

Zastosowanie koncepcji cech rozpoznawczych procesu do prognozowania właściwości eksploatacyjnych części maszyn

Application of process signature concept to prediction of the functional properties of machine parts

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.3.25>

Omówiono problematykę związków stanu fizycznego procesu obróbki z właściwościami użytkowymi części maszyn (kształtowanymi w różnych procesach obróbki ubytkowej), wyznaczonych na podstawie funkcjonalnych charakterystyk, tzw. sygnatur procesu. Określono dominujące zjawiska i oddziaływania energetyczne w procesie skrawania w odniesieniu do funkcjonalności technologicznej warstwy wierzchniej. Podano praktyczne przykłady zastosowania koncepcji sygnatur procesu do wytwarzania warstwy wierzchniej o określonych właściwościach eksploatacyjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka skrawaniem, sygnatura procesu, warstwa wierzchnia, właściwości użytkowe

The purpose of this survey is to explain and determine the relationships between physical state of the machining process, i.e. the decisive physical phenomena occurring during the process and the functional properties of the machined parts using the concept of process signatures. Dominant phenomena and energy transformation in the machining process are quantified in terms of the functionality of the technological subsurface layer. Some practical examples of the application of process signature to the producing of subsurface layer with demanded functional properties are presented and discussed.
KEYWORDS: machining processes, process signature, surface layer, functional properties

W poprzednich publikacjach autora w *Mechaniku* [1,2] wielokrotnie omawiano praktyczne możliwości poprawy jakości technologicznej i użytkowej funkcjonalnie ważnych części przez poddanie ich wykańczającym operacjom obróbki skrawaniem i hybrydowej. Rozważania oparto na zmierzonych parametrach chropowatości powierzchni 2D i 3D, które mają istotny wpływ na właściwości funkcjonalne. Pominięto w nich ogólnie rolę technologicznej warstwy wierzchniej (TWW), na którą składa się nie tylko rzeczywista powierzchnia, lecz także warstwa podpowierzchniowa o własnościach fizycznych (mechanicznych) i chemicznych zmienionych wskutek różnych oddziaływań energetycznych [3,4]. Wiedza inżynierska w tym obszarze nadal jest niewystarczająca, mimo że techniki pomiarów oraz symulacji powierzchni, naprężeń, twardości i mikrostruktury wciąż są doskonałe. W projektowaniu inżynierskim ważne są nie tylko tolerancje wymiarów i dokładność kształtu, lecz także powiązania

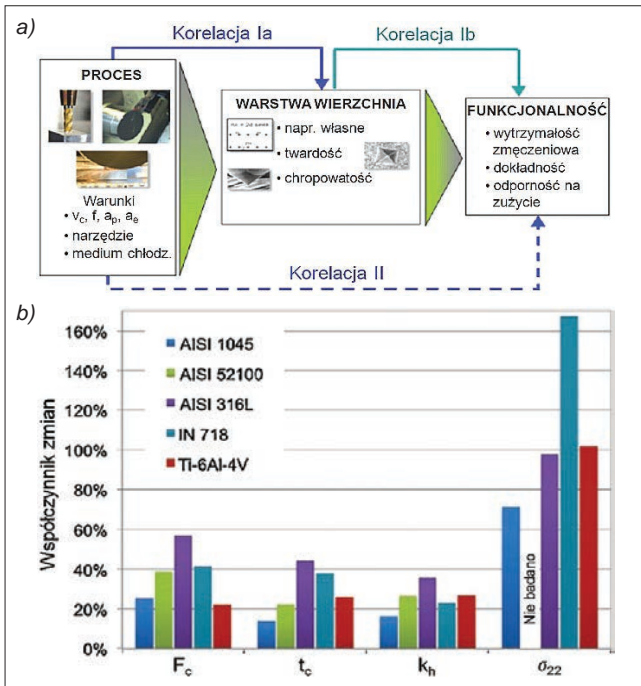
funkcjonalności TWW z jej stanem geometrycznym oraz fizycznym. W praktyce inżynierskiej związku stanu TWW dotyczą wielu ważnych właściwości funkcjonalnych, takich jak: wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie i korozję oraz naciski kontaktowe (wytrzymałość stykowa) [1, 3].

Należy wspomnieć, że termin warstwa wierzchnia wprowadził do polskiej literatury naukowej i technicznej J. Kaczmarek [4], bazując na wcześniejszych pracach CIRP z 1964 r. [5].

Obecny stan badań procesów wytwórczych/skrawania jest na tyle rozwinięty, że można wstępnie przewidzieć, jak się zachowa warstwa wierzchnia części we współpracy i jak spełni założone funkcje w eksploatacji [6,7]. Naczelną zasadą jest integracja cech geometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej z zachowaniem się części w czasie eksploatacji, co zgodnie z polską terminologią techniczną określa się mianem jakości technologicznej i eksploatacyjnej [8]. Problematyka wytwarzania i użytkowania warstw powierzchniowych została dość szczegółowo opisana przez T. Burakowskiego w monografii [9] poświęconej aerologii, czyli działowi nauki i techniki równoważnemu inżynierii powierzchni.

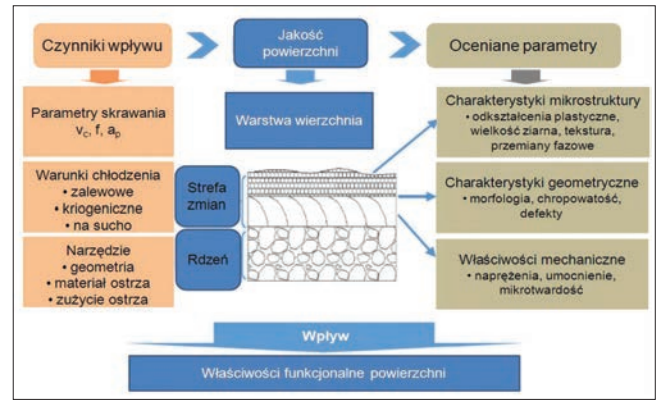
Trudności, jakie inżynieria wytwórcza napotyka przy próbach powiązania jakości technologicznej i eksploatacyjnej, są jeszcze zbyt duże, aby móc prognozować poszczególne właściwości eksploatacyjne na podstawie zmierzonych parametrów chropowatości powierzchni, umocnienia warstwy podpowierzchniowej, wprowadzonych naprężeń własnych i wywołanych zmian mikrostruktury. To stanowisko potwierdzają wyniki badań porównawczych (typu Round Robin), przeprowadzonych w ramach grupy roboczej CIRP „Surface Integrity and Functional Performance of Components” przez dziewięć ośrodków w świecie dla trzech rodzajów korelacji przedstawionych na rys. 1a. Uzyskano w nich znaczne rozrzuty wyników pomiarów parametru R_a chropowatości powierzchni, twardości i naprężeń własnych (nawet do 300% dla stopu tytanu Ti6Al4V po kalibracji modeli MES) dla różnych materiałów konstrukcyjnych i sposobów obróbki (rys. 1b). Brak jest również zadowalającej zgodności wyników modelowania analitycznego i symulacji numerycznej metodą MES. Zwykle wyniki pomiarów i analiz metalograficznych są weryfikowane w próbach przeprowadzanych na specjalistycznych urządzeniach, np. maszynach zmęczeniowych, tribometrach czy urządzeniach (w komorach) do badań odporności korozyjnej według procedur określonych w odpowiednich normach.

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Opolskiej



Rys. 1. Możliwe korelacje oceniane w badaniach obiegowych (Round Robin studies) (a) i rozrzut wyników pomiarów dla różnych charakterystyk procesu (b) [6]. Oznaczenia: F_c – siła skrawania, t_c – temperatura skrawania, k_h – współczynnik śpęczenia wióra, σ_{22} – naprężenia własne osiowe

W klasycznym podejściu do badań TWW (rys. 2) wykorzystuje się związki między stanem technologicznej warstwy wierzchniej i czynnikami wejściowymi, które definiują warunki procesu, oraz jej wpływem na zachowanie się części w eksploatacji (właściwościami eksploatacyjnymi). Te związki zaznaczono na rys. 1 jako korelacje typu Ia i Ib, rozważane w badaniach przeprowadzonych w ramach inicjatywy grupy roboczej CIRP [6]. W ogólnym ujęciu mogą one być rozpatrywane jako struktury systemów w strukturalnym modelu obróbki skrawaniem, tworzone w określonej hierarchii celów [3]. Zwłaszcza wydzielenie w modelu strukturalnym czynników funkcjonalnych prowadzi do ilościowego opisu fizycznego mechanizmu

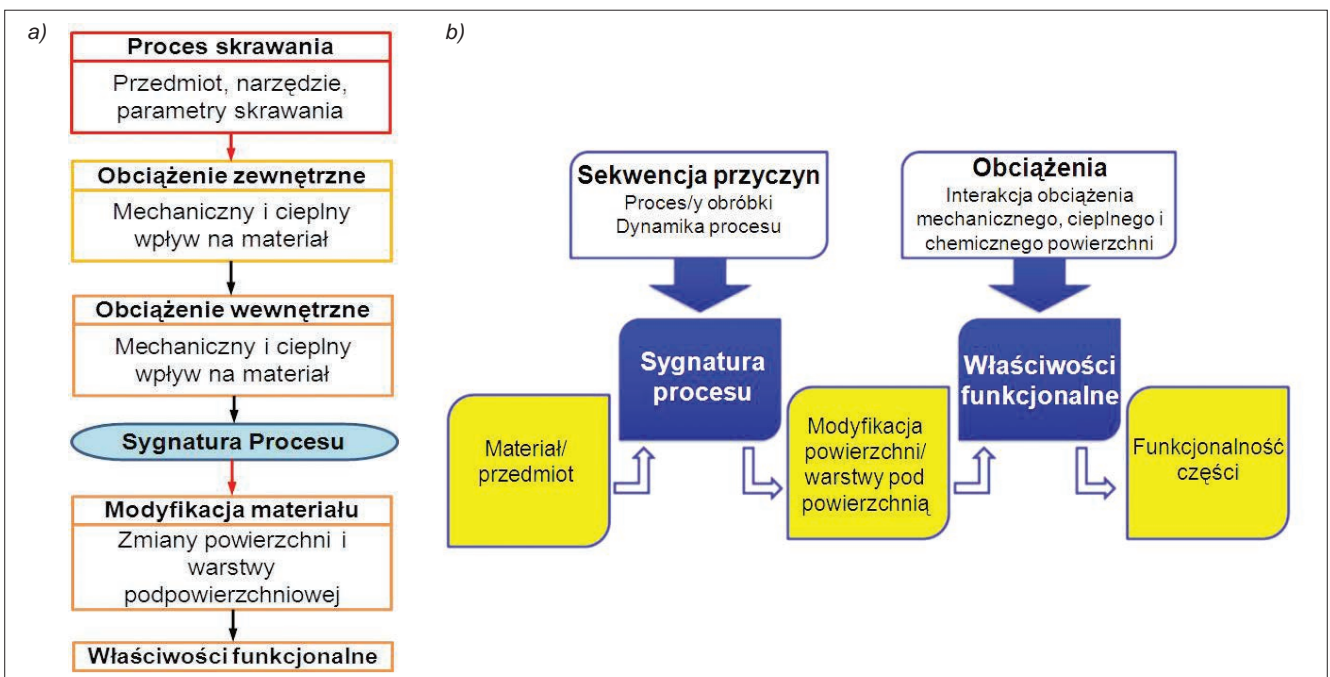


Rys. 2. Zależności między jakością powierzchni, istotnymi czynnikami procesowymi i charakterystykami TWW [10]

procesu skrawania i jego wpływu na stan warstwy wierzchniej oraz właściwości eksploatacyjne/funkcjonalne.

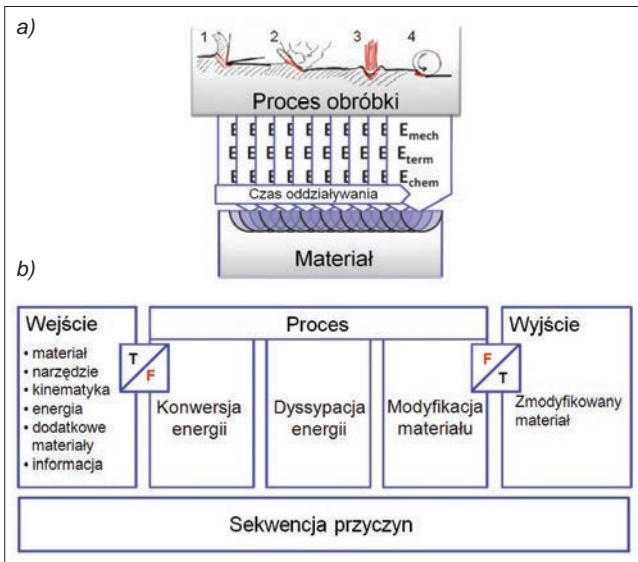
Zbliżone do strukturalnego modelu podejście, nazwane w oryginale *process signature* – PS (sygnatura procesu), zaproponowano w pracach [11–17]. Sygnaturę procesu należy interpretować jako zbiór funkcjonalnych charakterystyk występujących w modelu fizycznym procesu [3]. Jego istotą jest identyfikacja podstawowych mechanizmów procesu (mechanicznych, cieplnych i chemicznych oraz ich kombinacji), które skutkują nieodwracalnymi zmianami właściwości obrabianego materiału w czasie trwania procesu. Zdaniem pomysłodawców takie podejście stanie się załącznikiem projektowania procesów wytwórczych opartych na wiedzy (typu *knowledge-based*) dla konkretnych założeń odnośnie do funkcjonalności części maszyn. Zgodnie z rys. 3a proces jest zdefiniowany przez takie czynniki wejściowe, jak charakterystyki obrabianego materiału i zastosowanego narzędzia oraz warunków obróbki. Zależnie od rodzaju oddziaływań między elementami systemu obróbkowego wydziela się:

- zewnętrzne obciążenia mechaniczne i cieplne wywierane na materiał,
- wewnętrzne obciążenia mechaniczne i cieplne (np. pola odkształceń i temperatury), powstające w materiale w trakcie procesu.

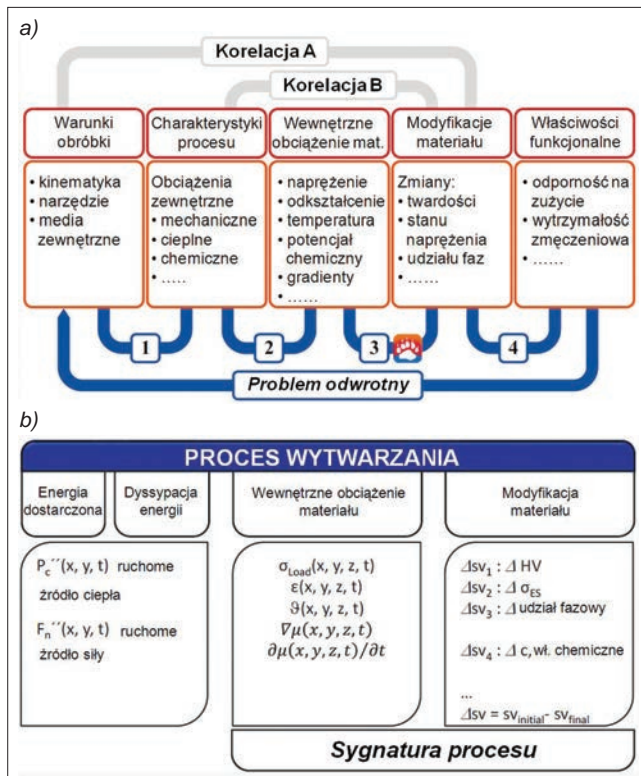


Rys. 3. Schemat podejścia typu sygnatura procesu w prognozowaniu właściwości eksploatacyjnych części maszyn poddanych skrawaniu (a) oraz wzajemne powiązanie występujących oddziaływań (b) [11–13]

Obciążenia zewnętrzne i wewnętrzne są reprezentowane przez odpowiednie strumienie energii E_{mech} , E_{term} i E_{chem} (rys. 4a). W rezultacie wyjściowy stan materiału zmienia się (modyfikuje), a suma modyfikacji określa końcowy stan geometryczny i fizyczny warstwy wierzchniej, czyli integralność powierzchni (*surface integrity*) [3]. Po zdefiniowaniu funkcjonalnych oddziaływań procesu rozwiązuje się zadanie odwrotne [11, 12, 15], czyli dla zdefiniowanego zbioru wymaganych topografii powierzchni i właściwości warstwy podpowierzchniowej ustala się warunki procesu wytwarzania części o wymaganych właściwościach eksploatacyjnych (wymaganej funkcjonalności).



Rys. 4. Poglądowy schemat kontrolowania funkcjonalnych oddziaływań w różnych sposobach obróbki (przy różnych obciążeniach wewnętrznych): 1 – obróbka wiórowa; 2 – obróbka ścierna; 3 – obróbka skoncentrowanym strumieniem fotonów, jonów, atomów; 4 – nagniatanie (a) i zdefiniowanie struktury modelu fizycznego i sekwencji przyczynowej (b) [12]



Rys. 5. Sekwencje przyczyn występujące w procesach wytwórczych (a) i przykłady zdefiniowania sekwencji przyczyn oraz składowych sygnatury procesu (b) [13, 14]

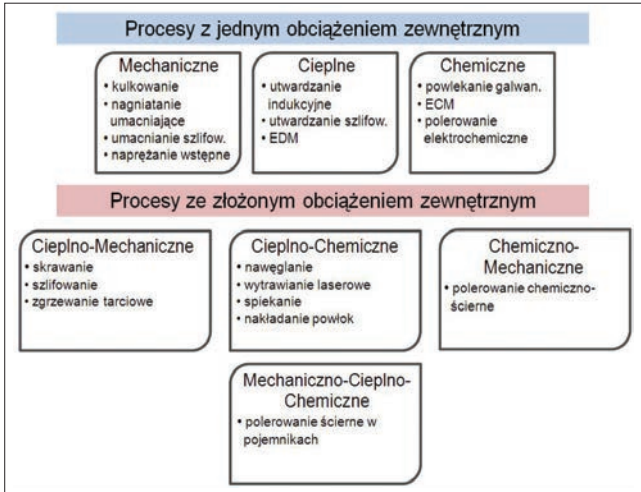
Wydzielone sygnatury procesu mają z założenia charakteryzować w sposób zunifikowany osobliwe cechy różnych procesów wytwórczych i ich interakcje w obrabianym materiale. Jest to możliwe, gdy stosowany zazwyczaj opis procesu za pomocą parametrów lub wskaźnika wydajności zostanie skutecznie zastąpiony przez fundamentalne zależności fizyczne i chemiczne, a te z kolei zostaną zamodelowane w różnej skali w celu uzyskania ogólnego opisu w formie sygnatury procesu. Z tego względu materiał jest integralną częścią nowego opisu procesu, co zaznaczono na rys. 4a. Należy dodać, że czas oddziaływania procesu (obciążenia) na materiał określa jednocześnie czas, w którym następuje konwersja energii i jej dyssypacja. Może to dotyczyć np. przepływu ciepła z uwzględnieniem gradientu objętości i czasu. Przy założeniu, że procesy wytwarzania są generalnie oparte na konwersji i dyssypacji energii, proces skrawania w ujęciu fizycznym jest realizowany – w mniejszym lub większym uproszczeniu – według schematu przedstawionego na rys. 4b. W rezultacie określa się sekwencję przyczyn powodujących kontrolowane modyfikacje właściwości materiału (zaznaczone także na rys. 3b). Przez analogię do przetworników A/D wprowadzono przetworniki technologiczno-fizyczne (T/F) i fizyczno-technologiczne (F/T).

W odniesieniu do praktyki przemysłowej ważne jest zbadanie wpływu warunków procesu (obecnie prowadzone są intensywne badania procesu szlifowania) na wypadkowe modyfikacje materiału, co reprezentuje korelacja A na rys. 5a. Może to być analiza wpływu materiału narzędzia na profil rozkładu naprężeń podczas frezowania na twardo kół zębatych [13]. Kolejnym krokiem w kierunku uogólnionego opisu modyfikacji stanu materiału jest korelacja B, która polega na zastąpieniu warunków procesu przez fizyczne charakterystyki procesu, np. składowe siły skrawania czy moc skrawania. Daje ona dobre wyniki, gdy wprowadzi się takie charakterystyki obciążenia wewnętrznego, jak naprężenia, odkształcenia, temperatura lub ich odpowiednie gradienty zmian. Prowadzi to do korelacji typu 2 i 3, które są brakującym ogniwem do rozwiązania odwrotnego, czyli związków właściwości funkcjonalnych z warunkami procesu obróbki. Na rys. 5b wyszczególniono niektóre składowe sygnatury procesu (PCS), takie jak odkształcenia (ϵ), gradienty pola temperatury – operator nabła ($\nabla\vartheta$), gęstość dyslokacji ($\Delta\rho$), właściwości chemiczne (Δfaz – zmiana udziału faz, c – udział fazowy, $\partial\mu/\partial t$ – zmiana potencjału chemicznego), które odpowiadają za zmianę stanu materiału [18, 19]. Warto zaznaczyć, że składowe sygnatury procesu należy określać na poziomie makro- i mikrostruktury, np. naprężenia własne I i II rodzaju, które jednak są ze sobą ściśle powiązane.

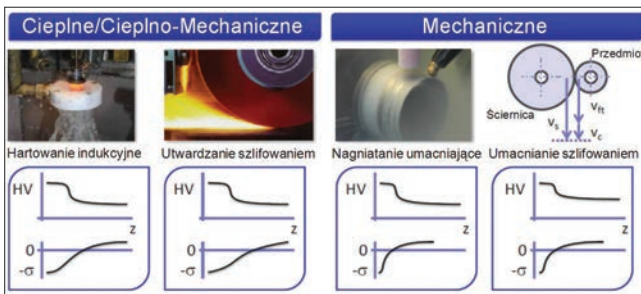
Przykłady zastosowania koncepcji sygnatury procesu w praktyce

Podstawową przesłanką, którą trzeba mieć na uwadze przy opracowywaniu i analizie koncepcji sygnatury procesu, jest to, że każdy proces wytwarzania jest charakteryzowany przez odpowiednią kombinację obciążeń materiału. To oznacza, że końcowy stan powierzchni i warstwy podpowierzchniowej zależy od indywidualnych obciążeń mechanicznych, cieplnych i chemicznych albo od ich kombinacji. Procesy, w których dominuje jeden główny wpływ, to: nagniatanie umacniające (*deep rolling*) – efekt mechaniczny, EDM – efekt termiczny i ECM – efekt chemiczny. Popularne procesy, np. szlifowanie

czy skrawanie, są przykładami łącznych oddziaływań mechanicznych i cieplnych. Na rys. 6 przedstawiono klasyfikację obciążeń wewnętrznych dla różnych procesów wytwórczych, uwzględniając dwa podane wcześniej kryteria. Z przeprowadzonych dotychczas badań [12, 13] wynika, że pewna grupa procesów wytwórczych (rys. 7) ma zbliżony potencjał, gdy chodzi o wytwarzanie wymaganych właściwości TWW.



Rys. 6. Specyfikacja obciążeń występujących w procesach wytwórczych [13]



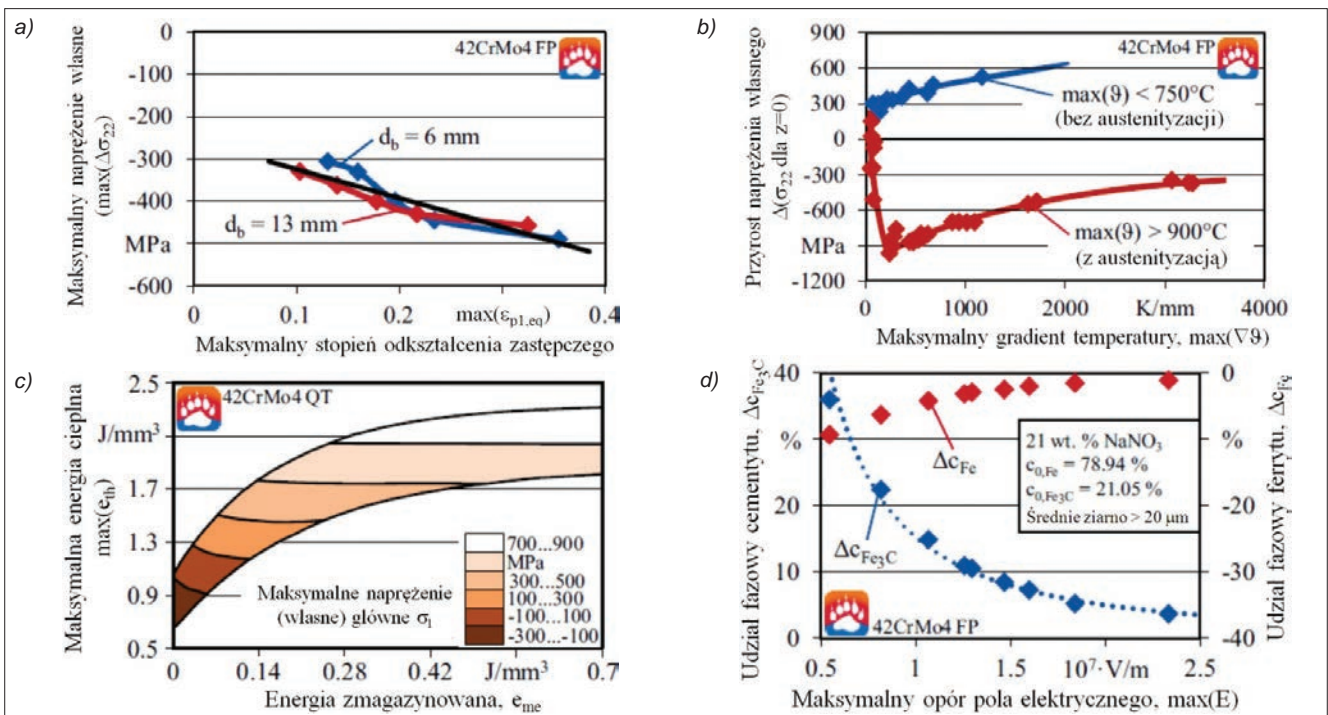
Rys. 7. Porównanie różnych procesów prowadzących do zbliżonych charakterystyk warstwy wierzchniej [12]

Bez względu na całkiem odmienne wpływy obciążeń wewnętrznych na materiał podczas procesu uzyskano zbliżone efekty modyfikacji stanu materiału wskutek zmian twardości i rozkładu naprężeń własnych w warstwie podpowierzchniowej.

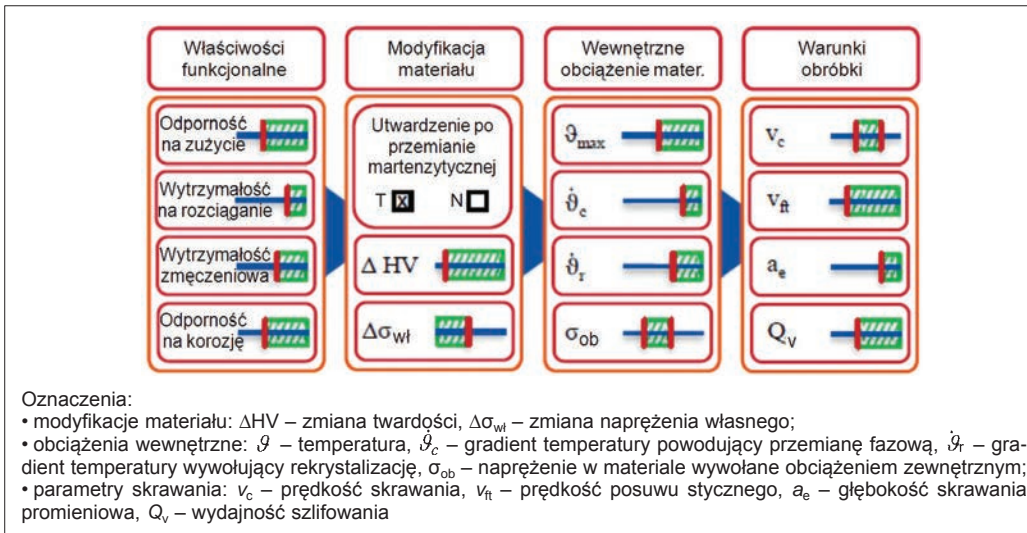
Na rys. 8a–c podano przykłady składowych sygnatury procesu (CPS) dla różnych typów obciążenia zewnętrznego. W przypadku nagniatania umacniającego (również umacniania szlifowaniem z rys. 7) z dominującym obciążeniem mechanicznym (rys. 8a) jest to maksymalna wartość naprężenia uplastyczniającego według hipotezy von Misesa ($\epsilon_{pl,eq}$). Ustalono, że wartość naprężenia uplastyczniającego praktycznie pozostaje niezmienna, gdy zastosuje się element nagniatający o różnej średnicy d_b [17]. W rezultacie maksymalną wartość wprowadzanego do WW naprężenia w kierunku posuwu σ_{22} (czyli miarę modyfikacji materiału) można w prosty sposób wyznaczyć na podstawie liniowej korelacji z maksymalnym naprężeniem (czyli wewnętrznym obciążeniem materiału).

Z kolei dla szlifowania z dominującym ciągłym obciążeniem cieplnym (rys. 8b) wewnętrznym obciążeniem cieplnym jest zdefiniowane przez maksimum gradientu temperatury ($\max(\nabla\vartheta)$), które jest ściśle powiązane z intensywnością przemiany austenitycznej i wytwarzaniem naprężeń własnych w WW. Jak można zauważyć, minimum wartości naprężenia odpowiada gradientowi temperatury ok. 250 K/mm [17].

Tworzenie białej warstwy w skrawaniu na twardo (rys. 8c) jest przykładem oddziaływania mechaniczno-cieplnego, w którym CPS reprezentuje zmagazynowana energia mechaniczna (e_{me}), przy czym jej maksymalna wartość wskazuje na wystąpienie efektu rekrytalizacji dynamicznej. W ten sposób zależności między energią zmagazynowaną (e_{me}) i maksymalną energią cieplną ($\max(e_{th})$), która jest proporcjonalna do maksymalnej temperatury w objętości materiału, wyznaczają pola dla różnych wartości naprężeń własnych. Należy dodać, że na rekrytalizację dynamiczną mają również wpływ wartości i prędkość odkształcenia [3], co powinno być uwzględnione w dalszej analizie.



Rys. 8. Przykłady CPS dla dominującego zewnętrznego obciążenia: a) mechanicznego – w nagniataniu umacniającym, b) ciągłego cieplnego – w szlifowaniu, c) mechaniczno-cieplnego – w toczeniu na twardo, d) ciepło-chemicznego – w ECM [15–17]



Rys. 9. Zastosowanie koncepcji PS do funkcjonalnie zorientowanego skrawania [13]

Przykład zdefiniowania CPS dla procesu o dominującym charakterze ciepno-chemicznym (ECM) zilustrowano na rys. 8d. W tym przypadku za obciążenie wewnętrzne przyjęto maksymalny opór pola elektrycznego, który decyduje o zmianach udziału faz cementytu i ferrytu w warstwie podpowierzchniowej. Powodem jest różna skłonność faz metalicznych do roztwarzania. Wzrost dokładności modelowania procesów o dominującym obciążeniu chemicznym i ciepno-chemicznym można osiągnąć przez uwzględnienie energii procesu, tj. potencjału chemicznego, który określa zmiany energii swobodnej Helmholtza lub Gibbsa względem stężenia molowego [18].

Na rys. 9 podsumowano dotychczasowe efekty badań nad zastosowaniem koncepcji CPS do dwóch procesów: kriogenicznego nagniatania i szlifowania z jednym dominującym wpływem na materiał. Na podstawie rozwiązania odwrotnego (rys. 5b) dokonano selekcji parametrów procesu obróbki w odniesieniu do żądanych właściwości eksploatacyjnych. Przez przesunięcie suwaka można regulować okna procesu (zakresowane obszary w kolorze zielonym) oraz ograniczenia minimum i maksimum wartości danego obciążenia (wyróżnione czerwoną pionową kreską).

Podsumowanie

W artykule omówiono stan wiedzy w zakresie prognozowania właściwości funkcjonalnych części maszyn – m.in. wytrzymałości na zmęczenie, odporności na zużycie ściernie, odporności na korozję – po różnych procesach obróbki, na podstawie wyznaczania ich związków funkcjonalnych z tzw. składowymi sygnatury procesu (CPS). Ta koncepcja polega na określeniu obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych oraz wynikowej modyfikacji właściwości materiału, która jednoznacznie określa funkcjonalne właściwości powierzchni części maszyn. Przeanalizowano możliwości prognozowania właściwości funkcjonalnych z jednym dominującym (mechanicznym, cieplnym lub chemicznym) oraz złożonym (ciepno-mechanicznym, ciepno-chemicznym, chemiczno-mechanicznym i mechaniczno-ciepno-chemicznym) obciążeniem wewnętrznym materiału. Podano przykłady zdefiniowania składowych PS dla szlifowania, obróbki na twardo, kriogenicznego nagniatania umacniającego i ECM.

Przed instytucjami badawczymi stoją poważne wyzwania związane z tym, że wyniki badań muszą umożliwiać wytwarzanie części o wymaganych właściwościach technologicznych i użytkowych. Jest to zdaniem autora sygnał do podjęcia przez zespoły badawcze w kraju tej tematyki.

Dotychczas podobne badania były prowadzone w Niemczech w ramach projektu badawczego DFG „Process Signatures” przez uniwersytety w Bremen i Aachen pod kierownictwem prof. E. Brinksmeiera – pomysłodawcy tej koncepcji w 2011 r. Badania te wpisują się w ogólną ideę strategii Produkcji 4.0.

LITERATURA

1. Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 587–593.
2. Grzesik W. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle”. *Mechanik*. 5–6 (2018): s. 338–342.
3. Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN, 2018.
4. Kaczmarek J. „Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej”. Warszawa: WNT, 1971.
5. Field M., Kahles J.F. „Review of surface integrity of machine components”. *Annals CIRP*. 20, 1 (1971): s. 107–108.
6. Jawahir I.S., Brinksmeier E., M'Saoubi R., Aspinwall D.K., Outeiro J.C., Meyer D., Umbrello D., Jayal D. „Surface integrity in material removal processes: recent advances”. *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. 60, 2 (2011): s. 603–626.
7. M'Saoubi R., Chandrasakaran H., Outeiro J.C., Dillon O.W., Jawahir I.S. „A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products”. *International Journal of Sustainable Manufacturing*. 1, 1–2 (2008): s. 203–236.
8. Feld M. „Technologia budowy maszyn”. Warszawa: WNT, 1993.
9. Burakowski T. „Areologia. Podstawy teoretyczne”. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2013.
10. Wang B., Shanqiang L. „Influence of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys – a review”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 98, 5–8 (2018): s. 1925–1975.
11. Willert M., Riemer O., Brinksmeier E. „Surface integrity in precision turning of steel”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 94, 1–4 (2018): s. 763–771.
12. Brinksmeier E., Gläbe R., Klocke F., Lucca D.A. „Process signatures – an alternative approach to predicting functional workpiece properties”. *Procedia Engineering*. 19 (2011): s. 44–52.
13. Brinksmeier E., Klocke F., Lucca D.A., Sölter J., Meyer D. „Process signatures – a new approach to solve the inverse surface integrity problem in machining processes”. *Procedia CIRP*. 13 (2014): s. 429–434.
14. Brinksmeier E., Meyer D., Heinzel C., Lübben T., Sölter J., Langenhorst L., Frerichs F., Kämmler J., Kohls E., Kuschel S. „Process signatures – the missing link to predict surface integrity problem in machining”. *Procedia CIRP*. 71 (2018): s. 3–10.
15. Brinksmeier E., Reese S., Klink A., Langenhorst L., Lübben T., Meinke M., Meyer D., Sölter J. „Underlying mechanisms for developing process signatures in manufacturing”. *Nanomanufacturing and Metrology*. 1 (2018): s. 193–208.
16. Frerichs F., Sölter J., Lübben T., Brinksmeier E., Zoch H.-W. „A simulation based development of Process Signatures for manufacturing processes with thermal loads”. *Procedia CIRP*. 45 (2016): s. 327–330.
17. Meyer D., Kämmler J. „Surface integrity of AISI 4140 after deep rolling with varied external and internal loads”. *Procedia CIRP*. 45 (2016): s. 363–366.
18. Przybyłowicz K. „Podstawy teoretyczne metaloznawstwa”. Warszawa: WNT, 1999.
19. Szargut J. „Modelowanie numeryczne pól temperatury”. Warszawa: WNT, 1992.