

2. Przesłanki teoretyczne podjęcia tematyki badawczej

2.1 Współczesne znaczenie powłok przeciwzużyciowych

Technika cienkich przeciwzużyciowych powłok nanoszonych różnymi metodami na materiały narzędziowe budzi od wielu lat duże zainteresowanie producentów. Postęp w tej dziedzinie dokonuje się równolegle z rozwojem w kilku obszarach inżynierii materiałowej, skupiając się na poszukiwaniu i wprowadzaniu nowych materiałów, a także na optymalizacji ich składu chemicznego i fazowego oraz technologii ich wytwarzania [14, 15]. Obecnie głównymi sposobami poprawy własności użytkowych materiałów narzędziowych są metody fizycznego i chemicznego osadzania powłok. Powłoki otrzymywane w procesach PVD i CVD w wielu zastosowaniach ugruntowały już swoją pozycję, pozwalając na wyraźną poprawę własności użytkowych elementów wykonanych z materiałów narzędziowych. Główne korzyści wynikające z ich nanoszenia na narzędzia to:

- dłuższa trwałość wytworzonych elementów,
- zmniejszenie kosztów produkcji w związku ze wzrostem trwałości narzędzi,
- ograniczenie przestoju międzyoperacyjnych spowodowanych koniecznością wymiany narzędzi,
- wzrost wydajności obróbki związany ze zwiększeniem prędkości skrawania i stosowanych posuwów,
- lepsza jakość powierzchni obrabianych materiałów,
- ograniczenie procesów utleniania i korozyjnych.

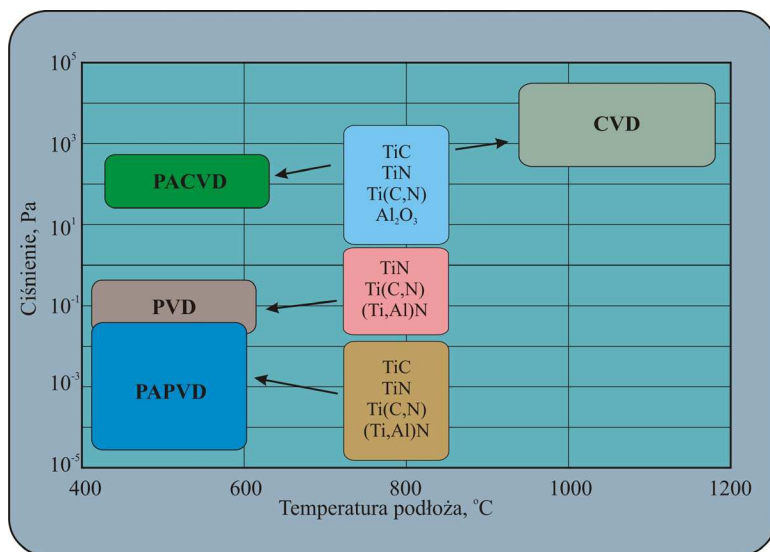
Stosowanie tych metod nie powoduje zanieczyszczenia środowiska, daje się łatwo automatyzować i stosować w produkcji seryjnej. O znaczeniu tych technologii wśród metod poprawy własności powierzchni świadczyć może fakt, że w ofercie handlowej liczących się producentów znajduje się szeroki asortyment narzędzi pokrywanych twardymi powłokami [16, 17].

Metody CVD nanoszenia powłok polegają na tworzeniu warstw węglików i azotków metali ze składników atmosfery gazowej, na powierzchni obrabianego elementu. W procesie

tworzenia warstwy biorą udział składniki podłoża. Proces prowadzony jest w atmosferach gazowych, zawierających zwykle pary związków chemicznych metalu, stanowiącego podstawowy składnik wytworzonej warstwy w 900-1100°C. Wysoka temperatura konieczna do przebiegu reakcji chemicznych znacznie zmniejsza zakres stosowania metod CVD, szczególnie w przypadku elementów narażonych na obciążenia dynamiczne podczas eksploatacji lub narzędzi wykonanych ze stali szybkootnących. Ogranicza to zakres stosowania technik CVD głównie do nanoszenia warstw na płytki ze spiekanych materiałów ceramicznych, dla których wysoka temperatura procesu nie powoduje utraty ich własności. W ostatnich latach opracowano kilka odmian procesów CVD, zwanych ogólnie metodami chemicznego osadzania z fazy gazowej w obecności wyładowania jarzeniowego PACVD, umożliwiającymi wykorzystanie pozytywnych cech wysokotemperaturowych procesów CVD (duża wydajność i jakość uzyskiwanych powłok) w połączeniu z niską temperaturą pokrywania oraz korzystnym oddziaływaniem plazmy, dającym możliwość oczyszczenia podłoża [2, 15, 16, 18, 19].

Metody PVD wykorzystują zjawiska fizyczne, takie jak odparowanie metali albo stopów lub rozpylanie katodowe w próżni i jonizację gazów i par metali. Wspólną ich cechą jest krystalizacja par metali lub faz z plazmy. Nanoszenie powłok przeprowadzane jest na podłożu zimnym lub podgrzanym do 200-600°C, co umożliwia pokrywanie podłoży zahartowanych i odpuszczonych bez obawy o spadek ich twardości. W technikach PVD zmiana parametrów procesu ma duży wpływ na strukturę wytworzonych powłok. Podstawowymi parametrami procesu wpływającymi na strukturę i topografię powłok PVD są: temperatura podłoża, ciśnienie gazów roboczych, energia osadzanych jonów, które razem z cechami i własnościami podłoża determinują ich własności mechaniczne [2, 20-23]. Ewolucja metod PVD zmierza w kierunku pozwalającym na nanoszenie zarówno powłok wielofazowych, wielowarstwowych, jak i gradientowych, charakteryzujących się dobrą przyczepnością do materiału podłoża [16, 17].

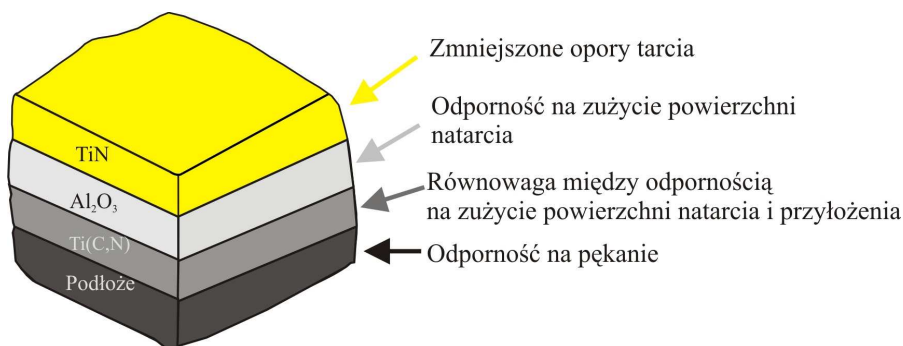
Wobec mnogości odmian technik nanoszenia warstw istnieje konieczność świadomego wyboru zarówno rodzaju powłoki, jak i metody jej nanoszenia, ponieważ te same powłoki nanoszone różnymi metodami różnią się pod względem własności użytkowych. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie technik nanoszenia powłok w zależności od temperatury procesu i ciśnienia roboczego.



Rysunek 2. Porównanie technik nanoszenia powłok [29]

Duża liczba możliwych technik pozwala na dobranie najbardziej odpowiedniej dla konkretnego zastosowania, ze względu na pożądane właściwości powłoki i pokrywanego podłoża. Wymagania stawiane powłokom przeciwzuzyciowym sprawiają, że materiały stosowane do ich uzyskania powinny charakteryzować się przede wszystkim wysoką twardością w podwyższonej temperaturze, wysoką odpornością na utlenianie oraz dobrą stabilnością chemiczną. Ze względu na tak postawione wymagania jako składniki powłok przeciwzuzyciowych na narzędziach stosuje się głównie: azotek tytanu TiN, węgiel tytanu TiC, węglikoazotek tytanu TiCN, azotek aluminium TiAlN oraz tlenek aluminium Al_2O_3 [24-29].

Właściwości powłok jednowarstwowych, obecnie najczęściej stosowanych, są w licznych przypadkach niewystarczające. Dużo większe możliwości kształtowania żądanych właściwości w różnych obszarach powłoki stwarzają pokrycia wielowarstwowe. Powłoki wielowarstwowe, tworzone w wyniku nałożenia na siebie kolejno warstw odmiennych materiałów, dobierane są w ten sposób, aby zagwarantować stopniowe przejście pomiędzy właściwościami poszczególnych warstw, mających do spełnienia odmienne zadania. W efekcie utworzona powłoka wielowarstwowa wykazuje jednocześnie wysoką przyczepność do materiału podłoża

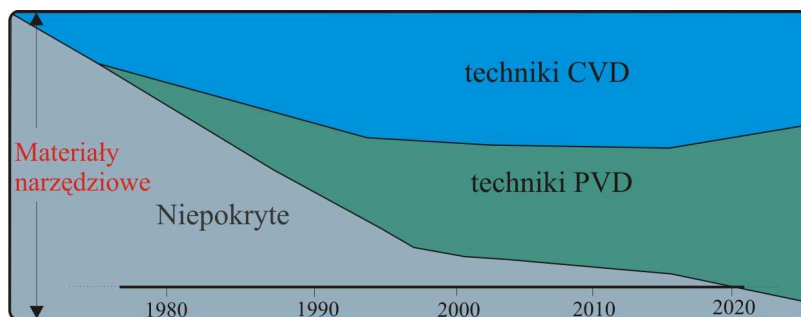


Rysunek 3. Schemat przykładowej powłoki wielowarstwowej naniesionej na ostrze skrawające z funkcjami poszczególnych warstw [4]

oraz wysoką twardość i odporność na zużycie. Na rysunku 3 przedstawiono schemat powłoki wielowarstwowej naniesionej na ostrze skrawające z funkcjami poszczególnych warstw, zgodnie z [4]. Bezpośrednio narażona na kontakt z obcym materiałem powierzchnia powłoki powinna charakteryzować się małą reaktywnością chemiczną. Od środkowej części na przekroju powłoki wymagana jest duża twardość oraz dobra ciągliwość, zapewniająca możliwość relaksacji naprężeń własnych. Strefa kontaktu powłoki z materiałem podłoża powinna zapewniać przede wszystkim dobrą przyczepność, którą można uzyskać przez minimalizację naprężeń cieplnych oraz dzięki zbliżonemu charakterowi wiązań między atomami w powłoce i podłożu [2, 4, 16].

O efektywności stosowania powłok nanoszonych metodami PVD i CVD najlepiej świadczą wyniki badań porównawczych wykonanych jednocześnie dla narzędzi pokrytych oraz niepokrytych [1, 2, 6, 16, 21, 25-27]. Rozwój procesów PVD i CVD spowodował wykorzystanie na skalę przemysłową specyficznych własności powłok nie tylko do pokrywania materiałów narzędziowych lecz także w innych obszarach zastosowań: w optyce i mikroelektronice, biomedycynie, energetyce, przemyśle samochodowym i budowlanym [18, 29-32].

Zgodnie z [32] planowane jest stopniowe zwiększanie udziału narzędzi pokrytych metodami PVD i CVD w stosunku do narzędzi niepokrytych (rys. 4). Wciąż rosnące zapotrzebowanie na pokrycia otrzymywane technikami PVD i CVD prowadzi do znacznego

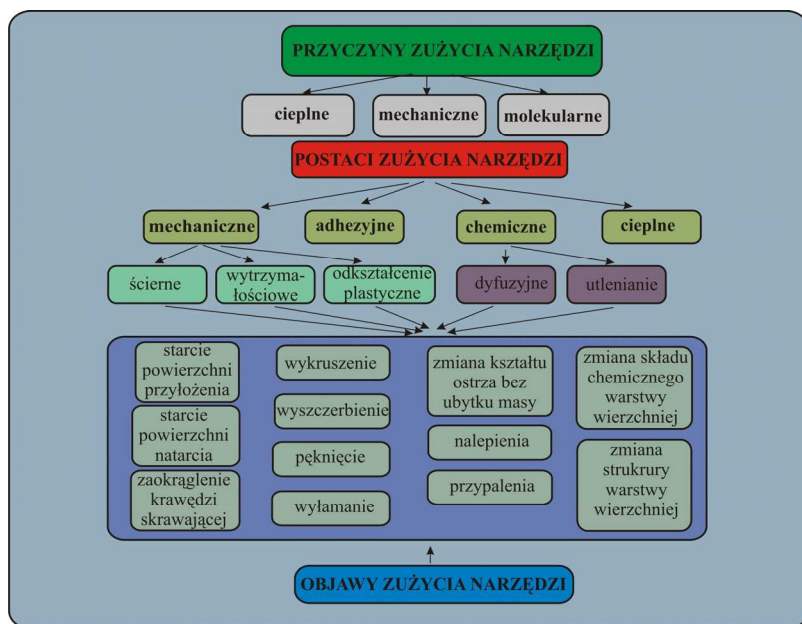


Rysunek 4. Prognoza rozwoju technik PVD i CVD [32]

wzrostu sprzedaży urządzeń do nanoszenia powłok, co pozwala na wprowadzanie nowych rozwiązań technologicznych i dynamiczny rozwój tej dziedziny inżynierii materiałowej. Wzrost zastosowań technologii PVD i CVD w produkcji handlowej spowodował potrzebę zastosowania systemu jakości w procesach nanoszenia powłok. Aby sprostać temu wyzwaniu, należy dokładnie poznać mechanizmy zużycia powłok, a także towarzyszące temu uszkodzenia, w zależności od środowiska i obszaru zastosowań rozpatrywanego przypadku powłoki. Analizując własności powłok, szczególną uwagę należy zwrócić na zagadnienia związane:

- z własnościami mechanicznymi (pryczepność, twardość, naprężenia wewnętrzne),
- z własnościami fizycznymi (gęstość, przewodność cieplna, współczynnik tarcia),
- z odpornością na zużycie (własności trybologiczne),
- z strukturą, składem chemicznym i fazowym oraz teksturą.

Czynniki te wpływają na szybkość zużycia oraz zwiększenie trwałości narzędzi i w konsekwencji decydują o przeznaczeniu powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD [33 - 35]. Głównym celem prowadzonych badań nad mechanizmami zużycia narzędzi skrawających jest określenie wpływu warunków i parametrów zużycia na trwałość i niezawodność pracy narzędzi (rys. 5). Rozpoznanie i określenie wpływu możliwie dużej liczby czynników determinujących trwałość narzędzi pozwala na opracowanie coraz dokładniejszych modeli zużycia powłok PVD i CVD. Rozwiązanie tego problemu umożliwi zwiększenie wydajności i jakości obróbki, przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności i materiałochłonności [2, 5].



Rysunek 5. Przyczyny, postaci i objawy zużycia narzędzi [21]

W praktyce koniec technologicznego okresu trwałości narzędzia następuje zwykle wtedy, gdy przestaje ono zapewniać uzyskanie przedmiotu o pożądanym wymiarach i jakości powierzchni. Liczne testy wykonywane w laboratoriach naukowych pozwalają określać trwałość powłok PVD i CVD, wśród których najczęściej stosowane są testy skrawności oraz test erozyjny.

Wiele prac [2, 3, 33-39] poświęconych jest wpływowi warunków procesów nanoszenia powłok, polaryzacji i temperatury podłoża, ciśnienia i przepływów gazów reaktywnych na ich własności wyrażone przez adhezję, twardość, stan naprężeń wewnętrznych, skład fazowy i orientację krystalograficzną, a także rodzaj struktury. Stan wiedzy na temat zależności pomiędzy strukturą, własnościami fizycznymi a warunkami uzyskiwania powłok w procesach PVD i CVD jest jeszcze niezadowolający i wymaga badań laboratoryjnych, wspomaganych technikami komputerowymi. Wykorzystanie technik komputerowych znacznie zwiększa możliwości analizy otrzymywanych wyników doświadczalnych oraz ograniczenia konieczności przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych prób technologicznych na rzecz prognozowania własności mechanicznych i użytkowych powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD na materiałach narzędziowych [40, 41].

2.2 Analiza fraktalna jako narzędzie oceny topografii powierzchni

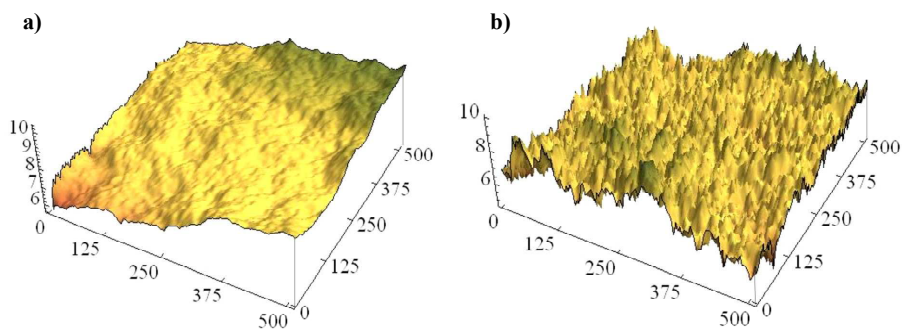
Analiza fraktalna jest metodą matematyczną stworzoną w latach 60 ubiegłego wieku przez B.B. Mandelbrota do opisu abstrakcyjnych konstrukcji matematycznych, a następnie form występujących powszechnie w przyrodzie, posiadających cechę samopodobieństwa [42, 43]. Wśród przykładów obiektów samopodobnych można wymienić tak różnorodne struktury, jak: rozkłady galaktyk w przestrzeni kosmicznej, wahania kursów walut na giełdzie oraz powierzchnie masywów górskich, co sprawia, że metody fraktalne stały się użytecznym narzędziem w teoretycznych i eksperymentalnych badaniach wielu dziedzin nauki, m. in. astrofizycznych, geologicznych, biologicznych, medycznych, fizycznych, gospodarczych oraz informatycznych [44-48].

Topografia powierzchni wielu rzeczywistych materiałów inżynierskich, w tym powłok CVD i PVD, wykazuje cechę samopodobieństwa [49-53], co pozwala zastosować do ich opisu metody analizy fraktalnej. Ponieważ powierzchnie rzeczywistych materiałów nigdy nie są idealnie „gładkie”, więc po zastosowaniu odpowiednio dużego powiększenia ich fragmentów ujawniają się nierówności w postaci wgłębień lub wypukłości. Można zauważyć, że dla pewnych materiałów stopień tych nieregularności jest stały bez względu na skalę. Oznacza to, że jeśli analizowana powierzchnia jest gładka i regularna, to jej fragmenty po powiększeniu zachowują tę cechę. W przypadku gdy powierzchnia jest nieregularna i chropowata, również jej powiększone fragmenty wyglądają tak samo. Dzieje się tak, gdyż ujawniają się dodatkowe szczegóły, które wcześniej nie były dostrzegalne. Geometria fraktalna jest narzędziem, które pozwala w sposób jakościowy i ilościowy scharakteryzować stopień nieregularności powierzchni, w przypadku gdy wielkość ta jest niezależna od skali. Podstawową wielkością fraktalną, która charakteryzuje stopień wypełnienia przestrzeni przez powierzchnię i opisuje jej kształt, jest powierzchniowy wymiar fraktalny D_s . Wymiar fraktalny D_s , będący liczbą rzeczywistą zawartą w przedziale [2,3], jest miarą nieregularności i stopnia złożoności kształtu powierzchni. Niska wartość wymiaru fraktalnego jest charakterystyczna dla powierzchni gładkich, natomiast wysoka – opisuje powierzchnie o złożonym i skomplikowanym kształcie.

Metody geometrii fraktalnej umożliwiają nie tylko wyznaczanie wymiaru fraktalnego analizowanych obiektów, ale również modelowanie powierzchni o dowolnie wybranej, zadanej wartości tego parametru [54]. W pracy [55] autor prezentowanego opracowania przedstawił trzy algorytmy, umożliwiające uzyskiwanie danych modelujących powierzchnie o ułamkowych wartościach wymiaru fraktalnego: dwie wersje algorytmu losowego przemieszczania środka (midpoint displacement method) [56, 57] oraz algorytm Falconera [54]. Na rysunku 6

przedstawiono przykłady wykresów powierzchni fraktalnych o różnych wartościach wymiaru fraktalnego ($D_s = 2,25$ oraz $D_s = 2,75$), wygenerowanych przy użyciu algorytmu losowego przemieszczania środka. Porównując te dwa zbiory, których rozmiary (szerokość i długość) są jednakowe, można zauważyć, że powierzchnia o niższej wartości wymiaru fraktalnego (rys. 6a) jest słabiej rozwinięta (mniejsze pole powierzchni) niż powierzchnia o jego wysokiej wartości (rys. 6b). Porównanie obu wykresów powierzchni pozwala zinterpretować znaczenie parametru D_s . Powierzchnie charakteryzujące się niską wartością D_s wykazują jednocześnie względnie małą amplitudę oraz częstotliwość nierówności, natomiast częstotliwość i amplituda nierówności występujących na powierzchniach o wyższej wartości D_s są większe. Powierzchnie o niskiej wartości D_s są jednorodne i gładkie, a kształty obiektów, których wymiar powierzchniowy jest wysoki, są bardziej nieregularne i złożone.

Dla powierzchni euklidesowych („klasycznych”) wymiar fraktalny D_s przyjmuje wartość całkowitą, równą 2, zgodną z intuicyjną wartością wymiaru. W przypadku obiektów o bardziej nieregularnych kształtach, składających się z drobnych fragmentów, które stają się „widoczne” dopiero po zastosowaniu odpowiedniego „powiększenia”, wartość D_s wzrasta. Zestawy danych modelujących powierzchnie o zadanych wartościach wymiaru fraktalnego mogą zostać również wykorzystane do sprawdzenia poprawności metod wyznaczania wymiaru fraktalnego. Przeprowadzone analizy pozwalają skojarzyć wartość wymiaru fraktalnego z jedną z najczęściej stosowanych w inżynierii materiałowej wielkości do opisu topografii powierzchni analizowanych materiałów czyli z chropowatością. Zazwyczaj powierzchnie o niskiej chropowatości charakteryzowane są przez niską wartość wymiaru fraktalnego, natomiast



Rysunek 6. Przykłady wykresów powierzchni fraktalnych o różnych wartościach wymiaru fraktalnego a) $D_s = 2,25$ i b) $D_s = 2,75$ (wygenerowanych przy użyciu algorytmu losowego przemieszczania środka) [55]

wzrostowi chropowatości towarzyszy wzrost jego wartości. Jeżeli analizowany obiekt jest fraktalem, to zastosowanie wymiaru fraktalnego do charakterystyki topografii powłok ma zasadniczą przewagę nad tradycyjnymi wielkościami, określającymi chropowatość, ponieważ, w przeciwieństwie do nich, nie zależy on od wyboru zakresu pomiarowego. Chropowatość wyznaczana jest dla jednego zakresu pomiarowego i nie pozwala wnioskować na temat cech powierzchni próbki w innych zakresach pomiarowych. Powierzchnia o dużej chropowatości, określonej przykładowo przez wysoką wartość R_a , może zawierać duże ziarna, których ścianki obserwowane przy dużym powiększeniu okazują się gładkie, i w tak wybranym mniejszym zakresie pomiarowym przyjmują niską wartość R_a . Powierzchnia o niskiej chropowatości, określonej przez niską wartość R_a , która powinna być gładka, po zastosowaniu właściwego powiększenia może zawierać dużą liczbę drobnych ziaren i w mniejszym zakresie pomiarowym przyjmować wysoką wartość parametru R_a . Należy podkreślić, że, w przeciwieństwie do abstrakcyjnych, idealnych konstrukcji matematycznych, cecha samopodobieństwa dla powierzchni rzeczywistych występuje tylko w sensie statystycznym i w określonym przedziale wielkości. W szczególności nie należy zakładać, że powierzchnie powłok uzyskiwane w procesach CVD i PVD we wszystkich zakresach pomiarowych wykazują tę cechę. Z tego względu wyznaczanie wartości wymiaru fraktalnego powinno być poprzedzone określeniem zakresu, w którym stopień nieregularności badanych powierzchni jest niezależny od skali. Jeżeli powyższy warunek jest spełniony, geometria fraktalna staje się narzędziem, które umożliwi ilościową charakterystykę rzeczywistych powierzchni, w tym powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD.

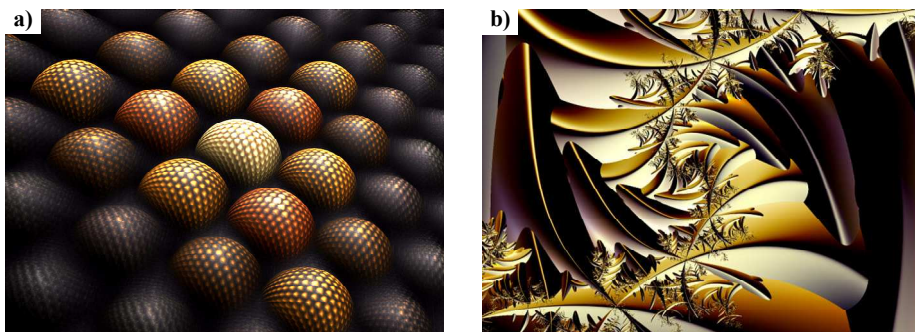
Praktycznie już w momencie powstania teorii fraktali B.B. Mandelbrot wskazał [58], że do opisu większości rzeczywistych obiektów (jako przykład wybrał rozkład złóż miedzi) zastosowanie formalizmu fraktalnego jest niewystarczające. Wynika to z faktu, że rzeczywiste obiekty nie są jednorodne i z tego powodu niemożliwe jest opisanie własności geometrycznych obiektów o nieregularnych kształtach za pomocą jednej liczby – wymiaru fraktalnego. Powierzchnie badanych materiałów inżynierskich zazwyczaj nie są idealnymi obiektami samopodobnymi, ponieważ cecha ta występuje jedynie lokalnie. Rozkład nieregularności zmienia się w zależności od wyboru fragmentu analizowanego obszaru próbki. W pewnych fragmentach powierzchnie mogą charakteryzować się dużą nieregularnością, podczas gdy w innych mogą wykazywać bardziej regularny kształt. Mandelbrot zaproponował, by uogólnić pojęcie zbioru fraktalnego i zastąpić je miarą multifraktalną. Miara multifraktalna umożliwia charakteryzowanie złożonych kształtów, w tym powierzchni, dla których wymiar wyznaczony w różnych obszarach przyjmuje różne wartości. Z tego powodu analiza multifraktalna jest

uzupełnieniem metody fraktalnej, umożliwiając scharakteryzowanie geometrycznych własności rzeczywistych powierzchni w pełniejszy i bardziej precyzyjny sposób [59, 60].

We współczesnej nauce geometria fraktalna i multifraktalna znalazła zastosowanie między innymi do badania nieregularności powierzchni i opisu jej kształtu. Fraktalne i multifraktalne własności powierzchni były dotychczas wyznaczane dla wielu materiałów, wśród których należy wymienić: materiały metalowe [61, 62] i ich stopy [63-66], materiały ceramiczne, polimerowe oraz amorficzne [67-72]. Koncepcja fraktali została wykorzystana do opisu morfologii powierzchni przełomów w przestrzeni 2D i 3D dla potrzeb stereologii [73]. W wyniku badań próbek amorficznych wykonanych ze stopów FeNiVSiB przedstawionych w [74] stwierdzono, że ich odporność na kruche pękanie jest proporcjonalna do wartości wymiaru fraktalnego topografii przełomu. W pracy [75] przedstawiono wyniki badań nad półprzewodnikową warstwą TiO_2 , wykazując korelację pomiędzy wymiarem fraktalnym opisującym i charakteryzującym badane powierzchnie a ich zdolnościami absorpcji światła. Zastosowanie mikroskopii elektronowej umożliwia badania polimerowych materiałów kompozytowych wzmacnianych cząstkami mineralnymi. Analiza fraktalna przeprowadzona na podstawie uzyskanych rezultatów ułatwiła ilościowy opis rozproszenia cząstek mineralnych, dzięki zastosowaniu wskaźnika numerycznego powiązanego z szerokością widma multifraktalnego [76]. Posługując się analizą multifraktalną, podjęto próbę opisu zjawiska Portevin - Le Chatelier (PLC) [77]. Z krzywej odkształcenia określono prawdopodobieństwo wystąpienia nietrwałości plastycznej wewnątrz badanej struktury, a miarą stopnia niejednorodności powierzchni materiału, w którym doszło do odkształcenia plastycznego, był wymiar fraktalny. W pracy [78] przedstawiono wyniki badań powierzchni materiałów przetapianych laserowo. Wykazano, że materiały przetapiane wiązką lasera o wyższej energii charakteryzują się większą niejednorodnością powierzchni, a na charakter opisującego ją widma multifraktalnego wpływa energia strumienia lasera. Analizę multifraktalną powłok złożonych Si/TiN/Pd osadzonych na podłożu ze stopu NiCuP metodą powlekania bezprądowego w zależności od czasu trwania tego procesu przedstawiono w pracy [79]. Otrzymane wyniki wskazują na korelację pomiędzy parametrami opisującymi widmo multifraktalne a zmianami niejednorodności powłoki w przypadku zwiększenia czasu procesu jej osadzania.

Geometria fraktalna i multifraktalna znajduje także szerokie zastosowanie w zakresie charakteryzowania i opisu morfologii powierzchni materiałów biomedycznych. Otrzymywanie implantów oraz pokryć powierzchni elementów wszczepianych do wnętrza organizmu ludzkiego lub przeznaczonych do długotrwałego kontaktu z nim (np. rozruszniki i sztuczne zastawki serca, cewniki, dreny, nici chirurgiczne) jest obecnie bardzo intensywnie rozwijającym się kierunkiem

badania naukowe. Do najczęściej stosowanych biomateriałów zalicza się polimery, materiały ceramiczne oraz niektóre metale i ich stopy. Do obrazowania ich powierzchni, w zależności od rozmiaru badanych obszarów, wykorzystuje się mikroskopię optyczną, konfokalną, oddziaływań międzyatomowych, skaningową lub transmisyjną, a do oceny otrzymywanych wyników stosowane są głównie metody automatycznej analizy obrazu, w tym również analizy fraktalnej [80-82]. W przypadku materiałów biomedycznych, wykorzystywanych jako implanty, niezwykle istotną rolę odgrywa topografia ich powierzchni. Wykorzystanie analizy fraktalnej umożliwi w tym obszarze wyznaczanie ilościowych parametrów opisujących amplitudę nierówności występujących na powierzchni oraz stopień ich uporządkowania. Komplementarne podejście, uwzględniające obok pomiarów chropowatości również wyznaczanie wymiaru fraktalnego, zostało praktycznie wykorzystane do optymalizacji procesu otrzymywania materiałów o pożądanych własnościach powierzchni [83, 84]. W obszarze badań materiałów ceramicznych, wykorzystywanych w medycynie, wysiłki badaczy skupione są na opracowywaniu metod, umożliwiających ilościową ocenę porowatości stosowanych materiałów. Wyniki prowadzonych badań [85] wskazują, że wymiar fraktalny jest proporcjonalny do porowatości materiałów ceramicznych oraz że istnieje korelacja pomiędzy jego wartością oraz udziałem wody, która może być wchłonięta przez materiał. Wykazano, że w przypadku materiałów ceramicznych, stosowanych w dentystyce, istnieje zależność pomiędzy twardością i wymiarem fraktalnym [86] oraz ponadto wykorzystano geometrię fraktalną do monitorowania zmian morfologii powierzchni implantów dentystycznych, charakteryzując z jej wykorzystaniem zużycie analizowanych biomateriałów [87]. Ponadto, geometria fraktalna i multifraktalna wykorzystywana jest powszechnie do analizy obrazów medycznych (ECG, EEG, USG, prześwietleń, badań mammograficznych itp.) [88]. Geometria fraktalna jest także wykorzystywana komercyjnie np. przy produkcji filmowych efektów specjalnych, do kodowania i kompresji obrazów oraz przy tworzeniu skomplikowanych obrazów fraktali (rys. 7a i 5b) [89, 90].



Rysunek 7. a), b) Komputerowo wygenerowane obiekty fraktalne [90]

2.3 Teza, cel i zakres pracy

Przeprowadzone badania własne oraz studium literaturowe wskazują na fakt, że zarówno rodzaj i warunki procesu, rodzaj materiału podłoża, jak i skład chemiczny nanoszonych powłok decydują o strukturze, a co za tym idzie topografii powierzchni powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD, które z kolei decydują o ich własnościach mechanicznych, wytrzymałościowych oraz odporności na zużycie. Potwierdzają to zwłaszcza prace Thorntona [36], Messnera [37] oraz Mowczana i Demczyszyna [38], przedstawiające modele stref strukturalnych powłok i będące najczęściej cytowanymi pozycjami w bardzo licznych opracowaniach, dotyczących warstw uzyskiwanych w procesach PVD i CVD. Potwierdzenie, a następnie wyjaśnienie wspomnianych zależności ma nie tylko istotne znaczenie poznawcze, ale w krótkim czasie może znaleźć zastosowanie praktyczne, dające możliwość prognozowania własności powłok na podstawie oceny kształtu topografii ich powierzchni. Sformułowano więc następującą tezę pracy:

Analiza kształtu topografii powierzchni powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD umożliwi prognozowanie ich własności mechanicznych i eksploatacyjnych.

W inżynierii materiałowej duże znaczenie praktyczne odgrywa precyzyjny opis powierzchni powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD, jednak ze względu na brak odpowiedniego narzędzia, dającego możliwość ilościowego scharakteryzowania złożonych kształtów badanych powierzchni, dotychczas nie zwrócono należytej uwagi na to zagadnienie. Zdaniem autora geometria fraktalna może stanowić wartościowe uzupełnienie stosowanych dotychczas metod. Przykładowo, zastosowanie wymiaru fraktalnego do charakterystyki topografii powłok ma zasadniczą przewagę nad tradycyjnymi wielkościami, określającymi chropowatość, ponieważ, w przeciwieństwie do nich, nie zależy on od wyboru zakresu pomiarowego, natomiast analiza multifraktalna stanowi rozszerzenie metody fraktalnej, umożliwiając w precyzyjny sposób scharakteryzowanie geometrycznych własności rzeczywistych powierzchni, dla których wymiar wyznaczony w różnych obszarach przyjmuje różne wartości.

W związku z tym za cel prezentowanej pracy przyjęto opracowanie metodyki, dającej możliwość prognozowania własności powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD na materiałach narzędziowych na podstawie wielkości fraktalnych, opisujących ich powierzchnię.

2. Przesłanki teoretyczne podjęcia tematyki badawczej

W ramach zrealizowanej pracy przeprowadzono badania oraz analizy, obejmujące:

- określenie wpływu rodzaju procesu i warunków nanoszenia na strukturę i kształt topografii powierzchni oraz własności mechaniczne i eksploatacyjne uzyskanych powłok,
- opracowanie metodyki charakterystyki i precyzyjnego opisu topografii powłok uzyskiwanych w procesach PVD i CVD na materiałach narzędziowych z wykorzystaniem geometrii fraktalnej i multifraktalnej na podstawie obrazów uzyskiwanych za pomocą mikroskopu sił atomowych,
- ustalenie korelacji pomiędzy wielkościami fraktalnymi charakteryzującymi analizowane powierzchnie powłok PVD i CVD a ich własnościami mechanicznymi i eksploatacyjnymi.