyński J., Michalski J., Ratajski J.: Model of controlling gas nitriding processes in the precise creation of surface layers with programmed properties”, Proceedings of 17th International Federation of Heat Treatment and Surface Engineering Congress, Journal of the Japan Society for Heat Treatment, Special Issue, Vol. 49, Netsu Shori, Japan, 2009, Coden: NESHDF, pp. 769–772.
13. Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.

Recenzent:
Jerzy MICHALSKI

Knowledge bases with fuzzy rules in prediction of selected properties of layers obtained in gas nitriding processes

Key words

Knowledge base, thermochemical processes, fuzzy logic, fuzzy inference, forecasting of properties of layers and coatings.

Summary

The paper presents the methodology of building the knowledge base that includes fuzzy rules used for inference about properties of surface layers obtained in thermochemical processes, in gas nitriding processes in particular. The basis of presented methodology is an integral cooperation between databases and artificial intelligence based on fuzzy logic. Moreover, the paper shows data structures for mapping the parameters and function relations that comprehensively characterise substrate material, process environment and surface layer properties. In order to verify elaborated computer models of fuzzy inference a comparison research was performed on selected properties of surface layers constituted in real technological processes.