New approach to the machinability assessment: towards total machining performance (TMP). Pt. I. Definitions, methodology, criteria and assessment fields

Nowe podejście do oceny skrawalności: przejście do całkowitej wydajności obróbki (TMP). Cz. I. Definicje, metodologia, kryteria i obszary oceny

WIT GRZESIK*

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.11.11

The article presents a comprehensive review of current knowledge regarding material machinability and its assessment methods. It incorporates advancements in machining technology and modern optimization techniques that enable a transition to Total Machining Productivity (TMP). Essential research procedures are outlined to integrate studies across five key thematic areas and to develop an integrated TMP model that additionally incorporates the concept of sustainable machining. Future research directions are also specified.

KEYWORDS: machinability, total machining performance, machinability tests, machinability prediction

W artykule dokonano gruntownej analizy wiedzy o skrawalności materiałów z uwzględnieniem metod jej oceny, zawierającej uzupełnienia niezbędnych informacji o dokonanym rozwoju technologii obróbki skrawaniem, i nowoczesnych metod optymalizacji, umożliwiających przejście na poziom całkowitej wydajności obróbki (TMP). Podano niezbędne procedury badawcze prowadzące do integracji badań w pięciu podstawowych grupach tematycznych i utworzenia zintegrowanego modelu TMP z dodatkowym uwzględnieniem koncepcji obróbki zrównoważonej. Wyszczególniono przyszłe kierunki badań.

SŁOWA KLUCZOWE: skrawalność, całkowita wydajność obróbki, testy skrawalności, predykcja skrawalności

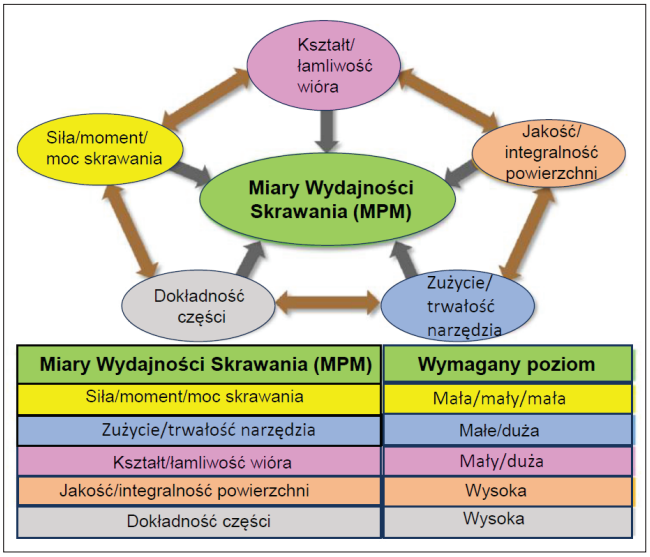
Wprowadzenie

Termin „skrawalność" (*machinability rating*) jest definiowany i używany w praktyce obróbki skrawaniem od początku lat dwudziestych XX wieku jako dodatkowa właściwość materiału, która decyduje o łatwości lub trudności przeprowadzenia obróbki skrawaniem na danym materiale obrabianym w zdefiniowanych warunkach procesu [1–3]. Z tego względu dotyczy konkretnego sposobu, rodzaju i odmiany obróbki [1]. Termin „skrawalność", mimo powszechnego stosowania od ponad kilku dekad, jest jednym z najbardziej niejasno zdefiniowanych, często niejasno rozumianych i niekompletnych terminów w dziedzinie obróbki skrawaniem. Definicja ta jest nie tylko niejasna i niekompletna, ale także jedynie częściowo odnosi się do rzeczywistej wydajności obróbki przez „technologiczny system obróbki" (OUPN) utworzony przez obrabiarkę, uchwyt obróbkowy, obrabiany materiał i narzędzie skrawające. Trudności w zrozumieniu i jednoznacznym praktycznym określeniu spowodowały powstanie ponad 100 000 publikacji, z których każda przedstawia wyniki nowych badań, definiując ten termin często indywidualnie, zgodnie z własną narracją [3]. Chociaż na przestrzeni lat ilościowe zrozumienie wydajności procesu obróbki skrawaniem stale się rozwija, pozorny brak pełnego zrozumienia istoty „rzeczywistej skrawalności" w opublikowanej literaturze jest mylący i często niezrozumiały.

W środowisku badawczym i przemysłowym w dziedzinie obróbki skrawaniem od dawna uważa się, że ta niejednoznaczność wymaga gruntownego wyjaśnienia. Chociaż wielu badaczy ze społeczności CIRP i innych liderów w dziedzinie obróbki skrawaniem, w tym badaczy działających w przemyśle i specjalistów ds. wdrożeń z firm narzędziowych, podejmowało wysiłki w celu generowania nowej wiedzy na temat wydajności procesu obróbki skrawaniem i czynników wpływających na skrawalność, to ogólny postęp w opracowaniu jednoznacznie definiowalnego lub powszechnie akceptowalnego terminu, który miałby zastąpić obecnie stosowany termin obrabialności, był bardzo ograniczony. Należy podkreślić, że większość dotychczasowych działań skupiała się na różnych miarach/wskaźnikach wydajności obróbki skrawaniem, które są powszechnie stosowane w badaniach i ocenie skrawalności, pojedynczo lub w kombinacjach.

Na rys. 1 przedstawiono pięć najczęściej branych pod uwagę wskaźników wydajności obróbki skrawaniem (bezpośrednich i pośrednich) oraz ich pożądane poziomy. Złożone powiązania między tymi wskaźnikami wymagają kompleksowego zbadania i opracowania modeli ich prognozowania z dokładnością akceptowalną przez przemysł wytwórczy. Pomiary i wyznaczanie parametrów wydajności obróbki, a następnie integracja modeli są niezbędne w celu dokonania końcowej optymalizacji procesu. Całościowa ocena wydajności obróbki wymaga zatem znacznych działań organizacyjnych i nakładów pracy, które do tej pory stanowiły poważne wyzwanie techniczne dla osób zajmujących się badaniami skrawalności. Chociaż prawie wszystkie z pięciu wskaźników wydajności obróbki wyszczególnionych na rys. 1 dotyczą aspektów zrównoważonego rozwoju procesów obróbki (*sustainable manufacturing/machining*), w różnych poprzednich badaniach nie wykazano żadnych bezpośrednich korzyści ilościowych [4].

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik – wit.grzesik@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3898-5119 – Opole, Polska.



Miary Wydajności Skrawania (MPM)	Wymagany poziom
Siła/moment/moc skrawania	Mała/mały/mała
Zużycie/trwałość narzędzia	Małe/duża
Kształt/łamliwość wióra	Mały/duża
Jakość/integralność powierzchni	Wysoka
Dokładność części	Wysoka

Fig. 1. Commonly considered machining performance measures in machinability evaluation/assessment and their desired levels [4, 5]
Rys. 1. Wskaźniki wydajności obróbki skrawaniem powszechnie brane pod uwagę w ocenie / ocenie obrabialności oraz ich pożądane poziomy [4, 5]

Wskaźniki i praktyczne testy skrawalności

Właściwości materiału obrabianego wpływające na skrawalność to: twardość, wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie, skład chemiczny, mikrostruktura, stopień zgniotu i hartowność. Pod uwagę bierze się kształt i wymiary przedmiotu obrabianego oraz sztywność przedmiotu obrabianego wynikającą z jego konstrukcji [1–3].

Tradycyjnie ocenę skrawalności przeprowadza się, wykorzystując kryteria ogólne i szczegółowe [1–4].

Do kryteriów ogólnych należą:
- zużycie/trwałość ostrza narzędzia,
- siła/moc skrawania,
- jakość powierzchni / warstw podpowierzchniowych, np. stan warstwy wierzchniej określany ogólnie jako integralność powierzchni (*surface integrity*),
- dokładność wymiarowo-kształtowa części,
- forma wióra/łamliwość wióra.

Do kryteriów szczegółowych (stosowanych jako szybkie testy) należą:
- moment obrotowy / siła wiercenia,
- czas wiercenia lub szybkość penetracji,
- temperatura skrawania na ostrzu narzędzia lub w wiórze,
- współczynnik spęczenia,
- stopień utwardzenia wióra.

W celu oceny skrawalności w ciągu ostatnich kilku dekad opracowano i wdrożono do praktyki laboratoryjnej/przemysłowej różne testy, np.:
- zużycia/trwałości narzędzia,
- wykończenia powierzchni,
- siły skrawania,
- temperatury skrawania,
- zużycia energii,
- podatności na skrawanie (np. szybkość penetracji wiertła przy stałym nacisku posuwu),
- symulowane testy produkcyjne w celu zapewnienia optymalnych warunków skrawania.

Złożone interakcje między wszystkimi elementami wpływającymi na całkowitą wydajność obróbki i ogólną obrabialność, przedstawione na rys. 1, sprawiają, że niezwykle trudno jest ocenić eksperymentalnie ogólną wydajność obróbki.

Jeśli podsumuje się dotychczasowe badania nad skrawalnością na przestrzeni ponad wieku, to można dostrzec główne obszary zainteresowania w różnych okresach. Liczne, obszerne bazy danych dotyczące skrawalności zostały utworzone przez instytuty badawcze i grupy przemysłowe. Na przykład, „Machining Data Handbook" (1980) [6], który później przekształcił się w skomputeryzowany system CUTDATA (2003), zawiera ponad 90 000 zaleceń dotyczących skrawalności 3750 materiałów roboczych dla ponad 40 operacji obróbki [4]. Uwzględniał co najmniej 12 głównych gatunków materiałów ostrzy skrawających (HSS, węgliki spiekane, ceramika itp.). Zbiory i algorytmy CUTDATA stały się podstawą dla modułów automatycznego doboru parametrów (Speed and Feed) integrowanych bezpośrednio w systemach CAM (np. Gibbs CAM czy PEPS3) oraz w nowoczesnych sterowaniach CNC (np. tablice parametrów CUT.DATA w systemach sterowania Heidenhain). Skomputeryzowane bazy danych dotyczące skrawalności opierają się na obszernych danych eksperymentalnych generowanych przez lata, ale dostarczają jedynie ogólnych zaleceń dotyczących skrawalności. Z wyjątkiem kilku specyficznych, wysoce dostosowanych baz danych do zastosowań przemysłowych, żaden z tych systemów nie jest w stanie zapewnić rzeczywistych ani użytecznych zaleceń dotyczących skrawalności. Dotyczy to w szczególności:
- nowo opracowanych zaawansowanych materiałów narzędziowych,
- różnych rodzajów powłok narzędziowych odpornych na zużycie (pojedynczych i wielowarstwowych),
- zmian w geometrii narzędzi / zastosowaniach uchwytów narzędziowych,
- konfiguracji łamaczy wiórów.

Takie oceny skrawalności nie uwzględniają statycznych i dynamicznych efektów (sztywności) obrabiarek i wyposażenia/akcesoriów, takich jak przyrządy obróbkowe i oprzyrządowanie technologiczno-pomiarowe, wpływ chłodziwa itp. W związku z tym brakuje praktycznej metody oceny skrawalności z uwzględnieniem tych efektów konstrukcyjnych i technologicznych. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na bardziej kompleksowe metody i procedury oceny, staje się oczywiste, że tylko bezstronne, neutralne grono ekspertów badawczych i specjalistów branżowych może opracować taki praktyczny i użyteczny system. Na rys. 2 zaprezentowano system obróbki (obrabiarka, narzędzie skrawające i przedmiot obrabiany) oraz jego główne elementy i cechy.

Na przestrzeni lat podejmowano znaczne wysiłki w zakresie modelowania wydajności obróbki z wykorzystaniem numerycznych modeli / metodologii empirycznych opartych na danych oraz zaawansowanych technik logiki rozmytej (fuzzy logic) [1, 2, 4].

Wykazano, że metody te umożliwiają przewidywanie jednej lub więcej miar wydajności obróbki, przedstawionych na rys. 2.

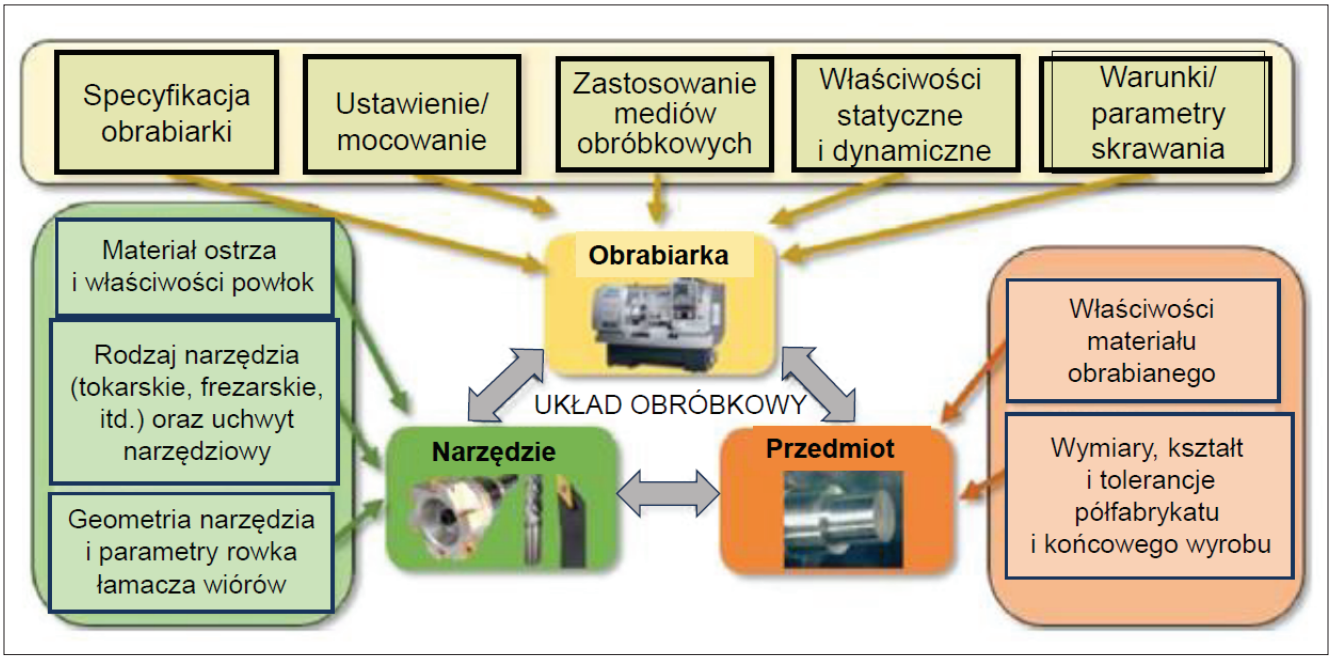


Fig. 2. Technological machining system and its components influencing total machining performance (TMP)
Rys. 2. Układ obróbkowy i jego elementy składowe wpływające na ogólną wydajność obróbki [1,2,4]

Obszary tematyczne wybrane do oceny całkowitej wydajności skrawania (CWS/TMP)

W ramach kilkuletniego programu IMPACT (*Integrated Machining Performance for Assessment of Cutting Tools*), którym kierował prof. I.M. Jawahir z Instytutu Zrównoważonej Obróbki na Uniwersytecie Kentucky (USA) [4, 5], w latach 2021–2024 dokonano obszernego przeglądu najnowocześniejszych rozwiązań w zakresie obrabialności i wydajności obróbki w pięciu powiązanych ze sobą tematach dotyczących obrabialności, a następnie przeprowadzono serię testów wieloetapowych na dziesięciu różnych maszynach w pięciu krajach (USA, UK, Kanada, Niemcy, Szwecja), prezentując niespójności dostępnych głównych metod oceny skrawalności. Stanowiło to podstawę do przedstawienia potrzeby modelu całkowitej wydajności obróbki (TMP) dla zrównoważonej obróbki. Następnie przedstawiono nowo opracowaną metodę oceny TMP, wykorzystującą minimalne dane eksperymentalne i modele predykcyjne, wraz z walidacją. Jako podsumowanie podano trzy branżowe studia przypadku (*case studies*), a następnie sformułowano uwagi końcowe i przyszłe kierunki badań i analiz.

Tematy badawcze były następujące [4]:

1. Obecna wiedza i praktyki branżowe: potrzeby i wiedza, luki (Temat A),
2. Modelowanie i symulacja: stan obecny i ograniczenia (Temat B),
3. Projektowanie i rozwój narzędzi skrawających: aktualna wiedza i złożoności (Temat C).
4. Inteligentne narzędzia i czujniki: postęp i ograniczenia (Temat D).
5. Optymalizacja wydajności narzędzi skrawających (Temat E).

W Temacie E, który będzie oddzielnie omówiony w cz. II artykułu, poruszono zagadnienia sztucznej inteligencji (AI – *Artificial Intelligence*) i uczenia maszynowego (ML – *Machine Learning*), które znacząco wpłynęły na rozwój systemów sterowania procesem obróbki skrawaniem, ułatwiając tworzenie modeli predykcyjnych, zwiększających wydajność i jakość procesów obróbki. Kompleksowe podejście do oceny całkowitej wydajności obróbki (TMP) [5] powinno uwzględniać wiele kryteriów, w tym wykończenie powierzchni, intensywność zużycia narzędzi i koszty produkcji, aby zmaksymalizować wydajność funkcjonalną i zagwarantować zrównoważony rozwój przez wielokryterialne techniki optymalizacji. Parametry procesu obróbki skrawaniem definiują wielkości fizyczne, które zmieniają się, odzwierciedlając różne warunki operacyjne, co czyni je głównymi celami optymalizacji całkowitej wydajności obróbki (TMP). Zmienne procesowe w obróbce skrawaniem obejmują wszystkie mierzalne właściwości bezpośrednio zależne od procesu, w tym wskaźniki operacyjne, takie jak czas, koszt i wpływ na środowisko, a także specyficzne cechy, takie jak formowanie wiórów, składowe siły skrawania i wzrost temperatury, monitorowane podczas operacji w celu oceny wydajności obróbki. Parametry procesu to zmienne ustawienia służące do optymalizacji operacji, w tym prędkości skrawania i wartości posuwu. Oba są niezbędnymi danymi wejściowymi dla modeli uczenia maszynowego przewidujących wydajność obróbki. Sztuczne sieci neuronowe (ANN – *Artificial Neural Networks*) to najczęściej stosowane algorytmy uczenia maszynowego. Następne w kolejności są maszyny wektorów nośnych (SVM – *Support Vector Machine*) i lasy losowe (RF – *Random Forests*). Najnowsze postępy w algorytmach sztucznej inteligencji opartych na danych, ML i optymalizacji ewolucyjnej znacząco poprawiły wydajność obróbki i umożliwiły inteligentne, zrównoważone procesy obróbkowe/produkcyjne [4, 7, 12].

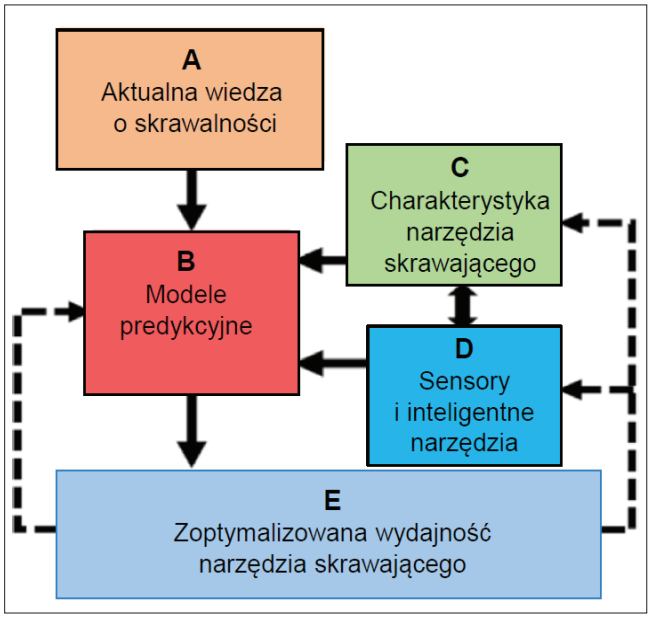


Fig. 3. Interactions among the five IMPACT topics [4, 5]
Rys. 3. Interakcje między pięcioma tematami w programie badawczym IMPACT [4, 5]

Zasady integracji tematycznej w grupach

W ramach grupy badawczej STC C CIRP przeprowadzono zintegrowaną ocenę skrawalności, uwzględniając interakcje w pętli zamkniętej pomiędzy pięcioma wybranymi obszarami tematycznymi, według schematu przedstawionego na rys. 3.

Biorąc pod uwagę podział zadań w czasie, wydzielono trzy fazy [3]:

- faza I (2021–2022): Kompleksowe badania nad najnowocześniejszymi technologiami obróbki,
- faza II (2022–2023): Nowe metody oceny całkowitej wydajności obróbki,
- faza III (2023–2024): Zintegrowany system optymalizacji wydajności predykcyjnej.

Rezultatem fazy I jest pięć artykułów przeglądowych podsumowujących najnowszy stan wiedzy i praktyki we wszystkich pięciu obszarach tematycznych. Zostały opublikowane w *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* w 2024 r. [8–12]. Posłużyły do zebrania i usystematyzowania wiedzy do przeprowadzenia końcowej, zintegrowanej optymalizacji całkowitej wydajności procesu (TMP). Dotyczą kolejno następujących zagadnień:

- zastosowania modelowania fizycznego do charakteryzacji procesu i pracy narzędzi skrawających [8],
- przeglądu najlepszych praktyk w zrozumieniu i ocenie skrawalności w celu doskonalenia wydajności procesu [9],
- inżynieryjnego projektowania narzędzi skrawających z uwzględnieniem materiału ostrza, geometrii ostrza i powłok w celu zrozumienia i doskonalenia przebiegu procesu skrawania [10],
- czujników do monitorowania procesów obróbkowych w trakcie ich trwania oraz bezpośrednio na obrabiarce [11],
- optymalizacji ogólnej wydajności obróbki z wykorzystaniem sztucznej inteligencji [12].

Model całkowitej wydajności skrawania

Efektem zintegrowanej oceny skrawalności przeprowadzonej według struktury IMPACT przedstawionej na rys. 3 jest model rozszerzony o metody obróbki zrównoważonej zaprezentowany na rys. 4. W ten

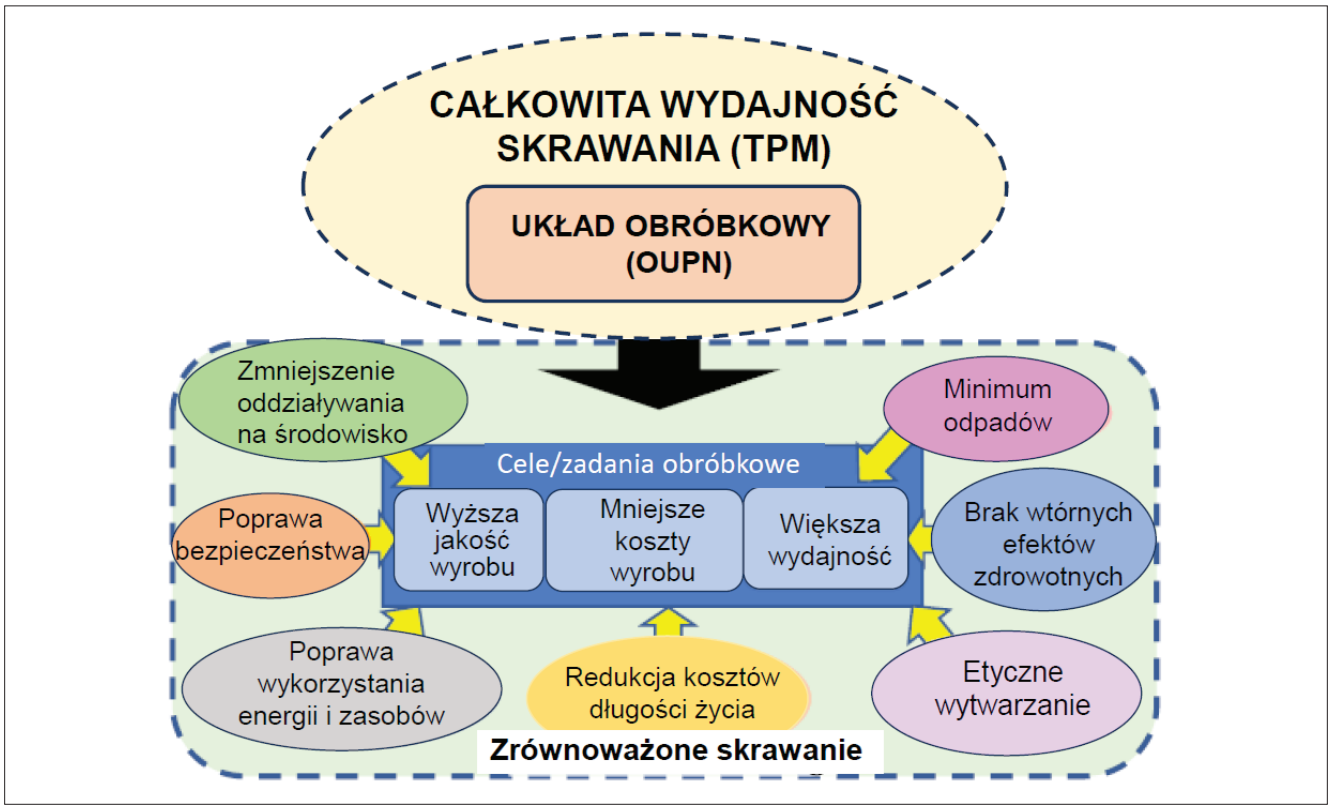


Fig. 4. Proposed integrated model TMP incorporating sustainable machining methods [4]
Rys. 4. Proponowany zintegrowany model TMP z metodami obróbki zrównoważonej [4]

sposób można osiągnąć lepszą jakości produktu, obniżyć koszty produkcji i zwiększyć produktywność.

Na rys. 4 można dostrzec nie tylko aspekty ekonomiczne (redukcję kosztów), ekologiczne (zmniejszenie oddziaływania na środowisko, minimalizacja odpadów), ergonomiczne (poprawę bezpieczeństwa) i energetyczne (lepsze wykorzystanie energii i jej źródeł), lecz także etyczne. Zagadnienia te były już przedmiotem licznych publikacji w „Mechaniku" [13, 14, 15].

Kierunki przyszłych badań nad skrawalnością materiałów

W celu zniwelowania luk w obecnym stanie wiedzy konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań w następujących obszarach tematycznych [4, 5]:

– Badania porównawcze mające na celu ocenę dokładności i niezawodności wybranych modeli predykcyjnych do przewidywania kluczowych wskaźników efektywności (KPI – *Key Performance Indexes*) oraz porównanie z danymi eksperymentalnymi i wynikami testów typu *round robin* (RRT),

– Opracowywanie modeli wieloskalowych [16] w celu przewidywania kryteriów obrabialności materiałów wytwarzanych metodą addytywną, materiałów o stopniowanej funkcjonalności, materiałów nanostrukturalnych, MMC (*Metal Matrix Composites*) i CMC (*Carbon Matrix Composites*),

– Opracowanie modeli zużycia narzędzi i łuszczenia się warstw powierzchniowych (odprysków) opartych na mechanice pękania, uwzględniających powłoki i mikrostrukturę powszechnie stosowanych i nowych kompozytowych materiałów narzędziowych [17],

– Opracowanie modeli do mikroobróbki, charakteryzujących się ekstremalnie małą grubością warstwy skrawanej,

– Opracowanie zaawansowanych modeli CFD (*Computational Fluid Dynamics*) do badania interakcji struktur przepływowych podczas obróbki w celu oceny obrabialności przy chłodzeniu wysokociśnieniowym i hybrydowym chłodzeniu kriogenicznym – MQL,

– Opracowanie modeli w skali molekularnej w celu opisania reakcji chemicznych na styku narzędzia, wióra i przedmiotu obrabianego, w celu zrozumienia mechanizmów reakcji tribochemicznych i ich wpływu na obrabialność,

– Opracowywanie modeli wpływu obróbki na środowisko i oceny cyklu życia,

– Opracowywanie modeli przewidujących odkształcenia części i atrybuty jakości.

Zagadnienia powyższe powinny być brane pod uwagę przez polskie uczelnie badawcze, aby uczestniczyć w międzynarodowej wymianie badawczej i programach badawczych ERC. Niestety, projekty finansowane z funduszy NCN są bardzo rozproszone tematycznie i w wielu przypadkach odbiegają od kierunków nakreślonych przez ekspertów CIRP. Jest to rezultatem braku spójnego programu badawczego, a jedynie inicjatyw lokalnych. Wiele z tych zagadnień zostało opisanych w „Mechaniku", np. [7, 13, 14, 15–17], przyczyniając się wydatnie do rozpowszechniania aktualnej wiedzy o nowoczesnych badaniach i analizach w obszarze obróbki ubytkowej/skrawaniem w sektorze naukowym, badawczym i produkcyjnym. Duże znaczenie mają też promocyjne materiały firm narzędziowych, m.in. Sandvik Coromant, Iscar, Mitsubishi Carbide, Kennametal, które są szczególnie przydatne dla technologów obróbki skrawaniem.

LITERATURA

[1] W. Grzesik, Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych, PWN, 2018

[2] W. Grzesik, Advanced machining processes of metallic materials, Elsevier, 2017

[3] F. Klocke, Manufacturing processes 1, Springer, 2011

[4] I.S. Jawahir, H. Attia, M. Dix, H. Ghadbeigid, Z. Liao, J. Schoop, A. Shokrani, Revisiting machinability assessment: Towards total machining performance. *CIRP Annals – ManufacturingTechnology* 74(2025): 817–842

[5] I.S. Jawahir, Y. Altintas, Special issue on machinability revisited: integrated machining performance for assessment of cutting tools (IMPACT). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 52(2024): 386–388, DOI: 10.1016/j.cirp.2025.05.003

[6] Machining Data Handbook, Machinability Data Center in Cincinnati, 1980

[7] W. Grzesik, Zaawansowane metody wyznaczania współczynnika tarcia w procesie skrawania (Advanced methods of determination of friction coefficient in the machining process). *Mechanik* 1(2026), DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.1.1

[8] H. Attia, A. Sadek, Y. Altintas, A. Matsubara, D. Umbrello, K. Wegener, R. Eisseler, F. Ducobu, H. Ghadbeigi, Physics-based models for characterization of machining and cutting tool performance – A critical review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 51(2024): 161–189

[9] Z. Liao, J. Schoop, J. Saelzer, B. Bergman, P. Priarone, A. Splettstoßer, Y. Kaynak, Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 50(2024): 151–184

[10] P. Mativenga, J. Schoop, I.S. Jawahir, D. Biermann, M. Kipp, Z.M. Kilic, T. Ozel, R. Wertheim, P. Arrazola, D. Boing, Engineered design of cutting tool material, geometry and coating for optimal performance and customized applications: a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 52(2024): 212–228

[11] A. Shokrani, H. Dogan, D. Burian, T.T. Nwabueze, P. Kolar, Z. Liao, A. Sadek, R. Teti, P. Wang, R. Pavel, T. Schmitz, Sensors for in-process and on-machine monitoring of machining operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 51(2024): 263–292

[12] K. Ullrich, M. von Elling, K. Gutzeit, M. Dix, M. Weigold, J.C. Aurich, R. Wertheim, I.S. Jawahir, H. Ghadbeigi, AI-based optimisation of total machining performance: a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 50(2024): 40–54

[13] W. Grzesik, Visions and strategies of manufacturing, Part I. *Mechanik* 83(3)(2010): 145–148

[14] W. Grzesik, Visions and strategies of manufacturing, Part II. *Mechanik* 83(4)(2010): 232–236

[15] W. Grzesik, Etyka w produkcji (Ethics in manufacturing). *Mechanik* 5–6(2026)

[16] W. Grzesik, K. Jarosz, Modelling and simulation of the machining process based on multiscale approach – a comprehensive review (Modelowanie i symulacja procesu obróbki na podstawie podejścia wieloskalowego – przegląd). *Mechanik* 5(2025), DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2025.7.6

[17] W. Grzesik, J. Małecka, Development and applications of protective DLC-based coatings in tooling industry. *Mechanik* 4(2026), DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.4.6