

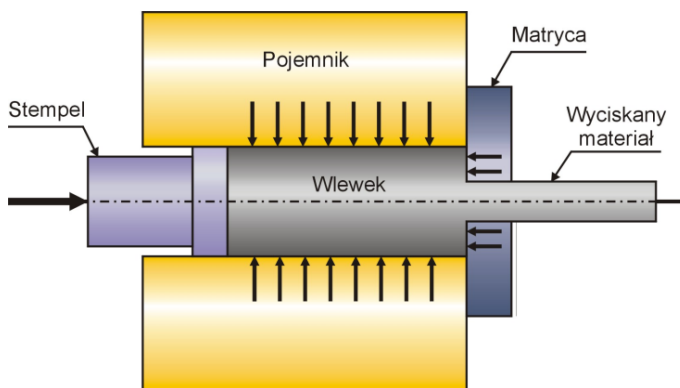
2. Ocena stanu zagadnienia

2.1. Charakterystyka procesu wyciskania oraz warunki pracy i typowe mechanizmy zużycia matryc

Obróbka plastyczna jest jedną z najbardziej rozwijających się gałęzi przemysłu. W dziedzinie tej obserwujemy dynamiczny rozwój zarówno teorii, jak i procesów technologicznych. Obecnie panuje pogląd, że najbardziej ekonomiczną metodą obróbki plastycznej jest wyciskanie, w której wsad w kształcie walca umieszczony w pojemniku, wypływa przez otwór matrycy pod wpływem nacisku narzędzia, zazwyczaj przetłoczki połączonej ze stemplem prasy (rys. 1). Kształt produktu wypływającego z matrycy nadany jest przez otwór matrycy [39-41].

Wyciskanie posiada istotne cechy, które wyróżniają go od innych metod obróbki plastycznej, do których można zaliczyć [39]:

- możliwość uzyskania produktów o korzystnej strukturze i dobrych własnościach,
- możliwość otrzymania produktów pustych lub pełnych o skomplikowanych kształtach w trakcie jednej operacji,
- możliwość uzyskania bardzo dużych stopni odkształcenia w jednej operacji (zmiana przekroju może osiągać wartości ponad 90%),
- występowanie korzystnego stanu naprężeń w postaci trójosiowego nierównomiernego ściskania, umożliwiającego kształtowanie materiałów o niewielkiej plastyczności.



Rysunek 1. Schemat i zasady procesu wyciskania [40]

Początkowo wyciskanie stosowano przede wszystkim do kształtowania produktów z materiałów wykazujących niską granicę plastyczności ze względu na duże naciski. Rozwój metod wyciskania, w tym zastosowanie podgrzewania narzędzi oraz materiału wsadowego, jak również użycie odpowiednio dobranych smarów, stworzyło możliwość wyciskania stali oraz innych metali o wysokiej temperaturze topnienia i to zarówno na zimno jak i na gorąco. Obecnie wyciskanie jest podstawową metodą wytwarzania rur, prętów i kształtowników oraz elementów maszyn ze stali oraz metali nieżelaznych i ich stopów.

Znane są dwa zasadnicze sposoby realizacji wyciskania w zależności od kierunku płynięcia metalu: współbieżne oraz przeciwbieżne. Stosowane jest także, tzw. wyciskanie boczne, w którym metal płynie w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu stempla. Istotnym zagadnieniem w trakcie wyciskania jest analiza płynięcia metalu, w szczególności w strefie odkształcenia, determinująca strukturę, własności oraz jakość gotowych produktów. Wiedza na temat możliwości kontrolowania płynięcia metalu wymaga szczególnej uwagi, ze względu na konieczność ograniczenia niejednorodności odkształcenia materiału. Decydującymi czynnikami mającymi wpływ na sposób płynięcia wyciskanego metalu jest wielkość tarcia na kontakcie wlewka z pojemnikiem, stopień odkształcenia, prędkość wyciskania oraz geometria i kinematyka narzędzi (matrycy) [39].

W inżynierii materiałowej istotne znaczenie ma wytwarzanie materiałów o strukturze nanokrystalicznej, zapewniającej korzystne własności mechaniczne i użytkowe produktów. W przypadku metali opracowano wiele metod prowadzących do silnego rozdrobnienia ziaren w wyniku intensywnego odkształcenia plastycznego. Metody te są znane pod wspólną nazwą SPD (ang. *Severe Plastic Deformation*), gdyż w wyniku odkształcenia plastycznego w materiale wytwarzana jest duża liczba defektów, które podczas reorganizacji przestrzennej i wzajemnym przereagowaniu umożliwiają rozdrobnienie ziarna do zakresu nanometrycznego. Spośród wielu metod intensywnego odkształcenia plastycznego najczęściej stosuje się [3, 42, 43]:

- metodę wielokrotnego wyciskania przez kanał kątowy – ECAE (ang. *Equal Chanel Angular Extrusion*),
- metodę cyklicznego wyciskania spęczającego – CEC (ang. *Cyclic-Extrusion Compression*),
- metodę skręcania pod wysokim ciśnieniem – HPT (ang. *High-Pressure Torsion*),
- metodę kumulacyjnego walcowania z łączeniem – ARB (ang. *Accumulative Roll-Bonding*),
- metodę powtarzalnego fałdowania z prostowaniem – RCS (ang. *Repetitive Corrugation and Straightening*),

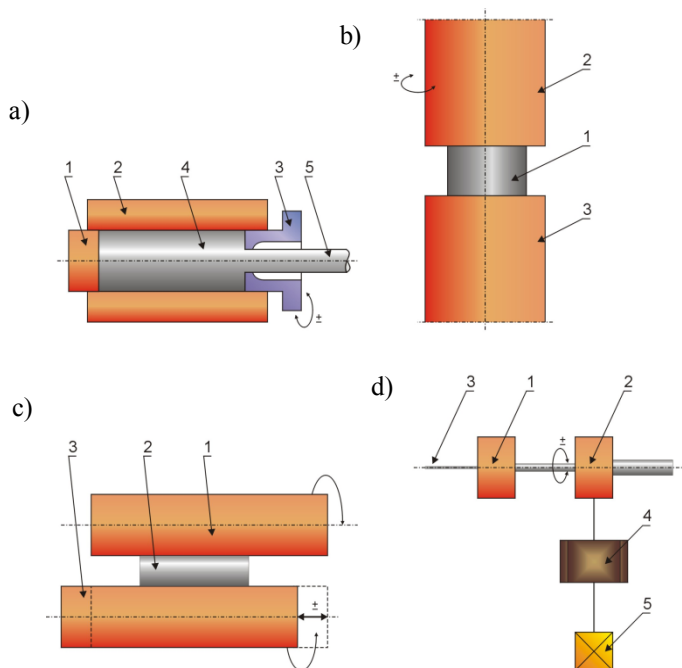
- metodę hydrostatycznego wyciskania – HE (ang. *Hydrostatic extrusion*),
- metodę KOBO.

Metody intensywnego odkształcenia plastycznego, z wyjątkiem ARB, HE oraz wyciskania w technologii KOBO, nie zostały dotąd zastosowane na skalę przemysłową ze względu na niedogodności związane z ograniczeniem wymiarów uzyskiwanych z nich produktów. Prowadzone są dalsze poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych na narzędzia kształtujące ze względu na stosowanie dużych nacisków i związaną z tym potrzebą odprowadzania znacznych ilości ciepła generowanego w trakcie odkształcania. Wykorzystanie metod ARB, HE, a w szczególności metody KOBO posiadającej, obok walorów testu doświadczalnego, cechy procesu przemysłowego, umożliwi wytwarzanie materiałów o strukturze nanokrystalicznej, jednakże wymagają one dalszych badań oraz optymalizacji warunków technologicznych [3, 7].

Jednym z najbardziej nowatorskich sposobów prowadzenia obróbki plastycznej jest technologia KOBO, której idea opiera się na cyklicznej zmianie drogi odkształcenia metalu w wyniku wprowadzenia dodatkowego, rewersyjnego, cyklicznie zmiennego oddziaływania narzędzi kształtujących na metal (rys. 2) i umożliwia zarówno kucie [44, 45], walcowanie [46, 47], ciągnięcie [7, 48], jak również wyciskanie [49, 50].

Doniesienia literaturowe [7, 49-56] wskazują, że najwięcej danych doświadczalnych na temat przebiegu odkształcenia metodą KOBO, jak i własności wytrzymałościowych otrzymanych produktów, dotyczy wyciskania. Na ich podstawie można stwierdzić, że zachowanie metali poddanych wyciskaniu metodą KOBO w niewielkim stopniu zależy od temperatury, natomiast dominującym czynnikiem jest kinetyka prowadzonego procesu zapewniona wysoką częstością zmian drogi odkształcenia w wyniku cyklicznego skręcania metalu, dużą prędkością odkształcenia oraz znacznym stopniem przerobu. Związane jest to z aktywacją niskoenergetycznego mechanizmu odkształcenia bazującego na lepko-plastycznym płynięciu uwarunkowanym bardzo intensywnym tworzeniem i migracją defektów punktowych. Odkształcenie plastyczne metalu w metodzie KOBO przedstawia się, jako proces płynięcia lepkiej cieczy, pomimo, że pozostaje on niezmiennie w stanie stałym.

Prowadząc obróbkę plastyczną metodą KOBO można znacząco zredukować pracę odkształcenia, obniżyć temperaturę procesu oraz wyeliminować wyżarzanie międzyoperacyjne w porównaniu z konwencjonalnymi sposobami wyciskania. Metoda KOBO pozwala na wydajne



Rysunek 2. Schematyczne przykłady rozwiązań technicznych procesów odkształcenia materiałów metalicznych metodą KOBÓ [56]: a) wyciskanie (1 – stempel, 2 – pojemnik, 3 – obustronnie obracana matryca, 4 – wsad metaliczny, 5 – produkt); b) kucie (1 – wsad metaliczny, 2 – obustronnie obracany stempel, 3 – matryca/kowadło); c) walcowanie (1 – wsad metaliczny, 2 – walec górny, 3 – cyklicznie, poosiowo przesuwany walec dolny); d) ciągnięcie (1 – nieruchome ciągnadło, 2 – obustronnie obracane ciągnadło, 3 – wsad metaliczny, 4 – przekładnie, 5 – silnik)

i energooszczędne, a przy tym ekologiczne otrzymywanie produktów funkcjonalnych, stwarza możliwość plastycznego kształtowania „na zimno”, czyli bez wstępnego nagrzewania materiału stopów trudnoodkształcalnych i stabilnego przetworzenia ich struktury wewnętrznej oraz wytworzenia z nich produktów o złożonej geometrii. Szczególnie jej zalety przejawiają się w możliwości rozdrabniania struktury do wymiarów nanometrycznych, a przez to generowania nadzwyczaj korzystnych własności mechanicznych [7, 57].

Dotychczasowe doświadczenia uzyskane w badaniach laboratoryjnych, jak również w warunkach przemysłowych (w Walcowni Metali w Czechowicach, Hucie Będzin, Zakładzie Przetwórstwa Metali IMN w Gliwicach) wskazują, że pomimo możliwości znacznego obniżenia temperatury procesu, siły wyciskania i wynikającej z tego redukcji pracy odkształcenia, zwiększenie żywotności narzędzi, w szczególności powierzchni roboczych matryc w wyniku

wyciskania metodą KOBO nadal pozostaje kwestią otwartą, biorąc pod uwagę dodatkowe parametry ruchu matrycy – kąt obustronnego obrotu i częstotliwość tych zmian oraz tendencję do przywierania wyciskanego materiału do narzędzia.

Jakość produktów wyciskanych opisywana jest przez zespół cech, takich jak: gładkość powierzchni, tolerancja wymiarowa, wielkość ziarna, własności mechaniczne, z których większość uzależniona jest przede wszystkim od prawidłowości przebiegu procesu, odpowiedniego doboru i ukształtowania matrycy oraz jej własności użytkowych, które ulegają zmianom w miarę upływu czasu eksploatacji [39].

Wyciskanie charakteryzuje się koniecznością stosowania pras o bardzo dużych naciskach, co wymusza stosowanie narzędzi, przede wszystkim matryc o skomplikowanych kształtach i bardzo wysokim koszcie wytwarzania, pracujących w skrajnie niekorzystnych warunkach obciążeń mechanicznych i cieplnych.

Z pozycji użytkownika narzędzi najistotniejsza jest, obok trwałości, odporność narzędzia na uszkodzenia. W przypadku wyciskania zużycie trybologiczne powierzchni roboczych matryc zależy od wielu czynników, takich jak temperatura, szybkość wyciskania, kształt i geometria matrycy, długość części kalibrującej, stan powierzchni, cykliczne zmiany temperatury związane z kontaktem z gorącym metalem, jak również własności wyciskanego metalu oraz stali, z której wykonana jest matryca. Zużycie trybologiczne występujące podczas wyciskania, szczególnie w podwyższonej temperaturze jest bardzo złożone i zazwyczaj w jego skład wchodzi procesy tarcia, zużycia ściernego, zużycia ścierno-adhezyjnego, zużycia adhezyjnego, zużycia cieplnego i odkształcenia. W większości przypadków nie występują pojedynczo, tworząc natomiast hybrydowe mechanizmy oddziałują grupowo na powierzchnię narzędzi [58, 59].

Podczas wyciskania zachodzące przesuwanie się uplastycznionego metalu o relatywnie małej twardości po powierzchni roboczej matrycy o twardości znacznie większej powoduje wystąpienie zjawiska tarcia w strefie kontaktu odkształcanego materiału z powierzchnią narzędzia, które wywiera istotny wpływ zarówno na siłę wyciskania, jak również na sposób płynięcia wyciskanego metalu. Zazwyczaj tarcie występujące podczas wyciskania, ze względu na stosowanie smarów, ma charakter półpłynny lub półsuchy. W przypadku braku stosowania smarów występuje tarcie suche, którego energia zużyta na pracę odkształcenia plastycznego, jak również pokonywanie sił adhezji i kohezji prawie w całości zostaje zamieniona na ciepło powodując podwyższenie temperatury. Jedynie niewielka jego część może zostać zmagazy-

nowana w warstwie wierzchniej narzędzia w wyniku odkształcenia. Tarcie występujące między powierzchnią roboczą matrycy a wyciskany materiałem ma znaczący wpływ na jej trwałość, przebieg odkształcenia plastycznego, niejednorodność odkształcenia, co w konsekwencji decyduje o własnościach użytkowych finalnego produktu. Bardzo istotną rolę odgrywają siły tarcia pojawiające się w oczku kalibrującym matrycy, gdzie występują największe zakłócenia w płynięciu wyciskanego materiału spowodowane gwałtowną zmianą przekroju i wynikającym z tego wzrostem prędkości płynięcia metalu. Zbyt duże opory tarcia w oczku matrycy, powodujące nierównomierność płynięcia materiału są zjawiskiem niepożądanym [60-62].

Skutki działania sił tarcia są niekorzystne, dlatego podstawowym zagadnieniem w procesie wyciskania jest zmniejszenie występujących oporów tarcia przez stosowanie odpowiednio dobranych smarów i metod smarowania [63]. Tarcie można zmniejszyć, dobierając materiały o małej adhezji, np. ceramikę lub poprzez wytworzenie powłok typu DLC, MoS₂, WS₂ na powierzchni narzędzi. Powłoki te, mające bardzo niskie współczynniki tarcia, określane są jako powłoki samosmarujące lub niskotarciowe [6, 64].

Silna tendencja niektórych metali i ich stopów, szczególnie aluminium, miedzi, tytanu i platyny do przywierania do stalowych powierzchni matryc powoduje intensywne zmniejszenie trwałości eksploatacyjnej w wyniku zużycia adhezyjnego lub ścierno-adhezyjnego. W wyniku dużych nacisków lokalne szczepienia i zrosty między stykającymi się powierzchniami prowadzą do przemieszczania się cząstek materiału wewnątrz jego objętości, a nie bezpośrednio na powierzchni podczas ich względnego ruchu. W wyniku rozrywania szczepień możliwy jest ubytek materiału w części roboczej matrycy. W podwyższonej temperaturze zwiększa się skłonność do szczepiania się materiałów, a w przypadku szczególnie ciężkich warunków pracy obserwuje się zatarcia powierzchni, wywołane gwałtownym wzrostem oporów tarcia ślizgowego, co może być efektem zachwiania równowagi termicznej i mechanicznej układu [58, 61, 65, 66].

Podczas kontaktu z nagrzanym do wysokiej temperatury wyciskany metal, oprócz intensywnego ścierania, powierzchnie matrycy podlegają również korozyjnemu oddziaływaniu obrabianego materiału oraz cyklicznym zmianom temperatury w związku z koniecznością wymiany wlewka w recypencie [67].

W trakcie wyciskania większość metali ma nieograniczoną zdolność do odkształceń plastycznych dzięki trójosiowemu ścisaniu z dużymi wartościami naprężeń. Jakikolwiek ograniczenia aplikacji wyciskania wprowadza się z uwagi na trwałość i wytrzymałość narzędzi [68]. Elementami najbardziej narażonymi na zużycie i które jednocześnie mają największy

wpływ na dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni produktu są matryce. Do wytwarzania matryc pracujących w tak trudnych warunkach należy stosować materiały zapewniające odpowiednią wytrzymałość w temperaturze pracy, odporność na korozyjne oddziaływanie wyciskanego metalu, ścieranie w podwyższonej temperaturze oraz zmęczenie cieplne. Główną grupą materiałów spełniających te wymagania są wysokostopowe stale narzędziowe do pracy na gorąco [69, 70].

Skład chemiczny i struktura współczesnych stali narzędziowych do pracy na gorąco jest efektem prowadzonych przez dziesięciolecia badań eksperymentalnych. Dążąc do zwiększenia trwałości matryc modyfikowano zawartość pierwiastków stopowych w stalach [71] lub ograniczano wpływ czynników powodujących niszczenie narzędzi poprzez stosowanie odpowiednich smarów matrycowych, skutecznie zmniejszających tarcie, jak również izolujących matrycę od bezpośredniego styku pomiędzy wyciskany metal a materiałem narzędzia [72].

Przełomowe dla poprawy własności eksploatacyjnych matryc było wprowadzenie metod modyfikacji ich powierzchni, m.in. poprzez obróbkę cieplno-chemiczną [73, 74], niskotemperaturowe fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) warstw powierzchniowych [75-77], czy z wykorzystaniem technologii hybrydowych, będących połączeniem wyżej wymienionych metod [78-80]. Podkreślając niepodważalną wartość tego podejścia, należy jednak wskazać na pewne jej ograniczenia, związane z faktem, że wytwarzane na matrycach warstwy azotowane nie zapewniają odpowiednio długiej trwałości eksploatacyjnej, jak również powtarzalności wyników. Generalnym problemem staje się również brak możliwości wyeliminowania przywierania wyciskanego materiału do matrycy [81-84].

2.2. Znaczenie nanokrystalicznych powłok przeciwzużyciowych

Problematyka badawcza dotycząca wytwarzania powłok przeciwzużyciowych stanowi jeden z ważniejszych kierunków rozwoju inżynierii powierzchni, gwarantujących otrzymanie powłok o wysokich własnościach użytkowych w zakresie własności mechanicznych oraz odporności na zużycie trybologiczne.

Nadanie nowych cech eksploatacyjnych powszechnie stosowanym narzędziom bardzo często uzyskuje się poprzez nanoszenie powłok prostych jednowarstwowych, jednoskładnikowych metodami PVD, ze względu na niski zakres temperatury procesu. Jednakże w wielu przypadkach ich własności mechaniczne i eksploatacyjne są niewystarczające.

Znana zależność pomiędzy twardością a odpornością na zużycie ściernie spowodowała wolę opracowania coraz twardszych materiałów powłokowych. Postęp w zakresie wytwarzania warstw powierzchniowych techniką fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej pozwala otrzymywać powłoki wielowarstwowe [85-87], funkcjonalne powłoki gradientowe [88, 89] oraz powłoki adaptacyjne [90], które wykazują wysokie własności mechaniczne i użytkowe oraz są zdolne do zachowania niskiego współczynnika tarcia w wielu środowiskach pracy, przy zachowaniu dużej twardości i zwiększonej odporności.

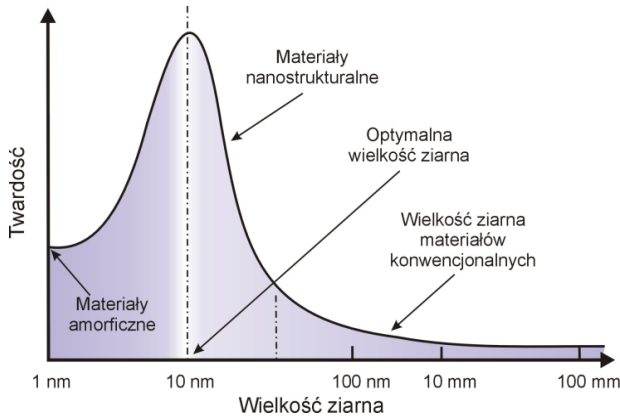
Dokonując wyboru materiału na powłoki napotyka się na barierę wynikającą z tego, że wiele własności oczekiwanych od „idealnej” powłoki, tzn. duża twardość i odporność na zużycie w połączeniu z wysoką wytrzymałością i dobrą ciągliwością, niemożliwe jest jednocześnie do uzyskania. Wymagania dotyczące własności różnych obszarów warstwy często kolidują ze sobą, co dodatkowo utrudnia dobór materiałów warstw [91-94].

Rozwiązanie tego problemu upatruje się w zastosowaniu powłok nanokrystalicznych, a w szczególności nanokompozytowych o jak najbardziej pożądanymi własnościami aplikacyjnych [4, 95-101]. Podobnie jak w przypadku konwencjonalnych materiałów polikrystalicznych, zgodnie z zależnością Halla-Petcha wraz ze zmniejszeniem wielkości ziaren wzrasta twardość powłok. Efekt ten jest szczególnie znaczący w przypadku zmniejszenia wielkości ziaren do wartości krytycznej około 10 nm (rys. 3) [102].

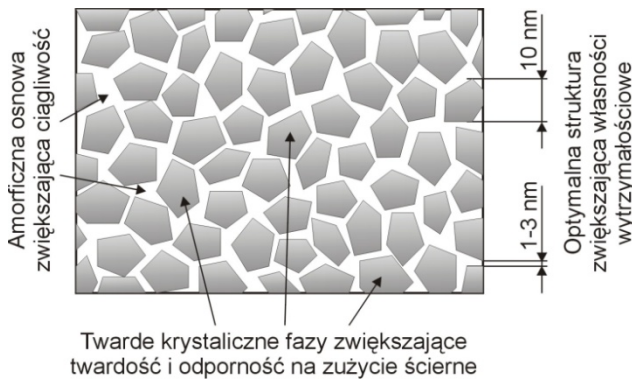
Powłoki o takiej strukturze wykazują bardzo wysoką twardość (40-80 GPa) [103-105], stabilność w wysokiej temperaturze [17, 106], odporność korozyjną [107, 108], jak również wysoką odporność na zużycie ściernie i erozyjne [109, 110]. W przypadku struktury o wielkości ziaren mniejszej od wartości krytycznej następuje spadek twardości materiału, ze względu na występowanie nowego mechanizmu odkształceń, tj. odwrotnej zależności Halla-Petcha (rys. 3).

Główną ideą uzyskania wysokiej twardości powłok o strukturze nanokompozytywnej jest ograniczenie możliwości powstawania i ruchu dyslokacji w obrębie ziarna oraz pojawienie się nowego mechanizmu odkształcenia związanego z ruchem granic ziaren. Struktura tych powłok składa się z krystalicznych faz o wysokiej wytrzymałości i wielkości ~10 nm, osadzonych w miękkiej amorficznej osnowie zapewniającej dużą ciągliwość, w której są odseparowane od siebie na odległość 1-3 nm (rys. 4).

Wg modelu zaproponowanego przez Vepreka [111-113] duża twardość powłok nanokompozytowych wynika z faktu, że ruch dyslokacji jest znoszony na małych ziarnach i przestrzeniach pomiędzy nimi, co powoduje powstawanie odkształceń. W przypadku, gdy wielkość ziaren jest



Rysunek 3. Wykres twardość materiałów w funkcji wielkości ziarna [102]



Rysunek 4. Schemat ideowy powłoki nanokompozytowej

zredukowana do wielkości nanometrów, aktywność dyslokacji jako źródła ciągliwości materiału jest wyeliminowana. Ten typ powłok charakteryzuje również duża ilość granic ziaren z krystaliczną/amorficzną powierzchnią rozdziału faz ograniczającą powstawanie i rozwój pęknięć. Mechanizm ten wyjaśnia odporność na kruche pęknięcie powłok [114]. Z kolei ich dobra ciągliwość wynika z możliwości dyfuzji i poślizgu po granicach ziaren [115-116].

W literaturze przedstawiono trzy koncepcje otrzymywania twardych, wytrzymałych, ciągliwych, odpornych na działanie obciążeń dynamicznych i o dobrej przyczepności do podłoża powłok nanokompozytowych poprzez:

- zastosowanie gradientowej warstwy przejściowej pomiędzy materiałem podłoża a krystaliczną/amorficzną warstwą właściwą zwiększającą przyczepność i ograniczającą naprężenia (kombinacja gradientowych powłok funkcjonalnych i nanokompozytowych) [117],

- wytworzenie struktury składającej się z twardych, krystalicznych faz o wielkości 3-10 nm w amorficznej osnowie ograniczających aktywność dyslokacji, zatrzymujących lub zmieniających kierunek rozprzestrzeniania się pęknięć i zachowujących wysoką twardość [118],
- wytworzenie struktury z dużą ilością granic ziaren zapewnia ciągliwość poprzez poślizg po granicach ziaren oraz poprzez nanopęknięcia wzdłuż granicy rozdziału faz krystaliczne ziarno/amorficzna osnowa [119].

Niejednokrotnie w celu podwyższenia twardości powłok nanokrystalicznych stosuje się ich wyżarzanie w odpowiedniej temperaturze, zazwyczaj w atmosferze azotu. W wyniku tego zabiegu obróbki cieplnej następuje rekrytalizacja i poprawa własności mechanicznych [120].

Istnieje wiele systemów nanokrystalicznych ziaren (nc-) azotków metali przejściowych (TiN, TiAlN, CrN, BN, VN, ZrN, W₂N, ect.), węglików (TiC, VC, WC, etc.), borków (TiB₂, TiB, CrB₂, etc.), tlenków (Al₂O₃, TiO₂, B₂O₃, SiO₂, etc.) lub siarczków (TiSi₂, CrSi₂, ZrSi₂, etc.) rozmieszczonych w amorficznej osnowie (a-) (Si₃N₄, BN, C), takich jak: nc-TiN/a-Si₃N₄, nc-TiN/a-Si₃N₄/a-&nc-TiSi₂, nc-CrN/a-Si₃N₄, nc-W₂N/a-Si₃N₄, nc-TiAlN/a-Si₃N₄, nc-TiN/a-BN, nc-TiC/a-C, nc-WC/a-C [102, 121, 122].

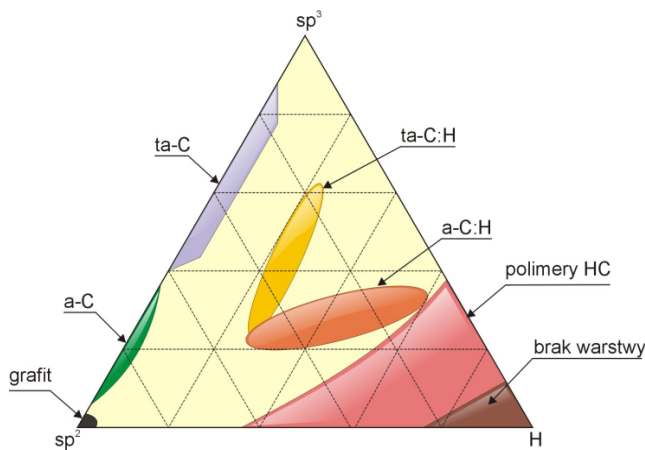
Bardzo istotną rolę w redukcji oporów tarcia, szczególnie w warunkach tarcia technicznie suchego wykazują niskotarciowe warstwy diamentopodobne typu DLC (ang. *Diamond-Like Carbon*) lub dwusiarczku molibdenu MoS₂ [123-125].

Szczególnie korzystne własności trybologiczne wykazują warstwy DLC. Generalnie terminem tym określane są w literaturze powłoki otrzymywane różnymi metodami, jak również o zróżnicowanym składzie chemicznym i fazowym, które stanowią mieszaninę amorficznego lub drobnokrystalicznego węgla o hybrydyzacji sp¹ (liniowa), sp² (trygonalna) typowej dla grafitu i sp³ (tetragonalna) typowej dla diamentu [126]. Atomy węgla o hybrydyzacji sp¹ występują tylko w niewielkich ilościach, natomiast stosunek udziału faz sp³/sp² determinuje własności i jest jednym z kryteriów klasyfikacji powłok węglowych. Niski współczynnik tarcia oraz dobre przewodnictwo elektryczne zapewnia powłokom faza sp², natomiast udział fazy sp³ decyduje o wysokiej twardości, odporności na zużycie trybologiczne i obojętności chemicznej [58].

Najogólniejszy podział dotyczy warstw w których formowaniu biorą udział atomy wodoru a-C:H (amorficzny uwodorniony węgiel), ta-C:H (tetraedryczny uwodorniony węgiel) oraz warstw wolnych od wodoru ta-C (tetraedryczny węgiel), a-C (amorficzny węgiel). O własnościach warstw DLC decyduje udział poszczególnych faz charakteryzujących się różnymi typami wiązań między atomami o różnej hybrydyzacji oraz stężenia wodoru (rys. 5). Modyfikowanie

diamentopodobnych warstw węglowych atomami pierwiastków niemetalicznych lub metalicznych a-C:H:X, ta-C:X (gdzie X – Si, N, O, Ti, W, Cr) wpływa na zwiększenie ich własności mechanicznych, głównie twardości [127, 128].

Korzystne własności trybologiczne skojarzeń tarcowych z udziałem warstw diamentopodobnych DLC, szczególnie w przypadku a-C oraz a-C:H związane są głównie ze zjawiskami poślizgu zachodzącymi w warstwie przejściowej, spełniającej rolę smaru stałego, powstającej w strefie kontaktu tarcowego jako konsekwencja procesów grafytyzacji i utleniania warstwy DLC [129, 130].



Rysunek 5. Potrójny układ równowagi fazowej klasyfikujący warstwy węglowe w zależności od stężenia wodoru i udziału wiązań typu [123]

Doskonale, a dzięki różnorodności technik wytwarzania, zróżnicowane własności warstw DLC, spowodowały intensywny rozwój badań nad ich przemysłowymi zastosowaniami.

Powszechność wykorzystywania produktów pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych sprawia, że koniecznym staje się nasilenie prac badawczych dotyczących doboru właściwego materiału, technologii wytwarzania oraz nanoszenia na nich powłok odpornych na zużycie. Koncepcja wytworzenia produktów o optymalnych własnościach zarówno w strefie rdzenia jak i warstwy wierzchniej jest możliwa dzięki wykorzystaniu potencjału, jakie dają nowoczesne technologie wytwarzania, np. metalurgia proszków oraz nowoczesne technologie hybrydowe nanoszenia powłok, w szczególności metody fizycznego i chemicznego osadzania z fazy gazowej nanokrystalicznych powłok oraz warstw niskotarciowych.