

Jerzy DOBRODZIEJ, Adam MAZURKIEWICZ, Jacek WOJUTYŃSKI
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

Jerzy RATAJSKI
Politechnika Koszalińska, Koszalin

Jerzy MICHALSKI
Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE MODELOWANIA PROCESÓW TERMODYFUZYJNYCH ORAZ PROCESÓW PVD Z WYKORZYSTANIEM LOGIKI ROZMYTEJ

Słowa kluczowe

Proces termodyfuzyjny, technologia PVD, logika rozmyta, baza wiedzy, system ekspertowy.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę budowy modeli rozmytych wykorzystywanych w systemie ekspertowym przeznaczonym do projektowania warstw wierzchnich i powłok o zakładanych właściwościach eksploatacyjnych. Podstawą prezentowanej metodyki jest współdziałanie bazy danych oraz modeli sztucznej inteligencji, w tym modeli logiki rozmytej. Przedstawiono strukturę informacyjną bazy danych oraz metodę odwzorowywania w niej parametrów i zależności funkcyjnych kompleksowo charakteryzujących materiały podłoża, środowisko procesowe oraz właściwości warstwy wierzchniej. Sformułowano relacje pomiędzy strukturą logiczną bazy danych a modelami rozmytymi procesów termodyfuzyjnych i procesów PVD. Przedstawiono aplikację i możliwości użytkowe systemu ekspertowego w zakresie prognozowania właściwości warstw powierzchniowych. Opracowane modele wykorzystywano w komputerowym wspomaganie projektowania procesów termodyfuzyjnych i technologii PVD. Przeanalizowano wyniki weryfikacji modeli komputerowych na podstawie ba-

dań porównawczych pomiędzy zmierzonymi właściwościami eksploatacyjnymi warstw powierzchniowych konstytuowanych w rzeczywistych procesach technologicznych z wynikami predykcji uzyskanymi przy użyciu opracowanych modeli wnioskowania rozmytego.

Wprowadzenie

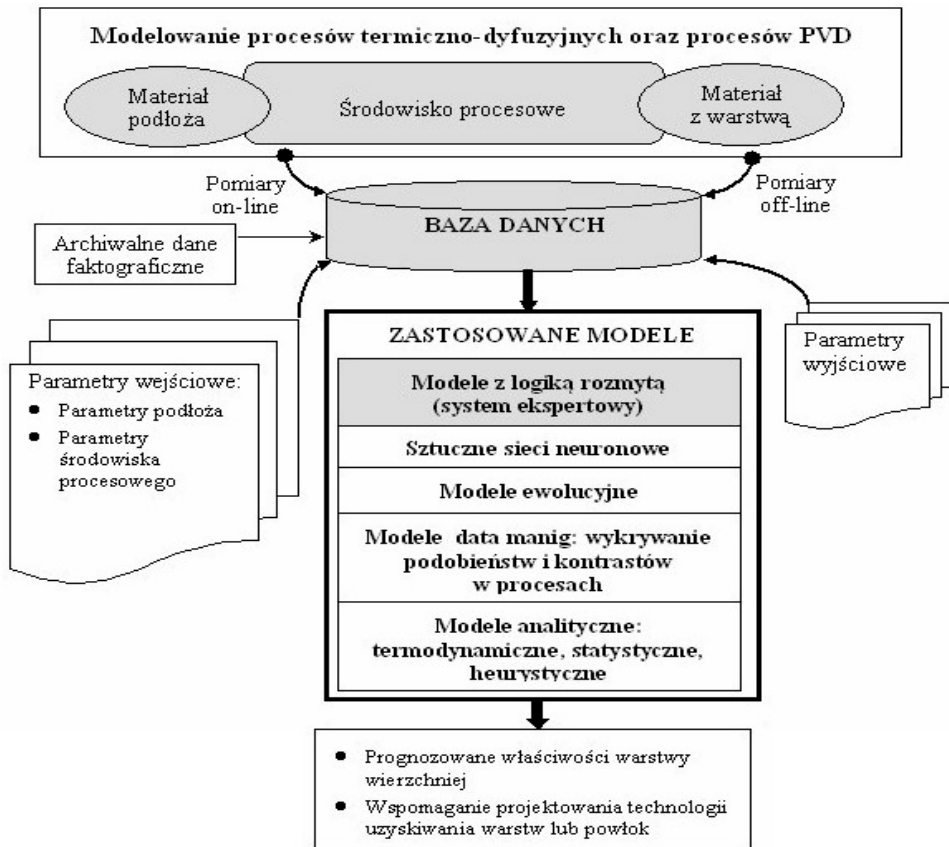
Jednym z kluczowych problemów inżynierii warstwy wierzchniej jest komputerowe wspomaganie projektowania technologii konstytuowania warstw wierzchnich o założonych i powtarzalnych właściwościach eksploatacyjnych. Skuteczne rozwiązanie tego problemu umożliwia predykcję właściwości warstw wierzchnich na podstawie parametrów materiału podłoża oraz charakterystyk środowiska procesowego. Efektywne wykorzystanie wyników predykcji pozwala przeanalizować różne warianty procesów oraz zaprogramować technologię optymalną ze względu na przyjęte kryteria odnośnie do właściwości warstwy wierzchniej. Implementacja takiej koncepcji umożliwia zastąpienie stosowanej obecnie bardzo kosztownej 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. Autorzy podjęli zadanie badawcze, którego celem jest zastosowanie zaawansowanego modelowania (rys. 1), w szczególności wykorzystanie modeli sztucznej inteligencji, na potrzeby wnioskowania o właściwościach warstw wierzchnich i powłok uzyskiwanych w procesach termodyfuzyjnych oraz technologiach PVD. Decyzję o zastosowaniu metod sztucznej inteligencji, w tym metod logiki rozmytej, uzasadniały: problemy w modelowaniu procesów konstytuowania warstw wierzchnich oraz ograniczenia numeryczne występujące w trakcie obliczeń z użyciem opracowanych modeli analitycznych.

Podstawowe problemy w modelowaniu procesów warstwy wierzchniej dotyczą przede wszystkim:

- identyfikacji zjawisk, które mają dominujący wpływ na właściwości wytwarzanych warstw,
- wyboru parametrów, które determinują właściwości warstw wierzchnich [1],
- monitorowania kinetyki wzrostu warstwy [2],
- konieczności uwzględnienia parametrów skorelowanych ze sobą,
- trudności pomiarowych *on-line* wielkości fizycznych występujących przy opracowywaniu modeli analitycznych wiążących parametry i charakterystyki podłoża lub środowiska procesowego z parametrami fizykochemicznymi i eksploatacyjnymi uzyskiwanych warstw, np.: odporność na ścieranie, adhezja, wytrzymałość mechaniczna, przewodnictwo cieplne lub elektryczne [3].

Ograniczenia numeryczne wynikają między innymi z następujących przesłanek [4]:

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



Rys. 1. Model energetyczny procesów uzyskiwania warstw wierzchnich i powłok

Brak adekwatnych – w szerokim zakresie zmienności wartości parametrów – modeli analitycznych oraz trudności obliczeniowe są podstawowymi przyczynami podjęcia przez autorów prac badawczych, których celem było kompleksowe, oparte na metodach inżynierii systemów oraz metodach sztucznej inteligencji

cji, wykorzystanie informacji o materiałach i środowisku procesowym pozyskiwanej w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych do opracowania modelu inergetycznego¹.

Założono, że opracowany model umożliwi:

- wnioskowanie o fizykochemicznych i eksploatacyjnych właściwościach warstw wierzchnich i powłok w komputerowym projektowaniu technologii ich wytwarzania (system ekspertowy z logiką rozmytą),
- predykcję wybranych właściwości warstw (sztuczne sieci neuronowe),
- obliczanie wybranych parametrów środowiska procesowego w procesach termiczno-dyfuzyjnych (algorytmy ewolucyjne),
- poszukiwanie analogii i kontrastów pomiędzy procesami wytwarzania warstw (*metody data minig*),
- symulacje charakterystyk środowiska procesowego istotne dla realizacji procesu (metody termodynamiczne, statystyczne lub heurystyczne).

Zaprezentowano kluczowe moduły modelu, tj.: bazę danych oraz system ekspertowy, w którym zastosowano aparat logiki rozmytej.

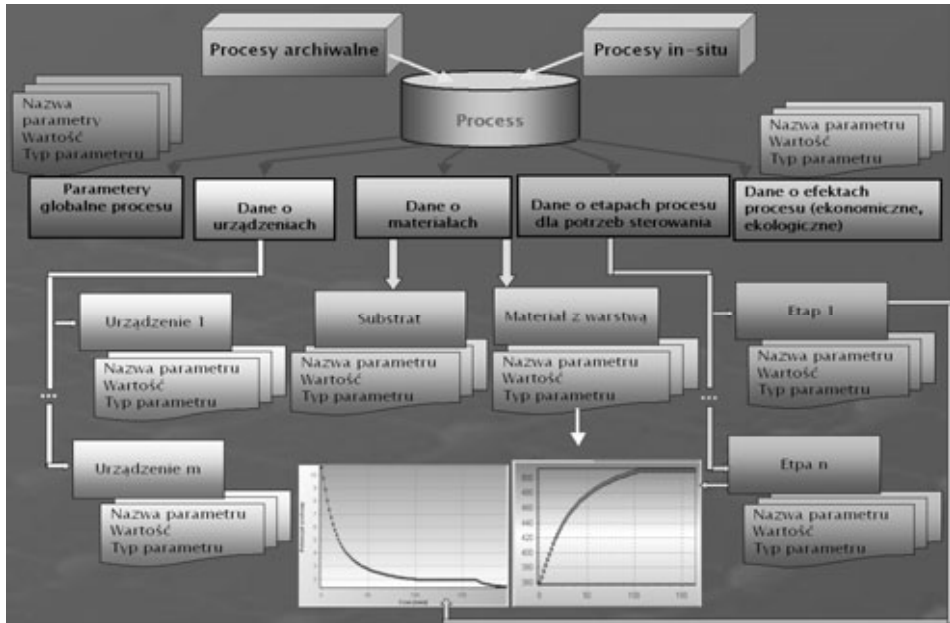
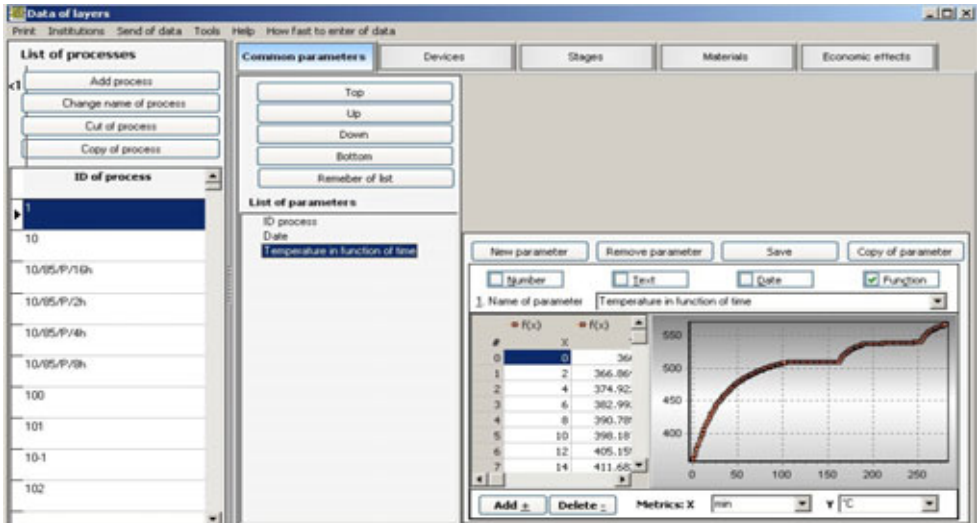
1. Zakres informacyjny baz danych

Przedmiotem odwzorowania w strukturach informacyjnych baz danych były procesy termiczno-dyfuzyjne oraz technologie PVD. Strukturę informacyjną bazy danych przedstawiono na rys. 2.

Dane do bazy danych zostały zgromadzone z wielu ośrodków naukowych w Polsce, zajmujących się badaniami i aplikacjami technologii warstwy wierzchniej w ramach strategicznego narodowego Programu Wieloletniego PW-004 pn.: „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” [5]. Do zarządzania informacyjnego bazą danych wykonano oprogramowanie pracujące w systemie Windows (rys. 3). Wyszukiwanie informacji o procesach przy użyciu zapytania SQL lub zapytań rozmytych [6] może odbywać się zarówno w lokalnej bazie danych użytkownika, jak i poprzez Intranet lub Internet po udostępnieniu zasobów bazy danych (rys. 4).

Rezultatem wyszukiwania jest zbiór procesów spełniający kryteria zdefiniowane w zapytaniu SQL. Użytkownik otrzymuje wykaz zawierający nazwy jednostek, w których procesy zostały wykonane oraz unikalne identyfikatory procesów, natomiast szczegółowe dane o procesie, materiale podłoża i warstwach są prezentowane po naciśnięciu odnośnika w wierszu kolumny Nazwa procesu (rys. 4). Źródła zasilania informacyjnego baz danych stanowią: zautomatyzowane systemy sterowania (monitorowania) dostarczające w trybie on-line

¹ Modele integrujące metody sztucznej inteligencji, metody drążenia danych, metody heurystyczne oraz metody numeryczne w komputerowym przetwarzaniu danych w zadaniach automatycznego pozyskiwania wiedzy.

Rys. 2. Zakres informacyjny bazy danych²

Rys. 3. Aplikacja do obsługi bazy danych

² Typ parametru w sensie informatycznym, np.: liczba, data, łańcuch alfanumeryczny.

PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
Program Wieloletni

Rozwój nanotechnologii w inżynierii powierzchni
PW-004/ITE/04/2004

Wyniki przeszukiwania bazy danych

Znaleziono 15 procesów spełniających wyniki wyszukiwania

Lp.	Nazwa jednostki	Unikalny identyfikator procesu
1.	Instytut Technologii Eksploatacji	Proces azotowania P6 23/2004
2.	Instytut Mechaniki Precyzyjnej	Nawęglanie próżniowe nr. proc. 192
3.	Politechnika Koszalińska	Azotowanie 23/03/2003
4.	Instytut Fizyki Jądrowej	PVD metoda łukowo-próżniowa (CrN/TiN)x3
5.	Politechnika Koszalińska	Chromowanie TK 34
6.	Instytut Mechaniki Precyzyjnej	Azotowanie 1B3
7.	Akademia Górniczo-Hutnicza	PVD metoda łukowo-próżniowa (CrN/TiN)
8.	Politechnika Koszalińska	Nawęglanie 10/85/P/164
9.	Instytut Technologii Eksploatacji	Nawęglanie próżniowe - technologia SimVac PLUS
10.	Politechnika Koszalińska	PAPVD metoda magnetronowa (10/PAPVD)

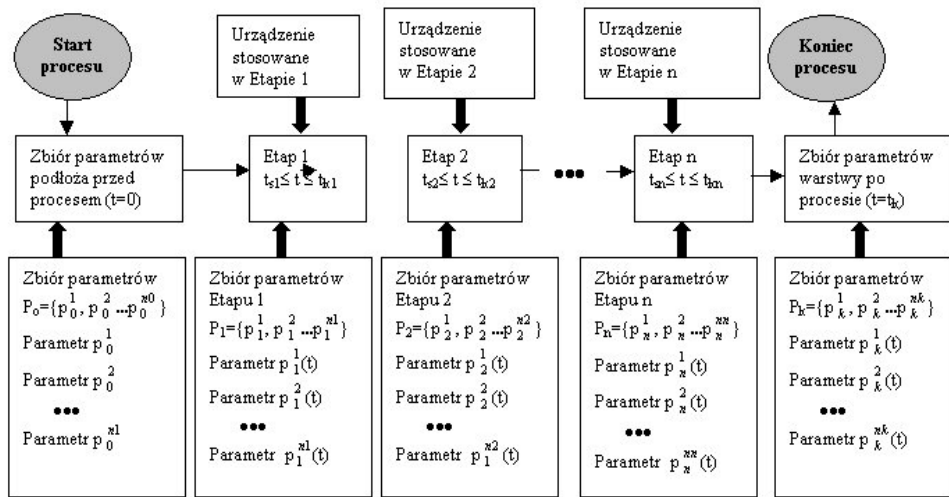
Rys. 4. Aplikacja do udostępniania danych w Internecie

danych o procesach, badania właściwości materiałów podłoża oraz warstwy wierzchniej (tryb *off-line*), archiwalne dane faktograficzne oraz wiedza ludzi realizujących procesy. Pozyskane dane są gromadzone w bazach danych i wykorzystane na potrzeby operacyjne w opracowanych modelach.

2. Model teoriomnościowy procesów termodyfuzyjnych i procesów PVD

Zasadniczy problem, jaki należało rozwiązać w odwzorowaniu struktur procesów termodyfuzyjnych i technologii PVD, różniących się pomiędzy sobą zarówno zastosowanymi urządzeniami, parametrami środowiska procesowego, jak i uzyskanymi efektami, było opracowanie takiego modelu, po użyciu którego możliwe byłoby gromadzenie i przetwarzanie informacji o procesie z zastosowaniem relacyjnych baz danych. Ponieważ wspólną cechą badanych procesów jest możliwość wyodrębnienia sekwencyjnych etapów³ technologicznych oraz brak sprzężeń zwrotnych w procesie, zatem proces może być opisany z użyciem listy zbiorów parametrów (rys. 5).

³ Etapy - operacje technologiczne np.: kolejnymi etapami są: nagrzewanie pieca do zadanej temperatury, utrzymanie odpowiedniego potencjału azotowego przez zadany czas w temperaturze procesu, a następnie chłodzenie pieca.



Rys. 5. Model teoriomnościowy procesów termiczno-dyfuzyjnych oraz procesów PVD

Pierwszym elementem listy jest zbiór parametrów charakteryzujących właściwości materiału podłoża. Kolejne elementy listy zawierają zbiory parametrów opisujących etapy technologiczne procesu oraz zbiory parametrów i charakterystyk urządzeń użytych w etapie. Ostatnim elementem listy jest zbiór parametrów, obejmujący właściwości uzyskanej warstwy lub powłoki – takimi parametrami są na przykład: mikrotwardość, moduł Younga, wytrzymałość zmęczeniowa, adhezja. Każdemu parametrowi przyporządkowane są następujące atrybuty: wartość parametru (liczbowa, nominalna lub charakterystyka), typ parametru (liczbowy, alfanumeryczny), identyfikator zakresu informacyjnego (materiał podłoża, warstwa, etap technologiczny, urządzenie). Każdy ze zbiorów parametrów może być uzupełniany nowymi parametrami lub można tworzyć nowe listy zbiorów parametrów, a więc opracowany model może zostać użyty również w przypadku innych procesów konstytuowania się warstw wierzchnich, np. procesów CVD lub procesów hybrydowych.

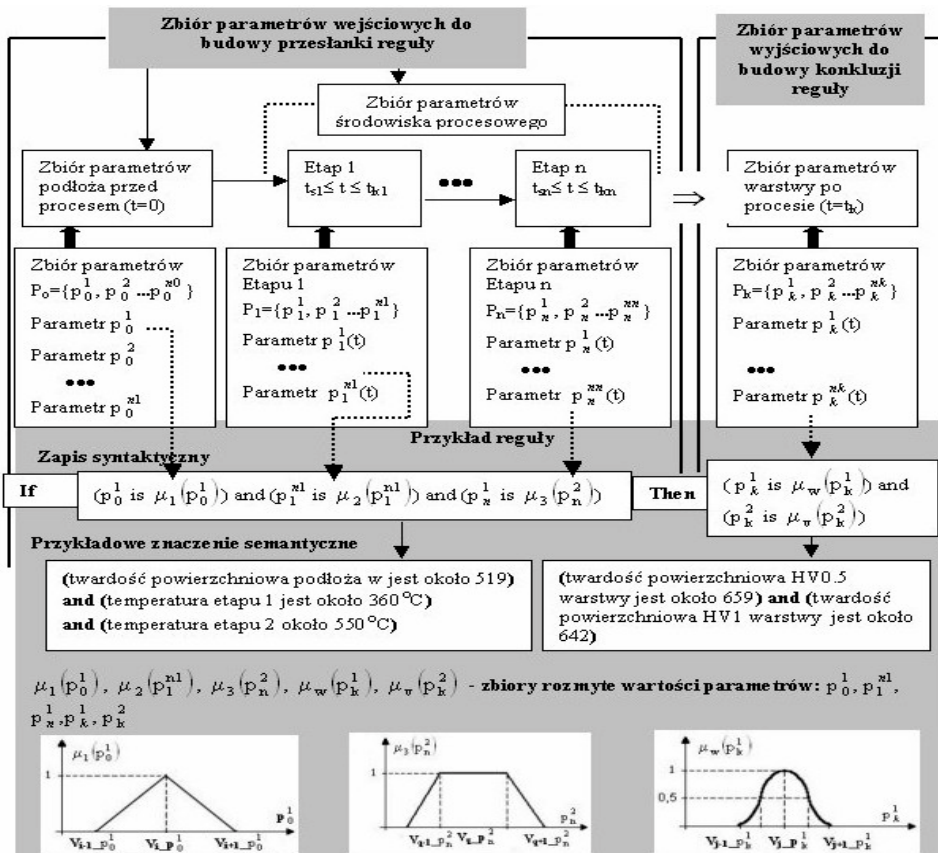
Opracowany model charakteryzuje:

- elastyczność – proces jest opisany zbiorem parametrów, który można modyfikować bez konieczności zmiany struktury bazy,
- dekompozycyjność – proces może być rozłożony na kolejne etapy technologiczne,
- agregacyjność – do bazy danych można importować dane z innych rozproszonych baz danych,
- gotowość informacyjna – na podstawie danych zgromadzonych w bazie można wyznaczyć podzbiory informacji według różnych kryteriów,

- zupełność – kompletny zbiór informacji tworzy funkcjonalną całość i może być wykorzystany do wspomagania projektowania procesów (poprzez analogie) lub do predykcji wartości parametrów warstwy.

3. Metody logiki rozmytej we wnioskowaniu o właściwościach warstw wierzchnich

Opracowany model teoriomnogościowy procesów termodyfuzyjnych oraz procesów PVD umożliwia wnioskowanie o właściwościach warstw powierzchniowych, ponieważ dostarcza danych niezbędnych do wykorzystania w niejawnych, uwikłanych zależnościach funkcyjnych pomiędzy parametrami warstwy wierzchniej a parametrami środowiska procesowego oraz parametrami materiału podłoża. Zależności te są reprezentowane rozmytymi regułami logicznymi. Sposób wykorzystania opracowanego modelu teoriomnogościowego do automatycznej generacji reguł rozmytych przedstawiono na rys. 6.



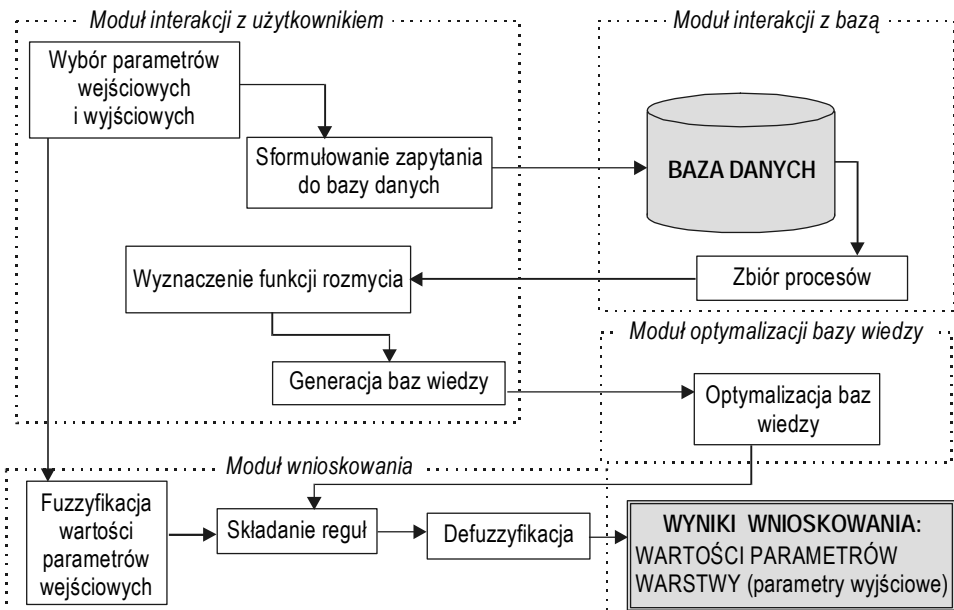
Rys. 6. Budowa reguł rozmytych baz wiedzy na podstawie zasobów informacyjnych bazy danych o procesach termodyfuzyjnych oraz procesach PVD

Użycie reguł rozmytych do wnioskowania o wynikach procesów termodyfuzyjnych i technologii PVD uzasadniały następujące przesłanki [7–9]:

- logika rozmyta udostępnia efektywne metody wnioskowania na podstawie reguł rozmytych, co ma zwłaszcza znaczenie ze względu na trudności pomiarowe *in-situ*, w szczególności w procesach PVD, gdzie elementy pomiarowe wprowadzają zaburzenia procesu i pozyskiwane dane eksperymentalne są obciążone błędem pomiarowym, a więc do wnioskowania logicznego informacja o procesie jest niepewna,
- logika rozmyta jest wykorzystana do modelowania nieliniowych zależności funkcyjnych trudnych do odwzorowania innymi metodami; pozwala uzyskać koherentność wnioskowania nawet w przypadku wieloetapowych lub hybrydowych procesów wytwarzania warstw wierzchnich i powłok.

4. System ekspertowy do wnioskowania o właściwościach warstw wierzchnich

Zbiory reguł rozmytych są automatycznie generowane z zasobów bazy danych metodami statystycznymi i umieszczane w bazach wiedzy w zależności od bieżących potrzeb projektowych, jakie występują w komputerowym wspomaganiu projektowania technologii procesów wytwarzania warstw. Bazy wiedzy są wykorzystane w szkieletowym systemie ekspertowym (rys. 7).



Rys. 7. Struktura systemu ekspertowego do prognozowania parametrów warstwy

System ekspertowy obejmuje następujące podstawowe moduły:

- moduł interakcji z *użytkownikiem* umożliwiający m.in.: definiowanie zbiorów parametrów wejściowych i wyjściowych systemu, dobór funkcji rozmywających,
- moduł integracji z bazą danych, umożliwiający automatyczne generowanie baz wiedzy na podstawie danych zgromadzonych w bazie danych oraz zdefiniowanych przez operatora systemu zbiorów parametrów wejściowych i wyjściowych,
- moduł optymalizacji baz wiedzy, umożliwiający usuwanie reguł nadmiarowych lub sprzecznych oraz grupowanie (klasteryzację) reguł,
- moduł wnioskowania zawierający modele wnioskowania rozmytego.

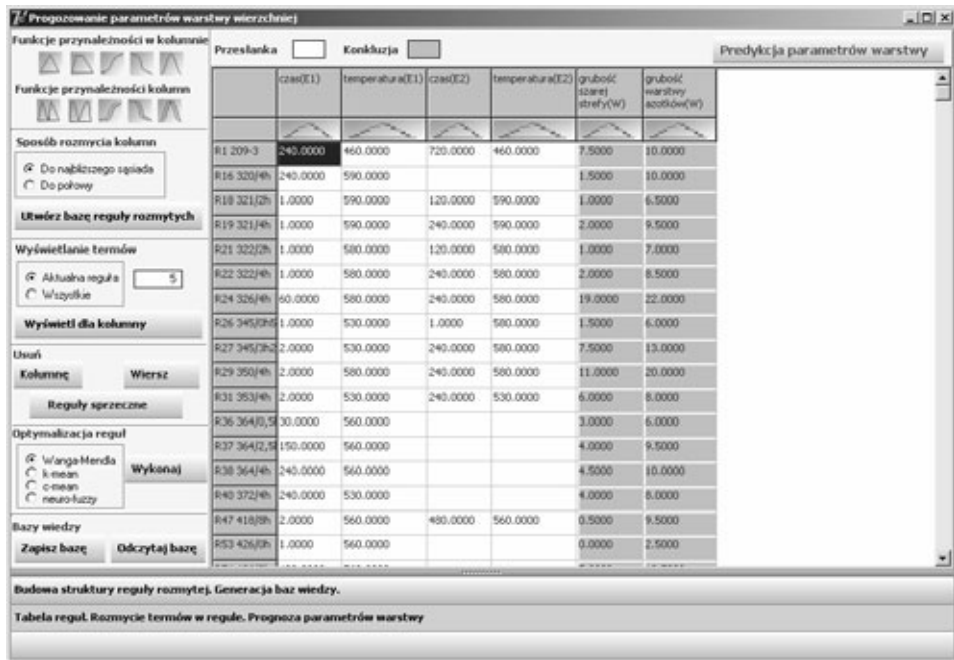
Prognozowanie właściwości warstwy powierzchniowej rozpoczyna się od wyboru rodzaju procesu (termodyfuzyjny lub PVD) oraz urządzenia, na którym realizowana jest technologia. Następnie przeszukiwana jest baza danych. Rezultatem przeszukiwania jest zbiór procesów, spełniających kryteria i założenia projektowe. Wyszukane procesy dostarczają parametrów do budowy regułowej bazy wiedzy (rys. 7). Wygenerowane automatycznie bazy wiedzy są optymalizowane, weryfikowane i ewentualnie modyfikowane z wykorzystaniem wiedzy operatorów ukierunkowanej na rozwiązywanie praktycznych problemów technologicznych. Po zweryfikowaniu baz wiedzy przeprowadzana jest fuzyfikacja wartości parametrów wejściowych. Następnie wykonywane są operacje składania reguł i defuzyfikacji. Procedury składania reguł odpowiadają za obliczenie zbioru wynikowego na podstawie wybieranej przez operatora t-normy⁴. Modele defuzyfikacji umożliwiają obliczenie odpowiedzi ostrej (nierozmytej) na podstawie zbioru rozmytego wyznaczonego w operacji składania reguł. Wynikiem defuzyfikacji są wartości parametrów wyjściowych, fizykochemicznych lub eksploatacyjnych warstwy wierzchniej.

Interfejs użytkownika systemu ekspertowego (rys. 8) wykonano z zastosowaniem programowania obiektowego. System wyposażono, między innymi, w procedury modelowania funkcji przynależności, wizualizacji wyników wnioskowania oraz zapisu i odczytu baz wiedzy do plików tekstowych.

Opracowany system ekspertowy charakteryzują następujące cechy użytkowe:

- uniwersalność – wnioskowanie może być realizowane z użyciem różnych parametrów dla zaprogramowanych termodyfuzyjnych procesów lub technologii PVD,
- elastyczność i koherentność – wnioskowanie odbywa się dla parametrów z dziedzinami ciągłymi (np. temperatura w funkcji czasu), dyskretnymi (np.: wartość odporności warstwy na korozję) lub nominalnymi uporządkowanymi (np. rodzaj zastosowanej obróbki mechanicznej powierzchni materiału podłoża),
- adaptacyjność i uczenie się – wykorzystywanie danych o nowych, zrealizowanych procesach oraz otrzymanych warstwach do poprawy jakości wnioskowania.

⁴ t-norma – funkcja dwóch zmiennych niemalejąca względem obu argumentów, spełniająca warunek przemienności i łączności. W przypadku wnioskowania rozmytego dotyczy operacji przecięcia zbiorów rozmytych.



Rys. 8. Aplikacja systemu ekspertowego – moduł baz wiedzy⁵

Uniwersalność opracowanego, szkieletowego systemu ekspertowego w połączeniu z elastycznością baz danych wskazuje, że może on być wykorzystany również do wnioskowania o właściwościach warstw powierzchniowych uzyskiwanych na przykład w procesach azotowania jarzeniowego, procesach „duplex” lub wieloetapowych procesach hybrydowych.

5. Weryfikacja systemu ekspertowego

Do weryfikacji poprawności opracowanych modeli i metodyki modelowania rozmytego, w szczególności systemu ekspertowego, wykorzystano dane z 1200 procesów azotowania gazowego oraz 60 procesów PVD. Informacje te obejmowały:

- w procesach azotowania gazowego dane charakteryzujące: całkowitą grubość warstwy (węglo)azotków żelaza, twardość powierzchniową, odporność na korozję, rozkład mikrotwardości w warstwie dyfuzyjnej oraz skład fazowy warstwy (węglo)azotków,

⁵ Szara strefa – strefa porowata z przewagą fazy ϵ w przypowierzchniowej warstwie azotków żelaza [10].

- w procesach PVD dane opisujące: techniki nanoszenia, szybkość nanoszenia, wartości parametrów wyładowania plazmy (napięcie, prąd, częstotliwość), temperaturę obrabianego detalu, twardość uzyskiwanych warstw, naprężenia własne i współczynnik tarcia.

5.1. Weryfikacja systemu ekspertowego dla procesów azotowania gazowego

W tabeli 1 zamieszczono informacje o wybranych procesach azotowania gazowego: dwóch zrealizowanych w warunkach przemysłowych do wytworzenia warstw na wałeczkach tocnych, bieżnikach łożysk tocnych (procesy 1 i 3) oraz w procesie laboratoryjnym, w trakcie którego na próbkach w odstępach godzinnych badano kinetykę wzrostu warstwy wierzchniej. Zmierzone oraz prognozowane parametry charakteryzujące własności uzyskiwanych warstw dyfuzyjnych zaprezentowano w tabeli 2.

W przypadku procesów podanych w tabeli 1 wygenerowano bazę wiedzy zawierającą 27 reguł rozmytych.

Na rys. 9 zademonstrowano wyniki badań adekwatności wnioskowania dotyczące wpływu liczby reguł na jakość wnioskowania.

Zmniejszenie liczby reguł w bazie wiedzy powodowało zwiększenie sumarycznego błędu⁶ predykcji prognozy. Wy tłumaczeniem tego mechanizmu jest zmniejszenie rozdzielczości reguł – dziedziny parametrów były pokrywane mniejszą liczbą zbiorów rozmytych. Uzyskane błędy wskazują, że opracowany system może być wykorzystany z powodzeniem do wnioskowania o różnych parametrach (np. twardości powierzchniowej lub grubościach efektywnych) charakteryzujących właściwości warstw wierzchnich wytwarzanych w procesach azotowania gazowego.

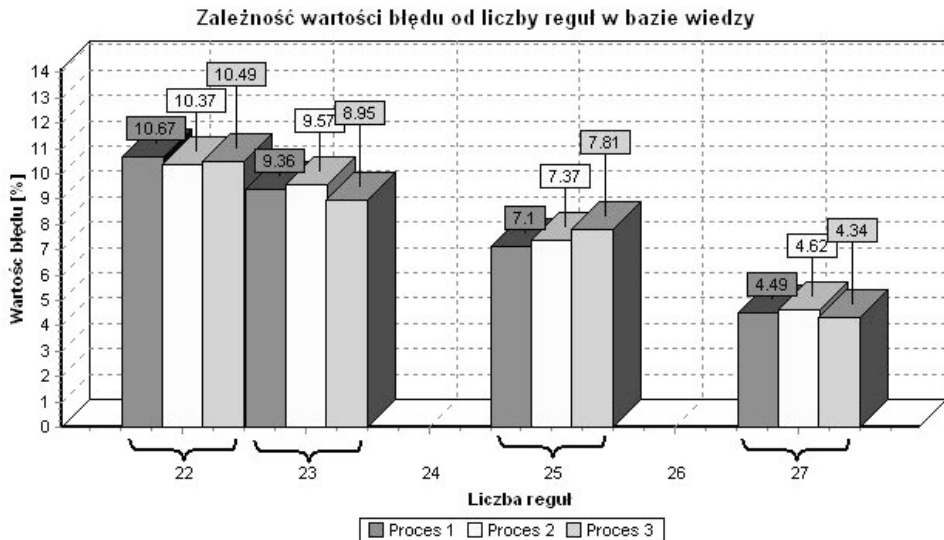
Tabela 1. Parametry środowiska procesowego w procesach azotowania gazowego

Nazwa parametru \ Proces	Proces 1	Proces 2	Proces 3
Czas trwania procesu [min]	570	60	480
Średni potencjał azotowy [$\text{atm}^{1/2}$]	4.75	3.25	6
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	530	570	530
Zawartość N_2 w atmosferze [%]	60	40	60
Zawartość NH_3 w atmosferze [%]	40	60	40
Materiał podłoża	40HMJ	40HMJ	38HMJ
Sposób rozmycia	trójkąt	trójkąt	trójkąt

⁶ Średnia z sumy błędów względnych predykcji wybranych parametrów.

Tabela 2. Wyniki predykcji jako rezultat wnioskowania w systemie ekspertowym

Proces \ Nazwa parametru	Proces 1		Proces 2		Proces 3	
	Uzyskane	Predykcja	Uzyskane	Predykcja	Uzyskane	Predykcja
Grubość efektywna g400 [m μ]	0,185	0,1767	0,17	0,1621	0,2	0,1913
Grubość efektywna g500 [m μ]	0,09	0,086	0,07	0,0668	0,1	0,0957
Grubość efektywna gr+50 [m μ] ⁷	0,345	0,3295	0,24	0,2289	0,3	0,2870
Grubość szarej strefy [m μ]	5	4,775	4	4,1848	4,5	4,3047
Grubość warstwy azotków [m μ]	10	10,45	12,5	13,0775	10,5	10,0443
Twardość maksymalna HV	551	575,795	538	562,8556	552	575,9568
Twardość powierzchniowa HV1	659	629,345	692	723,9704	644	671,9496
Twardość powierzchniowa HV10	642	670,89	630	600,8940	625	652,125
Twardość powierzchniowa HV0,5	519	495,645	512	535,6544	532	555,0888
Twardość powierzchniowa HV5	544	519,52	559	533,1742	562	537,6092

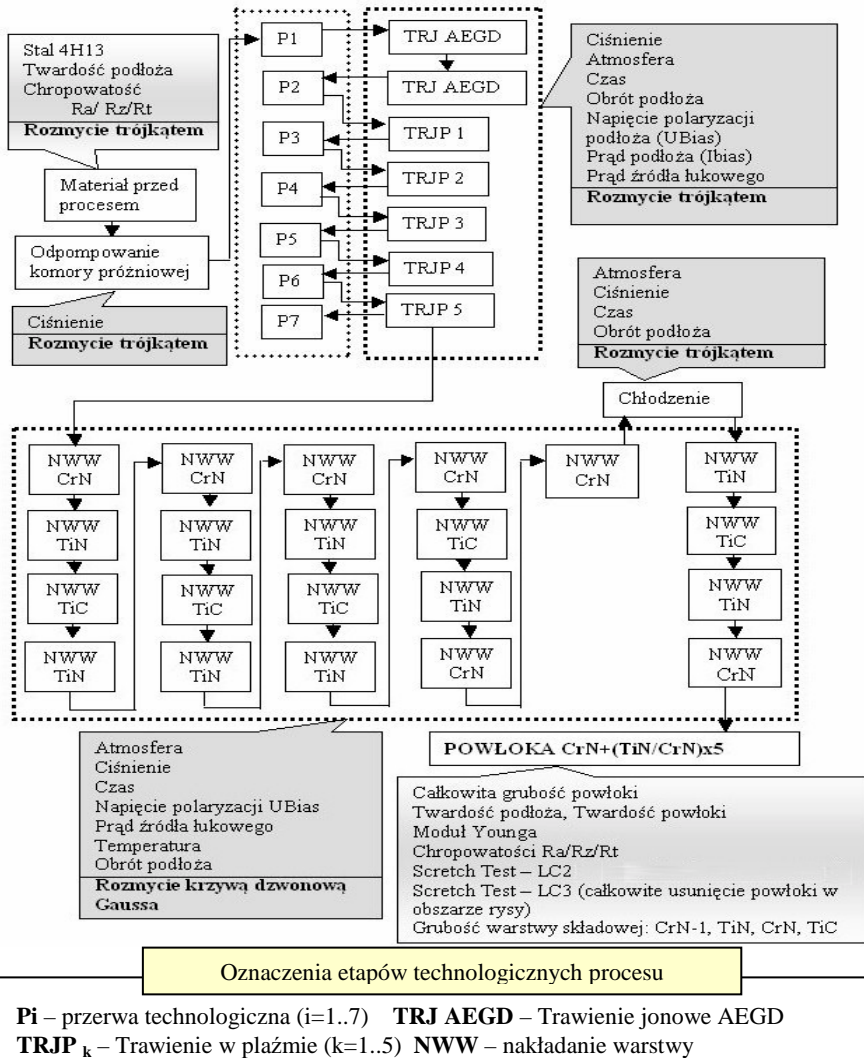


Rys. 9. Błąd predykcji w funkcji liczby reguł bazy wiedzy

⁷ g_{r+50} – grubość warstwy azotowanej od powierzchni do twardości równej twardości rdzenia + 50 VH05 [10].

5.2. Weryfikacja systemu ekspertowego dla procesów PVD

Weryfikacji poddano możliwości prognozowania z wykorzystaniem opracowanego systemu ekspertowego w przypadku wieloetapowych procesów PVD (metoda łukowo-próżniowa) wytwarzania powłok $\text{CrN}+(\text{TiN}+\text{CrN})_{x5}$ na narzędziach ze stali 4H13 przeznaczonych do obróbki plastycznej na gorąco. Algorytm procesu przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Struktura procesu PVD wytwarzania powłok $\text{CrN}+(\text{TiN}+\text{CrN})_{x5}$ odwzorowana w rozmyte reguły wygenerowane w bazie wiedzy⁸

⁸ *Stretch Test LC2* pozwala pomierzyć wartość obciążenia, przy którym pojawia się adhezja powłok (delaminacja niewielkich obszarów powłok).

Każdy z etapów technologicznych opisany został zbiorem parametrów, które posłużyły do budowy reguł rozmytych. Wygenerowano bazę wiedzy zawierającą 16 reguł rozmytych.

W tab. 3 zademonstrowano wyniki predykcji wybranych parametrów powłoki PVD wytwarzanej w procesie, którego algorytm podano na rys. 10.

Tabela 3. Wyniki wnioskowania i rzeczywiste wartości wybranych parametrów powłoki $\text{CrN}+(\text{TiN}+\text{CrN})\times 5$ uzyskanej w wyniku wieloetapowej technologii PVD

Nazwa parametru	Wartość rzeczywista	Wartość wnioskowana	Błąd względny
Całkowita grubość powłoki	6 μm	6,21 μm]	3,5 %]
Twardość powłoki	2700 HV	2892 HV	7,1 %
Chropowatości Ra	0,15 μm	0,143 μm	4,6 %
Chropowatości Rz	1,55 μm	1,67 μm	7,74 %
Chropowatości Rt	2,25 μm	2,31 μm	2,7 %
Wynik scratch testu LC2	18 N	17,23 N	4,8 %
Całkowite usunięcie powłoki w obszarze rysy	40 N	41,22 N	3,05 %

Największy błąd predykcji uzyskano w przypadku twardości powłoki, co wynika z faktu, że w przypadku 4 reguł brakowało wartości tego parametru.

Analiza uzyskanych wyników prowadzi do wniosku, że opracowana metoda wnioskowania rozmytego w stopniu zadowalającym, już na obecnym etapie rozwoju, może być wykorzystana do projektowania i prognozowania właściwości warstw wierzchnich wytwarzanych z wykorzystaniem technologii PVD.

Podsumowanie

- Opracowany szkieletowy system ekspertowy umożliwia wieloparametryczną predykcję właściwości warstwy powierzchniowej na podstawie parametrów (np.: twardości, chropowatości) podłoża oraz parametrów środowiska procesowego co potwierdziły przeprowadzone testy weryfikacyjne.
- Wykorzystanie bazy danych oraz zastosowanie algorytmów opracowanych przez autorów do generacji baz wiedzy pozwala na uczenie się systemu. Dane wprowadzane na bieżąco do bazy pozwalają na:
 - 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 predykcji.
- Dokładność predykcji uzależniona jest od liczby reguł wykorzystywanych we wnioskowaniu. Szczegółowa weryfikacja systemu wymaga opracowania algorytmu krosvalidacji oraz zbadania wpływu klasy funkcji rozmywających oraz modeli defuzyfikacji na jakość predykcji.
 - Rezultaty wnioskowania mogą być wykorzystywane do różnych wariantów procesów i wyznaczenia wartości parametrów warstwy.
 - Opracowany system ma charakter rozwojowy. Dalsza rozbudowa systemu kontynuowana będzie w kierunku integracji wyników wnioskowania i metod symulacji w celu budowy efektywnych narzędzi do komputerowego wspomagania projektowania technologii procesów wytwarzania warstw.

Bibliografia

1. Ratajski J., Lipiński D., Suszko T., Dobrodziej J., Michalski J.: Artificial neural network predictions of the microhardness profile in the nitrided layers. *Problemy Eksploatacji*, 2006, 2, 139.
2. Lee J.J.: Application of inductively coupled plasma to CVD and PVD. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200, 31–34.
3. Andreasen K.P., Böttiger J., Chevallier J., Schell N.: Real time in situ of PVP growth using synchrotron radiation. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200, 1–6.
4. Ratajski J., Suszko T., Dobrodziej J., Michalski J.: Chosen aspects of the modelling of kinetics of the (carbo) nitrided layer growth. *Problemy Eksploatacji*, 2006, 2, 113.
5. Mazurkiewicz A.: Mechanisms of knowledge transformation in the area of advanced technologies of surface engineering. 5th IFHTSE and SMT 20 Congress, Viena (Austria), 2006.
6. Dobrodziej J., Mazurkiewicz A.: 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, 2007.
7. Luger G.F.: Artificial intelligence and strategies for complex problem solving. Addison-Wesley, London, 2005.
8. Mendel J.M.: Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and new direction. Prentice Hall PTR, London, 2001.
9. Rutkowski L: Metody i techniki sztucznej inteligencji, WNT, Warszawa, 2005.
10. Dobrodziej J., Ratajski J., Michalski J., Suszko T., Wojutyński J., Tacikowski J., Wach P.: Komputerowe wspomaganie projektowania procesów azo-

towania gazowego z wykorzystaniem symulacji i metod sztucznej inteligencji. Inżynieria Powierzchni, 2007, 3, 82.

11. Ratajski J.: Wybrane aspekty współczesnego azotowania gazowego pod kątem sterowania procesem. Monografia Wydziału Mechanicznego, 95, Koszalin, 2003.

Recenzent:
Tadeusz WIERZCHOŃ

Computer-aided modelling of gas nitriding processes and PVD processes with the utilisation of fuzzy logic

Key words

Knowledge transformation, fuzzy logic, expert system, thermo-diffusive process, PVD technology.

Summary

The article presents a methodology for constructing fuzzy models that support the efficient design of surface layers and coatings with given maintenance properties. The interaction of artificial intelligence models, including those using fuzzy logic with a database, is presented as the foundation of the method. The article presents the data structure of the database, the method of parameter mapping, and function dependencies that give a comprehensive description of the substrate materials, process milieu, and surface layer properties. The relationship between the logical structure of the database and the fuzzy models of thermo-diffusional and PVD processes is formulated. The application and utility value of the expert system that predicts the surface layers properties is presented. The developed models were used in a computer-aided design of thermo-diffusive processes and PVD technologies. Validation results of the computer models are analysed based on comparative studies between the measured maintenance properties of surface layers created in actual technological processes with the prediction results obtained from the fuzzy inference models.

