

Dr inż. **Piotr Szablewski**
Uniwersytet Kaliski
INSTYTUT INŻYNIERII MECHANICZNEJ

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Kalisz, 13.06.2025

1. DANE OSOBOWE

Imię i Nazwisko: **Piotr Szablewski**

2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

Stopień naukowy doktora Rok uzyskania: **2009**

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn

Tytuł rozprawy doktorskiej: **Skrawalność stopu Inconel 718 w procesie toczenia**

Promotor:

prof. zw. dr hab. inż. Mieczysław Kawalec – Politechnika Poznańska

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Maciej Kupczyk – Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Hubert Latoś – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Tytuł zawodowy magistra inżyniera Rok uzyskania: **1998**

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Pojazdów

Tytuł pracy dyplomowej: **Metody diagnozowania silników spalinowych**

Promotor: prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski – Politechnika Poznańska

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

26.02.2024 – do dziś	Profesor Uczelni, Wydział Politechniczny, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Kaliski.
01.10.2023 – 25.02.2024	Adiunkt, Wydział Politechniczny, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Akademia Kaliska.
18.02.2021 – 30.09.2023	Adiunkt, Wydział Politechniczny, Instytut – Centrum Doskonałości Badań Kół Zębatych Akademii Kaliskiej.
29.09.2015 – 17.02.2021	Starszy Wykładowca, Wydział Politechniczny, Centrum Dydaktyczne Badań Kół Zębatych, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu.
01.11.2019 – do dziś	Ekspert ds. Obróbki Skrawaniem, Pratt & Whitney Kalisz.
01.11.2016 – 31.10.2019	Inżynier Wiodący ds. Obróbki Skrawaniem, Pratt & Whitney Kalisz.
01.05.2012 – 31.10.2016	Specjalista Technolog ds. Rozwoju Procesów, Pratt & Whitney Kalisz.
01.10.2009 – 30.04.2012	Specjalista Technolog, Pratt & Whitney Kalisz.
01.02.2005 – 30.09.2009	Specjalista Technolog-programista CNC, Pratt & Whitney Kalisz.
01.11.2004 – 31.01.2005	Starszy technolog-programista CNC, Pratt & Whitney Kalisz.
01.09.2000 – 31.10.2004	Technolog-programista CNC, Pratt & Whitney Kalisz.

4. WSKAZANE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCE Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem)

Jako osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego wynikającego z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. **Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), wskazuję cykl powiązanych tematycznie publikacji, na który składa się zbiór artykułów naukowych, które wspólnie można zatytułować jako:

„Technologiczne aspekty wykończeniowej obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych”.

4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

- A1. **Szablewski P.**, Evaluation of the topography and load capacity of cylindrical surfaces shaped in the process of finish turning of the Inconel 718 alloy. Measurement 223 (2023) 113749. (IF₂₀₂₃ = **5.6**; MEiN₂₀₂₃: **200 pkt.**, Indeksowane w WoS).

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113749>

- A2. **Szablewski P.**, Tribological behavior of Inconel 718 alloy when cutting with a carbide insert prepared using the SPS technique under dry and lubricated sliding conditions, Tribology International 199 (2024) 109951. (IF₂₀₂₃ = **6.1**; MEiN₂₀₂₃: **200 pkt.**, Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109951>

- A3. Krawczyk B., **Szablewski P.**, Legutko S., Smak K., Gapiński B.: Anomalies in the Geometric Surface Structure of Shaped Elements Composed of Inconel 718 Alloy. Materials 2021, 14, 7524 (IF₂₀₂₁ = **3.748**; MEiN₂₀₂₁: **140 pkt.**, Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.3390/ma14247524>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych, opracowanie metodyki badań właściwości warstwy wierzchniej. Wykonanie badań mikroskopowych, pomiarów chropowatości powierzchni, pomiarów zużycia ostrzy skrawających (topografia ostrza skrawającego i promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej). Wykonanie badań stanowiskowych na obrabiarce CNC. Analiza wyników badań doświadczalnych. Zredagowanie artykułu i wniosków. Korekta artykułu po recenzji.

- A4. Krawczyk B., **Szablewski P.**, Mendak M., Gapiński B., Smak K., Legutko S., Wieczorowski M., Miko E.: Surface Topography Description Of Threads Made with Turning On Inconel 718 Shafts, Materials 2023, 16, 80. (IF₂₀₂₃ = **3.4**; MEiN₂₀₂₃: **140 pkt.**, Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.3390/ma16010080>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Wykonanie badań stanowiskowych na obrabiarce CNC. Przygotowanie próbek do badań topografii powierzchni. Udział w analizie wyników badań doświadczalnych. Udział w zredagowaniu artykułu.

- A5. **Szablewski P.**; Legutko S.; Mróz A.; Garbiec D.; Czajka R.; Smak, K.; Krawczyk, B. Surface Topography Description after Turning Inconel 718 with a Conventional, Wiper and Special Insert Made by the SPS Technique. *Materials* 2023, 16, 949. (IF₂₀₂₃ = 3.4; MEiN₂₀₂₃: 140 pkt., Indeksowane w WoS) <https://doi.org/10.3390/ma16030949>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Wykonanie pomiarów topografii powierzchni, udział w badaniach stanowiskowych na obrabiarce CNC. Analiza wpływu parametrów skrawania i cieczy chłodząco-smarującej na topografię powierzchni oraz krzywą udziału materiałowego. Opracowanie wyników oraz wniosków z przeprowadzonych badań. Zredagowanie artykułu i wniosków. Korekta artykułu po recenzji.

- A6. Smak K., **Szablewski P.**, Legutko S., Krawczyk B., Miko E., Investigation of the influence of anti-wear coatings on the surface quality and dimensional accuracy during finish turning of the Inconel 718 alloy, *Materials* 2023, 16, 715. (IF₂₀₂₃ = 3.4; MEiN₂₀₂₃: 140 pkt., Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.3390/ma16020715>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Wykonanie pomiarów topografii powierzchni. Udział w analizie wyników badań doświadczalnych oraz opracowaniu wykresów i grafik. Udział w zredagowaniu artykułu.

- A7. Smak K., **Szablewski P.**, Legutko S., Petru J., Kratochvil J., Wencel S. Evaluation of the Influence of the Tool Set Overhang on the Tool Wear and Surface Quality in the Process of Finish Turning of the Inconel 718 Alloy. *Materials* 2024, 17, 4465. (IF₂₀₂₄ = 3.1; MEiN₂₀₂₄: 140 pkt., Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.3390/ma17184465>.

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Wykonanie pomiarów topografii powierzchni, pomiarów zużycia ostrzy skrawających (topografia ostrza skrawającego i promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej). Udział w analizie wyników badań doświadczalnych. Udział w sformułowaniu wniosków.

- A8. **Szablewski P.**, Legutko S., Ungureanu N., Petru J., Smak K., Krawczyk B., Comparative Assessment of Tool Wear and Surface Topography After Superfinish Turning of Inconel 718 with Carbide and Ceramic Inserts, *Applied Sciences*, 2025, 15, 4265, (IF₂₀₂₅ = 2,5; MEiN₂₀₂₅: 100 pkt., Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.3390/app15084265>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Opracowanie metodyki badań. Wykonanie pomiarów topografii oraz zużycia ostrzy skrawających (badania SEM i analiza EDS). Wykonanie badań stanowiskowych na obrabiarce CNC. Przeprowadzenie analizy wyników badań doświadczalnych. Opracowanie artykułu oraz sformułowanie wniosków. Wykonanie korekty artykułu po recenzji. Nadzór i administrowanie projektem.

- A9. **Szablewski P.**, Smak K., Krawczyk B.: Analysis of the Impact of Wiper Geometry Insert on Surface Roughness and Chips in Machining Materials Used in the Aviation Industry. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022; 16(1):203-212 (IF₂₀₂₂ = 1.1; MEiN₂₀₂₂: 100 pkt., Indeksowane w WoS). <https://doi.org/10.12913/22998624/143475>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych, opracowanie metodyki badań właściwości warstwy wierzchniej. Wykonanie pomiarów chropowatości powierzchni. Udział w badaniach stanowiskowych na obrabiarce CNC. Określenie czynników wpływających na chropowatość powierzchni obrobionej i kształt formowanego wióra dla trzech rodzajów materiałów obrabianych stosowanych w przemyśle lotniczym (stop aluminium, austenityczna stal nierdzewna i stal do ulepszenia cieplnego). Analiza wyników badań doświadczalnych, opracowanie wykresów, grafik. Zredagowanie artykułu i wniosków. Korekta artykułu po recenzji.

- A10. Szablewski P., Chwalczuk T., Dobrowolski T., Evaluation of the cutting insert condition influence on the microstructure of surface layer after turning of Inconel 718 alloy, *Mechanik* 12/2019, 814-816, (MEiN₂₀₁₉: 5 pkt.). <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.111>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Współudział w opracowaniu metodyki badań właściwości warstwy wierzchniej. Wykonanie badań mikroskopowych, pomiarów chropowatości powierzchni, pomiarów zużycia ostrzy skrawających. Wykonanie badań stanowiskowych na obrabiarce CNC. Określenie wpływu zużycia ostrza skrawającego na mikrostrukturę warstwy wierzchniej. Analiza wyników badań doświadczalnych, opracowanie grafik. Przygotowanie tekstu artykułu i opracowanie wniosków. Korekta artykułu po recenzji.

- A11. Krawczyk B., Szablewski P., Gapiński B., Wieczorowski M. (2024). Assessment of Threads Used in the Aviation Industry Based on the Microstructure Analysis. In: Diering, M., Wieczorowski, M., Harugade, M. (eds) *Advances in Manufacturing IV. MANUFACTURING 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. (MEiN₂₀₂₄: 20 pkt., Indeksowane w WoS). https://doi.org/10.1007/978-3-031-56467-3_4

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Wykonanie badań stanowiskowych na obrabiarce CNC. Udział w analizie wyników badań doświadczalnych. Udział w zredagowaniu artykułu.

- A12. Rybicki M., Szablewski P., *Investigation of chips morphology after turning of materials applied in aerospace industry*, MATEC Web of Conferences, 121, 03020 (2017) (MEiN₂₀₁₇: 15 pkt.). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712103020>

Wkład: Opracowanie koncepcji i metodologii badań doświadczalnych. Przeprowadzenie analizy wyników badań doświadczalnych oraz opracowanie grafik. Zredagowanie artykułu i wniosków. Korekta artykułu po recenzji.

- A13. Chwalczuk T., Przestacki D., Szablewski P., Felusiak A., Microstructure characterization of Inconel 718 after laser assisted turning, MATEC Web of Conferences 188, 02004 (2018) (MEiN₂₀₁₈: 15 pkt.). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818802004>

Wkład: Opracowanie metodyki badań właściwości warstwy wierzchniej. Opracowanie i analiza wyników badań, a także opracowaniu wniosków będących efektem przeprowadzonych prac eksperymentalnych.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac oraz osiągniętych wyników

Efektywność procesu wytwarzania w dużym stopniu zależy od wiedzy w zakresie technologicznych aspektów obróbki skrawaniem. Jednym z elementów Przemysłu 4.0 jest zrównoważony rozwój, czyli wdrażania takich procesów, które pozwolą na zmniejszenie negatywnego skutku dla środowiska, zmniejszą zużycie energii elektrycznej i zasobów naturalnych, będą bezpieczne dla pracowników. Jedną z gałęzi przemysłu, w którym Przemysł 4.0 znajduje zastosowanie jest przemysł lotniczy. Części wykonywane przez przemysł lotniczy podlegają rygorystycznym wymogom jakościowym i dokładności wymiarowej. Zastosowanie materiałów w konstrukcji silnika lotniczego w dużej mierze uwarunkowane jest tym, w jakiej sekcji dana część pracuje, w zimnej czy gorącej. W części zimnej przeważają stopy aluminium, stale do ulepszania cieplnego i austenityczne stale nierdzewne. Natomiast w części gorącej przeważają stopy na podstawie niklu, takie jak Inconel 718, który zachowuje właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach.

Motywacją do podjętych badań w zakresie aspektów technologicznych były problemy technologiczne w obróbce stopów na podstawie niklu, zdefiniowane w ramach mojej pracy w firmie Pratt & Whitney Kalisz (spółce podległej firmie Pratt & Whitney Canada, która jest jednym z

światowych liderów w produkcji silników lotniczych). Bazowałem przy tym na doświadczeniu nabytym w ciągu kilkunastu lat pracy jako programista obrabiarek CNC podczas wdrożeń części typu pierścienie, korpusy, obudowy, uszczelniacze, wały, jarzma, koła zębate, sworznie, końcówki przewodów paliwowych. Korzystałem również z wiedzy zdobytej podczas realizacji projektów, zarówno wewnętrznych, jak i z dofinansowaniem. O aktualności i zapotrzebowaniu na badania w zakresie technologicznych aspektów obróbki wykończeniowej stopów na osnowie niklu decydują coraz bardziej restrykcyjne wymagania konstrukcyjne, nastawienie na zrównoważone wytwarzanie oraz rozwój w zakresie materiałów narzędziowych.

Za **cel naukowy ww. prac** przyjęto analizę technologicznych aspektów obróbki wykończeniowej materiałów stosowanych na części silników lotniczych, w szczególności stopów na osnowie niklu, obejmujących badania oddziaływań pomiędzy parametrami technologicznymi procesu a wskaźnikami jakościowymi i stanem technologicznej warstwy wierzchniej w wykończeniowej obróbce skrawaniem. Cel pracy zdefiniowano na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz wyników dotychczasowych badań.

Przedstawiony do oceny cykl jednotematycznych publikacji pod tytułem: „Technologiczne aspekty wykończeniowej obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych” obejmuje zagadnienia analizy oddziaływań pomiędzy parametrami technologicznymi procesu, a wskaźnikami jakościowymi i stanem technologicznej warstwy wierzchniej.

Określony cel naukowy prac badawczych został zrealizowany poprzez szerokie spektrum badań doświadczalnych obejmujących pomiary wskaźników jakościowych oraz stan technologicznej warstwy wierzchniej. Oprócz konwencjonalnego toczenia wzdłużnego, toczenia stożków i powierzchni sferycznych oraz toczenia gwintów, w badaniach uwzględniono również laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem (LAM). W przypadku stopów na osnowie niklu metody te są szczególnie ukierunkowane na aspekty zrównoważonego wytwarzania.

Wśród komponentów technologicznej warstwy wierzchniej odnoszących się do wewnętrznych norm jakościowych w przemyśle lotniczym można wyróżnić:

- topografię powierzchni obrobionej z uwzględnieniem parametrów chropowatości oraz struktury śladów obróbki, zarysowań, nalepień, pęknięć itp.,
- zmiany morfologii mikrostruktury – występowanie tzw. białej warstwy i odkształcenia ziaren,
- umocnienie warstwy wierzchniej.

Obróbka wykończeniowa ogranicza zakres parametrów skrawania, jednak wymaga uwzględnienia stanu technologicznej warstwy wierzchniej. Wpływa na to fakt, iż znaczna część badań została zrealizowana na częściach produkcyjnych, które finalnie zostały wysłane do klienta, który zamontował te części na silnikach lotniczych. Przyjęty zakres badań został uzasadniony i szczegółowo opisany w pracach stanowiących oceniany cykl jednotematycznych publikacji [A1-A13].

Poniżej przedstawiono omówienie wybranych wyników w zakresie analizy technologicznych aspektów wykończeniowej obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych, w szczególności stopów na osnowie niklu.

Większość prac badawczych poruszających tematykę obróbki stopu Inconel 718, dotyczy wykończeniowego toczenia wzdłużnego. W pracy [A3] przeprowadzono analizę wpływu kąta pomiędzy główną krawędzią skrawającą i powierzchnią obrobioną na chropowatość. Badania przeprowadzono dla zmiennych warunków chłodzenia-smarowania podczas obróbki, dla zmiennych prędkości skrawania i zmiennych twardości obrabianego materiału. Zrealizowane badania wykazały, że toczenie stopu Inconel 718 na sucho, niezależnie od jego twardości, wpływa na charakter i rozmiar zużycia krawędzi skrawającej ostrza. Brak zastosowania cieczy chłodząco-smarującej powoduje zwiększenie promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, czego wynikiem

jest zwiększenie ilości generowanego ciepła w strefie skrawania, objawiające się zmianami mikrostruktury oraz pogorszeniem jakości powierzchni obrobionej. Zmniejszenie kąta pomiędzy krawędzią skrawającą i powierzchnią obrobioną powoduje zwiększenie długości czynnej krawędzi skrawającej, w wyniku czego generowane są większe opory skrawania objawiające się drganiami, które wpływają negatywnie na chropowatość powierzchni (rys. 1).

Na podstawie znanego wzoru (1):

$$Rz_{to} = \frac{f^2}{8 r_\varepsilon} \quad (1)$$

opracowano model teoretycznej wysokości chropowatości określonej parametrem Rz_{to} (2):

$$Rz_{to} = \frac{f^2}{8 r_\varepsilon} + \frac{k \cdot r_n}{2} \left(1 + \frac{k \cdot r_n \cdot r_\varepsilon}{f^2} \right) + \Delta Rz_d \quad (2)$$

gdzie:

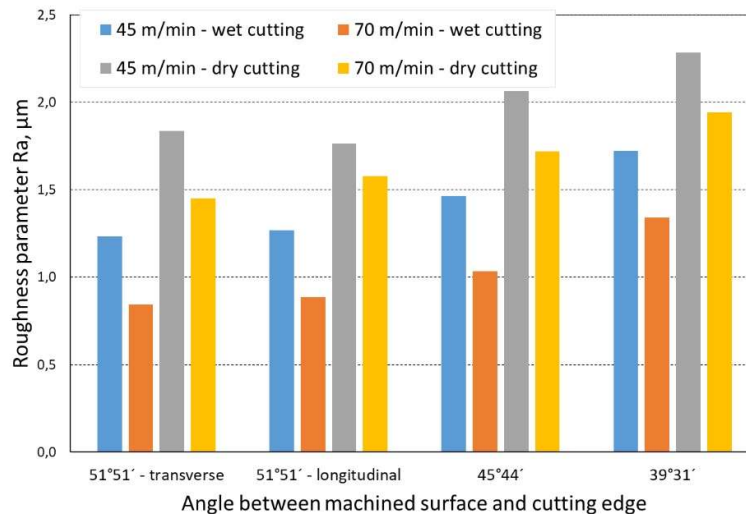
f – posuw [mm/obr.],

r_n – promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej [mm],

r_ε – promień naroża płytki skrawającej [mm],

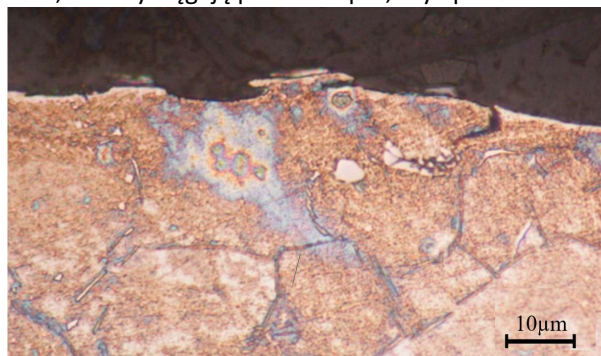
$k = \frac{h_{\min}}{r_n}$; współczynnik zależny od minimalnej grubości warstwy skrawanej $h_{\min}$

Dokładność stosowania wzoru (1) w celu prognozowania wartości chropowatości parametru Rz , jest wystarczająca w stabilnych warunkach procesu obróbki. Zachwianie tej stabilności poprzez brak zastosowania chłodzenia, zwiększenie czynnej długości krawędzi skrawającej, zmiana prędkości skrawania, wpływa na dynamikę procesu obróbki, czyli na wartość ΔRz_d (wzór 2). Z analizy współczynnika ΔRz_d wynika, że największy wpływ na jego wartość ma brak zastosowania chłodzenia podczas toczenia, a tym samym brak smarowania pomiędzy ostrzem i powierzchnią obrobioną.



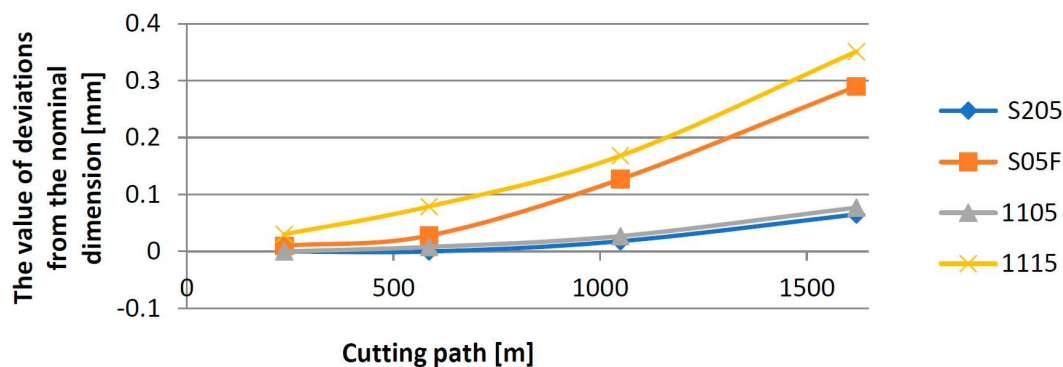
Rys. 1. Wpływ kąta pomiędzy główną krawędzią skrawającą i powierzchnią obrobioną przy zmiennej prędkości skrawania na parametr chropowatości Ra ; twardość obrabianego materiału 23 HRC [A3]

Zaobserwowano, że właściwości Inconelu 718 powodują, że podczas obróbki skrawaniem następuje deformacja krawędzi skrawającej ostrza i części obrabianej, która jest przyczyną powstawania ciepła i odkształceń plastycznych. Generowane ciepło zazwyczaj zmienia mikrostrukturę stopu i powoduje powstanie naprężeń w warstwie wierzchniej. Temperatura i odkształcenie, razem lub oddzielnie mogą spowodować pęknięcia (rys. 2) i mikrostrukturalne zmiany podczas obróbki [A10]. Badania wykazały wpływ ostrza na deformację ziaren. Głębokość zmian mikrostruktury warstwy wierzchniej po toczeniu z zastosowaniem cieczy wyniósł 4,49 μm , podczas gdy dla obróbki na sucho, zmiany sięgają ponad 16 μm , czyli prawie czterokrotnie więcej.



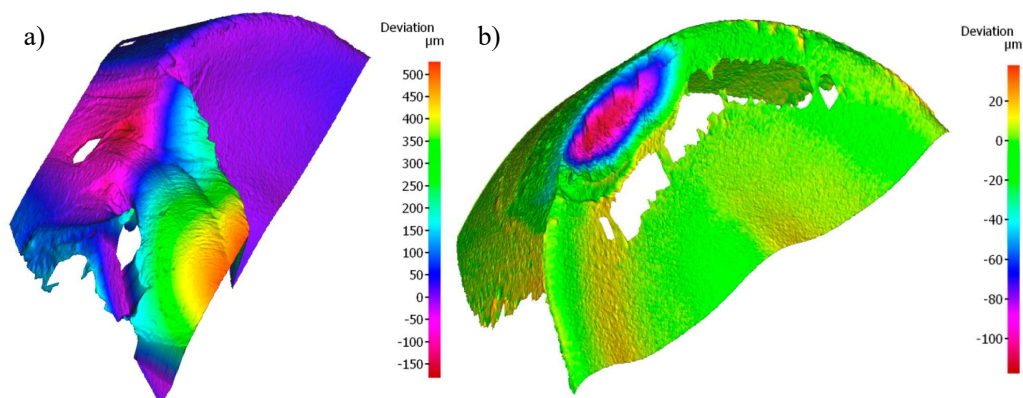
Rys. 2. Mikrostruktura Inconelu 718 (20 HRC) po toczeniu płytką WNMG 080408-TF IC3028; $v_c = 40 \text{ m/min}$, $f = 0,05 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,20 \text{ mm}$, $VB_c = 0,25 \text{ mm}$, (widoczne mikropęknięcia) [A10]

Wdrożenia części produkcyjnych wielokrotnie pokazały, że niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na zużycie ostrza skrawającego, a tym samym na jakość powierzchni obrobionej i dokładność wymiarową, są powłoki przeciwzużyciowe. Z tego powodu w pracy [A6] podjęto ten temat. W badaniach zastosowano płytki skrawające VBGT 160408 na których nałożone były powłoki 1105 (TiAlN), 1115 (TiAlN+TiAlN), S05F (TiCrN+Al₂O₃+TiN) i S205 (TiCN+Al₂O₃+TiN). Powłoki 1105 i 1115 nakładane są metodą PVD, natomiast powłoki S05F i S205, nakładane są metodą CVD. Pomiar twardości nałożonych powłok wykazał, że największą twardością cechuje się powłoka 1115 (2574,14 HV), natomiast najmniejszą twardością cechuje się powłoka S205 (1614,83 HV). Zrealizowane badania wykazały, że największe odchylenie wymiaru rzeczywistego od nominalnego, nastąpiło po skrawaniu ostrzem z powłoką 1115, a zatem z powłoką o największej twardości. Natomiast najmniejsze odchylenie wymiaru rzeczywistego od nominalnego, nastąpiło po skrawaniu ostrzem z powłoką S205, czyli z powłoką o najmniejszej twardości (rys. 3.).



Rys. 3. Wartość odchylenia wymiaru rzeczywistego od nominalnego w funkcji drogi skrawania [A6]

Znacznie większe odchylenie wartości rzeczywistej od nominalnej dla ostrza z powłoką 1115 w porównaniu do ostrza powłoką S205 jest konsekwencją znacznie większego zużycia ostrza z powłoką 1115, co przedstawia rys. 4. Wynik taki pokazuje, że twardość ostrza skrawającego zastosowanego do obróbki wykończeniowej nie jest jedynym czynnikiem od którego zależy zużycie ostrza.



Rys. 4. Topografia ostrza VBGT 160408 po toczeniu stopu Inconel 718; a) powłoka 1115, b) powłoka S205 [A6]

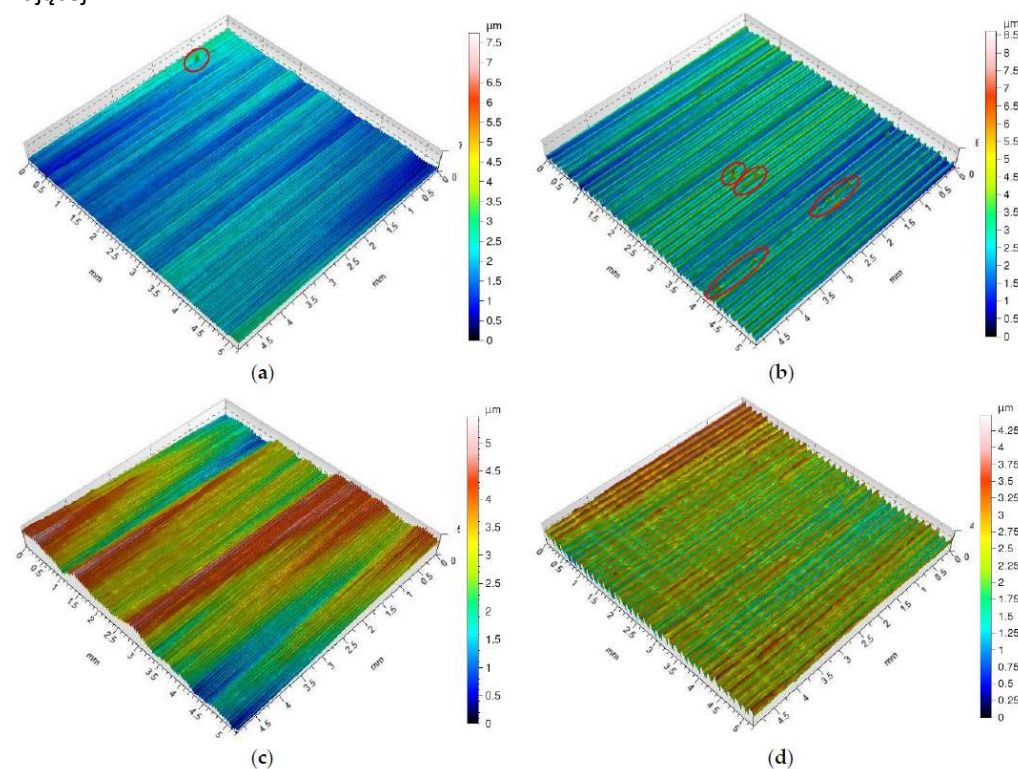
Przeprowadzona analiza mikrostruktury warstwy wierzchniej obrobionej powierzchni pozwoliła stwierdzić, że najmniejszą głębokość odkształcenia ziaren, uzyskano dla powierzchni obrobionej płytką skrawającą z powłoką S205. Zatem mniejsze zużycie ostrza skrawającego generuje mniejszą deformację warstwy wierzchniej. Jednak chropowatość powierzchni nie zawsze odzwierciedla odkształcenie ziaren w mikrostrukturze warstwy wierzchniej. Obrobiona powierzchnia, dla której odnotowano największe wartości parametrów chropowatości, nie miała największego odkształcenia ziaren.

W pracy [A5] przeprowadzono analizę topografii powierzchni uzyskanych po toczeniu ostrzami konwencjonalnymi i ostrzami przygotowanymi metodą SPS (Spark Plasma Sintering). Wszystkie testowane ostrza miały kształt płytki WNMG 080408, przy czym kształt płytki wykonanej techniką SPS został trochę zmodyfikowany. Modyfikacja polegała na dodaniu promienia pomiędzy promieniem naroża płytki a krawędzią styczną do tego promienia. W wyniku tego, wydłużono krawędź krzywoliniową, która ma bezpośredni kontakt z obrabianym materiałem.

Powierzchnie obrobione płytką SPS bez udziału cieczy chłodząco-smarującej (rys. 5a i rys. 5b) charakteryzują się nalepzeniami pochodzącymi najprawdopodobniej z fragmentów wiórów. Częstotliwość pojawiania się nalepień jest zależna od wartości posuwu, im większy posuw, tym większa ilość nalepień na powierzchni. Zjawiska tego nie zaobserwowano na powierzchniach obrobionych płytką SPS z udziałem cieczy chłodząco-smarującej (rys. 5c i rys. 5d). Powierzchnia uzyskana po toczeniu z posuwem $f = 0.05$ mm/obr cechuje się falistością, a odległość pomiędzy sąsiednimi grzbietami wynosi około 1 mm. Natomiast na powierzchni obrobionej z posuwem $f = 0.15$ mm/obr widoczne są ślady posuwu charakterystyczne dla operacji toczenia.

Porównanie powierzchni obrobionych ostrzem konwencjonalnym i wykonanym techniką SPS wykazało, że częstotliwość występowania oblepień na powierzchni obrobionej jest zależna od wartości posuwu i promienia naroża płytki (a raczej długości czynnej krawędzi skrawającej z obrabianym materiałem). W przypadku konwencjonalnej płytki skrawającej, większą częstotliwość oblepień zaobserwowano na powierzchni obrobionej z najmniejszą wartością posuwu zastosowaną podczas badań, $f = 0.05$ mm/obr. Natomiast po skrawaniu płytką SPS, większą częstotliwość występowania oblepień na powierzchni obrobionej zarejestrowano po skrawaniu z posuwem $f = 0.15$ mm/obr. Niezależnie od rodzaju zastosowanego ostrza i wartości posuwu, oblepień

na powierzchni obrobionej nie stwierdzono po obróbce z zastosowaniem cieczy chłodząco smarującej.

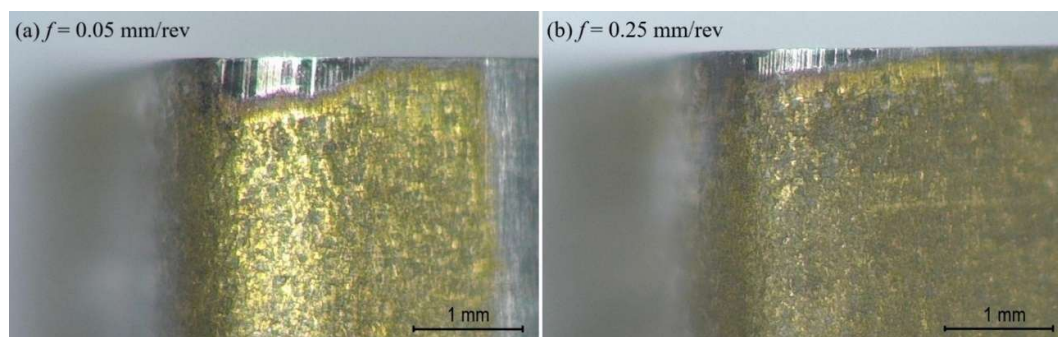


Rys. 5. Topografia powierzchni obrobionej po toczeniu stopu Inconel 718 ostrzem SPS;
a) toczenie na sucho, $f = 0,05$ mm/obr, b) toczenie na sucho, $f = 0,15$ mm/obr,
c) toczenie z chłodzeniem, $f = 0,05$ mm/obr, d) toczenie z chłodzeniem, $f = 0,15$ mm/obr, [A5]

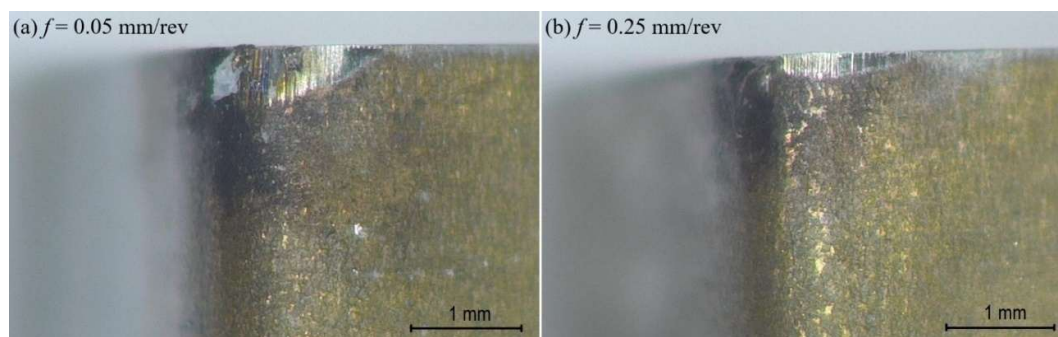
Kontynuację badań dotyczącą zastosowania ostrzy wykonanych techniką SPS do toczenia stopów niklu przedstawiono w pracy [A2], w której oceniono zużycie ostrzy skrawających, wykonano analizę EDS dla zastosowanych ostrzy, przeprowadzono ocenę morfologii wiórów wraz z określeniem częstotliwości drgań wiórów oraz określono współczynnik tarcia badanych ostrzy.

Badania zużycia ostrzy skrawających wykonanych techniką SPS wykazują podobne cechy, jakie pojawiły się u innych badaczy, którzy badali zużycie ostrzy wykonanych z węglików spiekanych podczas obróbki superstopów na osnowie niklu. Rys. 6 i Rys. 7 przedstawiają powierzchnię boczną zużytych ostrzy skrawających po toczeniu stopu Inconel 718 z chłodziwem i bez chłodziwa z posuwami $f = 0,05$ mm/obr i $f = 0,25$ mm/obr. We wszystkich badanych przypadkach stwierdzono starcie na powierzchni przyłożenia, różna jest jednak skala zużycia. Zarówno w przypadku obróbki z chłodzeniem, jak i bez chłodzenia szersze pasmo starcia zaobserwowano przy zastosowaniu najmniejszej badanej wartości posuwu $f = 0,05$ mm/obr. Podczas badań każde ostrze usuwało tą samą objętość materiału, jednak ostrze, które skrawało z posuwem $f = 0,05$ mm/obr było zaangażowane w materiale pięciokrotnie dłużej niż ostrze pracujące z posuwem $f = 0,25$ mm/obr. Zatem na wartość zużycia na powierzchni przyłożenia określona wskaźnikiem VB_c większy wpływ ma czas kontaktu z obrabianym materiałem, niż obciążenie ostrza wynikające z większego przekroju wióra przy posuwie $f = 0,25$ mm/obr. Istotną różnicą pomiędzy ostrzami skrawającymi z chłodzeniem (rys. 6), a ostrzami skrawającymi bez chłodzenia (rys. 7), jest utlenianie powierzchni przyłożenia tych drugich. Przejawia się to dekoloryzacją powierzchni płytki skrawającej. Zastosowane ostrza skrawające pozbawione były powłok, nie było więc barier chroniących ostrza przed wnikaniem ciepła. Przy czym należy przepuszczać, że większa temperatura

została wygenerowana podczas skrawania z posuwem $f = 0,05$ mm/obr, ponieważ obszar zmian jest dużo większy niż dla posuwu $f = 0,25$ mm/obr. Większa temperatura ma wpływ na zużycie ostrza określone wskaźnikiem VB_c . Wartość tego wskaźnika przy obróbce z posuwem $f = 0,05$ mm/obr jest ponad dwukrotnie większa niż przy skrawaniu z posuwem $f = 0,25$ mm/obr, dla tych samych warunków skrawania.



Rys. 6. Objawy zużycia powierzchni przyłożenia po toczeniu stopu Inconel 718 z chłodzeniem [A2]



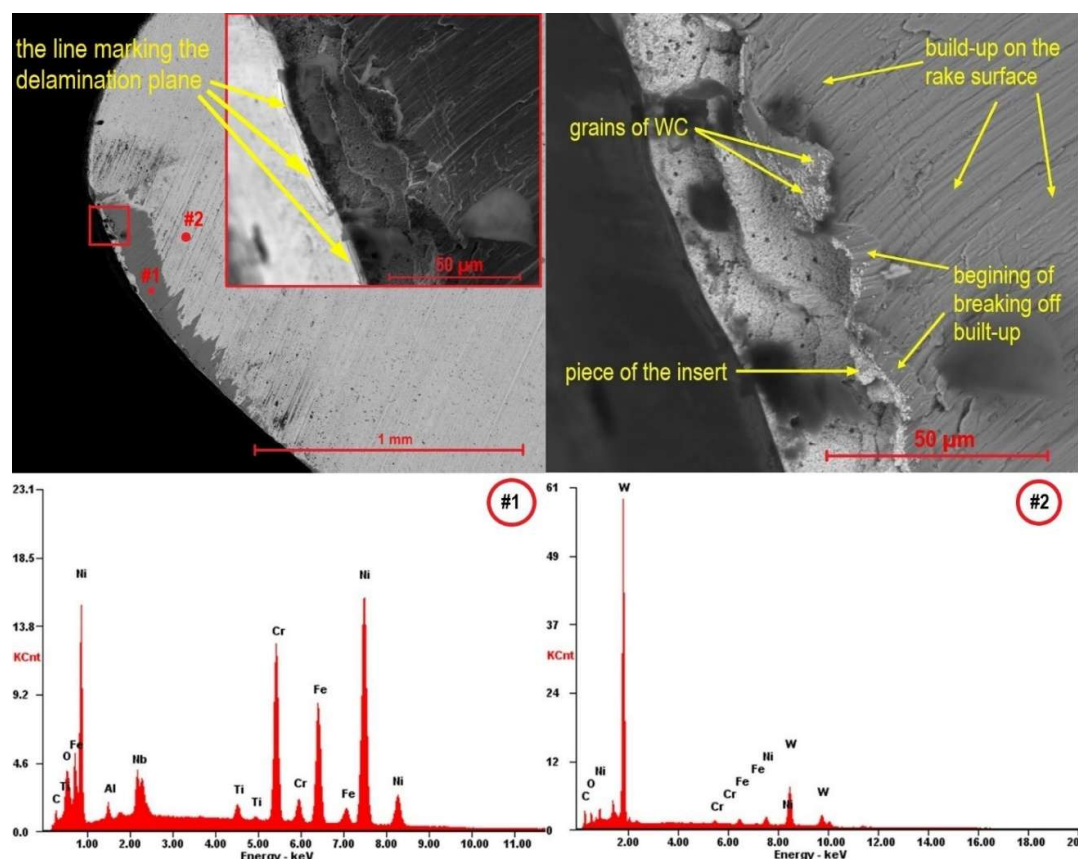
Rys. 7. Objawy zużycia powierzchni przyłożenia po toczeniu stopu Inconel 718 bez chłodzenia [A2]

Obraz SEM powierzchni natarcia oraz analiza EDS powierzchni natarcia ostrza w punktach #1 i #2 po skrawaniu z chłodzeniem z posuwem $f = 0.05$ mm/obr. (rys. 8) pokazuje, że zrywany narost wyrywa z ostrza pojedyncze ziarna materiału ostrza, a nawet całe jego fragmenty. Widoczna jest również delaminacja, która przebiega równolegle do powierzchni natarcia. Na obrazie SEM widoczna jest linia wyznaczająca kolejną płaszczyznę delaminacji. Analiza EDS wykonana w punktach #1 i #2 (Tabela 1) wykazała obecność O (odpowiednio 10.06 at % i 12.26 at %). Oznacza to, że zarówno narost (punkt #1), jak i powierzchnia ostrza (punkt #2 oddalony około 0.3 mm od krawędzi skrawającej) ulegają utlenieniu w podobnym stopniu. Analiza EDS w punkcie #2, oprócz W (83.32 wt%) i C (7.7 wt%), wykazała również obecność Ni (3.44 wt%), Cr (0.88 wt%) i Fe (1.77 wt%). Zapewne są to śladowe ilości obrabianego materiału pozostawione przez spływający wiór po powierzchni natarcia.

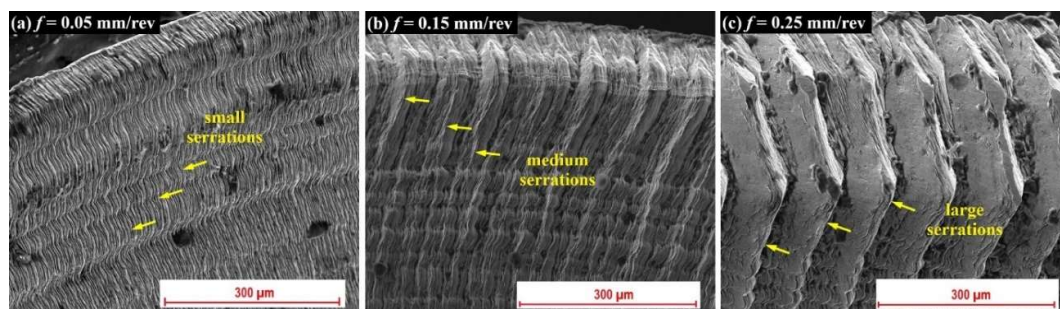
Tabela 1. Analiza EDS powierzchni natarcia ostrza SPS w punktach (#1-#2) z rys. 8 ($f = 0.05$ mm/obr.) [A2]

weight %									
Point no.	Ni	Cr	Fe	O	Al	Nb	Ti	C	W
1	52.23	17.00	16.34	3.46	1.08	5.01	1.19	3.70	
2	3.44	0.88	1.97	2.70				7.70	83.32

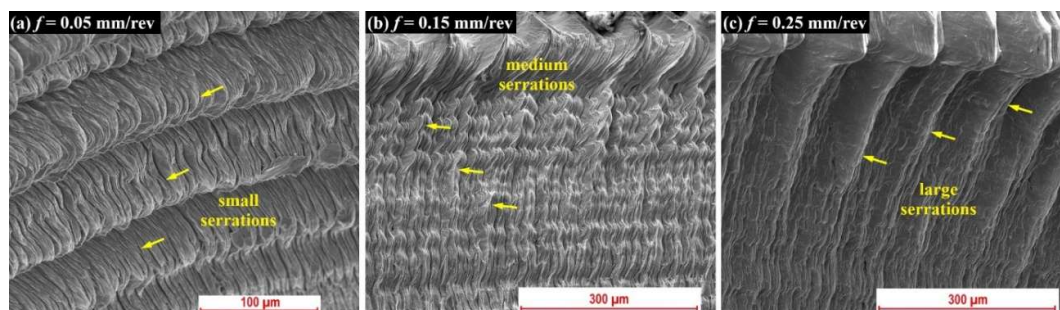
atom %									
Point no.	Ni	Cr	Fe	O	Al	Nb	Ti	C	W
1	41.34	15.19	13.59	10.06	1.86	2.50	1.16	14.30	
2	4.26	1.24	2.57	12.27				46.67	33.00

Rys. 8. Obraz SEM i analiza EDS powierzchni natarcia ostrza SPS po toczeniu stopu Inconel 718 z chłodzeniem, $f = 0.05$ mm/obr [A2]

Badania przedniej strony wiórów pokazują wspólną cechę dla wszystkich zastosowanych wartości posuwów – ząbkowanie. Rysunki 9–10 pokazują, że podczas skrawania Inconelu 718 płytką skrawającą wykonaną techniką SPS, ząbkowanie w większym stopniu zależy od wartości posuwu aniżeli od chłodzenia/smarowania. Pomiedzy wiórem uzyskanym z posuwem $f = 0.25$ mm/obr. z chłodzeniem (rys. 9) i bez chłodzenia (rys. 10) nie ma znacznych różnic, w obu przypadkach mamy do czynienia z dużym ząbkowaniem. Mniejsze wartości zastosowanych posuwów generują wióry z małym ząbkowaniem.

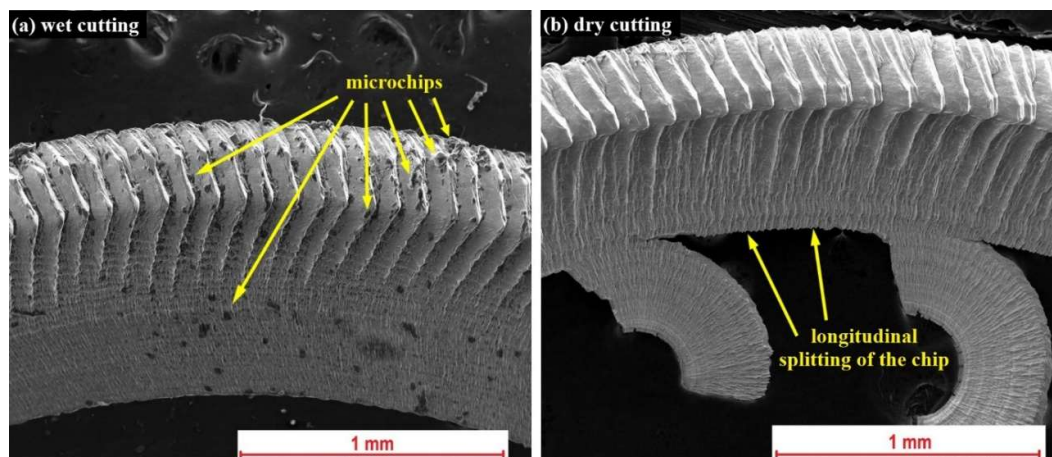


Rys. 9. Morfologia wiórów po toczeniu stopu Inconel 718 z chłodzeniem [A2]



Rys. 10. Morfologia wiórów po toczeniu stopu Inconel 718 bez chłodzenia [A2]

Jedną z różnic pomiędzy wiórami otrzymanymi podczas obróbki na sucho i z udziałem cieczy, jest rozdzielanie się wzdłużne wiórów generowanych podczas obróbki bez chłodzenia. Zjawisko to widoczne jest zwłaszcza po skrawaniu z większymi wartościami zastosowanych posuwów (rys. 11). Rozdzielanie to następuje w miejscu zwiększania się przekroju poprzecznego wióra, a przyczyną tego zjawiska jest tarcie wióra o powierzchnię natarcia. Podczas toczenia z chłodzeniem w wiórze nie pojawiają się braki ciągłości (rys. 11a), i nie jest on tak zdeformowany, jak po obróbce bez chłodzenia (rys. 11b).

Rys. 11. Wióry po toczeniu stopu Inconel 718 (strona przednia) z posuwem $f = 0,25$ mm.obr. [A2]

W pracy, jako wskaźnik odkształcenia plastycznego przyjęto współczynnik skrócenia wióra k_i , określany w warunkach skrawania nieswobodnego. Wskaźnik ten został wyznaczony metodą wagową. Ważenie wiórów, pobranych w trakcie realizacji badań, odbywało się z wykorzystaniem elektronicznej wagi laboratoryjnej ATZ320 z dokładnością 0.001 g.

Współczynnik skrócenia wióra k_l określono na podstawie następującej zależności (3):

$$k_l = \frac{m}{L_{ch} \cdot A \cdot \gamma} \quad (3)$$

gdzie:

m – masa wióra [g],

L_{ch} – długość wióra [mm],

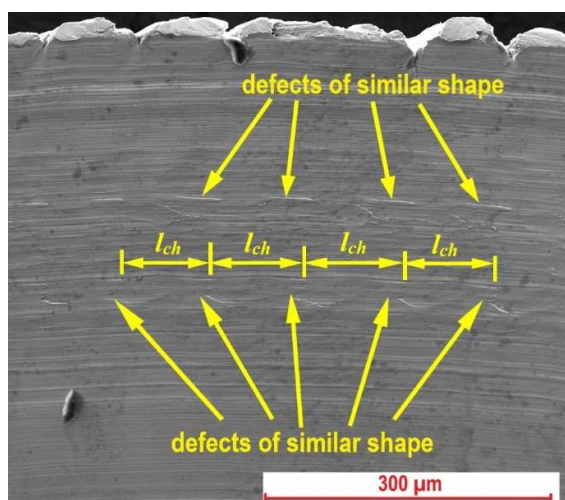
A – przekrój poprzeczny warstwy skrawanej, został wyznaczony graficznie w aplikacji Catia V5R20 [mm²],

γ – gęstość Inconelu 718, $\gamma = 8,19 \div 8,47$ [g/mm³]

Dla wiórów uzyskanych podczas skrawania z chłodzeniem i bez chłodzenia z posuwem $f = 0,25$ mm/obr. określono średnią częstotliwość drgań wióra, bazując na występujących deformacjach na tylnej stronie powierzchni wióra, ukierunkowanych równoległe do kierunku spływu wióra, f_{ch} z zależności (4):

$$f_{ch} = \frac{1000 \cdot v_c}{60 \cdot k_l \cdot L_{ch}} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

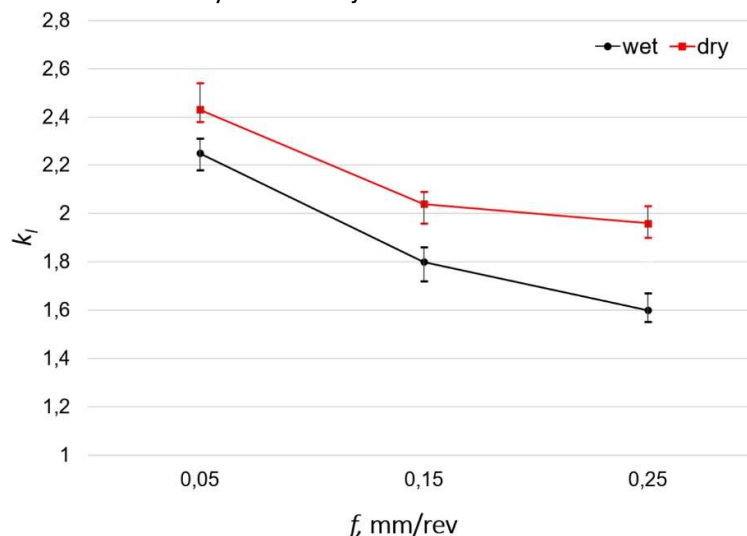
Sposób określenia średniej odległości pomiędzy kolejnymi powtarzalnymi defektami na tylnej powierzchni wióra przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Pomiar odległości pomiędzy powtarzalnymi deformacjami na tylnej stronie wióra [A2]

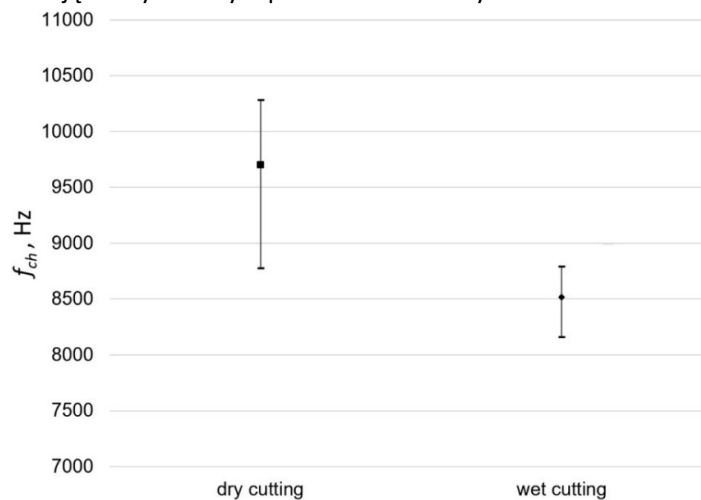
Wartości współczynnika skrócenia wióra k_l zostały przedstawione na rys. 13. Współczynnik skrócenia wióra k_l w funkcji posuwu jest funkcją malejącą, zarówno dla skrawania z chłodzeniem, jak i bez chłodzenia. Większe wartości tego współczynnika zaobserwowano podczas obróbki bez udziału cieczy chłodząco-smarującej. Należy zatem przyjąć, że zastosowanie środka chłodząco-smarującego skutecznie zmienia wartość współczynnika tarcia μ , gdyż przekrój wióra i prędkość skrawania (czynniki, które mają wpływ na nacisk na powierzchnię natarcia) przy danym posuwie się nie zmieniają. Wartość współczynnika skrócenia wióra k_l jest o 8% i 22% większa podczas toczenia bez chłodziwa niż z chłodziwem, odpowiednio dla posuwów 0.05 mm/obr. i 0.25 mm/obr. Dane literaturowe potwierdzają, że wartość zastosowanego posuwu podczas skrawania stopu Inconel 718 ma wpływ na generowane naprężenia w warstwie wierzchniej. Jego zwiększanie powodowało wzrost naprężeń ściskających, jednocześnie wartość posuwu wpływa na stopień umocnienia przez zgniot. Wzrost jego wartości powoduje większe umocnienie. Można więc znaleźć zależność pomiędzy współczynnikiem skrócenia wióra, naprężeniami war-

stwy wierzchniej i jej umocnienia się. Zatem zjawisko skrócenia wióra ma ważne znaczenie praktyczne, ponieważ zmiana wartości współczynnika skrócenia wióra k_l pozwala sądzić o kierunku zmian właściwości i cech warstwy wierzchniej.



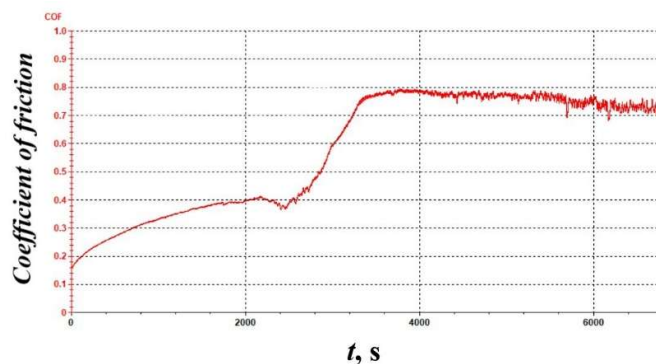
Rys. 13. Współczynnik skrócenia wióra k_l po toczeniu stopu Inconel 718 [A2]

Określenie współczynnika skrócenia wióra k_l i pomiar odległości powtarzalnych deformacji na tylnej stronie wióra pozwoliło na określenie częstotliwości drgań wióra podczas skrawania z posuwem $f = 0,25$ mm/obr (rys. 14). Średnia wartość tej częstotliwości podczas toczenia na sucho wyniosła 9701 Hz, podczas gdy obróbka na mokro wygenerowała drgania o częstotliwości, której wartość średnia była na poziomie 8514 Hz. Zatem częstotliwość drgań wióra przy zastosowaniu chłodzenia jest o prawie 14% mniejsza, niż częstotliwość generowana bez zastosowania chłodzenia. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że wyniki uzyskane dla toczenia na sucho cechują się większym rozrzutem, niż dla toczenia na mokro. Większe wartości częstotliwości drgań wióra podczas obróbki bez chłodzenia mają wpływ na większe zużycie ostrza skrawającego, ponieważ drgania wpływają negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową. Potwierdza to większe zużycie ostrza skrawającego z posuwem $f = 0,25$ mm/obr. bez zastosowania cieczy chłodząco-smarującej, niż ostrze skrawające z tym samym posuwem lecz z użyciem chłodziwa.



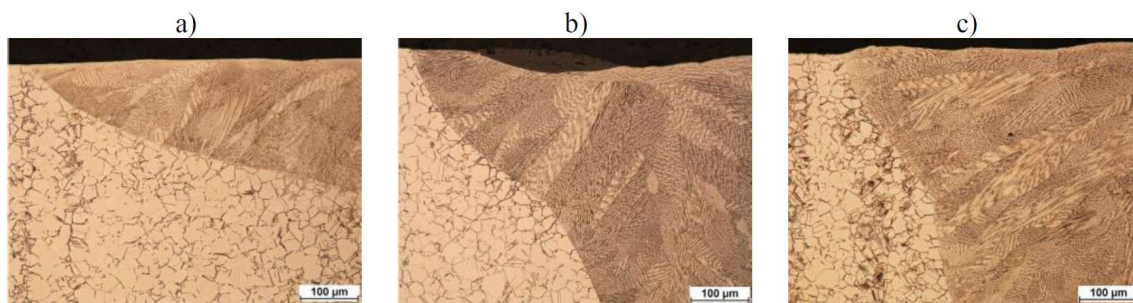
Rys. 14. Częstotliwość drgań wióra podczas toczenia stopu Inconel 718 z posuwem $f = 0,25$ mm/obr. w zależności od warunków chłodzenia/smarowania [A2]

Zmniejszenie tarcia pomiędzy powierzchnią natarcia i wiórem oraz pomiędzy powierzchnią przyłożenia i powierzchnią obrabianą jest jednym z czynników decydujących o zwiększeniu okresu trwałości narzędzi stosowanych w procesie skrawania stopów na osnowie niklu. Przebieg współczynnika μ w funkcji czasu przedstawiono na rys. 15. Początkowa wartość współczynnika tarcia jest mniejsza od 0.2. Do 2000 s, czyli około 33 minut, wzrost współczynnika tarcia wykazuje stabilny wzrost osiągając na koniec tego etapu wartość 0.4. Jest to dwukrotnie więcej niż na początku testu. Po czasie 2500 s (41.6 minut) następuje gwałtowny wzrost współczynnika μ do wartości 0.76, aby po 3400 s (56.7 minut) ustabilizować się w zakresie 0.72–0.76. Przyjmując jako punkt odniesienia fakt, że trwałość ostrzy z węglików spiekanych stosowanych do obróbki stopów na osnowie niklu wynosi około 15 minut, czyli 900 s, współczynnik tarcia nie przekracza w tym czasie wartości 0,35.



Rys. 15. Współczynnik tarcia ostrza SPS w funkcji czasu [A2]

W pracy [A13] przeprowadzono badania wpływu laserowego wspomagania toczenia na mikrostrukturę warstwy wierzchniej przy zastosowaniu dwóch rodzajów powłok absorpcyjnych nakładanych na obrabianą powierzchnię. Zaobserwowano, że głębokość oddziaływania strumienia ciepła lasera jest silnie skorelowana z obecnością warstwy pochłaniającej, jednak nie ma istotnych różnic w głębokości tworzenia struktury dendrytycznej pomiędzy testowanymi warstwami wierzchnimi (rys. 16).

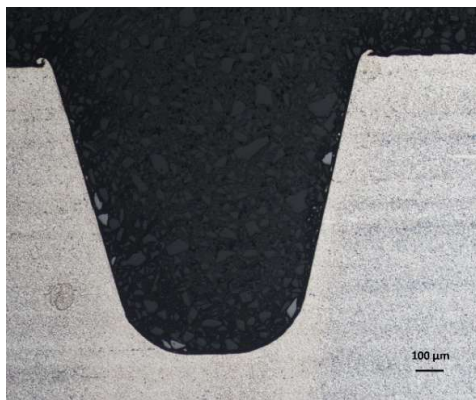


Rys. 16. Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Inconel 718 po nagrzewaniu laserem z nałożonymi powłokami absorpcyjnymi: a) czysta powierzchnia, b) czarna powłoka, c) biała powłoka [A13]

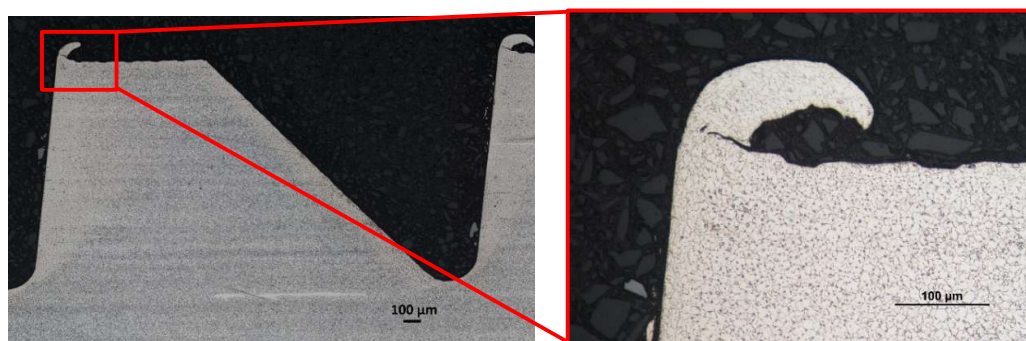
Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej przeprowadzono również w pracy [A11]. Dotyczyły one trzech rodzajów gwintów stosowanych w przemyśle lotniczym: trójkątnym – UNJ, trapezowym symetrycznym – ACME, trapezowym asymetrycznym – BUTTRESS. Toczenie gwintów, ze względu na fakt wykonywania ich w końcowej fazie obróbki danej części, jest jednym z bar-

dzień wymagających fragmentów procesu. Podczas toczenia wzdłużnego lub poprzecznego, głębokością skrawania można zwiększać lub zmniejszać długość czynnej krawędzi skrawającej. W przypadku gwintów, w ostatnim przejściu, płytka skrawająca ma kontakt z materiałem obrabianym na całej długości obrabianego profilu. Sytuacja ta, nierzadko jest przyczyną pojawiania się drgań. Możliwości uniknięcia drgań można szukać poprzez zmianę: prędkości skrawania, liczby przejść (która określa głębokość skrawania) i strategii gwintowania.

Analiza mikrostruktur pozwoliła stwierdzić, że w przypadku gwintów UNJ i ACME największa deformacja ziaren nastąpiła przy promieniu dna wrębu (rys. 17). Natomiast dla gwintu BUTTRESS, największe zniekształcenie ziaren warstwy wierzchniej zaobserwowano na boku „czynnym” gwintu, którego półką zarysu wynosi 7° . Zarówno na rysunku 17, jak i na rysunku 18, zarejestrowano wyraźną wypływkę materiału w miejscu przecięcia powierzchni bocznej wrębu ze średnicą wierchołkową. Średnica wierchołkowa była wykonywana wcześniej przy użyciu płytki VBGT 160408. Tocząc gwint część obrabianego materiału została „wypchnięta” na zewnątrz, na co wskazuje widoczna nieciągłość, co podkreśla iż materiał ten nie jest jednorodny.

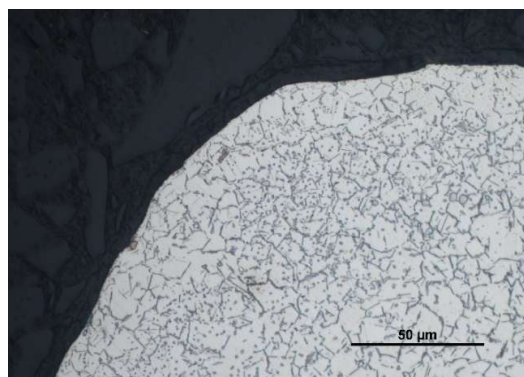


Rys. 17. Widok mikrostruktury warstwy wierzchniej gwintu ACME [A11]



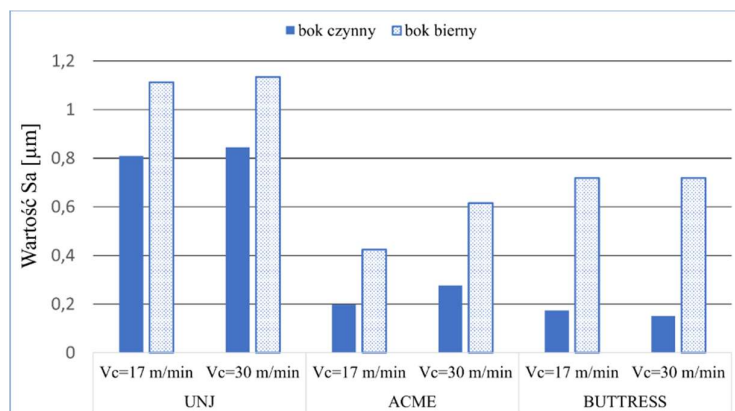
Rys. 18. Widok mikrostruktury warstwy wierzchniej gwintu BUTTRESS [A11]

Wypływkę materiału obrabianego nie zaobserwowano na gwincie UNJ (rys. 19). Efekt taki uzyskano dzięki zastosowaniu płytki skrawającej z nałożonym promieniem, który usuwa materiał znajdujący się pomiędzy bokiem gwintu, a średnicą zewnętrzną gwintu. W gwintach trapezowych również można zastosować płytki o profilu zakończonym promieniem jednak należy pamiętać, iż występują tu znacznie większe opory skrawania niż w przypadku gwintów o zarysie trójkątnym.



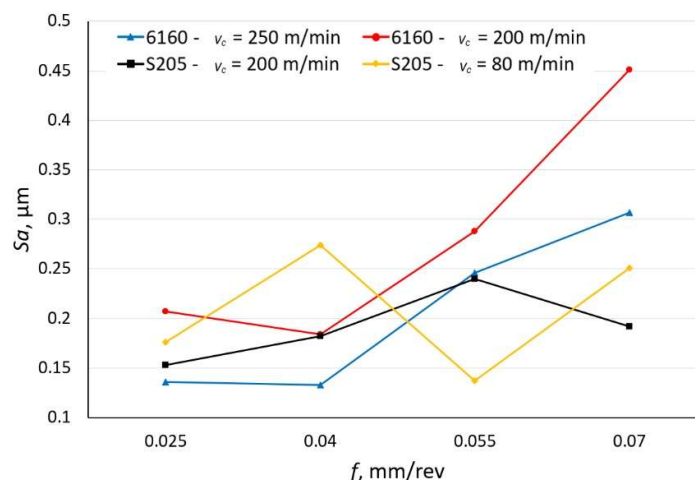
Rys. 19. Widok mikrostruktury warstwy wierzchniej gwintu UNJ [A11]

Gwinty wykonywane na elementach silników lotniczych przenoszą duże obciążenia. Z tego powodu bardzo często stosuje się gwinty asymetryczne typu BUTTRESS, w których bok gwintu o mniejszym kącie jest tzw. bokiem czynnym (przenoszącym obciążenie), a bok o większym kącie jest bokiem biernym. Z tego powodu w pracy [A4] przeprowadzono analizę parametrów 3D gwintów UNJ, ACME i BUTTRESS. Gwinty wykonywane były z zastosowaniem dwóch prędkości skrawania i takiej samej strategii wykonywania gwintów. Pomiar parametru Sa na bokach wykonanych gwintów wykazały znaczne różnice pomiędzy bokiem czynnym i biernym (rys. 20). Bok bierny dla gwintu ACME cechował się dwukrotnie większą wartością parametru Sa , natomiast dla gwintu BUTTRESS, parametr Sa był trzykrotnie większy na boku biernym. Najmniejsza różnica parametru Sa zaobserwowana została dla gwintu UNJ. Jednocześnie dla gwintu tego przekroczony został warunek chropowatości $Sa \leq 0,8 \mu\text{m}$. W warunkach produkcyjnych, chropowatość gwintu oceniana jest metodą wzrokową, ponieważ ani metody stykowe, ani metody optyczne nie pozwalają na pomiar chropowatości gwintu. Ocena gwintu metodą wzrokową jest oceną subiektywną osoby, która ją wykonuje. Gwinty oceniane w pracy [A4] przed pocięciem w celu dokonania pomiaru optycznego i stykowego, zostały ocenione przez osobę, która kontroluje gwinty na częściach lotniczych. Wg oceny wzrokowej, mniejszą chropowatość miały gwinty wykonane z prędkością skrawania 30 m/min. Zrealizowane pomiary wykazały, że tylko bok czynny gwintu BUTTRESS cechował się mniejszą chropowatością po obróbce z prędkością skrawania 30 m/min. Pozostałe gwinty cechowały się mniejszą chropowatością po obróbce z prędkością skrawania 17 m/min.

Rys. 20. Wartości Sa dla zmierzonych powierzchni gwintu [A4]

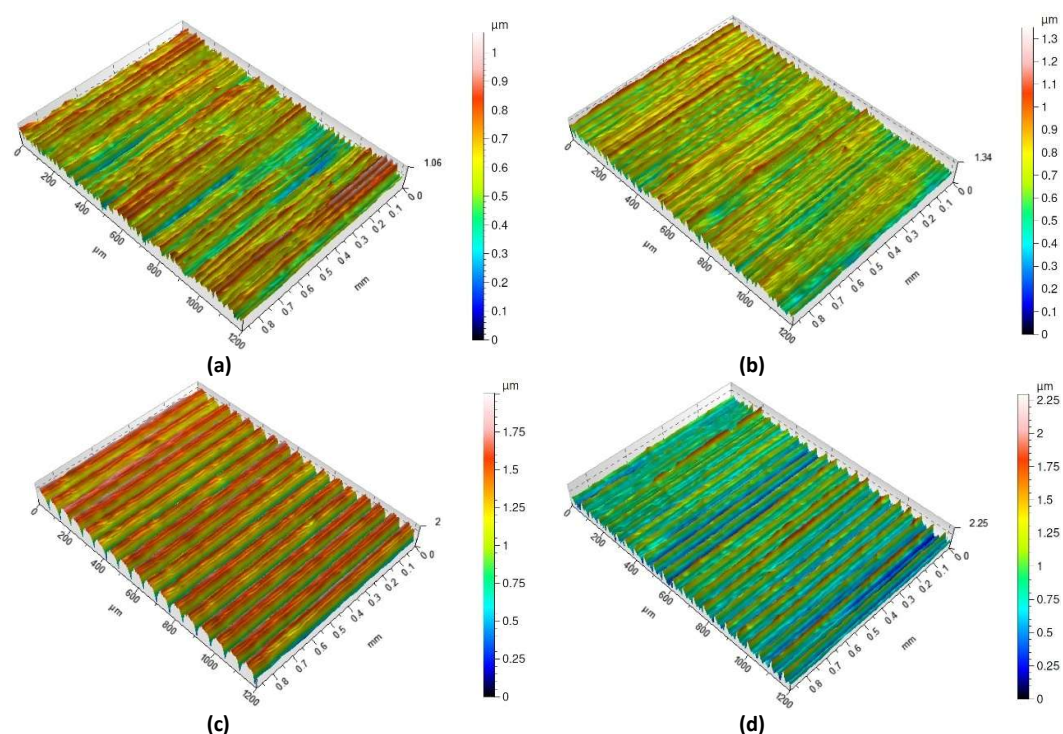
Artykuł [A1] koncentruje się na problemach badawczych, które są związane z chropowatością powierzchni i jej nośnością. Głównym celem badań było określenie wpływu parametrów skrawania oraz materiału ostrza na jakość powierzchni. Większość badaczy skupia się na badaniach dotyczących zwiększenia wydajności produkcji stosując większe wartości posuwów. Tymczasem w przemyśle lotniczym, gdzie bardzo szeroko stosowane są żaroodporne stopy niklu, zwłaszcza w gorącej części silników lotniczych, celem obróbki mechanicznej jest uzyskanie jak najmniejszych wartości parametrów chropowatości powierzchni. W gorącej sekcji silnika lotniczego niemożliwym jest zastosowanie elementów z gumy bądź tworzyw sztucznych jako uszczelniaczy. Z tego powodu w konstrukcji silników spotyka się warunek $Ra < 0.4 \mu\text{m}$. Oznacza to, że przylegające powierzchnie mają spełnić funkcję uszczelnienia, a zatem powinny zostać wykonane z jak najmniejszą chropowatością.

Parametr Sa (rys. 21) przyjęto jako ekwiwalent parametru Ra , aczkolwiek dane literaturowe pokazują, że w rzeczywistości parametr Sa może osiągać większe wartości niż parametr Ra . Jego wartość znacząco wzrasta wraz ze wzrostem posuwu. Przebiegi funkcji przedstawione na rysunku 12 zdają się to potwierdzać, jednakże zaobserwowano anomalię w przypadku ostrza S205 (wykonanego z węglików spiekanych) zastosowanego z prędkością skrawania $v_c = 80 \text{ m/min}$. Funkcja dla tego przypadku najmniejszą wartość $0.137 \mu\text{m}$ osiąga przy posuwie $f = 0.055 \text{ mm/obr}$, natomiast największą wartość $0.274 \mu\text{m}$ zarejestrowano przy posuwie $f = 0.04 \text{ mm/obr}$. Oszacowane wartości parametru $Sa = 0.027; 0.066; 0.123; 0.197 \mu\text{m}$ dla płytki wykonanej z ceramiki 6160 i $Sa = 0.026; 0.065; 0.121; 0.196 \mu\text{m}$ dla płytki z węglików spiekanych z powłoką S205, odpowiednio dla posuwów $f = 0.025; 0.04; 0.055; 0.07 \text{ mm/obr}$, w większości analizowanych przypadków nie znalazła potwierdzenia w przeprowadzonych badaniach. Najbliższej prognozowanej wartości jest wynik zarejestrowany po obróbce ostrzem S205 z prędkością skrawania $v_c = 200 \text{ m/min}$. Co prawda zmniejszenie wartości posuwu pozwala na zmniejszenie wartości parametru Sa , jednak nawet dla tej prędkości skrawania rzeczywiste wartości kilkukrotnie odbiegają od wartości teoretycznych. Poza jednym przypadkiem (obróbka płytką S205 z prędkością $v_c = 80 \text{ m/min}$ przy posuwie $f = 0.055 \text{ mm/obr}$), widoczny jest wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni. Zwiększenie tego parametru skrawania pozwala uzyskać mniejsze wartości parametru Sa , zarówno dla płytki 6160, jak i S205.



Rys. 21. Wpływ posuwu f na parametr Sa po toczeniu stopu Inconel 718 [A1]

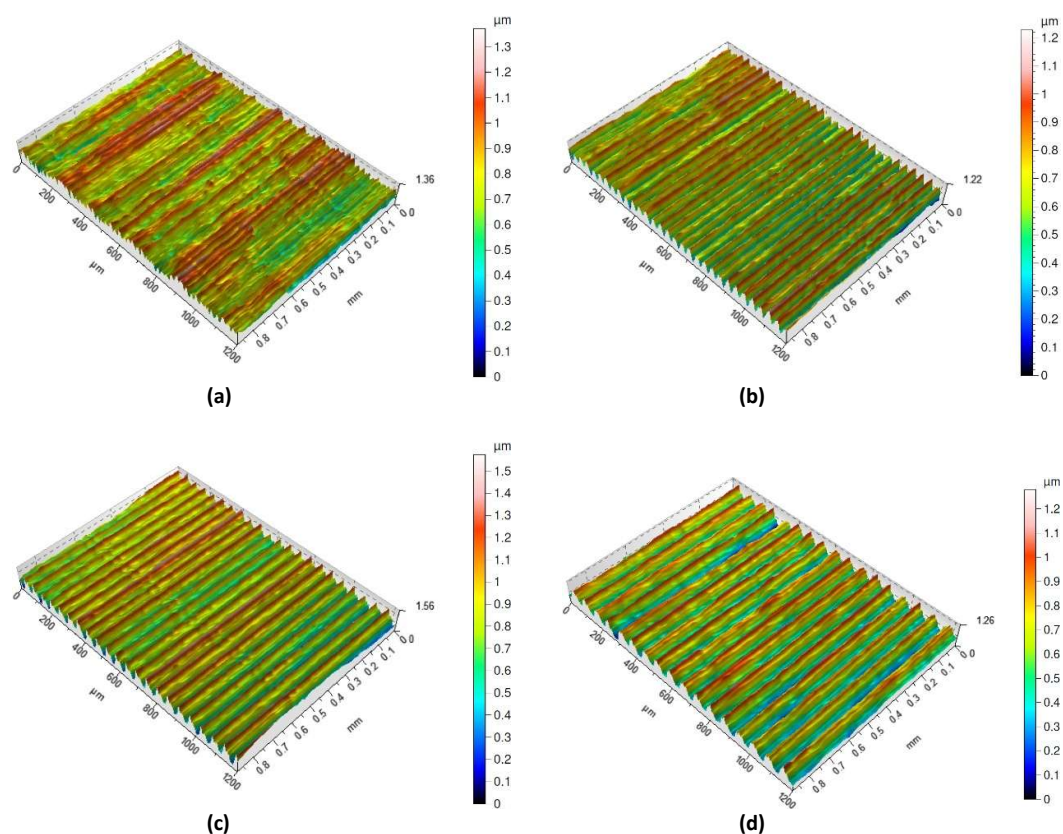
Na rysunkach 22–23 zostały przedstawione mapy izometryczne obrobionych powierzchni ostrzami z węglików spiekanych i ceramiki. Wszystkie analizowane powierzchnie cechują się charakterystycznymi dla toczenia śladami obróbki. Powierzchnie otrzymane po obróbce ostrzem 6160 z prędkością skrawania $v_c = 250$ m/min przy posuwach $f = 0.025$ mm/obr i $f = 0.04$ mm/obr cechują się zbliżonymi wartościami parametru S_a , lecz obrazy izometryczne są różne (rys. 22a i 22b). Oznacza to, że dokonywanie oceny poszczególnych powierzchni tylko na podstawie parametru S_a jest niewystarczające. Na powierzchni po obróbce ostrzem 6160 z prędkością skrawania $v_c = 250$ m/min przy posuwie $f = 0.025$ mm/obr zaobserwowano większą ilość wysokich grzbietów (znajduje to odzwierciedlenie w parametrze S_p), natomiast przy posuwie $f = 0.04$ mm/rev zaobserwowano większą ilość wysokich dolin. Z funkcjonalnego punktu widzenia korzystniejszą topografię posiada zatem powierzchnia obrobiona z posuwem $f = 0.04$ mm/obr. Pozostałe powierzchnie obrobione płytką 6160 z prędkością skrawania $v_c = 250$ m/min (rys. 22c i 22d) charakteryzują się równomiernym rozmieszczeniem grzbietów, przy czym na powierzchni uzyskanej po toczeniu z posuwem $v_c = 250$ m/min zaobserwowano wysokie pojedyncze piki oraz doliny.



Rys. 22. Topografia powierzchni stopu Inconel 718 po toczeniu ostrzem z ceramiki z prędkością skrawania $v_c = 250$ m/min. (a) $f = 0.025$ mm/obr; (b) $f = 0.04$ mm/obr; (c) $f = 0.055$ mm/obr; (d) $f = 0.07$ mm/obr. [A1]

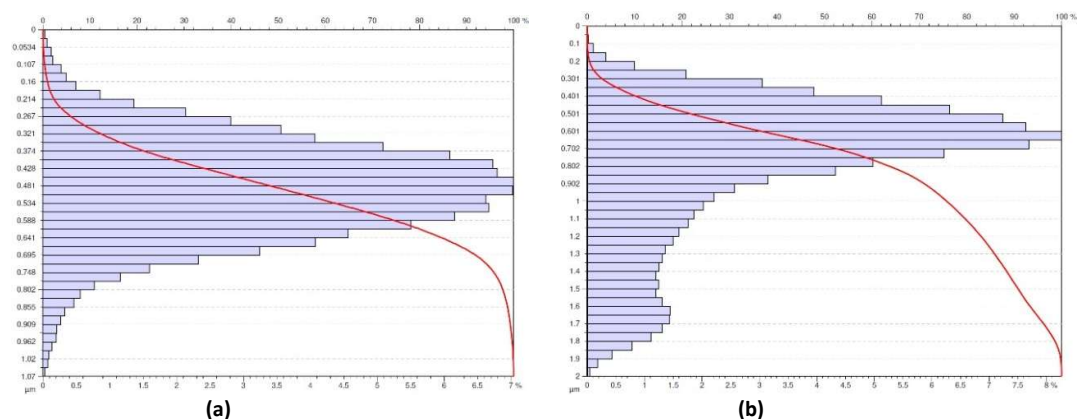
Rysunek 23a–d przedstawia mapy izometryczne powierzchni toczonej płytką S205 z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min. Różnią się one od map izometrycznych uzyskanych po toczeniu ostrzem z ceramiki tym, że dla dwóch najmniejszych wartości posuwu, parametry S_a różnią się od siebie dla poszczególnych wartości posuwu. Powierzchnia uzyskana po obróbce z posuwem $f = 0.025$ mm/obr (rys. 23a) cechuje się większą wartością parametru S_v , a jednocześnie mniejszą wartością parametru S_a , co potwierdza stwierdzenie, że parametr S_a jest mniej wrażliwy na pojedyncze wysokie wzniesienia i doliny. Obraz dla tego posuwu cechuje się nieregularnością i obszarami z wysokimi wzniesieniami. Przy posuwie $f = 0.04$ mm/obr (rys. 23b) również zaobserwować można miejsca z wysokimi wzniesieniami, jednak nie są one tak miejscowo skupione jak przy

niższej wartości posuwu oraz położenie sąsiednich grzbietów jest wyraźniej widoczne. Równomierne rozmieszczenie wzniesień i dolin charakteryzuje powierzchnie obrobione z posuwami $f = 0.055$ mm/obr i $f = 0.07$ mm/obr (rys. 23c i 23d), przy czym powierzchnia uzyskana z posuwem $f = 0.07$ mm/obr cechuje się głębszymi dolinami. Obrazy izometryczne dla powierzchni po toczeniu płytką S205 nie pokazują pojedynczych wzniesień, jak to miało miejsce w przypadku obrazów dla powierzchni toczonej płytką 6160 zarówno z mniejszą, jak i większą zastosowaną dla tej płytki prędkości skrawania.

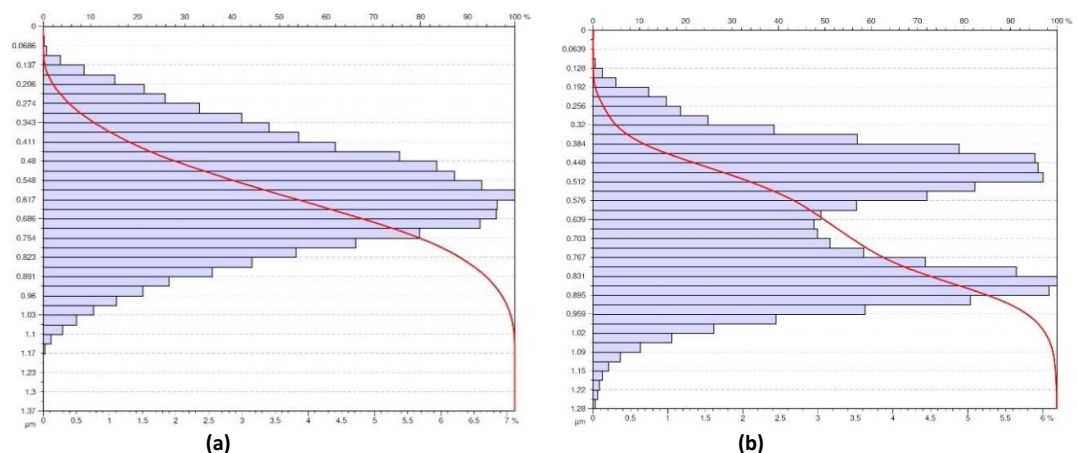


Rys. 23. Topografia powierzchni stopu Inconel 718 po toczeniu ostrzem z węglików spiekanych z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min. (a) $f = 0.025$ mm/obr; (b) $f = 0.04$ mm/obr; (c) $f = 0.055$ mm/obr; (d) $f = 0.07$ mm/obr. [A1]

Krzywe udziału materiałowego, zarówno po toczeniu ostrzem ceramicznym 6160, jak i ostrzem z węglików spiekanych z powłoką S205, cechują się bardziej skoncentrowanym rozkładem gęstości rzędnej dla posuwu $f = 0.025$ mm/obr (rys. 24a i 25a). Zastosowanie posuwu $f = 0.07$ mm/rev wpływa niekorzystnie na rozkład rzędnych, zwłaszcza dla prędkości skrawania $v_c = 200$ m/min po skrawaniu ostrzem S205. Aczkolwiek dla płytki S205 zaobserwowano mniejsze wysokości rzędnych dla posuwu $f = 0.07$ mm/obr (rys. 25b).

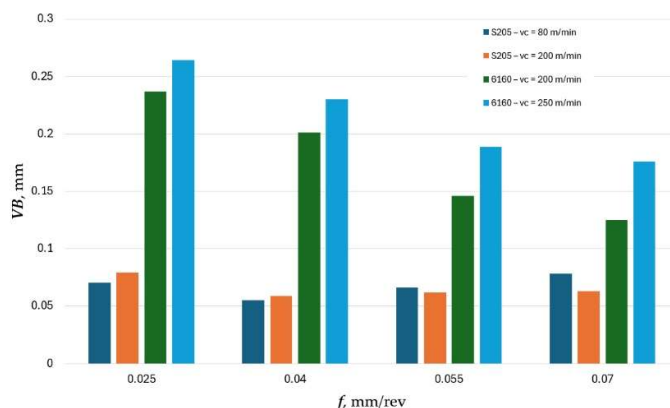


Rys. 24. Krzywa udziału materiałowego powierzchni po toczeniu ostrzem z ceramiki 6160 i prędkością $v_c = 250$ m/min. **(a)** $f = 0.025$ mm/obr; **(b)** $f = 0.07$ mm/obr.

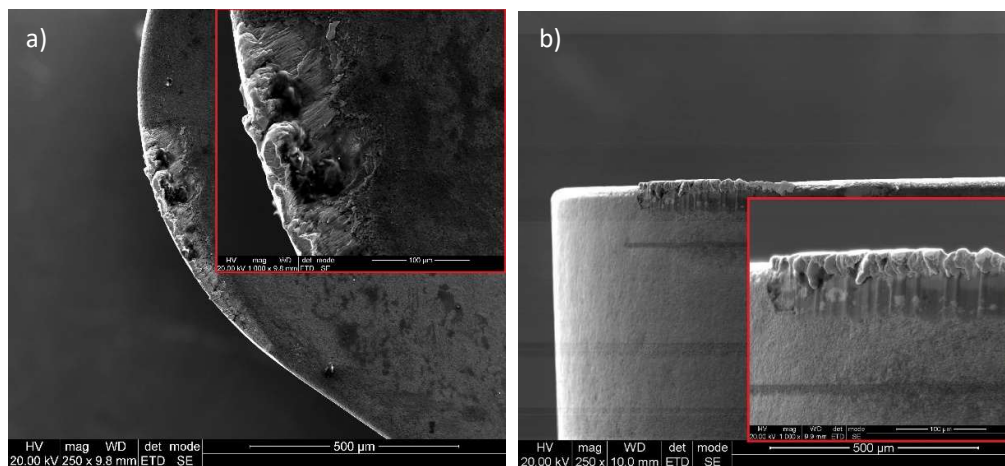


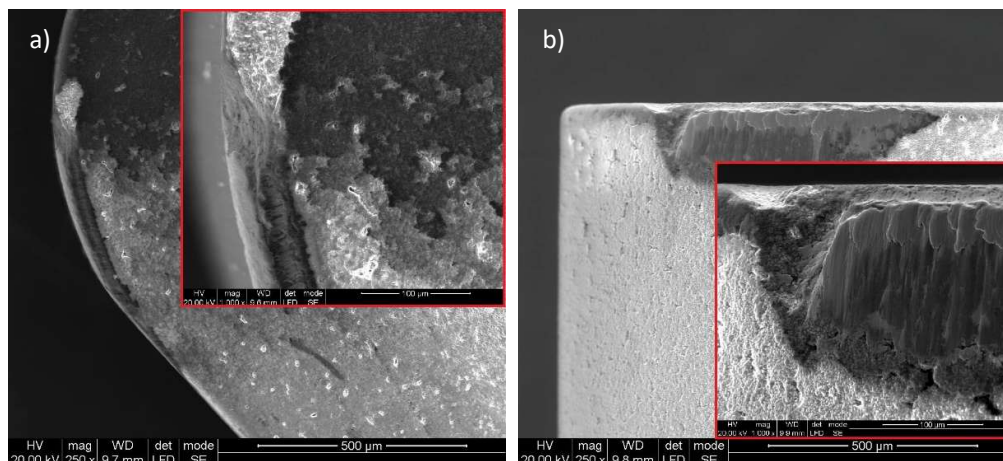
Rys. 25. Krzywa udziału materiałowego powierzchni po toczeniu ostrzem z węglików spiekanych z powłoką S205 i prędkością $v_c = 200$ m/min. **(a)** $f = 0.025$ mm/obr; **(b)** $f = 0.07$ mm/obr. [A1]

Kontynuację badań porównawczych płytek wykonanych z węglików spiekanych z powłoką S205 i płytek ceramicznych 6160, przedstawia praca [A8]. Zrealizowane badania pokazały, że wpływ prędkości skrawania na zużycie powierzchni bocznej płytek S205 jest niejednoznaczny (rys. 26). Zarówno przy prędkości skrawania $v_c = 80$ m/min, jak i $v_c = 200$ m/min wartości VB są podobne. Jednak w przypadku płytek 6160 można zaobserwować wyraźny wpływ zarówno prędkości skrawania, jak i posuwu na zużycie powierzchni przyłożenia. Zwiększenie posuwu prowadzi do zmniejszenia zużycia powierzchni przyłożenia, podczas gdy zwiększenie prędkości skrawania powoduje większe zużycie powierzchni przyłożenia. Różnice w wartościach zużycia VB między płytkami S205 i 6160 są znaczące. Podczas gdy przy posuwie $f = 0,07$ mm/obr. zużycie płytek ceramicznych jest około dwukrotnie większe niż płytek z węgla spiekane, to przy posuwie $f = 0,025$ mm/obr. zużycie płytek ceramicznych jest ponad trzykrotnie większe niż płytek z węglików spiekanych.

Rys. 26. Wpływ posuwu f na zużycie powierzchni przyłożenia VB [A8]

Obrazy SEM ostrzy z węglików spiekanych z powłoką S205 (rys. 27) i ostrzy z ceramiki 6160 (rys. 28) pokazały, że dominującymi objawami zużycia ostrzy S205 i 6160 są ścieranie i adhezja. Różnica pomiędzy tymi ostrzami polega na tym, że ostrza S205 cechują się tworzeniem narostu na powierzchni natarcia, podczas gdy ostrza 6160 wykazują tendencję do tworzenia narostu na powierzchni przyłożenia. Ponadto płytki ceramiczne 6160 mają większą skłonność do zużycia skoncentrowanego.

Rys. 27. Obraz SEM ostrza S205 po toczeniu z prędkością skrawania $v_c = 80$ m/min i posuwem $f = 0.07$ mm/obr.; a) powierzchnia natarcia, b) powierzchnia przyłożenia [A8]



Rys. 28. Obraz SEM ostrza S205 po toczeniu z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min i posuwem $f = 0.025$ mm/obr.; a) powierzchnia natarcia, b) powierzchnia przyłożenia [A8]

Wyniki badań przedstawione w pracy [A7] są kontynuacją badań, których wyniki przedstawiono w pracy [A6]. W pracy [A7] przedstawiono wyniki toczenia przedmiotów zestawami narzędziowymi o różnym wysięgu przeznaczonymi odpowiednio do obróbki powierzchni zewnętrznych i otworów. Zestawy te wyposażone były w płytki skrawające o kształcie V z naniesionym różnymi powłokami przeciwwuzyciowymi. Celem tej pracy była ocena wpływu wysięgu narzędzia na zużycie ostrza, które z kolei przełożyło się na chropowatość i topografię powierzchni oraz dokładność uzyskiwanych wymiarów.

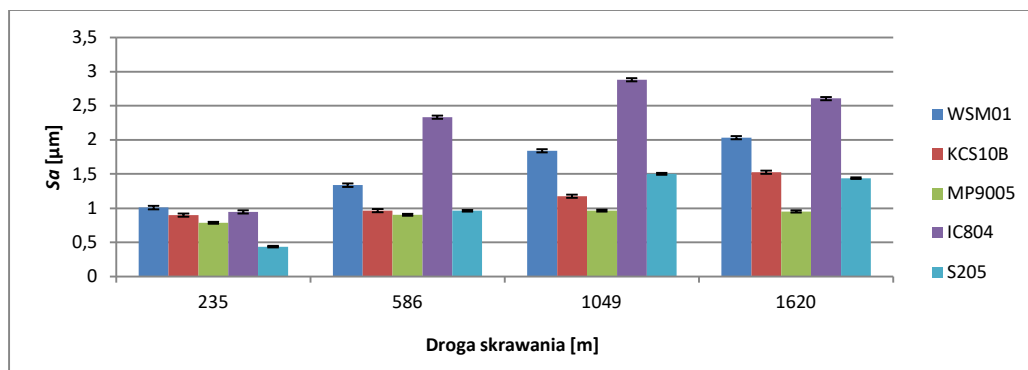
Podczas badań zastosowano dwa rodzaje oprawek narzędziowych: standardową oprawkę typu Capto C6–SVHBL–45065–16HPA o wysięgu 120 mm, oraz oprawkę antywibracyjną S–570–3C–70/80–1053–40CR, połączoną z główką SL–SVLBL–40–16HP (rys. 29) o wysięgu 700 mm. W badaniach wykorzystano pięć płytek skrawających o takim samym kształcie, lecz z różnymi powłokami przeciwwuzyciowymi od pięciu różnych producentów płytek. Parametry chropowatości mierzone były w czterech miejscach, na początku i na końcu prowadzonej obróbki oraz w dwóch miejscach pośrednich.



Rys. 29. Oprawka antywibracyjna S-570-3C-70/80-1053-40CR z główką SL-SVLBL-40-16HP [A7]

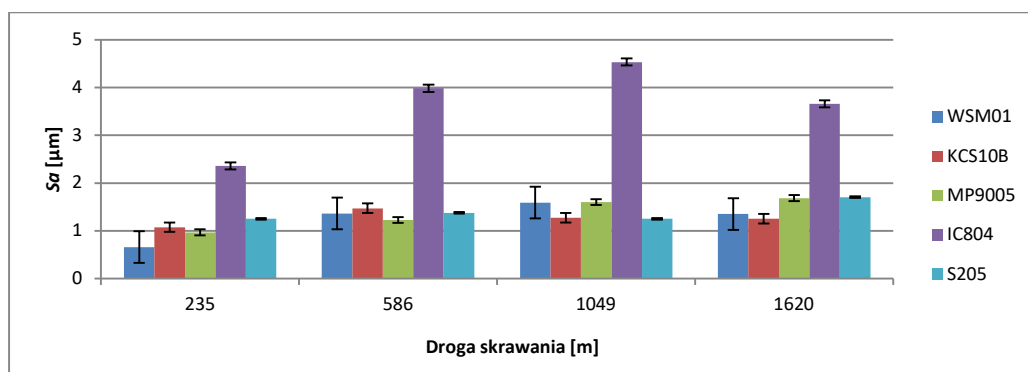
Analizując wpływ wysięgu oprawki na topografię powierzchni, ocenianą parametrem S_a , można zauważyć, że wyniki pomiarów kształtują się na podobnym poziomie. W przypadku

oprawki o wysięgu 120 mm najmniejszą średnią wartość parametru Sa w początkowej fazie procesu obróbki zarejestrowano dla powierzchni, którą obrobiono płytką S205 i wyniosła $Sa = 0.436 \mu\text{m}$. Największą średnią wartość topografii na tym etapie otrzymano dla powierzchni uzyskanej w wyniku obróbki płytką WSM01, która wyniosła $Sa = 1.01 \mu\text{m}$. Odnosząc się do końcowego etapu obróbki dla niniejszego narzędzia, najmniejszą średnią wartość parametru Sa zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką MP9005 i wyniosła $Sa = 0.952 \mu\text{m}$. Powierzchnią charakteryzującą się największą średnią wartością tego parametru, była powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki płytką IC804, dla której $Sa = 2.606 \mu\text{m}$ (rys. 30).



Rys. 30. Wartość parametru Sa topografii powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 120 mm [A7]

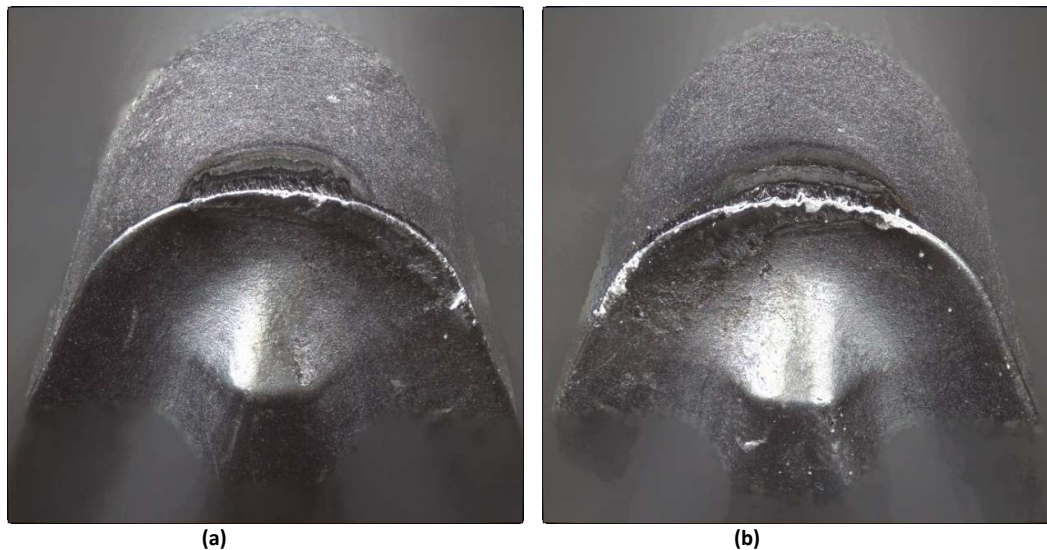
Dla oprawki o wysięgu 700 mm w początkowym etapie obróbki najmniejszą średnią wartość parametru Sa zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką WSM01, gdzie $Sa = 0.662 \mu\text{m}$. Natomiast największą średnią wartość topografii w tej fazie procesu zarejestrowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, dla której $Sa = 2.36 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę końcowy etap obróbki dla omawianego narzędzia, najmniejszą średnią wartość parametru Sa otrzymano dla powierzchni obrobionej płytką KCS10B i wyniosła $Sa = 1.253 \mu\text{m}$. Natomiast powierzchnią charakteryzującą się największą średnią wartością tego parametru, była powierzchnia uzyskana w wyniku obróbki płytką IC804, dla której $Sa = 3.656 \mu\text{m}$ (rys. 31).



Rys. 31. Wartość parametru Sa topografii powierzchni w zależności od drogi skrawania dla ostrzy badanych w oprawce o wysięgu 700 mm [A7]

Dominującymi objawami zużycia ostrzy stosowanych do obróbki stopów na osnowie niklu są adhezja i zużycie ściernie. W zrealizowanych badaniach zarejestrowano również formy zużycia wytrzymałościowego w postaci wykruszeń i wyszczerbień na krawędzi skrawającej. Należy jednak zwrócić uwagę, że na krawędzi skrawającej płytki pracującej w oprawce o wysięgu 700 mm

wystąpiła zdecydowanie większa liczba wykruszeń i wyszczerbień co miało wpływ na uzyskaną chropowatość obrobionej powierzchni. Ta zwiększona koncentracja tego rodzaju zużycia była spowodowana mniejszą stabilnością procesu skrawania w stosunku do obróbki oprawką o mniejszym wysięgu (rys. 32).



Rys. 32. Widok krawędzi skrawającej zużytego ostrza płytki VBMT 160408 – LS MP9005: a) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 120 mm, b) ostrze pracujące w oprawce o wysięgu 700 mm [A7]

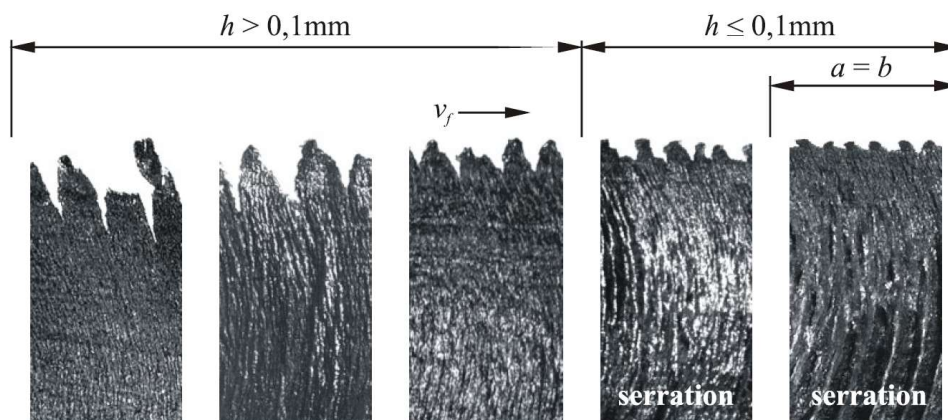
Przeprowadzone badania pokazują, że dla większości ostrzy dłuższy wysięg narzędzia miał negatywny wpływ biorąc pod uwagę otrzymane wartości chropowatości powierzchni. Jest to spowodowane mniejszą stabilnością procesu skrawania. W przypadku oprawki o wysięgu 120 mm, najmniejsze wartości parametrów chropowatości i topografii w końcowym etapie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem MP9005 i wyniosły $Sa = 0.952 \mu\text{m}$, $Ra = 0.924 \mu\text{m}$. Natomiast największe wartości parametrów Sa i Ra zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, gdzie $Sa = 2.606 \mu\text{m}$ i $Ra = 2.302 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę oprawkę o wysięgu 700 mm, najmniejsze wartości parametrów chropowatości i topografii w końcowym etapie obróbki zarejestrowano dla powierzchni obrobionej ostrzem KCS10B i wyniosły $Sa = 1.253 \mu\text{m}$, $Ra = 0.804 \mu\text{m}$. Największe wartości parametrów Sa i Ra zanotowano dla powierzchni obrobionej płytką IC804, gdzie $Sa = 3.656 \mu\text{m}$ i $Ra = 3.133 \mu\text{m}$.

W obróbce wykończeniowej jednym z wyzwań jest generowany w procesie skrawania wiór. Ze względu na stosowane w obróbce wykończeniowej stosunkowo małe posuwy i głębokości skrawania, bardzo często tworzony wiór ma formę wstęgową, która jest niepożądana w aspekcie „bezobsługowej” obróbki części. Pod pojęciem „bezobsługowej” obróbki rozumiana jest tutaj obróbka bez konieczności zatrzymywania obrabiarki w celu usunięcia wiórów zgromadzonych na obrabianej części, uchwycie mocującym czy też narzędziu. Ponadto na krawędzi wióra po jego cieńszej stronie powstaje ząbkowanie, którego rozmiar i częstotliwość zależy od parametrów skrawania. Ząbkowanie, które ma wpływ na jakość powierzchni obrobionej, tworzy się większe gdy grubość warstwy skrawanej jest mniejsza od minimalnej.

Wyniki badań wiórów powstających podczas skrawania materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym przedstawiono w pracach [A9] i [A12].

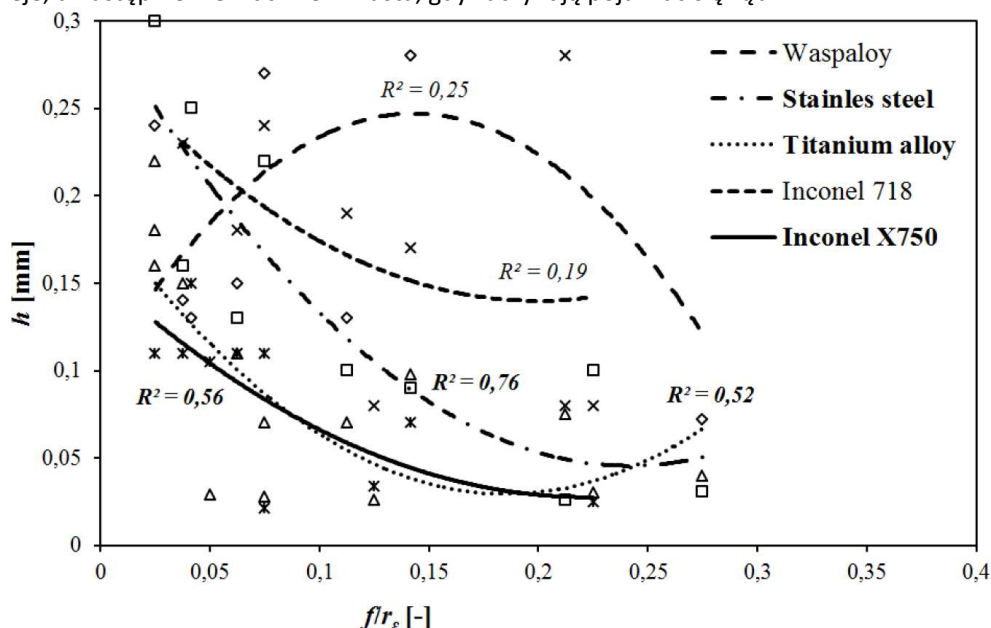
W pracy [A12] zamieszczono wyniki badań, w których materiałami obrabianymi były: Waspaloy, Inconel 718, Inconel X750, stal nierdzewna i stop tytanu. Wpływ posuwu na wysokość ząbkowania h przedstawiono na rysunku 33. Potwierdza on, że zmniejszanie wartości posuwu, a

tym samym zmniejszanie grubości warstwy skrawanej powoduje zwiększenie wysokości ząbkowania.



Rys. 33. Wpływ posuwu na morfologię wiórów po toczeniu stopu tytanu, $r_\epsilon = 0,8$ mm [A12]

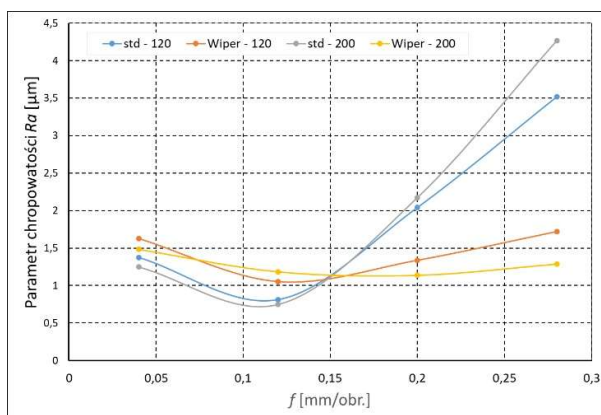
Na rysunku 34 pokazano wpływ wskaźnika f/r_ϵ na wysokość ząbkowania wiórów h . Wskaźnik f/r_ϵ jest proporcjonalny do grubości cięcia, wpływając na formowanie wiórów. Zastosowany wskaźnik pozwolił na łatwiejsze powiązanie wymiarów ząbkowania wiórów z konkretną kombinacją wartości f i r_ϵ niż za pomocą grubości warstwy skrawanej. Na rysunku, jako model regresji wykorzystano wielomian kwadratowy, oparty na wynikach badań, w których wysokość ząbkowania ma najmniejszą wartość w funkcji parametru skrawania v_c . Z rysunku 34 wynika, że stopy żaroodporne: Waspaloy i Inconel 718 charakteryzują się największym ząbkowaniem występującym niezależnie od posuwu f i promienia naroża r_ϵ . Wskaźnik f/r_ϵ ma znaczny wpływ na wysokość ząbkowania h dla trzech badanych materiałów: stali nierdzewnej, stopu tytanu i Inconel X750. W przypadku materiałów ze wzrastającym wskaźnikiem f/r_ϵ wysokość h ząbkowania najpierw maleje, a następnie nieznacznie wzrasta, gdy zaczynają pojawiać się ząbki.



Rys. 34. Wpływ wskaźnika f/r_ϵ na wysokość zadziórów h [A12]

W pracy [A9] przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na trzech rodzajach materiałów stosowanych na części silników lotniczych. Były to austenityczna stal nierdzewna XCrNiNb18-9, stal do ulepszenia cieplnego 14NiCr14 i stop aluminium A356. W badaniach zastosowano dwa rodzaje ostrzy skrawających, konwencjonalną płytkę skrawającą WNMG 080408 oraz płytkę skrawającą WNMG 080408-FW, która cechuje się tym, że posiada tzw. ostrze Wiper. Ostrze Wiper oznacza, że ma ono przedłużoną krawędź skrawającą przy promieniu naroża. Celem takiej konstrukcji jest umożliwienie prowadzenia obróbki ze zwiększonym dwukrotnie posuwem, podczas gdy chropowatość powierzchni pozostaje niezmienna.

Jakość powierzchni obrobionej była oceniana w zależności od prędkości skrawania i posuwu. Do oceny jakości powierzchni zastosowano parametry chropowatości Ra i Rz . Analizując wpływ posuwu na chropowatość powierzchni po toczeniu stali nierdzewnej XCrNiNb18-9 (rys. 35), można zauważyć, że przy mniejszych wartościach posuwu $f < 0,12$ mm/obr., zarówno dla płytki ostrzem standardowym jak i z ostrzem Wiper, parametr chropowatości Ra wzrasta, przy czym, dla płytki Wiper wzrost jest większy niż dla płytki standardowej. Analiza wpływu prędkości podczas skrawania tego materiału, nie daje jednoznacznej odpowiedzi, ponieważ dla płytki z ostrzem standardowym, mniejszą wartość parametru Ra uzyskano podczas obróbki z prędkością skrawania $v_c = 120$ m/min, natomiast dla płytki z ostrzem Wiper, mniejszą wartość parametru Ra uzyskano podczas obróbki z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min. Zatem stosowanie płytek skrawających z ostrzem Wiper z posuwami poniżej 0,15 mm/obr przynosi odwrotne rezultaty od zamierzonych.



Rys. 35. Wpływ posuwu f na wartości parametru chropowatości Ra powierzchni obrobionej (materiał obrabiany - XCrNiNb18-9) [A9]

Czwarta rewolucja przemysłowa cechuje się zaawansowaną automatyką przemysłową, która wynika z potrzeby zwiększenia wydajności produkcji. Jednym z elementów automatyzacji produkcji jest Closed Door Machining (CDM), które pozwala realizować proces wytwarzania bez konieczności ingerencji operatora w czasie obróbki części na obrabiarce. Do wyzwań, jakie stoją przed technologiem-programistą CNC, należy uzyskanie odpowiedniej formy wióra generowanego w trakcie procesu skrawania. Z tego powodu w pracy [A9] oceniono wióry uzyskane podczas badań.

Analiza wiórów otrzymanych podczas skrawania stali nierdzewnej XCrNiNb18-9 (Tabele 2-3) pokazuje, iż nie ma wyraźnych różnic pomiędzy wiórami otrzymanymi podczas skrawania płytką tradycyjną i płytką Wiper. Dla najmniejszej zastosowanej wartości posuwu $f = 0,04$ mm/obr., zarówno dla płytki tradycyjnej, jak i płytki Wiper (dla obu zastosowanych prędkości skrawania) otrzymano wióry śrubowe otwarte splecione (4.3 – wg PN-ISO 3685). Wiór taki uniemożliwia

automatyzację produkcji, ponieważ pozostaje w strefie obróbki, ograniczając ilość dostarczanego chłodziwa do strefy skrawania, co powoduje szybsze zużywanie się ostrza skrawającego oraz pogorszenie jakości powierzchni obrobionej. Problemy z ewakuacją wióra mogą być powodem tego, że przy posuwie $f = 0,04$ mm/obr., uzyskano około 40% wyższy parametr Ra niż przy posuwie $f = 0,12$ mm/obr. zastosowanie posuwu $f = 0,12$ mm/obr. pozwoliło uzyskać wióry śrubowe otwarte krótkie (4.2), które odprowadzane są ze strefy skrawania za pomocą strumienia chłodziwa. Wióry takie są akceptowalne pod kątem automatyzacji procesu. Należy zauważyć, że zwiększenie prędkości skrawania, zarówno dla płytki tradycyjnej, jak i płytki Wiper, powoduje skrócenie długości wióra dla tej wartości posuwu. Wióry otrzymane dla posuwów $f \geq 0,20$ mm/obr., to wióry łukowe luźne (6.2). Są one szybko usuwane ze strefy obróbki, dzięki czemu nie ograniczają dostępu chłodziwa do strefy skrawania. Jest to bardzo korzystna forma wiórów. Zatem kształt generowanych wiórów można kontrolować poprzez zmianę wartości posuwu, jak również prędkości skrawania.

Tabela 2. Wióry po obróbce stali nierdzewnej XCrNiNb18-9 płytką tradycyjną, $v_c = 200$ m/min [A9]

f [mm/obr.]			
0.04	0.12	0.20	0.28
			

Tabela 3. Wióry po obróbce stali nierdzewnej XCrNiNb18-9 płytką Wiper, $v_c = 200$ m/min [A9]

f [mm/obr.]			
0.04	0.12	0.20	0.28
			

Badania naukowe i rozwojowe zrealizowane przez habilitanta związane z technologicznymi aspektami wykończeniowej obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych ukierunkowane są na **praktyczne zastosowanie wyników**. Znaczna część badań, na podstawie których opracowane zostały publikacje, została wykonana na obrabiarkach stosowanych w produkcji komponentów silników lotniczych. Jakość powierzchni obrobionej zależy od układu OUPN (obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie). Wykonywanie badań na obrabiarkach produkcyjnych, umożliwia redukcję liczby zmiennych. W ten sposób aplikacja opracowanych rozwiązań trwa znacznie krócej.

Do najważniejszych **oryginalnych osiągnięć** cyklu powiązanych tematycznie publikacji można zaliczyć:

- wykazanie, że toczenie wykończeniowe stopu na osnowie niklu może być alternatywą dla czasochłonných operacji szlifowania; w wykonanych badaniach własnych wykazano, że zastosowanie odpowiednich parametrów skrawania oraz ostrzy wykonanych z węglików spiekanych i ceramiki, umożliwia uzyskanie powierzchni, dla której $Ra < 0,2$ μm ; opracowaną technologię wdrożono w procesie wytwarzania elementów silników lotniczych pracujących

- w gorącej strefie silnika, gdzie niemożliwe jest zastosowanie uszczelnień z materiału typu guma, a wymagana jest chropowatość powierzchni $Ra < 0,4 \mu\text{m}$,
- opracowanie kompleksowej oceny stanu technologicznej warstwy wierzchniej i zużycia ostrzy skrawających, po toczeniu na sucho i z chłodzeniem stopu Inconel 718 ostrzami wykonanymi metodą SPS połączoną z oceną morfologii wiórów oraz określeniem częstotliwości drgań wióra w trakcie procesu skrawania; w świetle publikowanych prac analiza technologicznej warstwy wierzchniej i zużycia ostrzy skrawających wykonanych metodą SPS po skrawaniu stopu niklu Inconel 718 były pierwszymi na świecie tego typu badaniami,
 - wykazanie pozytywnego wpływu powłok przeciwzużyciowych na stan technologicznej warstwy wierzchniej, obejmującego topografię powierzchni i mikrostrukturę oraz trwałość ostrzy po toczeniu wzdłużnym stopu na osnowie niklu; dostępna literatura prezentuje wyniki badań wpływu powłok na trwałość ostrzy podczas obróbki stopów niklu, lecz ostrza pochodziły od różnych producentów, zatem mikro i makrogeometria stosowanych ostrzy były różne; w zrealizowanych badaniach zastosowano takie same ostrza skrawające z powłokami różniącymi się stechiometrią i metodą ich wytwarzania,
 - określenie i ocena zależności pomiędzy warunkami procesu obróbkowego, a mikrostrukturą i topografią gwintów stosowanych w przemyśle lotniczym; w świetle publikowanych prac zagadnienie jest nowym obszarem, nieomawianym w dostępnej literaturze; zrealizowane badania były podstawą do wprowadzenia zmian w procesie wytwarzania części krytycznych stosowanych w silnikach samolotowych, w których występują gwinty,
 - opracowanie kompleksowej oceny wpływu wysięgu zestawu narzędziowego podczas wykończeniowej obróbki długich otworów na topografię powierzchni obrobionej, dokładność wymiarową i zużycie ostrzy skrawających; w świetle publikowanych prac przedstawione zagadnienie obróbki otworów w stopach na osnowie niklu narzędziem o wysięgu $10\times D$ jest nowym obszarem badawczym, dotychczasowe prace badawcze bowiem skoncentrowane są na obróbce zewnętrznych powierzchni narzędziami o małym wysięgu; opracowaną technologię wdrożono w procesie produkcji wałów głównych silników lotniczych,
 - zidentyfikowanie wpływu laserowego wspomaganie toczenia na mikrostrukturę warstwy wierzchniej przy zastosowaniu dwóch rodzajów powłok absorpcyjnych nakładanych na obrabianą powierzchnię.

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

5.1. Działalność naukowo-badawcza prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora

Po ukończeniu studiów wyższych w 1998 r. rozpocząłem pracę w Zachodniej Dyrekcji PKP w Poznaniu. Po dwóch latach zmieniłem miejsce pracy na Pratt & Whitney Kalisz. Dostrzegając swoje braki w zakresie obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym, nawiązałem kontakt z prof. dr hab. inż. Mieczysławem Kawalcem, który zaproponował mi udział w studiach doktoranckich na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej. Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kawalec najpierw był moim opiekunem naukowym, a następnie promotorem pracy doktorskiej.

Studia doktoranckie ukończyłem w roku 2007, natomiast w czerwcu 2009 r., obroniłem na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej pracę doktorską „Skrawalność

stopu Inconel 718 w procesie toczenia” i uzyskałem stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Wymiernym efektem działalności naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych są publikacje (współautorstwo 2 rozdziałów w monografiach konferencyjnych oraz współautorstwo 1 rozdziału w Zeszytach Naukowych Politechniki Poznańskiej, współautorstwo 2 rozdziałów w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej oraz udział w 3 konferencjach krajowych).

5.2. Działalność naukowo-badawcza prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem współpracę w zakresie obróbki skrawaniem w szczególności z prof. Mieczysławem Kawalcem, czego wyrazem są 2 wspólne artykuły (1 w czasopiśmie *Mechanik* i 1 rozdział w monografii konferencyjnej). Ponadto nawiązałem współpracę z dr inż. Tadeuszem Chwalczukiem z Politechniki Poznańskiej, czego wyrazem jest 11 wspólnych artykułów (5 w czasopiśmie *Mechanik*, 2 rozdziały w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, 3 rozdziały w monografiach konferencyjnych krajowych oraz 1 rozdział w monografii konferencyjnej zagranicznej).

Chcąc utrzymać kontakt ze światem akademickim, brałem aktywny udział w cyklicznej konferencji Szkoły Obróbki Skrawaniem (uczestniczyłem we wszystkich konferencjach). Efektem udziału w tych konferencjach jest 18 referatów, które ukazały się w materiałach konferencyjnych. Na jednej z konferencji poznałem dr hab. inż. Dariusza Garbca z Grupy Badawczej Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Poznaniu. Nasza współpraca zaowocowała wspólną pracą, która ukazała się w czasopiśmie *Materials*. Na konferencji tej nawiązałem również kontakt z prof. Stanisławem Legutko (Politechnika Poznańska), prof. Michałem Wieczorowskim i dr hab. inż. Bartoszem Gapińskim, prof. PP (oboje Politechnika Poznańska) oraz prof. Edwardem Miko (Politechnika Świętokrzyska). Owocem współpracy z prof. Legutko jest 8 prac (5 w czasopiśmie *Materials*, 1 w *Lecture Notes in Mechanical Engineering* wydawnictwa Springer i 2 w materiałach konferencyjnych). Z prof. Wieczorowskim i prof. Gapińskim pracowaliśmy wspólnie przy 4 publikacjach (1 w czasopiśmie *Materials*, 1 w czasopiśmie *Sustainability*, 1 w *Lecture Notes in Mechanical Engineering* wydawnictwa Springer i 1 w monografii konferencji). Natomiast z prof. Miko jestem współautorem w 2 pracach (obie w czasopiśmie *Materials*). W ramach pracy w Pratt & Whitney Kalisz nawiązałem kontakt z prof. Sylwią Wencel (Politechnika Częstochowska). Efektem naszej współpracy są dwa artykuły (1 w czasopiśmie *Materials* i 1 w czasopiśmie *ASTRI*).

Moja aktywność naukowa w zakresie obróbki skrawaniem rozpoczęła się w chwili nawiązania kontaktu z prof. Mieczysławem Kawalcem w związku z rozpoczęciem studiów doktoranckich. W 2000 roku rozpocząłem pracę w firmie Pratt & Whitney Kalisz na stanowisku programisty CNC. Wyzwania, z jakimi wiązała się moja praca, uwydatniły braki wiedzy w zakresie obróbki skrawaniem materiałów stosowanych w konstrukcji silników lotniczych, a zwłaszcza stopów na osnowie niklu typu Inconel i Waspaloy. W ciągu 9 lat pracy na stanowisku programista CNC, opracowałem i wdrożyłem ponad 1500 programów CNC dla części wykonywanych w Pratt & Whitney Kalisz z różnych materiałów: stopy aluminium, stale do ulepszania cieplnego, stale nierdzewne, stopy tytanu, stopu na osnowie niklu. Spośród wymienionych, największe wyzwania stanowiły zawsze części wykonywane ze stopów na osnowie niklu. W zależności od rodzaju części (wały, obudowy turbin, obudowy łożysk, pierścienie, aparaty kierujące) po obróbce skrawaniem bardzo często

następowała deformacja obrobionego elementu. Ze względu na małą trwałość ostrzy skrawających, bardzo często pojawiały się problemy z uzyskaniem wymaganej jakości powierzchni obrobionej (chropowatość, mikrostruktura).

Rozwój technologii kształtowania ubytkowego stopów na osnowie niklu kontynuowałem w ramach udziału w projekcie PBS3 (2013 r.) - *Laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem nadstopów i stopów tytanu stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych*. W projekcie tym byłem kierownikiem projektu ze strony Pratt & Whitney Kalisz. Uczestnikami projektu byli: Politechnika Poznańska (Lider konsorcjum), Politechnika Rzeszowska, Pratt & Whitney Kalisz, Pratt & Whitney Rzeszów. W ramach projektu zrealizowano następujące zadania:

- opracowano warunki procesu obróbki skrawaniem nadstopów niklu i stopów tytanu stosowanych w przemyśle lotniczym z zastosowaniem wspomagania laserowego (LAM),
- przeprowadzono badania wstępne nagrzewania laserowego w procesie toczenia nadstopów niklu i stopów tytanu
- opracowano konstrukcję i wykonano oprzyrządowanie technologiczne,
- przeprowadzono badania wpływu geometrii i materiału ostrza narzędzia skrawającego na wskaźniki jakościowe procesu i kształtowanie stanu TWW w procesie toczenia konwencjonalnego oraz z zastosowaniem LAM nadstopów niklu i stopów tytanu,
- przeprowadzono badania wpływu parametrów procesu nagrzewania wiązką lasera powierzchni obrabianego materiału na właściwości WW w procesie laserowego wspomagania toczenia nadstopów niklu i stopów tytanu,
- dokonano oceny wpływu różnych strategii nagrzewania na właściwości kształtowanej TWW podczas toczenia ze wspomaganiem laserowym,
- opracowano modele procesu toczenia nadstopów i stopów tytanu z zastosowaniem LAM,
- dokonano weryfikacji wyników badań procesu toczenia z nagrzewaniem laserowym przy zastosowaniu demonstratorów.

Kontynuowałem współpracę ze środowiskiem akademickim w ramach projektu - *Opracowanie i wdrożenie systemu projektowania technologii obróbki ubytkowej komponentów silników turbinowych z zastosowaniem wspomagania komputerowego*. W projekcie tym byłem kierownikiem projektu ze strony Pratt & Whitney Kalisz. Projekt realizowany był wspólnie z WSK Rzeszów i Politechniką Warszawską. W projekcie tym współpracowałem z dr inż. Adamem Zaleskim z Politechniki Warszawskiej. Zadania zrealizowane w ramach projektu:

- badania w zakresie identyfikacji ograniczeń konstrukcyjnych, technologicznych, formalnych, ekonomicznych, itp.,
- badanie symulacyjne w zakresie doboru i optymalizowania strategii obróbki,
- badanie w zakresie opracowania modeli numerycznych wzorcowych operacji technologicznych,
- badania w zakresie opracowania algorytmów wzorcowych rozwiązań organizacyjnych dla procesów obróbki ubytkowej i monitorowania procesu,
- badania w zakresie opracowania metodyki stosowania sond pomiarowych w systemie CAM,
- opracowanie założeń do projektowania technologii obróbki,
- pracowanie modułu programowego do automatycznego pomiaru i integracji wyników z modułem programowym obróbki.

W celu dalszego rozwoju, brałem udział jako lider zadania w Projekcie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013 w ramach działania 1.4. „Wsparcie projektów celowych osi priorytetowej 1 „Badania i Rozwój nowoczesnych technologii” oraz działania 4.1 „Wsparcie wdrożeń wyników prac B+R osi priorytetowej 4 „Inwestycje w innowacyjne przedsięwzięcia”- UDA- POIG. 01.04.00-30-015/09-00 UDA- POIG. 04.01.00-30-015/09-00 w ramach umowy z Polską Agencją Rozwoju Przedsiębiorczości.

Zadania zrealizowane w ramach projektu:

- wykonanie badań sondami pomiarowymi RMP60M i RMP600 firmy Renishaw na obrabiarkach DMU125 i DMC125 firmy DMG,
- opracowanie wyników badań zarejestrowanych na obrabiarkach,
- analiza wyników badań, ocena zasadności stosowania sond pomiarowych części na centrach obróbkowych.

Oprócz projektów prowadzonych wspólnie z ośrodkami naukowymi w Polsce brałem udział w kilku projektach wewnętrznych, zrealizowanych w Pratt & Whitney Kalisz. Jednym z takich projektów było wdrożenie cienkościennych części typu wał o długości powyżej 1500 mm wykonywanych z materiału Inconel 718. Celem projektu było przeprowadzenie testów obróbki ostrzami z węglików spiekanych, ceramiki narzędziowej i CBN w celu doboru najbardziej korzystnego materiału narzędziowego i parametrów skrawania pod względem trwałości ostrza oraz określenie optymalnych parametrów skrawania pod względem uzyskiwanej jakości powierzchni obrobionej i deformacji obrabianej części. Okres realizacji projektu 01.09.2010 – 30.04.2012. Realizacja projektu pozwoliła na stworzenie technologii wzorcowej, na bazie której opracowywano kolejne technologie. Dzięki temu zredukowano tzw. koszty złej jakości wynikające z powstawania braków z powodu stosowania nieodpowiednich narzędzi skrawających. W projekcie tym byłem kierownikiem projektu.

Kolejnym bardzo ważnym dla korporacji projektem było wdrożenie w PWK pierwszej części wykonywanej z materiału HCM3 (stal o specjalnych właściwościach o twardości 46-50 HRC). Była to pierwsza część z zastosowaniem tego materiału w całej korporacji. Wdrożenie części poprzedzone było wieloma testami narzędzi skrawających pod kątem trwałości ostrzy, chropowatości powierzchni obrobionej i mikrostruktury warstwy wierzchniej (materiał ten, ze względu na twardość, ma tendencje do tworzenia białej warstwy i przehartowań). Wykonywaną częścią był wał główny silnika lotniczego, którego długość wynosiła 1997,66 mm. Wyzwaniem podczas wdrażania tej części było nie tylko prawidłowe dobranie parametrów skrawania ze względu na trwałość ostrza i jakość powierzchni obrobionej, ale także zastosowanie odpowiednich strategii obróbki ze względu na smukłość i cienkościenność obrabianej części. W projekcie tym byłem kierownikiem projektu.

Projektem wewnętrznym zrealizowanym w Pratt & Whitney Kalisz, w którym byłem kierownikiem projektu było zastosowanie węglkowych płytek skrawających do obróbki powierzchni utwardzonych (powyżej 55 HRC). Wdrożenie wielostrzowych płytek skrawających wykonanych z węglików spiekanych do obróbki utwardzonych powierzchni części silników lotniczych miało na celu eliminację czasochłonnych operacji szlifierskich. Realizacja projektu skróciła cykl obróbki wdrożonych części. Okres realizacji projektu 01.11.2012 – 30.06.2013.

Rozwój wiedzy w zakresie obróbki skrawaniem kontynuowałem w projekcie wewnętrznym Pratt & Whitney Kalisz, dotyczącym obróbki mechanicznej elementów silników lotniczych z nałożonymi powłokami typu plazma. Zrealizowanie tego projektu wymagało przeprowadzenia wielu badań w celu określenia najbardziej korzystnej geometrii ostrza skrawającego oraz wypracowania optymalnych parametrów podczas obróbki skrawaniem nałożonej powłoki. Okres realizacji projektu 01.06.2012 – 31.08.2013. Projekt został zrealizowany ze względu na problemy jakościowe dotyczące przekraczania wartości chropowatości oraz pęknięcia powłok.

Inny charakter miał projekt stworzenia bazy postprocesorów odwrotnych w aplikacji Vericut. Był to wewnętrzny projekt Pratt & Whitney Kalisz, w którym byłem kierownikiem projektu. Celem projektu było opracowanie wirtualnych obrabiarek dla ponad 120 maszyn numerycznych. Utworzona baza umożliwia programistom CNC oraz technologom na precyzyjne przeprowadzenie symulacji programów sterujących na obrabiarki CNC, która między innymi wykrywa błędne ruchy narzędzia ale również co szczególnie ważne, analizuje geometrię części obrabianej, uchwytu, wrzeciona, głowicy narzędziowej i dodatkowych elementów wyposażenia maszyny (np. konik, podtrzymka) pod względem kolizyjności. Aplikacja Vericut z modułem Opti Path umożliwia również optymalizację ścieżki narzędzia programu sterującego. Okres realizacji projektu 01.02.2010 – 31.10.2012. Zastosowanie symulacji dla złożonych cykli obróbczych na wieloosiowych obrabiarkach numerycznych pozwala wykryć na etapie projektowania procesu (przed wdrożeniem na wydziałach produkcyjnych) błędy w wygenerowanych programach sterujących oraz kolizje narzędzi skrawających z przedmiotem obrabianym i przyrządami mocującymi. W projekcie tym współpracowałem z firmą KOMODLEW z siedzibą w Krakowie.

Ze względu na ciągły rozwój firmy, w Pratt & Whitney Kalisz realizowany był projekt, którego byłem kierownikiem, stworzenia stanowiska do automatycznego pomiaru narzędzi skrawających połączonego z bazą narzędziową oraz aplikacją zarządzającą programami sterującymi na obrabiarki sterowane numerycznie. Celem projektu jest zbudowanie stanowiska umożliwiającego pomiar geometrii narzędzi skrawających oraz zapis tych danych na chip'ach umieszczonych w oprawkach narzędziowych. Narzędzie podczas załadunku do magazynu obrabiarki zostaje automatycznie rozpoznane przez sterownik a jego dane geometryczne są wprowadzane w odpowiednie miejsca „biblioteki” narzędzi. Połączenie stanowiska z aplikacją zarządzającą programami sterującymi umożliwia przesłanie informacji jakie narzędzia są stosowane do wykonania danej części. Interfejs do bazy narzędziowej przekazuje osobie obsługującej stanowisko pomiarowe, jakie wymiary geometryczne narzędzia należy ustawić podczas montażu. Okres realizacji projektu 01.08.2013 – 31.10.2016.

Praca przy wielu projektach wewnętrznych PWK związana z programowaniem obrabiarek CNC i zastosowaniem sond pomiarowych części zaowocował opracowaniem rozwiązania umożliwiającego pomiar gwintów na maszynie numerycznej. Opracowana metodyka pozwala na pomiar gwintów zewnętrznych i wewnętrznych typu UNJ i ACME na obrabiarce sterowane numerycznie CNC za pomocą tensometrycznej sondy z końcówkami pomiarowymi o średnicy 0.3 mm. Wdrożenie pomiarów parametrów gwintów tą metodą umożliwia zrealizowanie automatycznej korekcji narzędzia oraz potwierdzenie poprawności wykonanego gwintu po zakończeniu operacji.

5.3. Autorstwo i współautorstwo w publikacjach naukowych

Wykaz wszystkich opublikowanych po doktoracie prac naukowych habilitanta znajduje się w Załączniku 4. Na mój dorobek publikacyjny składa się autorstwo lub współautorstwo 44 publikacji w tym 39 po doktoracie. Spośród wszystkich prac:

- 13 opublikowałem w czasopiśmie indeksowanych w bazie WoS,
- 19 opublikowano w materiałach konferencyjnych.

Sumaryczny *Impact factor (IF)* według listy *Journal Citation Reports (JCR)*, zgodnie z rokiem opublikowania: **35,648**.

5.4. Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science, Scopus i Google Scholar

W zestawieniu przedstawiono stan na dzień 15.05.2025 r.

Liczba cytowań wg bazy Web of Science: 67.

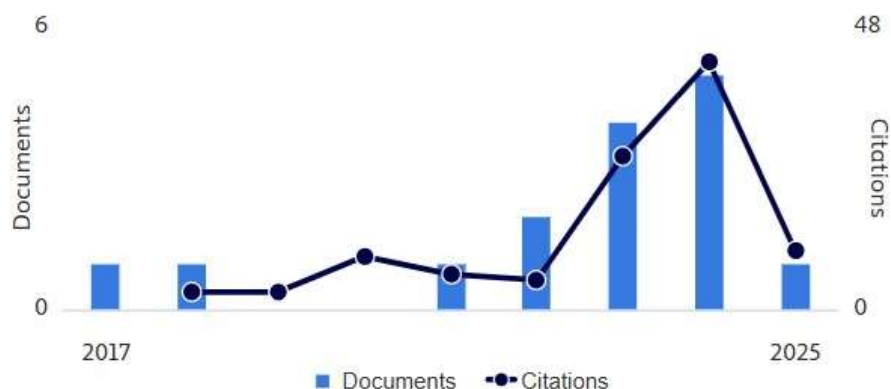
Indeks Hirscha wg bazy Web of Science: 7.

Liczba indeksowanych prac w bazie Web of Science: 13.

Liczba cytowań wg bazy Scopus (rys. 36): 104.

Indeks Hirscha wg bazy Scopus: 7.

Liczba indeksowanych prac w bazie Scopus: 16.

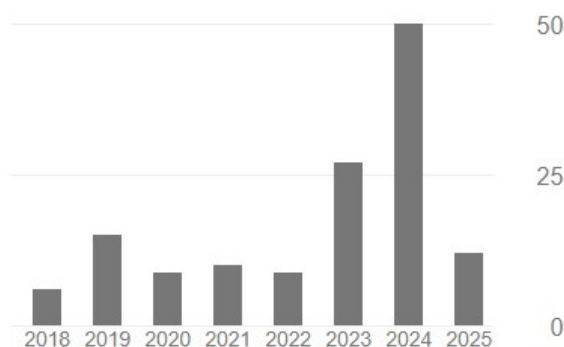


Rys. 36. Liczba cytowań według bazy Scopus na dzień 13.06.2025 r.

Liczba cytowań wg bazy Google Scholar (rys. 37): 151.

Indeks Hirscha wg bazy Google Scholar: 8.

Liczba indeksowanych prac w bazie Google Scholar: 39.



Rys. 37. Liczba cytowań według bazy Google Scholar na dzień 13.06.2025 r.

5.5. Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

1. UDA-POIG. 01.04.00-30-015/09-00 UDA-POIG. 04.01.00-30-015/09-00 – „Nowoczesna technologia wytwarzania kół zębatych przekładni silników lotniczych”. Okres realizacji projektu: 2009-2011. Lider zadania badawczego.
2. 6ZR8 2009 C/07200 – „Opracowanie i wdrożenie systemu projektowania technologii obróbki ubytkowej komponentów silników turbinowych z zastosowaniem wspomagania komputerowego”. Konsorcjum: Politechnika Warszawska, Pratt & Whitney Kalisz, Pratt & Whitney Rzeszów (lider projektu). Okres realizacji projektu: 2010-2012. Kierownik projektu ze strony Pratt & Whitney Kalisz.
3. PBS3/B5/36/2015 – „Laserowe wspomaganie obróbki skrawaniem nadstopów i stopów tytanu stosowanych w konstrukcjach silników lotniczych”. Konsorcjum: Politechnika Poznańska (lider projektu), Politechnika Rzeszowska, Pratt & Whitney Kalisz, Pratt & Whitney Rzeszów. Okres realizacji projektu: 2015-2018. Lider zadania badawczego, wykonawca.

5.6. Udział w konferencjach

Udział w konferencjach międzynarodowych:

- New trends in machining, Tefen, Izrael, 2010;
- Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Manufacturing, Poznań, Polska, 2010;
- Technology Forum, Montreal, Kanada, 2011;
- ESEE&R Aerospace Seminary, Fürth k. Norymbergii, Niemcy, 2013;
- International conference on surface metrology, Poznań, Polska, 2016;
- International conference on Manufacturing science an education, MSE, Trends in new industrial revolution, Sibiu, Rumunia, 2017;
- Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Manufacturing, Poznań, Polska, 2024.

Udział w konferencjach krajowych:

- VII Konferencja Naukowo – Techniczna, Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach, Olszanica k. Leska, 2006r,
- I Szkoła Obróbki Skrawaniem, Duszniki Zdrój, 2007;
- II Szkoła Obróbki Skrawaniem, Bukowina Tatrzańska, 2008;
- III Szkoła Obróbki Skrawaniem, Bachorze k. Chojnic, 2009;
- IV Szkoła Obróbki Skrawaniem, Łódź, 2010;
- V Szkoła Obróbki Skrawaniem, Opole, 2011;
- VI Szkoła Obróbki Skrawaniem, Łądek Zdrój, 2012;
- VII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Mierzęcin, 2013;
- VIII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Międzyzdroje, 2014;
- IX Szkoła Obróbki Skrawaniem, Kielce-Sandomierz, 2015;
- X Szkoła Obróbki Skrawaniem, Łańcut, 2016;
- XI Szkoła Obróbki Skrawaniem, Łańcut, 2017;
- XII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Dźwirzyno, 2018
- XIII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Opole, 2019
- XIV Szkoła Obróbki Skrawaniem, Lublin, 2021
- XV Szkoła Obróbki Skrawaniem, Opalenica, 2022
- XVI Szkoła Obróbki Skrawaniem, Dźwirzyno, 2023

Podsumowanie udziału w konferencjach naukowych przedstawiono w tabeli 3. (na dzień 15.05.2025)

Tabela 3. Podsumowanie tabelaryczne udziału w konferencjach

	Przed doktora- tem	Po doktoracie	Razem
Udział w konferencjach międzynarodowych	0	7	7
Udział w konferencjach krajowych	3	14	17
Razem	3	21	24

5.6. Otrzymane nagrody

- Nagroda Dyrektora Generalnego za szczególny wkład we wdrożenie nowego typu produktu w Pratt & Whitney Kalisz, TIE SHAFT (cienkościenny wał ze stopu na osnowie niklu do silnika PW1000 stosowanego do napędu samolotów Airbus A320NEO) – rok 2010
- Nagroda Dyrektora Pionu w dowód uznania za wprowadzanie innowacji w procesach dla redukcji kosztów wytwarzania – rok 2011
- Nagroda Bezpośredniego Przełożonego w dowód uznania za projekt oszczędnościowy wykorzystania płytek typu CNMG i CNGP – rok 2011

- Nagroda Bezpośredniego Przełożonego w dowód uznania za przeprowadzenie projektów oszczędnościowych oraz za zaangażowanie w projekt poprawiający jakość (chropowatość plazmy CPW518) – rok 2013
- Nagroda Dyrektora Pionu w dowód uznania za wkład we wdrożenie projektu optymalizacji obróbki skrawaniem elementu cienkościennego wykonanego ze stopu na osnowie niklu – rok 2013
- Nagroda Bezpośredniego Przełożonego w dowód uznania za zaangażowanie we wdrożenie bazy danych projektów redukcji kosztów High Performance Machining – rok 2014
- Nagroda Dyrektora Pionu w dowód uznania za stworzenia stanowiska do automatycznego pomiaru narzędzi skrawających połączonego z bazą narzędziową oraz aplikacją zarządzającą programami sterującymi na obrabiarki sterowane numerycznie – rok 2014
- Nagroda Dyrektora Pionu w dowód uznania za wkład w usprawnienie procesu w celu poprawy jakości wykonania wałów z materiału HCM3 – rok 2015
- Nagroda Dyrektora Pionu w dowód uznania za opracowanie konstrukcji narzędzia specjalnego i optymalizację obróbki skrawaniem oraz poprawę jakości wału głównego silnika lotniczego – rok 2015
- Nagroda Dyrektora Generalnego w dowód uznania za wdrożenie FAI dla części BH4 silnika NEO – rok 2017
- Nagroda Dyrektora Generalnego w dowód uznania za organizację i przeprowadzenie cyklu szkoleń w ramach Szkoły Programisty CNC – rok 2019
- Nagroda doskonałości im. Bogdana Zmyślonego za całokształt pracy w Pratt & Whitney Kalisz – rok 2021
- Nagroda Dyrektora Generalnego w dowód uznania za udział w zbudowaniu nowej linii produkcyjnej w Pratt & Whitney Kalisz – rok 2023

5.7. Szkolenia podnoszące kwalifikacje zawodowe

- Szkolenie z programowania maszyn GROB G352T – Sierosław, 2024;
- Renishaw Technological Days – Warszawa, 2023
- Szkolenie THAYER organizowane przez akademię wojskową West Point (USA), szkolenie dedykowane jest dla liderów projektów realizowanych w Pratt & Whitney, 2022;
- Szkolenie z systemu iControl Advanced WFL – Linz, Austria, 2022;
- Szkolenie z programu VERICUT – optymalizacja Force – 2022;
- Szkolenie z programowania maszyn WFL M30 – Linz, Austria, 2019;
- Szkolenie z programowania obróbki 5-cio osiowej w Catii V5, organizator: CADSOL, Kalisz, 2018;
- Innowacyjne rozwiązania dla przemysłu lotniczego, organizator: Sandvik, Katowice, 2018;
- Szkolenie z programowania sond pomiarowych na maszynie Grob G551 – Kalisz, 2017;
- Szkolenie z programowania obrabiarek Grob G551 – Mindelheim, Niemcy, 2017;
- Metalcutting Application Course, organizator: Kennametal, Bolesławiec, 2014;
- Szkolenie z obsługi aplikacji Vericut 7.3, 2014;

- Szkolenie: Wydajne narzędzia i nowoczesne obrabiarki dedykowane dla przemysłu lotniczego, Sandvik – Mazak, 2011;
- Szkolenie: CATIA V5 – Lathe Machining, 2011;
- Szkolenie: Obróbka części dla przemysłu lotniczego, Kennametal, Fürth k. Norymbergii - Niemcy, 2010;
- Szkolenia z zakresu programowania obrabiarek CNC organizowane przez SIEMENS połączone z prezentacją systemów do wyważania narzędzi – Haimer, 2010;
- Szkolenie: CATIA V5 – Mechanical Design, 2009.

6. Informacje o działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej

6.1. Działalność dydaktyczna

1. Promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim mgr inż. Bartłomieja Krawczyka, tytuł rozprawy: *Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC*, publiczna obrona 28.03.2025 r. oraz zamknięcie przewodu doktorskiego; **Praca wyróżniona**;
2. Promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim mgr inż. Krzysztofa Smaka, tytuł rozprawy: *Badania procesu skrawania osiowo-symetrycznych cienkościennych części silników lotniczych o dużej smukłości wykonywanych z materiału trudno skrawalnego*, otwarty przewód doktorski.
3. Zajęcia dydaktyczne prowadzone dla studentów Wydziału Politechnicznego na kierunku: Mechanika i Budowa Maszyn.
 - Obróbka skrawaniem (wykład, ćw., lab.),
 - Obróbka bezwiórowa i spajanie (wykład, lab.),
 - Nowoczesne technologie (wykład, ćw.),
 - Inżynieria systemów (wykład, ćw.),
 - Obrabiarki CNC (wykład, lab.),
 - Planowanie i Sterowanie Produkcją PPC (wykład, ćw.),
 - Mikro- i nanotechnologia (wykład, ćw.)
4. Organizacja zajęć dydaktycznych i prac w laboratorium obrabiarek CNC; opieka i nadzór nad laboratorium obróbki skrawaniem,
5. Przygotowanie Kart przedmiotów wraz z programem nauczania dla prowadzonych przedmiotów,
6. Promotor i recenzent prac magisterskich I inżynierskich z zakresu mechaniki i budowy maszyn:
 - 2017 r. – promotor 9 prac inżynierskich i recenzent 2 prac inżynierskich,
 - 2018 r. – promotor 6 prac inżynierskich, recenzent 3 prac inżynierskich promotor 1 pracy magisterskiej i recenzent 1 pracy magisterskiej,
 - 2019 r. – promotor 8 prac inżynierskich i recenzent 3 prac inżynierskich,
 - 2020 r. – promotor 7 prac inżynierskich, recenzent 3 prac inżynierskich i promotor 5 prac magisterskich,
 - 2021 r. – promotor 9 prac inżynierskich, recenzent 9 prac inżynierskich i recenzent 1 pracy magisterskiej,

- 2022 r. – promotor 4 prac inżynierskich i recenzent 11 prac inżynierskich,
- 2023 r. – promotor 9 prac inżynierskich, recenzent 7 prac inżynierskich, promotor 4 prac magisterskich i recenzent 3 prac magisterskich,
- 2024 r. – promotor 8 prac inżynierskich, recenzent 7 prac inżynierskich, promotor 1 pracy magisterskiej i recenzent 1 pracy magisterskiej,
- 2025 r. – promotor 5 prac inżynierskich i recenzent 5 prac inżynierskich, promotor 1 pracy magisterskiej.

6.2. Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych

Brak

6.3. Działalność naukowa i współpraca z jednostkami naukowo-badawczymi

1. Współpraca naukowa z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu (dr hab. inż. Dariusz Garbiec).
2. Współpraca naukowa z Politechniką Poznańską (prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, dr hab. inż. Bartosz Gapiński – prof. uczelni).
3. Współpraca naukowa z Politechniką Świętokrzyską (prof. dr hab. inż. Edward Miko).
4. Współpraca naukowa z Politechniką Częstochowską (dr hab. inż. Sylwia Wencel – prof. uczelni).

7. Informacje o działalności organizacyjnej

Aktywne uczestnictwo w działalności organizacyjnej Wydziału Politechnicznego przejawia się w pełnieniu następujących funkcji:

- Kierownik laboratorium w Instytucie – Centrum Doskonałości Badań Kół Zębatych (od 2015 r. do 2023 r.);
- Członek Uczelnianej Komisji Wyborczej (od 2019 r. do dziś);
- Kierownik katedry Mechaniki u Budowy Maszyn (w 2023 r.);
- Aktywne uczestnictwo w komisjach prac dyplomowych na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych 1-go i 2-go stopnia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn – specjalność: Technologia maszyn.

8. Współpraca międzynarodowa

1. 03.07.2023 r. – 30.09.2023 r., Department of Engineering and Technology Management, Technical University of Cluj-Napoca, Rumunia. Badania dotyczące właściwości integralności powierzchni i zużycia narzędzi po obróbce trudnoobrabialnych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym

2. 02.12.2024 r. – 03.03.2025 r., Faculty of Mechanical Engineering of Technical University of Ostrava, Czechy. Badania zużycia płytek skrawających z węglików spiekanych podczas toczenia stopu Inconel 718 oraz analiza wpływu zużycia narzędzi i parametrów skrawania na mikrostrukturę warstwy wierzchniej i topografię powierzchni.

Zrealizowane staże naukowe były doskonałą okazją do wymiany doświadczeń w zakresie badań zużycia ostrzy skrawających podczas obróbki stopów na bazie niklu i stopów tytanu, a także zjawisk tribologicznych. Jednym z głównych rezultatów współpracy z naukowcami z Wydziału Mechanicznego Politechniki Ostrawskiej i Katedry Inżynierii i Zarządzania Technologią Politechniki w Cluj-Napoca jest opracowanie artykułu naukowego, który został opublikowany przez Applied Sciences (IF₂₀₂₅ = 2,5; MEiN₂₀₂₅: 100 pkt.). Wspólnie z naukowcami z Czech, Rumuni oraz Instytutu Łukasiewicza planowane są dalsze badania ostrzy skrawających wytworzonych techniką Spark Plasma Sintering (toczenie stopu tytanu 6Al2Sn4Zr2Mo ostrzami SPS z powłokami nałożonymi metodą PVD).

SUMARYCZNE ZESTAWIENIE OSIĄGNIĘĆ WNIOSKODAWCY

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Kryterium według §3 p.4, §4 i §5	Liczba
Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR)	13
Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	25
Udzielone patenty	0
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	5
Sumaryczny Impact Factor według listy Journal Citation Reports (JCR)	35,648
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	67
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	7
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	1
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	0
Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach:	
- międzynarodowych	4
- krajowych	17
Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	3
Aktywny udział w konferencjach naukowych:	
- międzynarodowych	4
- krajowych	9
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych międzynarodowych i krajowych	0
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	13
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	2
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	0
Opieka naukowa nad studentami	77
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	2
Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	2
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	0
Recenzowanie publikacji w czasopismach:	
- międzynarodowych	22
- krajowych	0

Podpis:

.....