

Politechnika Rzeszowska

Im. I. Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki

2025

PRACA DOKTORSKA

Karol Falandys

**Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatki
turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A**

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek Tutak

Pragnę serdecznie podziękować mojemu Promotorowi, Panu Doktorowi Habilitowanemu Krzysztofowi Kurcowi, Profesorowi Politechniki Rzeszowskiej za nieocenione wsparcie merytoryczne, konstruktywną krytykę oraz pomoc w rozwiązywaniu problemów technicznych. Jego wiedza, doświadczenie oraz otwartość na nowe idee były dla mnie źródłem motywacji i rozwoju naukowego. Dziękuję za możliwość współpracy.

Z całego serca dziękuję mojej żonie Ani za nieustające wsparcie, cierpliwość i zrozumienie, które towarzyszyły mi przez cały okres pracy nad tym projektem. Jej obecność i wiara w moje możliwości były dla mnie źródłem siły i motywacji w chwilach zwątpienia.

Dziękuję również moim dzieciom, Izie i Julci, za ich uśmiech, radość i przypomnienie, co w życiu jest naprawdę ważne. Wasza obecność dodaje sensu każdemu dniu i pomaga zachować równowagę między pracą, a życiem rodzinnym.

Bez Waszego wsparcia ta praca nie byłaby możliwa.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	6
1. Wprowadzenie	7
1.1. Przegląd literatury – optymalizacja procesów technologicznych	10
1.2. Przegląd literatury – wykorzystanie modelu Archarda	15
1.3. Przegląd literatury – analiza kosztów procesu produkcyjnego.....	18
1.4. Cel, teza i zakres pracy	21
2. Testy laboratoryjne	22
2.1. Stanowisko testowe	23
2.2. Identyfikacja istotnych parametrów procesu	26
2.3. Narzędzie	27
2.4. Testy	29
2.5. Wnioski	36
3. Testy w środowisku przemysłowym	37
3.1. Przygotowanie oraz realizacja planu badawczego	41
3.2. Analiza stanu części.....	47
4. Symulacja procesu szczotkowania z wykorzystaniem MES.....	51
4.1. Przygotowanie modelu MES	53
4.2. Wyniki	60
4.3. Porównanie z wynikami eksperymentalnymi	63
5. Wdrożenie oraz weryfikacja nowych parametrów procesu szczotkowania	68
5.1. Ocena wizualna krawędzi	69
5.2. Ocena promienia załamania krawędzi	72
6. Analiza kosztów procesu szczotkowania.....	75
6.1. Równania opisujące koszty procesu produkcyjnego	78
6.2. Analiza zmian kosztów w procesie szczotkowania.....	80
7. Wnioski i kierunki dalszych badań.....	82
Spis rysunków.....	85
Spis tabel	87
Literatura.....	88
Załącznik 1.....	98
Załącznik 2.....	101

Wykaz ważniejszych oznaczeń

MES – Metoda Elementów Skończonych

$n, X1$ – prędkość obrotowa narzędzia, rpm

$d, X2$ – średnica szczotki, mm

$q, X3$ – ilość obrobionych detali

t – czas trwania procesu, s

a – głębokość dosunięcia detalu do narzędzia, zagłębienie, mm

R, r – wartość promienia zatępienia krawędzi, mm

x – numer pomiaru

σ – odchylenie standardowe

\bar{X} – średnia arytmetyczna

y – grubość włosa, mm

b_0, b_1, b_2, b_3 – współczynniki równania regresji

$S^2(y)$ – wariancja błędu pomiaru

G – współczynnik powtarzalności

F – współczynnik testu F (Fishera-Snedecora)

1. Wprowadzenie

Firmy produkcyjne działające w branży lotniczej dążą do zapewnienia odpowiedniej jakości swoim wyrobom, co przekłada się na niezawodność produkowanych komponentów, a w konsekwencji na niezawodność całych statków powietrznych. Wymogi te mają wpływ bezpośrednio na długość okresu eksploatacji oraz bezpieczeństwo użytkowania czy to pojazdów latających, czy też poszczególnych urządzeń. Zwiększenie osiągnięć współcześnie wytwarzanych silników lotniczych, w odniesieniu do tych produkowanych w przeszłości, przy równoległych działaniach mających na celu redukcję wagi własnej poszczególnych komponentów sprawiają, że wymagania związane z zapewnieniem odpowiednich cech rysunkowych oraz właściwości materiałowych ulegają zwiększeniu [1-5].

Drugim równoległym zadaniem przedsiębiorstwa jest dążenie do zwiększania zysków poprzez ograniczanie wszelkiego rodzaju kosztów mających związek z procesem produkcyjnym. Uwzględniając uwarunkowania gospodarcze, szczególnie regulacje wprowadzone przez Unię Europejską takie jak „Gotowi na 55” („fit for 55”) oraz sytuację ekonomiczną w gospodarce, przedsiębiorstwa działające w branży lotniczej stawiają sobie za jedno z najważniejszych celów ograniczenie kosztów jednostkowych. Bezpośrednio ma to wpływ na wzrost konkurencyjności w odniesieniu do innych firm działających w przemyśle lotniczym. Cel ten może być realizowany na wiele sposobów takich jak ograniczenie konsumpcji energii elektrycznej [6-7], automatyzacja połączona z robotyzacją procesów produkcyjnych [8-16], upraszczanie procesów produkcyjnych czy też ograniczenie ilości zużywanych narzędzi.

Jedną z metod pozwalających na poprawę zysków przedsiębiorstwa poprzez ograniczenie kosztów związanych z produkcją komponentów lotniczych, a także zapewniającą powtarzalność oraz odpowiednie możliwości technologiczne jest robotyzacja i automatyzacja operacji wchodzących w skład procesu technologicznego. Wprowadzenie robotyzacji i automatyzacji składowych operacji produkcyjnych pozwala realizować w sposób obiektywny, poprzez eliminację subiektywnych odczuć operatorów, prace mające na celu ograniczenie kosztów. Robotyzacja oraz automatyzacja przekłada się także pozytywnie na warunki pracy. Redukuje bowiem narażenie pracowników przedsiębiorstwa na szkodliwe czynniki takie jak pył czy hałas [17-21]. W większej perspektywie umożliwia także przeprowadzenie bezstronnych planów badawczych mających na celu redukcję kosztów poprzez ograniczenie zużycia narzędzi, a także zapewnia jakość oraz powtarzalność niezbędne w przemyśle lotniczym. W związku z tym przed rozpoczęciem prac związanych z optymalizacją składowych operacji procesu produkcyjnego, konieczne jest wpierw zrobotyzowanie oraz zautomatyzowanie danej operacji.

Zgodnie z wymaganiami stawianymi firmom produkcyjnym zdecydowano się na przeprowadzenie prac mających na celu ograniczenie konsumpcji szczotek wykorzystywanych w procesie produkcyjnym do operacji gratowania (szczotkowania). Redukcja zużycia narzędzi przyczyni się korzystnie nie tylko do poprawy wyniku

finansowego przedsiębiorstwa, ale wpłynie także na ograniczenie śladu węglowego (redukcja emisji CO₂) powstałego w trakcie produkcji łopatek. Prace badawcze mają na celu przeprowadzenie optymalizacji procesu gratowania, poprzez modyfikację poszczególnych parametrów procesu, wyznaczając zestaw parametrów optymalnych pod kątem zużycia narzędzi. W niniejszej pracy zdecydowano się na wykorzystanie szeregu metod związanych z optymalizacją celem uzyskania efektu synergii. Prace związane z optymalizacją procesu zostały podzielone na kilka etapów mających na celu zwiększenie efektywności wykorzystania szczotek.

Proces szczotkowania (gratowania, zatępienia krawędzi) jest powszechnie stosowaną w przemyśle metodą obróbki powierzchniowej, wykorzystywaną do usuwania zadziorów, czyszczenia, zaokrąglania krawędzi, czy polerowania [22-25]. Proces szczotkowania służy także do przygotowywania powierzchni pod dalsze procesy technologiczne. Jest to technika elastyczna, efektywna kosztowo i łatwa do zautomatyzowania, co czyni ją atrakcyjną dla wielu branż przemysłowych. Omawiany proces znajduje szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. W motoryzacji proces ten jest obecny przy produkcji komponentów silników, skrzyń biegów czy akumulatorów elektrycznych gdzie usunięcie wszystkich zadziorów jest niezbędne dla zapewnienia bezpieczeństwa oraz odpowiedniej jakości produktów. W przemyśle lotniczym proces gratowania znajduje zastosowanie np. w produkcji łopatek turbin [26], gdzie usunięcie wszystkich zadziorów oraz odpowiednie przygotowanie krawędzi wpływa nie tylko na bezpieczeństwo użytkowania, ale także na osiągi silnika. W branży medycznej proces gratowania jest obecny w produkcji narzędzi chirurgicznych, implantów czy sprzętu diagnostycznego, ponieważ precyzyjne wykończenie krawędzi jest niezbędne do zapewnienia właściwej funkcjonalności oraz biokompatybilności. W sektorze energetyki odnawialnej proces zatępienia jest obecny przy produkcji komponentów turbin wiatrowych czy systemów montażu paneli fotowoltaicznych przekładając się na optymalną trwałość i wydajność systemów. Dzięki swojej wszechstronności oraz uniwersalności, proces szczotkowania jest stosowany w wielu innych branżach, takich jak przemysł maszynowy czy produkcja narzędzi skrawających. Jeżeli chodzi o zastosowanie narzędzi to jednym z najczęściej wykorzystywanym narzędziem do realizacji procesu gratowania są różnego rodzaju szczotki takie jak:

- szczotki druciane: wykorzystywane do usuwania zadziorów, czyszczenia oraz wyoblania powierzchni i krawędzi komponentów wykonanych z metalu;
- szczotki z włóknami nylonowymi z wtopionymi ziarnami ściernymi: stosowane w precyzyjnej obróbce, np. w produkcji narzędzi chirurgicznych, gdzie wymagane jest delikatne i kontrolowane usuwanie materiału;
- szczotki wykonane z materiałów zawierających ceramikę [27-28]: znajdują zastosowanie w produkcji komponentów lotniczych, gdzie niezbędne jest zapewnienie wysokiej jakości finalnych produktów;
- szczotki elastyczne: używane do zaokrąglania krawędzi i polerowania wnętrz otworów, szczególnie w obróbce stopów tytanu i innych materiałów trudno obrabialnych [29].

Wybór odpowiedniego narzędzia zależy od materiału obrabianego, geometrii detalu oraz wymagań dotyczących jakości powierzchni. Do realizacji procesu gratowania można stosować także inne narzędzia takie jak tarcze lub frezy.

Proces szczotkowania może być realizowany zarówno ręcznie, jak i w sposób w pełni zautomatyzowany i zrobotyzowany [30]. W przypadku obróbki manualnej, operator prowadzi narzędzie szczotkujące po powierzchni detalu lub przykłada obrabiany detal do wirującej szczotki kontrolując siłę nacisku i czas działania. Na skutek kontaktu wirującego narzędzia z obrabianym detalem dochodzi do ścierania się materiałów, w tym usunięcia zadziorów. W obróbce zautomatyzowanej, proces jest realizowany przy użyciu robotów przemysłowych lub maszyn CNC, co zapewnia powtarzalność i wysoką jakość obróbki, a także umożliwia optymalizację procesu szczotkowania. Parametry procesu gratowania, takie jak prędkość obrotowa szczotki, czas obróbki, siła docisku czy rodzaj i grubość włókien oraz zastosowanie środka chłodzącego, mają istotny wpływ na efektywność procesu oraz jakość uzyskiwanej powierzchni. Dobrze zaplanowany proces szczotkowania pozwala na uzyskanie powierzchni o odpowiedniej chropowatości, zaokrągleniu krawędzi oraz eliminacji zadziorów, co jest istotne dla dalszych procesów technologicznych i finalnej jakości produktu.

Mimo licznych zalet, proces szczotkowania wiąże się również z pewnymi wyzwaniami. Należy do nich generowanie pyłów i cząsteczek ściernych podczas obróbki na sucho, co może stanowić zagrożenie dla zdrowia operatorów oraz środowiska. Dodatkowo, niewłaściwy dobór parametrów procesu może prowadzić do powstawania nowych zadziorów, zmian w wymiarach obrabianego detalu, zmęczenia materiału czy wprowadzenia naprężeń resztkowych. W odpowiedzi na te wyzwania, rozwijane są technologie umożliwiające bardziej precyzyjne i bezpieczne przeprowadzanie procesu szczotkowania. Przykładem jest wykorzystanie szczotek magnetycznych, które pozwalają na precyzyjne usuwanie zadziorów bez ryzyka uszkodzenia detalu.

Proces szczotkowania stanowi istotny element nowoczesnej obróbki powierzchniowej, oferując szerokie możliwości w zakresie usuwania zadziorów, zaokrąglania krawędzi oraz przygotowywania powierzchni pod dalsze procesy technologiczne. Dzięki swojej wszechstronności i elastyczności, znajduje zastosowanie w wielu branżach przemysłowych, przyczyniając się do poprawy jakości i funkcjonalności produkowanych komponentów.

1.1. Przegląd literatury – optymalizacja procesów technologicznych

Opis różnych rodzajów metod mających na celu ograniczenie kosztów poszczególnych operacji wchodzących w skład procesów produkcyjnych stanowił przedmiot zainteresowania wielu autorów. W dalszej części zdecydowano się omówić wybrane prace traktujące o optymalizacji różnych operacji produkcyjnej.

W publikacji [31] Autor obiera za cel prowadzonych prac naukowych redukcję zużycia energii elektrycznej podczas realizacji operacji obróbki skrawaniem oraz wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia wykorzystywanego w procesie toczenia. W swojej pracy zaznacza, że niezbędnym wymaganiem jest przeprowadzanie badań na maszynie CNC wyposażonej w układ do pomiaru pobieranej mocy. W publikacji analizuje wpływ różnych parametrów procesu technologicznego na czas eksploatacji narzędzia. Do testów zostały wybrane parametry operacji technologicznej takie jak prędkość skrawania, posuw, głębokość skrawania oraz promień zaokrąglenia narzędzia. W badaniach został wykorzystany kompozyt na podstawie metalowej (metal matrix composites, MMC) 7075 Al z 15% udziałem SiC. Natomiast materiał z jakiego przygotowano narzędzia to stal 6615 z węglikiem wolframu. W ramach przeprowadzonych badań modyfikowano zestaw parametrów opisujących proces toczenia oraz analizowano ich wpływ na poziom obciążeń powstających w trakcie realizacji procesu. W wyniku przeprowadzenia szeregu eksperymentów oraz po opracowaniu wyników z wykorzystaniem metody RSM (Response Surface Methodology), otrzymano zestaw parametrów technologicznych teoretycznie optymalny pod względem przyjętych założeń. Warty podkreślenia jest fakt przeprowadzenia przez Autora tego opracowania, testu weryfikującego otrzymane wyniki. Optymalne ze względu na ilość zużywanej energii elektrycznej oraz długość eksploatacji narzędzia wyniki zostały uzyskane dla identycznego zestawu parametrów wejściowych. Zdefiniowany został zestaw parametrów toczenia przekładający się na minimalizację zużycia energii (redukcja o około 13%) oraz wydłużenie czasu operacyjnego narzędzia (wzrost o około 22%). Na podstawie uzyskanych wyników Badacz wnioskuję, że przełożenie się poszczególnych rozpatrywanych parametrów technologicznych na pożądane redukcje jest różny. W największym stopniu na ograniczenie konsumpcji energii elektrycznej oraz wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia ma wpływ prędkość skrawania, a następnie głębokość skrawania, posuw oraz promień wierzchołka narzędzia. W przytoczonym opracowaniu Autor podkreśla pozytywną wartość swoich osiągnięć w dziedzinie optymalizacji parametrów procesu technologicznego na redukcję konsumpcji zasobów niezbędnych do realizacji wybranej operacji produkcyjnej. Działanie to przekłada się pozytywnie na środowisko naturalne.

W publikacji zatytułowanej „Mathematical modelling and optimization of cutting conditions in turning operation on MDN 350 steel with carbide inserts“ [32] Autorzy podjęli starania mające na celu wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia przy użyciu metody bazującej na sztucznej sieci neuronowej oraz przy zastosowaniu algorytmu genetycznego. Ponad to za cel badań Autorzy artykułu obrali obniżenie kosztów produkcji oraz zapewnienie odpowiedniej jakości obrabianej powierzchni. Eksperymenty były przeprowadzane na stali M350 charakteryzującej się wysoką twardością. W ramach

przeprowadzonych eksperymentów zostały przygotowane różne zestawy wyselekcjonowanych parametrów takich jak prędkość obrotowa obrabianej sztuki, posuw oraz głębokość skrawania. Te dane posłużyły do wyznaczenia optymalnych parametrów narzędzia pod kątem czasu eksploatacji. W dalszej części eksperymentów dodatkowo badano wpływ innych parametrów takich jak kąt skrawania, promień zaokrąglenia płytki skrawającej oraz kąt pochylenia. Wyselekcjonowany drugi zestaw parametrów technologicznych miał wpływ na chropowatość powierzchni. Dzięki zastosowanym metodom badawczym oraz przy wykorzystaniu odpowiednich algorytmów Autorzy uzyskali teoretyczny zestaw parametrów, odpowiadający za optymalny czas pracy narzędzia przy zapewnieniu możliwie najlepszej struktury obrabianej powierzchni. Jako ostatni etap przeprowadzonych eksperymentów zdecydowano się na empiryczną weryfikację matematycznie wyznaczonych parametrów technologicznych procesu toczenia. Dla wyznaczonego zestawu parametrów w postaci prędkości obrotowej wynoszącej 1000 rpm, posuwu 0.075 mm/rpm oraz głębokości skrawania 0.5 mm teoretyczny czas eksploatacji narzędzia wyniósł 320 minut, natomiast wartość pochodząca z dedykowanego eksperymentu wynosi 324 minuty co daje różnicę ok 1%. W odniesieniu do wyników związanych z chropowatością powierzchni różnica pomiędzy modelem teoretycznym, a wynikiem rzeczywistym jest mniejsza niż 5%. Dzięki przeprowadzonym pracom optymalizacyjnym doprowadzono do wydłużenia czasu eksploatacji narzędzi o 80%. Także różnica pomiędzy wynikami teoretycznymi oraz eksperymentalnymi jest niewielka (1-5%). Tematyka oraz wnioski z przeprowadzonych badań ma według Badaczy uniwersalne zastosowanie w przypadku przeprowadzania prac optymalizacyjnych dotyczących materiałów charakteryzujących się podobnymi właściwościami mechanicznymi. Dodatkowo w podsumowaniu wymieniono inne parametry takie jak rodzaj wykorzystywanego chłodziwa, materiał narzędzia skrawającego czy modyfikacje powłoki płytki skrawającej jako zasadne do przanalizowania w dalszej fazie optymalizowania. Podjęta tematyka prac oraz uzyskane wyniki przekładają się korzystnie na koszt jednostkowy operacji toczenia oraz doprowadzają do redukcji śladu węglowego.

Autorzy opracowania „Optimization Parameters of tool life Model Using the Taguchi Approach and Response Surface Methodology,” [33] przeprowadzili optymalizację operacji tokarskiej realizowanej na maszynie CNC. Za cel prowadzonych prac objęli taki dobór parametrów operacji toczenia, który przełoży się na maksymalizację czasu eksploatacji narzędzia. Do osiągnięcia założonych celów prac badawczych wykorzystano optymalizację metodami Taguchi oraz Response Surface Methodology (RSM). Przed przystąpieniem do eksperymentu zdecydowano się na wybór odpowiednich parametrów technologicznych – prędkości obrotowej, głębokości skrawania oraz posuwu. Wybrane parametry przyjmowały wartości na trzech różnych poziomach. Łącznie przełożyło się to na dziewięć prób reprezentujących różne kombinacje wskazanych kluczowych parametrów toczenia. We wszystkich testach użyto próbek wykonanych z tego samego materiału – stali o oznaczeniu AISI 1045. Dzięki zastosowaniu Response Surface Methodology uzyskano matematyczne równanie opisujące czas eksploatacji narzędzia na podstawie danych wejściowych, które stanowiły wybrane uprzednio parametry technologiczne. Na podstawie otrzymanego równania wyznaczono zestaw parametrów przekładający się na maksymalny czas operacyjny narzędzia. Różnica pomiędzy

wynikami teoretycznymi – uzyskanymi z modelu matematycznego, a rzeczywistym czasem narzędzia wynosiła mniej niż 1%. Co warte podkreślenia zakres czasu z jakim mogło pracować narzędzie przy różnych wartościach parametrów zmienia się pomiędzy około 90, a około 670 minut. Zestaw parametrów opracowanych z wykorzystaniem metody Tauguchi okazał się identyczny z wynikami uzyskanymi z metody RSM. Różnice w maksymalnym czasie eksploatacji narzędzia, uzyskane na podstawie tych dwóch różnych metod, okazały się nieistotne gdyż wynosiły znacznie mniej niż 1%.

W opracowaniu „Integrated optimization of cutting parameters and tool path for cavity milling considering carbon emissions” [34] Autorzy postawili sobie za cel taki dobór parametrów operacji frezowania, który przełoży się na ograniczenie emisji CO² związanej z realizacją wybranej operacji technologicznej. Prace badawcze mają za cel ograniczenie zużycia energii elektrycznej, niezbędnej do realizacji operacji frezowania, a także skrócenie czasu trwania procesu. Do opracowania wyników zdecydowano się na wykorzystanie algorytmu Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II). We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach frezowano w stali C45. W rozważaniach zdecydowano się uwzględnić, zarówno wpływ parametrów procesu technologicznego jak i też strategię opracowania ścieżek po, których porusza się frez. Autorzy postanowili, że nie będą uwzględniać skutków interakcji tych dwóch czynników wpływających na czas i koszty przeprowadzanej operacji. Jako rezultat przeprowadzonych prac Autorzy wykazują, że odpowiedni dobór parametrów frezowania może doprowadzić do skrócenia czasu operacji o około 20% i 15% spadek emisji CO² oraz kosztów. Jako słaby punkt przeprowadzonych badań wskazują, że podczas testów przeprowadzana była obróbka powierzchni płaskich. W przypadku frezowania powierzchni zakrzywionych istnieje możliwość, że uzyskane redukcje czasu oraz kosztów operacji mogą przyjąć inne wartości.

Optymalizacja operacji frezowania ze względu na czas trwania oraz ilość zużytej energii elektrycznej została także opisana w artykule „Dual-objective program and improved artificial bee colony for the optimization of energy-conscious milling parameters subject to multiple constraints” [35]. W opracowaniu Badacze przyjęli za cel taki dobór parametrów, który doprowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną w trakcie operacji frezowania, jak również przełoży się na skrócenie czasu potrzebnego do jej przeprowadzenia. W swoich rozważaniach zdecydowali się na wykorzystanie algorytmu ABC (Artificial Bee Colony). Wszystkie próby były przeprowadzane na metalowych blokach wykonanych z bliżej nieokreślonego stopu aluminium. Rezultatem podjętych działań dążących do dwukryterialnej optymalizacji jest uzyskanie dwóch zestawów parametrów przekładających się na jak najmniejsze zużycie energii elektrycznej oraz redukcję czasu operacji. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów ustalono, że minimalna moc niezbędna do realizacji procesu frezowania może wynosić 0.68 kW, podczas gdy maksymalne zapotrzebowanie na energię elektryczną może wynosić 1.52 kW. Natomiast w odniesieniu do czasu, czas trwania operacji wynosił pomiędzy 2.5 a 11.3 sekundy. Tak duża rozbieżność wyników podkreśla ważność działań związanych z racjonalnym wykorzystaniem dostępnych zasobów. W omawianej publikacji znalazły się też krytyczne uwagi dotyczące sposobu przeprowadzania prób. Autorzy podkreślają konieczność przeprowadzenia badań dla

bardziej skrajnych wartości parametrów technologicznych prowadzących do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej temperatury procesu. Warty rozważenia, w opinii Autorów jest konieczność zastosowania w dalszych badaniach bardziej złożonych operacji frezowania w odniesieniu do kształtu obrabianej powierzchni.

W dostępnej literaturze można znaleźć też szereg opracowań dotyczących optymalizacji przeprowadzanych dla operacji szlifierskich. W pracy zatytułowanej „Predictive modelling and Pareto optimization for energy efficient grinding based on aANN-embedded NSGA II algorithm” [36] Autorzy podkreślają, że w stosunku do innych operacji obróbki skrawaniem szlifowanie jest zdecydowanie bardziej energochłonnym procesem. W przeprowadzonych pracach badawczych za cel obrali sobie uzyskanie takiego zestawu kluczowych parametrów procesu szlifowania, aby przy zachowaniu właściwej jakości produkowanych detali, uzyskać minimum zużycia energii. Do realizacji postawionych celów został wykorzystany algorytm NSGA II, a wykorzystywanym w pracach badawczych materiałem była stal AISI 1045. W ramach przeprowadzonych prób modyfikowane były następujące parametry wejściowe: prędkość obrotowa ściernicy, posuw oraz głębokość skrawania. Jako wynik przeprowadzanych prób brano pod uwagę chropowatość Ra, czas trwania szlifowania, a także ilość energii niezbędną do przeprowadzenia poszczególnych operacji, różniących się od siebie wybranymi parametrami.

W artykule zatytułowanym “Assessment and optimization of grinding process on AISI 1045 steel in terms of green manufacturing using orthogonal experimental design and grey relational analysis” [37] Autorzy opisali proces optymalizacji operacji szlifowania. W przeprowadzonych pracach badawczych wykorzystywali stal AISI1045. W ramach podjętych aktywności dokonywali szeregu eksperymentów, w których poszczególne próby różniły się od siebie zestawem parametrów technologicznych oraz warunkami chłodzenia. Za cel obrali wyznaczenie zestawów parametrów szlifowania optymalnych pod różnymi względami takimi jak optymalizacja kosztów, optymalizacja wpływu na środowisko, optymalizacja benefitów wpływających na zdrowie oraz jakość produkowanych detali. Otrzymane w testach wyniki zostały poddane procesowi optymalizacji z wykorzystaniem metody Tauguchi. W ramach opracowania wyników przedstawiono szereg różnych kombinacji parametrów technologicznych w zależności od ustalonych priorytetów na rezultat końcowy. Najciekawszy ze względu na kompleksowość rozwiązania jest zestaw parametrów wyznaczony w celu uzyskania benefitów z każdej z czterech kategorii. W wyniku zaproponowanych zmian w kluczowych parametrach technologicznych dla badanej operacji szlifowania wykazano poprawę w stosunku do bazowo przyjętych wartości parametrów na poziomie 40%.

Na podstawie powyższych opracowań można wywnioskować, że cel poszukiwania zestawu parametrów procesu technologicznego, przekładający się na optymalizację procesu produkcyjnego, w tym wydłużenie czasu wykorzystania narzędzi mający na celu redukcję kosztów jest przedmiotem zainteresowania wielu autorów. Badacze przeprowadzali optymalizację różnych operacji technologicznych wykorzystując w swoich badaniach stale, stopy aluminium czy materiały kompozytowe. Cechą wspólną przeprowadzonych prac jest ich realizacja z wykorzystaniem maszyn CNC, które

zapewniają właściwą powtarzalność dla poszczególnych prób realizowanych w ramach testów. Naukowcy w swoich badaniach wykorzystywali różne metodologie mając za cel dążenie do wyznaczenia takich parametrów, które przyczynią się do redukcji kosztów operacyjnych poprzez ograniczenie wykorzystywanej w procesie produkcyjnym energii oraz na wydłużenie okresu wykorzystania narzędzi czy też ograniczenie czasu trwania operacji produkcyjnej. W przytoczonych opracowaniach zawsze wykazywane były różnice pomiędzy teoretycznie uzyskiwanymi rozwiązaniami, a wynikami eksperymentalnymi. W licznych artykułach podkreślano także zalety wynikające z przeprowadzanych prac optymalizacyjnych. Po implementacji w warunkach przemysłowych można uzyskać redukcję kosztów, co finalnie przełoży się na poprawę wyników finansowych przedsiębiorstwa. Z kolei w odniesieniu do ograniczenia śladu węglowego zyska na takich działania ogół społeczeństwa. Podsumowując działania dążące do bardziej racjonalnego wykorzystania dostępnych zasobów czy to w postaci ilości zużywanych narzędzi, czy też ilości energii elektrycznej wykorzystywanej w trakcie realizacji procesu produkcyjnego stanowią wyzwanie oraz cel dla wielu zespołów badawczych.

1.2. Przegląd literatury – wykorzystanie modelu Archarda

Wykorzystanie metody elementów skończonych dzięki licznym zaletom związanym przede wszystkim z redukcją kosztów oraz czasu pomiędzy rozpoczęciem prac nad danym produktem, a wprowadzeniem go na rynek znalazło szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Także rozwój dostępnych mocy obliczeniowych komputerów oraz klastrów obliczeniowych doprowadził do zwiększenia się popularności tego narzędzia w minionych latach. Dzięki zastosowaniu obliczeń numerycznych możliwe stało się optymalizowanie części pod kątem ciężaru, trwałości czy racjonalne wykorzystanie materiałów konstrukcyjnych. Wraz ze wzrostem zastosowania obliczeń numerycznych oraz licznym benefitom z tego wynikającym możliwy stał się rozwój systemów obliczeniowych nie tylko pod względem wydajności, ale także funkcjonalności. Jedną z możliwości wynikających z wykorzystania metody elementów skończonych w pracach projektowych jest możliwość przeprowadzania obliczeń numerycznych pozwalających na prognozowanie czasu przez jaki dana część czy mechanizm może spełniać zakładane cele projektowe. Przeprowadzając obliczenia numeryczne do oceny długości życia produktu nie trzeba tylko bazować na zjawiskach związanych ze zjawiskiem pęczania czy wytrzymałością wysoko oraz niskocyklową. Wykorzystanie współcześnie dostępnych komercyjnych systemów obliczeniowych daje możliwość zaimplementowania do modelu numerycznego także zagadnień związanych z trybologią. Symulowanie zjawiska zużycia ściernego stało się przedmiotem badania wielu Naukowców. Ze względu na stosunkową łatwość implementacji jednym z najpopularniejszych modeli pozwalających na zdefiniowanie zjawiska ściernia się stał się model Archarda. Poniżej przytoczono szereg artykułów naukowych w których to autorzy wykazywali, w korelacji do testów, wady oraz zalety wynikające ze stosowania tego modelu.

W publikacji „Modelling of the Die Wear in the Hot Forging Process Using the Archard Model” [38] Autorzy przeprowadzili symulację zużycia ściernego formy wykorzystywanej w procesie kucia na gorąco podkreślając, że jednym z głównych wyzwań związanych z realizacją procesu kucia na gorąco jest zużywanie ściernie przygotowanej formy. Jednocześnie zjawisko zużywania się formy jest jednym z największych składowych wpływających na koszt realizacji tej operacji technologicznej. Numeryczna symulacja kucia została wykonana w komercyjnym systemie służącym do przeprowadzania obliczeń metodą elementów skończonych. Do projekcji zużycia ściernego zdecydowano się wykorzystać model Archarda. Na podstawie porównania otrzymanych wyników symulacji numerycznych do rzeczywistego zużywania się formy potwierdzono, że model Archarda daje zadowalające wyniki. Z przeprowadzonych prac wynika jednoznacznie, że wpływ zużycia ściernego ma znaczący wpływ na kształt matrycy. W związku z powyższych jednym z wniosków, zaleceń jest przeprowadzanie obliczeń numerycznych w czasie życia narzędzia. Ma to na celu prognozowanie wyników procesu kucia z uwzględnieniem zużycia ściernego. W podsumowaniu wspomniano natomiast, że w celu poprawy korelacji wyników eksperymentalnych, z obliczeniami numerycznymi należy opracować bardziej dokładny model uwzględniający różne mechanizmy prowadzące do zużycia ściernego. Nastąpiło to na skutek identyfikacji

zużycia pewnych obszarów matrycy, w których dominował inny charakter zużycia niż ścierny.

W artykule „Physics-Based Simulations of Chip Flow over Micro-Textured Cutting Tool in Orthogonal Cutting of Alloy Steel” [39] Autorzy wykorzystują model zużycia ściernego Archarda jako element budowanego cyfrowego bliźniaka dla procesu skrawania. Fundamentalnym celem przeprowadzonych badań jest przygotowanie symulacji numerycznej procesu skrawania, mającego na celu wyznaczenie sił skrawania, tarcia oraz zużycia ściernego narzędzia w zależności od zmiennych parametrów fizycznych. Przygotowany model numeryczny pozwolił na porównanie wyników symulacji oraz danych pochodzących z testów w celu oceny szybkości zużywania się narzędzi, a także wpływu teksturowania na tą zależność. W wyniku przeprowadzonych prac oraz symulacji numerycznych uzyskano potwierdzenie wpływu makrotekstury utworzonej na powierzchni narzędzia przy wykorzystaniu EDM na poziom sił, temperatury oraz ciśnienia powstających w trakcie realizacji operacji cięcia. Opracowane dane pozwolą na przeprowadzanie badań oraz prac optymalizacyjnych w środowisku wirtualnym co przełoży się korzystnie na czas oraz koszty wdrożeń produkcyjnych. Przygotowanie cyfrowego bliźniaka z wykorzystaniem dokładnego modelu zużycia ściernego pozwoli na realizację zadań związanych z opracowaniem nowych narzędzi udoskonalonych pod względem wydajności.

Autorzy publikacji „Efficient Wear Simulation Methodology for Predicting Nonlinear Wear Behavior of Tools in Sheet Metal Forming” [40] poszukiwali wydajnej metody mającej na celu redukcję długości obliczeń w celu prognozowania zużycia ściernego stempli wykorzystywanych w procesie tłoczenia. Proces tłoczenia na zimno jako metoda przygotowania elementów karoserii nadwozia, zyskuje na popularności wraz z rozwojem pojazdów elektrycznych oraz tych zasilanych wodorem. Także mając na uwadze koszty produkcji należy dążyć do przewidywania z wyprzedzeniem ewentualnych błędów produkcyjnych wynikających ze zużywania się elementów tłocznych. Jednym z czynników powodujących problemy jest zużycie ściernie form oraz tłoczników, a koniecznością staje się wymóg prognozowania długości życia tych elementów. Przy znaczących wartościach zużycia ściernego występującego w symulacji numerycznej, dla zachowania dokładności wyników niezbędne jest aktualizowanie geometrii. Proces indukuje także konieczność przeprowadzenia generowania siatki elementów skończonych, co w rezultacie prowadzi do wydłużenia czasu obliczeń. Chcąc temu zaradzić Autorzy postanowili przygotować metodologię pozwalającą na uzyskanie satysfakcjonujących wyników symulacji numerycznej (pod względem dokładności), a także zoptymalizować czas niezbędny do uzyskania tych wyników. W celu uchwycenia nieliniowego charakteru zjawiska zdecydowano się na wprowadzenie modyfikacji do symulowania zużycia ściernego przy wykorzystaniu modelu Archarda. W ten sposób wykorzystując współczynnik skali reprezentujący zmiany właściwości zużycia w odniesieniu do głębokości zużycia jako dane wejściowe, symulacja numeryczna może przewidzieć zachowanie szybko pogłębiającego się zużycia ściernego. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz wprowadzonych modyfikacji do modelu Archarda uzyskano zoptymalizowany model numeryczny pod względem czasu obliczeń, umożliwiający przewidywanie długości życia stempla na skutek uszkodzenia ściernego.

W oparciu o przytoczone publikacje można stwierdzić, iż model Archarda jest szeroko wykorzystany, pozwalając na symulację zużycia ściernego w oprogramowaniu bazującym na metodzie elementów skończonych. Wspomniany model jest z powodzeniem wykorzystywany do symulowania takich procesów jak kucie na gorąco, przecinanie czy proces tłoczenia. Wszystkie wspomniane operacje wykorzystywane są szeroko w różnych gałęziach przemysłu. Uzyskiwane za pomocą tej metody symulacji zużycia ściernego wyniki były weryfikowane na podstawie danych bazujących na testach. Model Archarda może być także poddawany z powodzeniem modyfikacjom mającym na celu optymalizowanie czasu obliczeń numerycznych co w konsekwencji przekłada się na oszczędność kosztów i czasu projektowania, a w szerszej perspektywie prowadzi do redukcji śladu węglowego. Redukcja śladu węglowego dokonywana jest na skutek ograniczenia zużycia energii elektrycznej niezbędnej do przeprowadzenia obliczeń numerycznych. Także wykorzystanie modelu prognozowania zużycia ściernego do opracowania cyfrowych bliźniaków procesów produkcyjnych wpływa korzystnie na bardziej racjonalne wykorzystanie dostępnych zasobów. Dzięki takim zastosowaniom nie ma konieczności opracowywania drogich prototypów narzędzi czy przeprowadzania szeroko zakrojonych badań weryfikujących wpływ poszczególnych parametrów technologicznych na gotowy produkt. Racjonalizacji ulega także czas eksploatacji narzędzi, co znajduje pozytywne przełożenie zarówno na środowisko naturalne, jak i na koszty operacyjne.

1.3. Przegląd literatury – analiza kosztów procesu produkcyjnego

Analiza kosztów procesów produkcyjnych stanowi jedno z najważniejszych wyzwań skutecznego zarządzania w przedsiębiorstwach produkcyjnych, zwłaszcza tych działających w branży lotniczej. Ze względu na specyfikę, wysokie wymagania technologiczne oraz najważniejszą z punktu widzenia użytkownika jakość, produkcja w sektorze lotniczym cechuje się złożonością i wysokimi kosztami operacyjnymi [41]. Właściwe zrozumienie oraz kontrola tych kosztów pozwala przedsiębiorstwom na utrzymanie konkurencyjności na globalnym rynku. Jak zauważają Autorzy publikacji [42,43], w branży lotniczej dokładna alokacja kosztów jest ważna dla podejmowania strategicznych decyzji oraz optymalizacji procesów produkcyjnych niezależnie od przyjętych metod produkcji [44]. Co warto podkreślić, estymacji kosztów produkcyjnych dokonywać można już w fazie projektowania poszczególnych komponentów [45,46]. Ponadto dokładna analiza kosztów wpływa na efektywność wykorzystania zasobów, minimalizując marnotrawstwo oraz wspierając zrównoważony rozwój przedsiębiorstwa. W dobie rosnącej presji na redukcję wpływu działalności człowieka na środowisko, kosztowa optymalizacja operacji produkcyjnych staje się znaczącym elementem strategii biznesowych [47]. Branża lotnicza jest jednym z najbardziej kapitałochłonnych sektorów przemysłu, gdzie koszty produkcji często wynoszą setki tysięcy złotych za pojedynczy komponent. Wysoka precyzja i niezawodność elementów lotniczych uzyskiwane za pomocą złożonych procesów produkcyjnych przekładają się na znaczny wzrost kosztów [48]. Analiza kosztów operacji produkcyjnych pozwala na identyfikację krytycznych etapów, które generują największe wydatki. Stosowanie zaawansowanych metod obliczania kosztów, takich jak Activity Based Costing (ABC) [49-52], umożliwia dokładniejsze przypisanie kosztów pośrednich do konkretnych operacji produkcyjnych. Istnieją też inne metody, np. Material Flow Cost Accounting (MFCA)[53,54], która to jest narzędziem pozwalającym na kompleksową analizę kosztów materiałów oraz odpadów, dzięki czemu możliwa jest identyfikacja ukrytych strat i potencjałów do optymalizacji [55]. Dzięki temu przedsiębiorstwa lotnicze mogą poprawić alokację zasobów, ograniczyć nadmierne zużycie materiałów oraz zwiększyć efektywność produkcji, co przekłada się na niższe koszty jednostkowe oraz wyższą konkurencyjność [56]. Istnieje szereg zalet przeprowadzania optymalizacji kosztów, które można podzielić między innymi na zalety ekonomiczne, środowiskowe czy społeczno-gospodarcze. Ze względów ekonomicznych, optymalizacja kosztów prowadzi do bezpośrednich oszczędności finansowych, które mogą być reinwestowane w rozwój technologiczny, badania czy podnoszenie kwalifikacji pracowników. Przykładowo, zastosowanie technologii pozaautoklawowych w produkcji kompozytowych elementów lotniczych pozwala na znaczne skrócenie czasu produkcji oraz redukcję zużycia energii [57]. Takie innowacje nie tylko zwiększają efektywność, ale też umożliwiają bardziej elastyczne reagowanie na zmieniające się wymagania rynku. W dłuższej perspektywie, dzięki optymalizacji kosztów [58], przedsiębiorstwa mogą obniżyć ceny swoich produktów, co przekłada się na większy udział w rynku oraz wzrost przychodów.

Optymalizacja kosztów często idzie w parze z redukcją zużycia surowców i energii elektrycznej, co ma pozytywny wpływ na środowisko naturalne [59]. Choć jej głównym celem jest zwiększenie efektywności ekonomicznej, coraz częściej dostrzega się również

jej potencjalny wpływ na środowisko naturalne. Współczesne podejście do zarządzania produkcją zakłada, że działania zmierzające do redukcji kosztów mogą – przy odpowiednim ukierunkowaniu – prowadzić do ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko. Jednym z podstawowych mechanizmów, dzięki którym optymalizacja kosztów wpływa pozytywnie na środowisko, jest zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych. Przykładowo, wdrażanie technologii lean manufacturing [60] przy wsparciu sztucznej inteligencji pozwala na eliminację marnotrawstwa materiałowego i energetycznego, co przekłada się na mniejsze zużycie surowców i energii elektrycznej [61]. Redukcja odpadów produkcyjnych oraz emisji zanieczyszczeń staje się w tym kontekście nie tylko efektem ubocznym, ale również celem samym w sobie, szczególnie w przedsiębiorstwach realizujących strategię zrównoważonego rozwoju [62]. Kolejnym istotnym aspektem jest automatyzacja i cyfryzacja procesów produkcyjnych, które umożliwiają precyzyjne monitorowanie i sterowanie zużyciem energii oraz emisjami CO₂. Systemy zarządzania energią (EMS) oraz narzędzia oparte na sztucznej inteligencji pozwalają na dynamiczne dostosowywanie parametrów produkcji do aktualnych potrzeb, co zmniejsza straty energetyczne i poprawia efektywność środowiskową [63]. Warto również zauważyć, że optymalizacja kosztów może prowadzić do zmiany struktury łańcucha dostaw, np. poprzez lokalizację produkcji bliżej rynków zbytu, co redukuje emisje związane z transportem [64,65]. Z drugiej strony, nieodpowiednio przeprowadzona optymalizacja – np. poprzez przenoszenie produkcji do krajów o niższych standardach środowiskowych – może prowadzić do tzw. „eksportu zanieczyszczeń” i pogorszenia globalnego bilansu ekologicznego. W literaturze podkreśla się również znaczenie oceny cyklu życia (LCA) jako narzędzia wspierającego decyzje optymalizacyjne. Dzięki analizie wpływu środowiskowego na każdym etapie życia produktu – od pozyskania surowców po utylizację – możliwe jest identyfikowanie obszarów, w których optymalizacja kosztów przynosi jednocześnie korzyści ekologiczne [66-68].

Optymalizacja kosztów produkcji, choć często postrzegana głównie przez pryzmat efektywności ekonomicznej, ma również istotny wpływ na warunki społeczne w przedsiębiorstwach przemysłowych. Jednym z istotnych obszarów, w których ten wpływ jest szczególnie widoczny, jest automatyzacja procesów produkcyjnych [69-72]. Wdrażanie nowoczesnych technologii, takich jak roboty przemysłowe, systemy sterowania numerycznego (CNC) czy sztuczna inteligencja, nie tylko zwiększa wydajność, ale także znacząco poprawia jakość środowiska pracy. Automatyzacja pozwala na eliminację najbardziej uciążliwych, monotonicznych i niebezpiecznych zadań, które wcześniej były wykonywane ręcznie przez pracowników [73,74]. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko wypadków przy pracy, urazów ergonomicznych oraz długotrwałego narażenia na szkodliwe czynniki, takie jak hałas, pyły czy substancje chemiczne. Pracownicy są coraz częściej przesuwani do ról nadzorczych, kontrolnych lub związanych z obsługą i programowaniem maszyn, co wiąże się z wyższym poziomem kwalifikacji i często lepszym wynagrodzeniem [75,76]. Co więcej, optymalizacja kosztów poprzez automatyzację może prowadzić do większej stabilności zatrudnienia w dłuższej perspektywie. Choć początkowo może wiązać się z redukcją liczby miejsc pracy w obszarach niskokwalifikowanych, to jednocześnie tworzy zapotrzebowanie na specjalistów w różnych dziedzinach inżynierii, IT, utrzymania ruchu czy analizy danych.

W efekcie przedsiębiorstwa inwestują w szkolenia i rozwój kompetencji swoich pracowników, co sprzyja ich długofalowemu rozwojowi zawodowemu [77-79]. W literaturze podkreśla się również, że optymalizacja kosztów może poprawić kulturę organizacyjną poprzez wdrażanie systemów ciągłego doskonalenia (kaizen), które angażują pracowników w procesy decyzyjne i usprawnienia operacyjne. Tego typu podejście zwiększa poczucie odpowiedzialności, satysfakcję z pracy oraz identyfikację z celami firmy [80-82]. Podsumowując, optymalizacja kosztów produkcji, może przynieść istotne korzyści ekonomiczne, środowiskowe oraz społeczne, pod warunkiem że jest realizowana w sposób odpowiedzialny i zrównoważony. Optymalizacja kosztów produkcji może stanowić skuteczne narzędzie wspierające cele środowiskowe wtedy gdy, jest realizowana w sposób świadomy i zintegrowany z polityką zrównoważonego rozwoju. Kluczowe znaczenie ma tu podejście systemowe, uwzględniające zarówno aspekty ekonomiczne, jak i środowiskowe oraz społeczne.

1.4. Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy jest optymalizacja wybranych parametrów operacji gratowania ostrych krawędzi w procesie produkcyjnym łopatek turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A, która przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia. Jednocześnie należy utrzymać właściwą jakość produkowanych elementów niezbędną w przemyśle lotniczym. Dzięki realizacji celu prac badawczych zostaną spełnione wymagania zakładu produkcyjnego w zakresie finansów oraz ochrony środowiska.

Z racji tak sformułowanego celu pracy wynika następująca teza pracy: *w analizowanym zakresie zmienności parametrów procesu szczotkowania, istnieje lokalne minimum zużycia materiałów ściernych, którego ustalenie przełoży się bezpośrednio na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia (zwiększenie ilości sztuk obrabianych z wykorzystaniem pojedynczego narzędzia).*

Proces badawczy składa się z następujących etapów, realizowanych zarówno w laboratorium, jak i na wdrożonym zrobotyzowanym stanowisku przemysłowym opracowanym na podstawie badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych:

- Przeprowadzenie testów wstępnych mających na celu, poznanie różnicy w poziomie oddziałujących na siebie momentów oraz sił pomiędzy narzędziem, a obrabianym detalem występujących w trakcie procesu gratowania;
- Przeprowadzenie szeregu eksperymentów mających na celu wyznaczenie takiego zestawu paramentów procesu szczotkowania, a w dalszej części ich implementacja, które doprowadzą do wydłużenia okresu eksploatacji narzędzia;
- Przygotowanie modelu numerycznego mającego na celu analizę wpływu wybranych parametrów procesu gratowania na ilość ścierającego się materiału w trakcie trwania operacji szczotkowania;
- Wdrożenie opracowanych, optymalnych pod względem zużycia narzędzia parametrów procesu technologicznego oraz weryfikacja zmian w warunkach produkcji wielkoseryjnej.

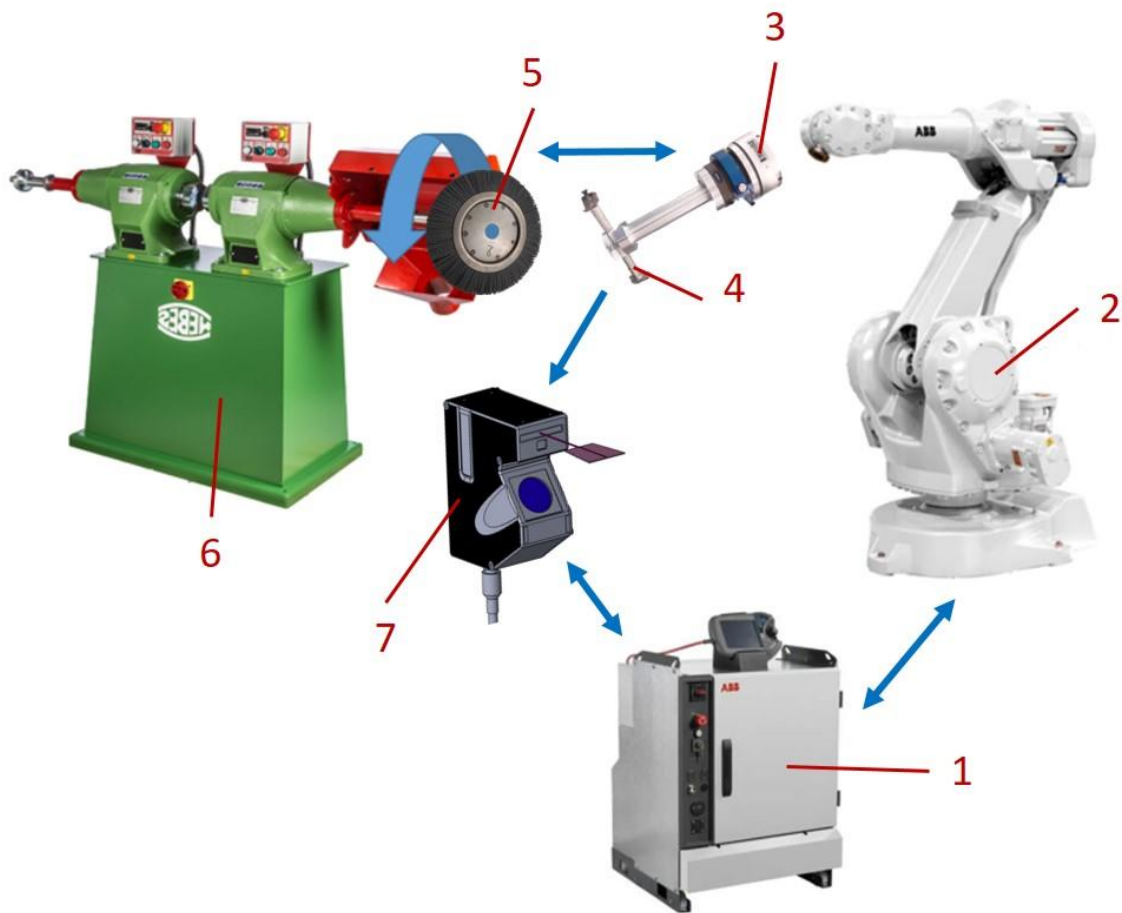
2. Testy laboratoryjne

Uwzględniając szereg dostępnych opracowań związanych z analizą oddziaływań na siebie narzędzi i obrabianych detali, a także liczne pozytywne wyniki prac optymalizacyjnych zdecydowano się na przygotowanie stanowiska laboratoryjnego. Uwzględniając trend widoczny w branży lotniczej zdecydowano się przygotować stanowisko wyposażone w manipulator przemysłowy w celu uzyskania odpowiedniej powtarzalności prób [83-87]. Przygotowane stanowisko laboratoryjne umożliwiło poznanie poziomu oraz zakres zmienności sił i momentów występujących w trakcie realizacji procesu gratowania. W trakcie testów zmieniano zestaw parametrów wejściowych takich jak prędkość obrotowa, czas trwania procesu czy też głębokość dosunięcia detalu do narzędzia (szczotki). Oprócz kontroli wybranych parametrów technologicznego konieczne było poznanie rezultatów procesu w celu oceny poprawności przeprowadzonej operacji. Kluczowym z punktu założeń badawczych było także poznanie oraz zarejestrowanie obciążeń występujących w trakcie procesu. W związku z powyższym przygotowywane stanowisko cechowało się [88]:

- powtarzalną możliwością realizacji procesu gratowania dla serii łopatek;
- możliwością modyfikowania wybranych parametrów takich jak czas trwania operacji, prędkość obrotowa narzędzia, głębokość dosunięcia narzędzia do obrabianego detalu;
- kontrolą oraz rejestracją sił i momentów występujących w trakcie realizacji procesu gratowania;
- kontrolą rezultatów procesu z punktu widzenia przyszłych działań wdrożeniowych, interesujące są tylko te próby w których proces gratowania przełożył się na realizację w sposób poprawny.

2.1. Stanowisko testowe

Schemat ideowy stanowiska został zaprezentowany na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska testowego.

Stanowisko laboratoryjne składa się z następujących elementów (Rys. 1):

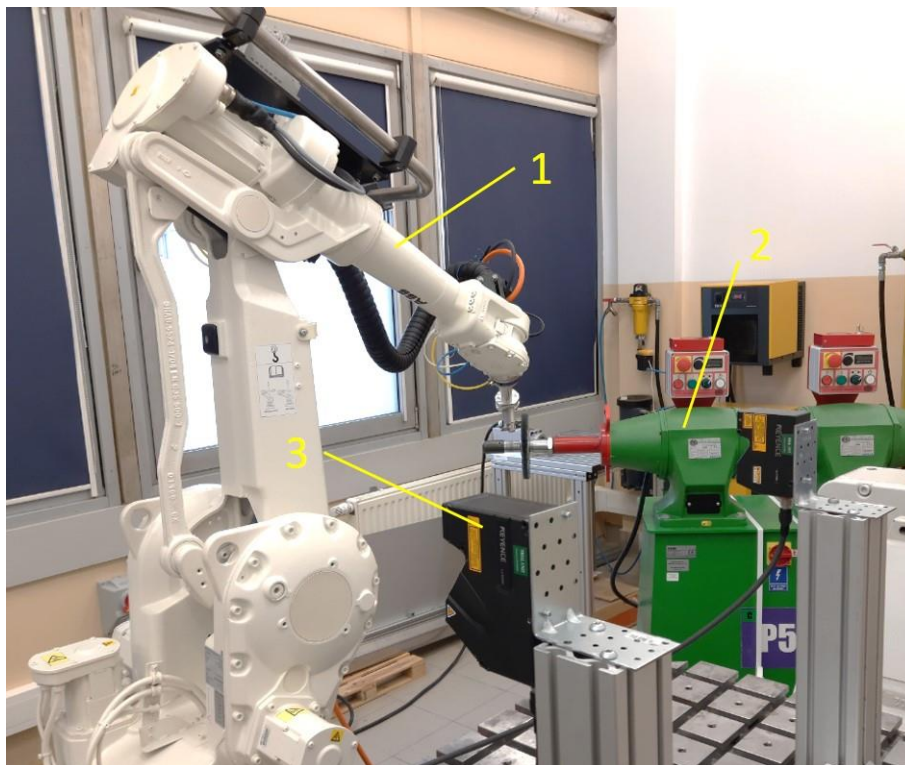
- Kontrolera ABB IRC5 – 1;
- Robota przemysłowego ABB IRB 2400 – 2;
- Czujnika Force Control – 3;
- Obrabianego detalu – 4;
- Narzędzie typu szczotka – 5;
- Szlifierki przemysłowej – 6;
- Układu pomiarowego (profilometr laserowy) – 7.

Proces gratowania, będący jedną z operacji w procesie produkcji łopatek, ma na celu osiągnięcie dwóch rezultatów – usunięcie niepożądanych zadziorów powstałych w trakcie wcześniejszych operacji oraz nadanie odpowiedniego promienia załuszczenia ostrym krawędziom. Działanie takie przełoży się na bezpieczeństwo pracownika na etapie montażu zespołu turbiny oraz zagwarantuje bezpieczną pracę całego zespołu w okresie jego eksploatacji. W celu realizowania procesu załuszczenia należy doprowadzić do kontaktu obrabiany detal z wirującym narzędziem. Podczas realizacji testów (Rys. 2) łopatką umieszczoną w uchwycie dosuwana jest przez robot przemysłowy po

zaprogramowanej trajektorii do wirującej szczotki napędzanej i pozycjonowanej przez szlifierkę przemysłową. W bazie rejestrowane są wartości pomiarowe jak siła, moment i promień zatępienia.

Szczegóły budowy stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 2, główne elementy stanowiska testowego to:

- Robot przemysłowy ABB IRB 2400 z kontrolerem ABB IRC5 oraz układem Force Control – 1;
- Szlifierka przemysłowa zawierająca układ sterowania umożliwiający zmianę prędkości obrotowej narzędzia – 2;
- Profilometr laserowy Keyence LJ-V7060 – 3.



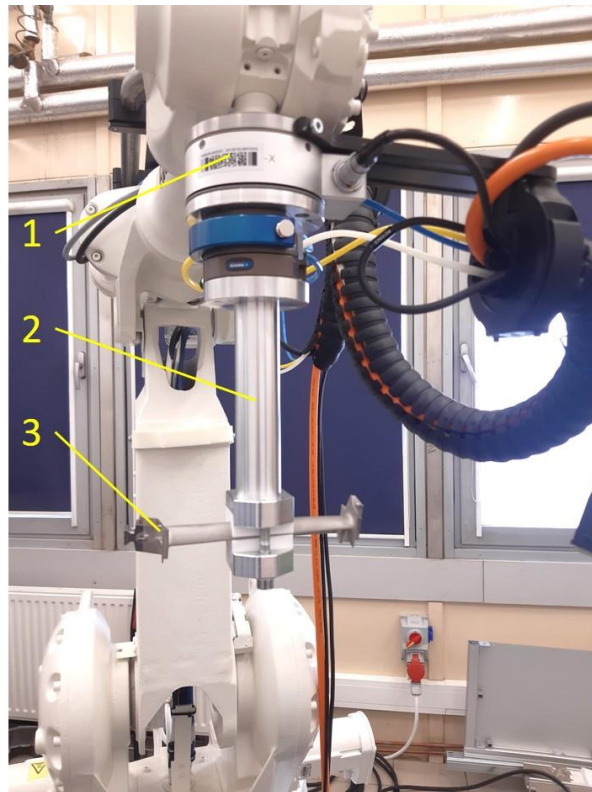
Rys. 2. Widok ogólny stanowiska testowego (1 – robot przemysłowy, 2 - szlifierka przemysłowa, 3 - profilometr laserowy).

Zadania realizowane przez poszczególne elementy składowe stanowiska testowego to:

- Robot przemysłowy – odwzorowanie i zaprogramowanie ruchów operatora zaobserwowanych podczas manualnie realizowanego procesu gratowania;
- Szlifierka przemysłowa – zapewnienie napędu z odpowiednią prędkością obrotową dla narzędzia (szczotki);
- Profilometr laserowy – automatyczna kontrola rezultatów procesu szczotkowania.

Zastosowany robot przemysłowy był wyposażony w czujnik Force Control do pomiarów sił i moment oraz dedykowany uchwyt na detale w celu precyzyjnego uchwycenia obrabianych łopatek (Rys. 3). Istnieje szereg publikacji naukowych w otwartych bazach artykułów, w których to badacze wykorzystywali tego typu czujniki do pomiarów sił oraz

momentów w trakcie różnych operacji realizowanych z wykorzystaniem robota w tym operacji obróbkowych [89-92].



Rys. 3. Czujnik pomiarowy zamontowany na ramieniu robota (1 – Force Control, 2 – dedykowany uchwyt, 3 – detal).

Przygotowane w ten sposób stanowisko testowe umożliwiło przeprowadzenie operacji gratowania w środowisku laboratoryjnym, poznanie wartości i zakresu zmienności sił oraz momentów występujących podczas procesu, a także zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu na wspomniane zmienne.

2.2. Identyfikacja istotnych parametrów procesu

Każda operacja technologiczna charakteryzuje się pewną ilością zmiennych i parametrów, a ich zdefiniowanie wymaga dogłębnego zapoznania się z budową oraz zasadą działania zastosowanych urządzeń. Do prawidłowej oceny rezultatów operacji technologicznych uzyskiwanych na poszczególnych etapach produkcji niezbędne jest zrozumienie wymagań projektowych stawianych obrabianej części. Przed rozpoczęciem testów przeprowadzono analizę procesu gratowania i urządzeń wchodzących w skład stanowiska. Umożliwiło to zdefiniowanie parametrów mających wpływ na poprawny przebieg procesu. Zidentyfikowano także parametry określające bezpośrednio wynik procesu. W ten sposób, po pogrupowaniu, powstały dwie grupy danych określane jako dane wejściowe oraz dane wyjściowe. Dane te zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Dane wejściowe i wyjściowe dla procesu gratowania.

Dane wejściowe	Dane wyjściowe
Prędkość obrotowa narzędzia, n [rpm]	Wartość promienia zatępienia krawędzi, R [mm]
Czas trwania procesu, t [s]	Brak obecności zadziorów, tak/nie
Głębokość wsunięcia detalu w narzędzie, a [mm]	-

2.3. Narzędzie

W oparciu o doświadczenia związane z realizacją produkcji wielkoseryjnej w środowisku przemysłowym zdecydowano się, na zastosowanie we wszystkich testach narzędzia typu szczotka (Rys. 4).



Rys. 4. Narzędzie typu szczotka wykorzystywana w procesie produkcyjnym.

Podstawowe dane techniczne charakteryzujące narzędzie przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wybrane charakterystyki wymiarowe narzędzia wykorzystywanego w testach.

Charakterystyka	Wartość
Średnica zewnętrzna	200 mm
Długość włosia	35 mm
Grubość włosia	1.1 mm

Tarcza szczotki wykonana została ze stali konstrukcyjnej. Materiał z jakiego wykonano włosie to węgiel krzemowy (SiC) znany pod handlową nazwą jako ABRALON612. Zgodnie z informacjami udostępnionymi przez producenta produkt charakteryzuje się wysoką wydajnością dzięki zastosowaniu w budowie włosia o wysokiej jakości. Także

możliwość pracy z podwyższoną prędkością obrotową, dużym wymiarem zewnętrznym oraz odpowiedniemu wyważeniu przekłada się na zwiększoną trwałość narzędzia.

2.4. Testy

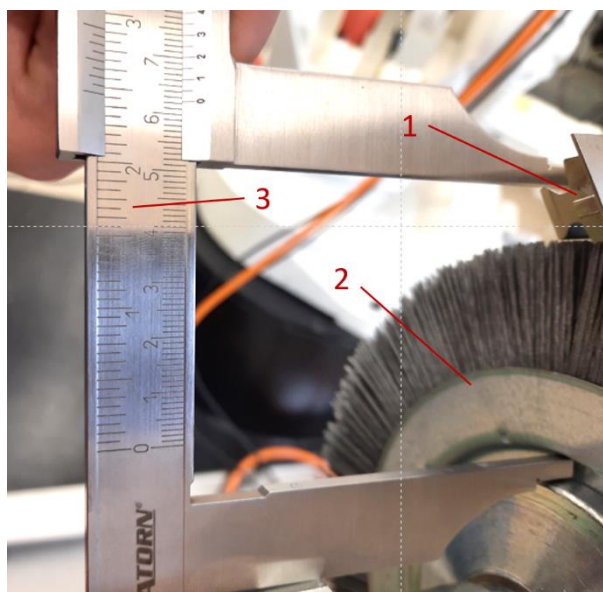
W pierwszej fazie testów laboratoryjnych za cel obrano zbadanie wartości sił i momentów występujących podczas procesu zatępienia krawędzi. Aby to osiągnąć, przeprowadzono szereg prób przy różnej wartości prędkości obrotowej narzędzia. Zdecydowano się na wybór dwóch prędkości obrotowych, aby zweryfikować wpływ tego parametru na obciążenia występujące w trakcie realizacji procesu zatępienia. Pierwsza wartość 1600 rpm została dobrana doświadczalnie z racji tej, że jest to maksymalna prędkość obrotowa wykorzystywana w procesie gratowania ręcznego przez wykwalifikowanego pracownika. Wartość druga to 3000 rpm jako maksymalna możliwa do osiągnięcia przez zastosowaną szlifierkę przemysłową. Wartość ta, ze względu na ograniczenia zastosowanej szlifierki, mogła by być jeszcze wyższa, ponieważ producenta szczotki dopuszcza nawet 5000 rpm. Dane zawarte w tabeli 3 zbierano z wykorzystaniem pakietu Force Control [93-97] oraz pomiaru czasu kontaktu detalu z narzędziem. Zaprezentowano zaobserwowane różnice pomiędzy stanem początkowym, a zmianą siły i momentu w trakcie przeprowadzania obróbki.

Tab. 3. Wyniki testów początkowych.

Prędkość obrotowa szczotki	Czas kontaktu detal narzędzie	Wartość różnicy siły	Wartość różnicy momentu
1600 rpm	5 s	30 N	5 Nm
3000 rpm	5 s	40 N	11.5 Nm

Wyniki pierwszego etapu testów laboratoryjnych w postaci wartości obserwowanych sił i momentów potwierdzają poprawność doboru czujnika Force Control. Maksymalna wartość pomiarowa wykorzystanego układu to 660 N dla sił oraz 60 Nm dla momentów. Ze względu na mało znaczącą różnicę pomiędzy stanem początkowym, a uzyskanymi siłami w trakcie przeprowadzonych prób (zmiana około 25%) w stosunku do zmian momentów (zmianą ok 130%) podjęto decyzję że, w dalszych rozważaniach należy skupić się tylko na wartościach momentów.

W kolejnym etapie testów laboratoryjnych przeprowadzono szereg prób (każdą próbę powtórzono trzykrotnie) mających za zadanie weryfikację momentów występujących w trakcie procesu szczotkowania w zależności od różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz głębokości wsunięcia obrabianego detalu w narzędzie (Rys. 5).



Rys. 5. Proces programowania i pomiar wsunięcia detalu w narzędzie(1 – obrabiany detal, 2 – narzędzie, 3 – pomiar).

Wyniki zarejestrowanych wartości zaprezentowano w tabeli 4. Testy przeprowadzono w dwóch seriach. Seria pierwsza obejmowała testy z wykorzystaniem szczotki nieużywanej (nowej). Natomiast druga seria prób (Tab. 5) wykorzystywała narzędzie charakteryzujące się pewnym stanem zużycia.

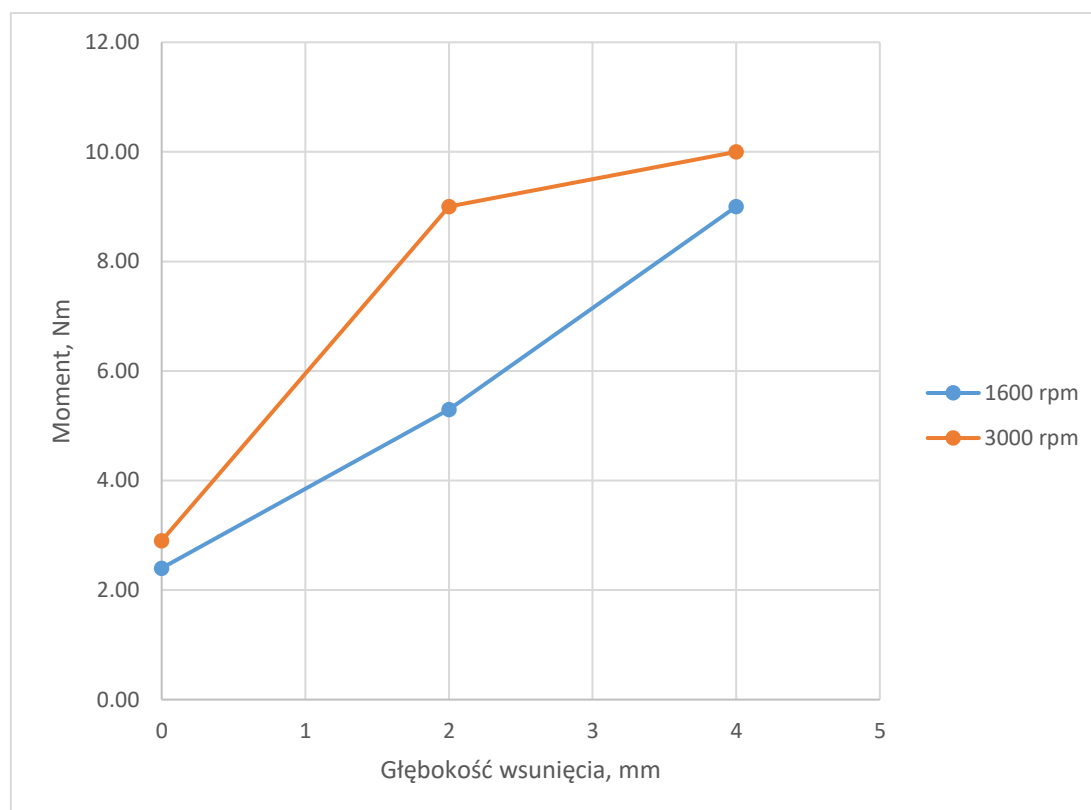
Tab. 4. Wyniki prób dla szczotki nowej.

Prędkość obrotowa szczotki	Głębokość wsunięcia	Średnia wartość momentu podczas procesu gratowania
1600 rpm	0 mm (kontakt detal-szczotka)	2.4 Nm
3000 rpm	0 mm (kontakt detal-szczotka)	2.9 Nm
1600 rpm	2 mm	5.3 Nm
3000 rpm	2 mm	9.0 Nm
1600 rpm	4 mm	9.0 Nm
3000 rpm	4 mm	10.0 Nm

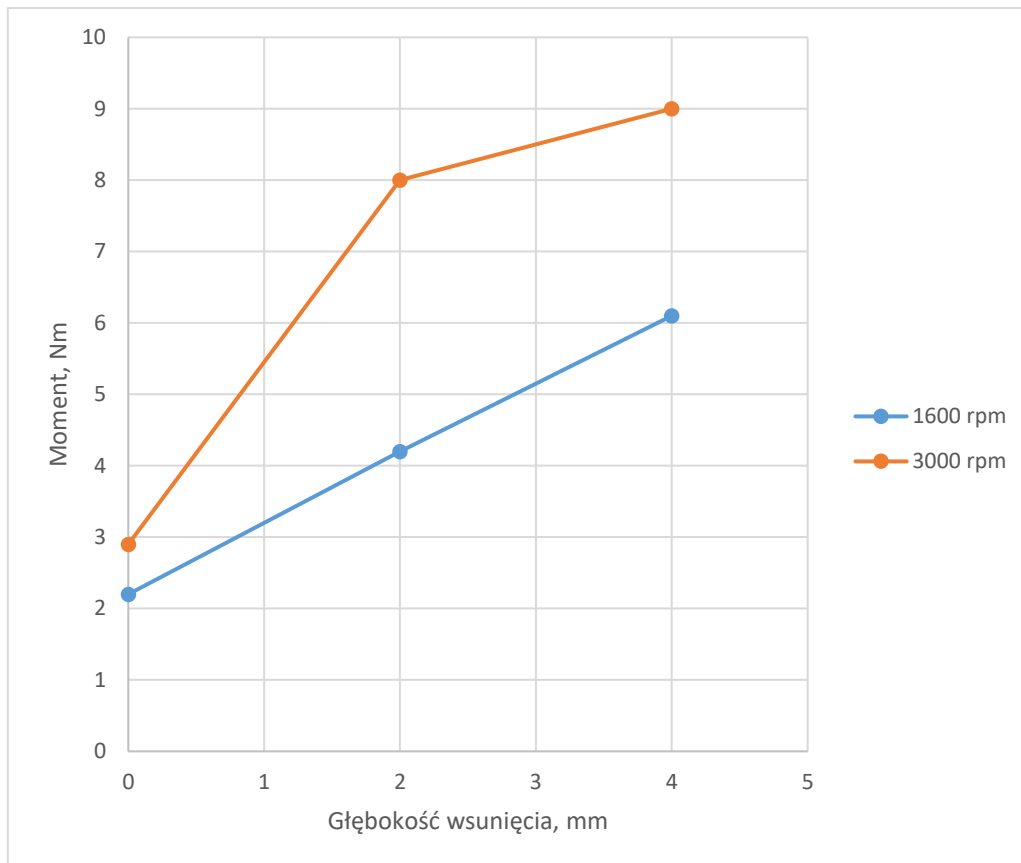
Tab. 5. Wyniki prób dla szczotki charakteryzującej się pewnym stanem zużycia.

Prędkość obrotowa	Głębokość wsunięcia	Średnia wartość momentu podczas procesu gratowania
1600 rpm	0 mm (kontakt detal-szczotka)	2.2 Nm
3000 rpm	0 mm (kontakt detal-szczotka)	2.9 Nm
1600 rpm	2 mm	4.2 Nm
3000 rpm	2 mm	8.0 Nm
1600 rpm	4 mm	6.1 Nm
3000 rpm	4 mm	9.0 Nm

Na rysunkach 6 oraz 7 przedstawiono otrzymane rezultaty, dla dwóch testowanych prędkości obrotowych (odpowiednio 1600 oraz 3000 rpm), wartość momentu w zależności od głębokości wsunięcia detalu w szczotkę. Dane przedstawiono osobno dla dwóch prób różniących się od siebie etapem eksploatacji szczotek – szczotki nowe oraz szczotki używane.



Rys. 6. Zależność momentu od głębokości wsunięcia detalu w narzędzie dla dwóch prędkości obrotowych, nowe szczotki.



Rys. 7. Zależność momentu od głębokości wsunięcia detalu w narzędzie dla dwóch prędkości obrotowych, używane szczotki.

Pomiar promienia zaokrąglenia krawędzi z wykorzystaniem profilometru laserowego (Rys. 8) pozwolił zweryfikować skuteczność przeprowadzonego procesu szczotkowania.



Rys. 8. Wyniki otrzymane za pomocą profilometru laserowego.

Wartości promienia zatępienia dla losowo wybranych 30 różnych łopatek przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Wyniki pomiaru promienia zatępienia.

Numer pomiaru, x	Wartość, mm
1	0.23
2	0.23
3	0.22
4	0.3
5	0.32
6	0.26
7	0.24
8	0.25
9	0.29
10	0.30
11	0.28
12	0.25
13	0.22
14	0.24
15	0.26
16	0.23
17	0.26
18	0.27
19	0.25
20	0.28
21	0.29
22	0.25
23	0.19
24	0.26
25	0.25
26	0.27
27	0.27
28	0.25
29	0.25
30	0.25

Z wykorzystaniem zebranych danych wyliczono średnią arytmetyczną wg zależności (1):

$$\bar{X} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{n} = 0.26 \text{ mm} \quad (1)$$

Oraz odchylenie standardowe wg zależności (2):

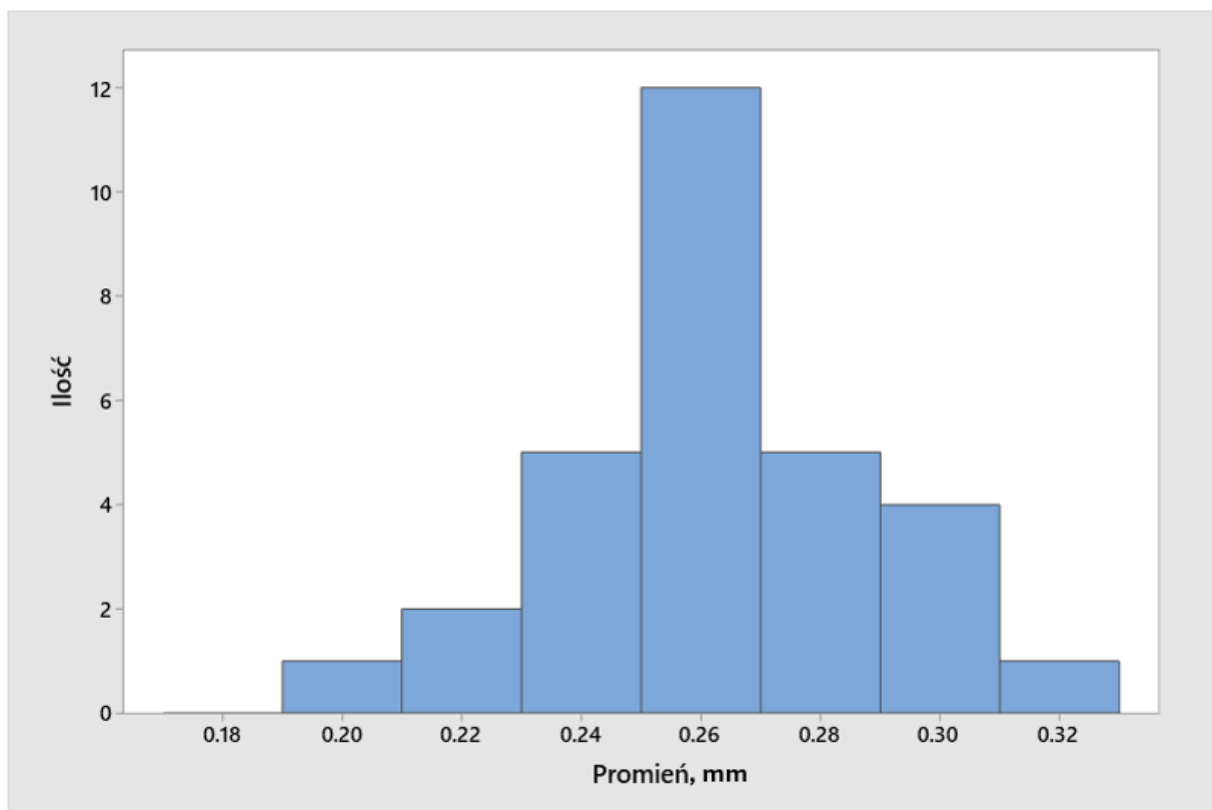
$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1-\bar{X})^2+(x_2-\bar{X})^2+\dots+(x_n-\bar{X})^2}{n}} = 0.027 \text{ mm} \quad (2)$$

A następnie obliczono zakresy $\pm 3\sigma$:

$$+3\sigma = \bar{X} + 3 \times \sigma = 0.34 \text{ mm} \quad (3)$$

$$-3\sigma = \bar{X} - 3 \times \sigma = 0.18 \text{ mm} \quad (4)$$

Otrzymanie krawędzi, charakteryzujących się średnią wartością promienia zatępienia ok 0.26 mm, świadczy o skuteczności przeprowadzenia operacji szczotkowania ponieważ, wymogi technologiczne zostały spełnione. W celu graficznej prezentacji otrzymanych wyników w postaci promienia zatępienia krawędzi przygotowano histogram (Rys. 9). Wielkość populacji – 30 pomiarów wykonanych dla łopatek pochodzących z różnych prób cechujących się zmiennością parametrów wejściowych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń odchylenia standardowego oraz średniej można przewidzieć, że analizowana wartość będzie znajdować się w zdecydowanej większości przypadków w przedziale od 0.18 do 0.34 mm (zakres +/- 3σ) (3) i (4). Z punktu widzenia wymogów projektowych wartości te uznaje się za odpowiednie.



Rys. 9. Histogram – wartość promienia krawędzi.

Na podstawie przeprowadzonych prób oraz otrzymanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Dwukrotny wzrost prędkości obrotowej narzędzia, przekłada się w sposób liniowy na wzrost momentu.
- Zwiększenie wsunięcia detalu w tarczę narzędzia, przekłada się w sposób nieliniowy na wzrost momentu. Obserwowany efekt jest istotnie mniejszy dla większych prędkości obrotowych szczotki;

- W trakcie przeprowadzonych prób, użyto również szczotek, które nie były fabrycznie nowe. Na podstawie przeprowadzonych prób zaobserwowano, że dla nowej szczotki generowany moment podczas szczotkowania jest o około 20% wyższy;
- W trakcie wszystkich przeprowadzonych testów zaobserwowano usunięcie gratu w sposób zgodny z wytycznymi.

2.5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że wybrane kluczowe parametry procesu gratowania mają inny niż zakładano wpływ na wartości obciążeń. W przypadku prędkości obrotowej narzędzia jest to liniowy wpływ, tzn. wzrost prędkości obrotowej przekłada się wprost na zwiększenie obciążeń. Natomiast zmiana głębokości wsunięcia obrabianej części w szczotkę powoduje nieliniowy wzrost obciążeń. Wykazano także, że zużycie szczotki prowadzi do spadku wartości momentu generowanego przez wirujące narzędzie. W związku z powyższym istotne jest przeprowadzenie dalszych prac mających na celu ustalenie takiego zestawu parametrów procesu (w postaci prędkości obrotowej i głębokości dosunięcia detalu do narzędzia), który przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia. Jednocześnie należy przeprowadzić wszelkie prace przy zachowaniu odpowiedniego dla branży poziomu jakości produkowanych części. Działania takie przełożą się bezpośrednio na wynik finansowy przedsiębiorstwa (redukcja kosztów) oraz wpłyną pozytywnie na redukcję śladu węglowego (redukcja zużycia materiałów ściernych) generowanego przez proces produkcji.

3. Testy w środowisku przemysłowym

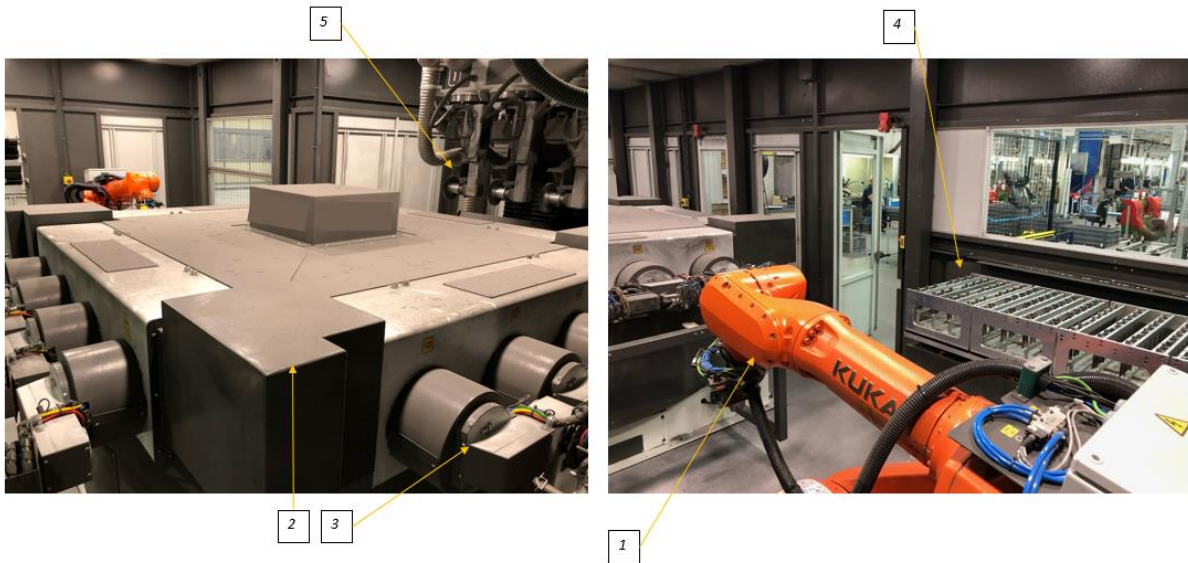
Wyznaczenie w sposób obiektywny i jednoznaczny optymalnych, pod kątem ograniczenia zużycia narzędzia, parametrów procesu technologicznego jest zadaniem wymagającym przygotowania odpowiedniego planu badawczego. Realizacja testów ma za zadanie dostarczenie wyników, które po dalszych obliczeniach matematycznych pozwolą na zbudowanie równania matematycznego, które powiąże wybrane parametry procesu szczotkowania z grubością włosia szczotki (tempem zużywania się włosia). Następnie z wykorzystaniem metod analizy matematycznej wyznaczone zostanie lokalne minimum przekładające się na ograniczenie zużywania narzędzi przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej jakości krawędzi poddanych procesowi gratowania. Takie działania przełożą się do realizacji celów stawianym przedsiębiorstwu polegających na maksymalizacji zysków oraz na ograniczeniu wpływu na środowisko.

Pierwszym etapem rozpoczynającym przygotowanie testów jest zdefiniowanie parametrów wejściowych, jakie będą modyfikowane oraz parametrom wyjściowym, jakie będą rezultatem przeprowadzonej operacji produkcyjnej. Na podstawie przeprowadzonych testów wstępnych do parametrów wejściowych można zakwalifikować prędkość obrotową szczotki. Zmiana prędkości obrotowej narzędzia przekładała się na zmianę momentu pomiędzy wirującą szczotką, a obrabianym detalem. Zależność ta cechowała się liniowym wzrostem momentu w zależności od wzrostu prędkości obrotowej. Bazując na testach wstępnych opisanych w rozdziale 2. *Testy laboratoryjne* zdecydowano się również uwzględnić wielkość zagłębienia obrabianego detalu w narzędziu. Zależność ta cechowała się nieliniowym charakterem dla wyższych prędkości obrotowych, oraz zbliżonym do liniowego wzrostem momentu w zależności od przyrostu głębokości dosunięcia.

Ze względu na wdrożeniowy charakter rozwiązania zdecydowano się nie wykorzystywać czasu operacji gratowania jako parametru wejściowego. Pod kątem finansowym wydłużanie czasu nie wpłynęłoby korzystnie na obniżenie kosztów całej operacji. Z drugiej, czas przeznaczony na zabieg usuwania gratu został już zoptymalizowany pod kątem taktu produkcyjnego, co w kontekście analizowanego przedsiębiorstwa wyklucza konieczność dalszych modyfikacji.

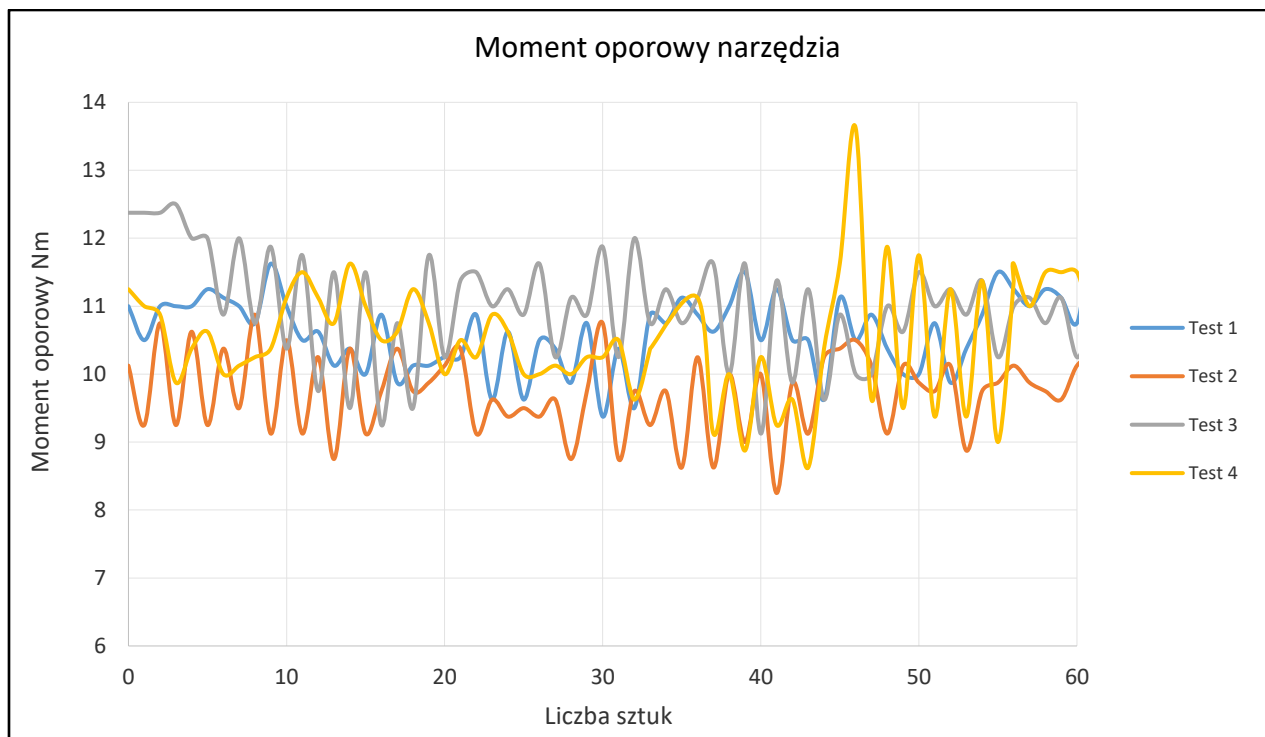
Naturalną kolejnością rzeczy jest konieczność powiązania grubości włosia (inaczej tempa zużywania się narzędzia) z liczbą sztuk obrobionych za pomocą szczotki. Będzie to ostatni z parametrów wejściowych użyty do optymalizacji wykorzystania narzędzia.

Innym możliwym do uwzględnienia w eksperymencie parametrem wejściowym, może być także moment oporowy narzędzia powstający w trakcie realizacji procesu zatępienia krawędzi. Moment ten powstaje na skutek obecności tarcia pomiędzy obracającym się narzędziem, a detalem [98].



Rys. 10. Stanowisko robocze (1 – manipulator przemysłowy, 2 - stół obrotowy, 3 – chwytak detalu, 4 - magazyn detali , 5 - uchwyt narzędziowy).

W stanowisku roboczym (Rys. 10) moment oporowy w trakcie procesu gratowania jest wyznaczany na podstawie poboru prądu przez serwonapędy użyte do napędzania narzędzi. Przed przystąpieniem do właściwej części testów rozważaniu poddano możliwość wykorzystania tego parametru do optymalizacji czasu eksploatacji narzędzi. W ramach standardowych warunków operacyjnych na stanowisko robocze trafia szereg nieznacznie różniących się od siebie detali, niemniej jednak wpływa to znacząco na analizowany parametr. Istnieje również wariacja związana z różną ilością zadziórów dla poszczególnych detali konieczną do usunięcia w trakcie procesu co również przekłada się na wartość analizowanego parametru. W rezultacie nie ma możliwości przeprowadzenia optymalizacji z wykorzystaniem tego parametru, gdyż zmienia się on w sposób chaotyczny. Dla zobrazowania sytuacji zaprezentowano na rysunku 11 wartość momentu oporowego w trakcie realizowania operacji ślusarskich. Wyniki zostały zebrane dla czterech różnych okresów eksploatacji stanowiska roboczego.



Rys. 11. Moment oporowy narzędzia w zależności od ilości przetworzonych cykli.

Z tego powodu uznano ten parametr za nieprzydatny w ramach dalszych prac związanych z badaniami nad optymalizacją wykorzystania szczotek. Finalnie, na podstawie przeprowadzonych testów wstępnych zdecydowano się wybrać do prac optymalizacyjnych parametry zebrane w tabeli 7.

Tab. 7. Parametry wejściowe uwzględnione w procesie optymalizacji.

Parametr wejściowy	Jednostka
Prędkość obrotowa narzędzia	rpm
Głębokość dosuwu	mm
Ilość zatępionych detali	sztuka

Ze względu na doświadczenia produkcyjne zdecydowano się na pozostawienie aktualnie wykorzystywanych w procesie narzędzi oraz ich parametrów takich jak materiał czy wymiary.

Jako parametry wyjściowe, świadczące o poprawności wykonania operacji gratowania, zdecydowano się przyjąć następujące zmienne – wartość promienia zatępienia krawędzi oraz weryfikację czy usunięto cały grat. Oba te parametry mają bezpośrednie przełożenie zarówno na bezpieczeństwo użytkownika urządzeń, w skład których wchodzi przygotowywane detale, jak i również przekładają się na bezpieczeństwo operatorów w trakcie montowania poszczególnych elementów. Konieczność usunięcia w całości zadziórów jest związana z możliwością powstawania oraz dalszej propagacji pęknięć, natomiast ostre krawędzie w połączeniu z zadziórami mogą przyczynić się do urazów operatorów w trakcie dokonywania operacji montażu. Bazując na doświadczeniach za odpowiednią wartość promienia zatępienia krawędzi

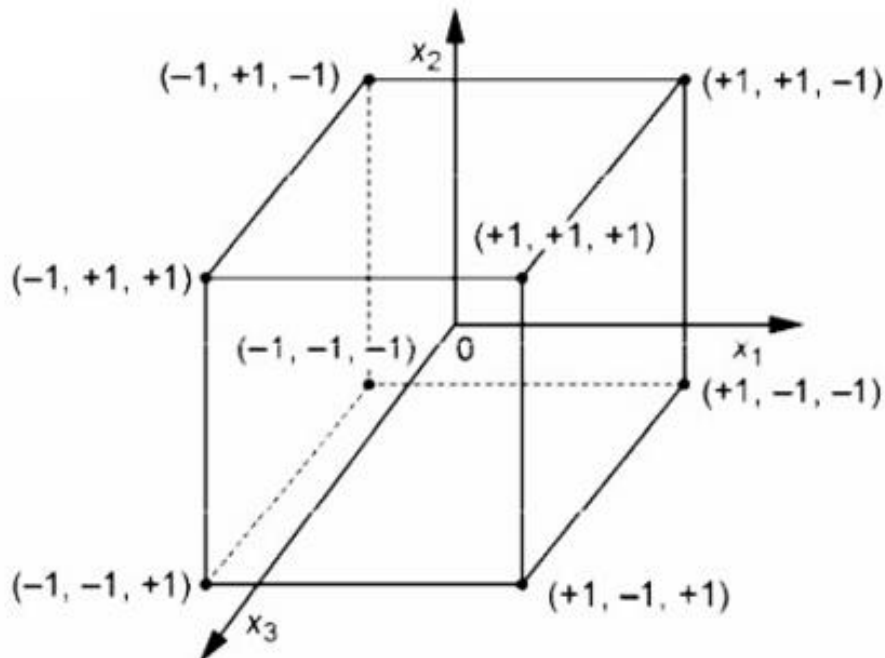
należy uznać wartość promienia mieszczącego się w przedziale pomiędzy 0.1-0.4 mm. Natomiast usunięte muszą zostać wszystkie zadziory powstałe na wcześniejszych etapach procesu produkcyjnego. Zestawienie parametrów wyjściowych wykorzystywanych w trakcie prac optymalizacyjnych jest przedstawione w tabeli 8.

Tab. 8. Parametry wyjściowe uwzględnione w procesie optymalizacji.

Parametr Wyjściowe	Wartość
Promień załamania krawędzi	0.1 – 0.4 mm
Usunięto wszystkie zadziory?	Tak/Nie

3.1. Przygotowanie oraz realizacja planu badawczego

Ze względu na potrzebę otrzymania równania opisującego proces zużywania się narzędzi zdecydowano się na przeprowadzenie szeregu eksperymentów w celu realizacji planu statycznego zdeterminowanego dwupoziomowego (Rys. 12).



Rys. 12. Schemat realizacji doświadczeń (3 czynniki wejściowe na 2 poziomach) [99].

Wybrano do realizacji badań schemat bez uwzględniania interakcji pomiędzy parametrami wejściowymi. W celu usystematyzowania testów opracowano macierzę planowania zamieszczoną w tabeli 9. Uwzględniając złożoność trajektorii ruchów narzędzia oraz detalu niemożliwe jest przedstawienie jednej wartości definiującej głębokość zagłębienia detalu w narzędziu. Na potrzeby realizacji procesu gratowania wartość ta została dobrana eksperymentalnie na podstawie przeprowadzanych prób w fazie projektowania stanowiska roboczego. W związku z tym postanowiono sterować parametrem średnicy szczotki, który przekładał się na przesunięcie każdego punktu z trajektorii wzajemnych ruchów o żądaną wartość. Na podstawie tego wartość 198 mm z tabeli 9 należy interpretować jako zwiększenie zagłębienia o 1 mm w stosunku do wartości bazowej wynoszącej ok 4 mm.

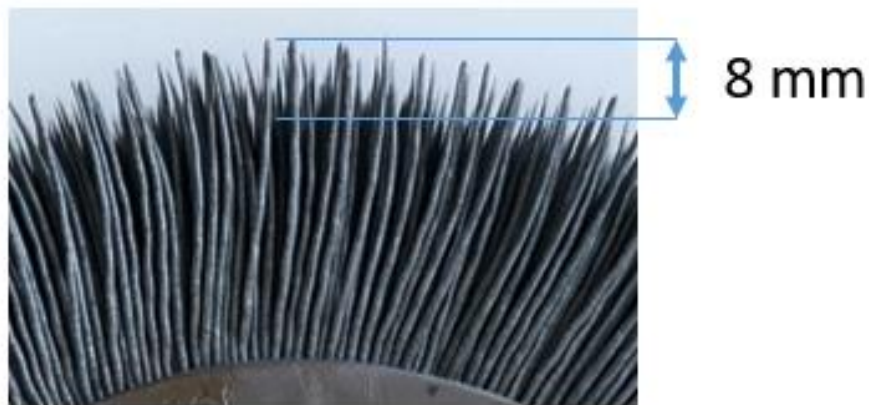
Tab. 9. Matryca testów, kolumny X1, X2, X3 określają poziom dolny („-”) oraz poziom góry („+”) wybranych parametrów procesu.

Numer próby	X1	X2	X3	Prędkość obrotowa rpm	Wartość zagłębienia jako średnica szczotki mm	Ilość przepracowanych sztuk
1	+	+	+	2000	200	60
2	+	+	-	2000	200	30

3	+	-	+	2000	198	60
4	+	-	-	2000	198	30
5	-	+	+	1400	200	60
6	-	+	-	1400	200	30
7	-	-	+	1400	198	60
8	-	-	-	1400	198	30

Próby opisane w matrycy testów były realizowane w sposób losowy. Konstrukcja stanowiska testowego umożliwiła przeprowadzenie testu składającego się z 12 powtórzeń celem wyeliminowania losowości.

W trakcie analizy sposobu zużywania się narzędzi w produkcji wielkoseryjnej zaobserwowano, że włosie ulega pocienieniu w odległości maksymalnie 8 mm mierząc od zewnętrznego obrysu szczotki (Rys. 13).



Rys. 13. Wymiar do jakiego została zużyta szczotka.

Zdecydowano się na pomiar grubości włosa w odległości 4 mm od zewnętrznego obrysu szczotki (Rys. 14).



Rys. 14. Miejsce pomiaru grubości włosa po przeprowadzonym teście.

Wyniki pomiarów grubości włosa zgodnie z przedstawionym schematem testów umieszczono w tabeli 10.

Tab. 10. Wyniki testu – zmierzona grubość włosa.

Numer próby	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}	y_{12}	\bar{y}
1	0.64	0.55	0.55	0.63	0.73	0.64	0.59	0.51	0.41	0.41	0.55	0.56	0.56
2	0.9	0.6	0.83	0.48	0.66	0.74	0.73	0.64	0.43	0.95	0.86	0.86	0.72
3	0.6	0.52	0.62	0.53	0.53	0.54	0.53	0.58	0.55	0.55	0.6	0.54	0.56
4	0.57	0.48	0.46	0.75	0.6	0.55	0.61	0.69	0.66	0.55	0.62	0.7	0.60
5	0.4	0.54	0.42	0.64	0.64	0.69	0.76	0.8	0.7	0.82	0.74	0.85	0.67
6	0.8	0.92	0.75	0.69	0.83	0.8	0.62	0.5	0.62	0.45	0.7	0.65	0.69
7	0.47	0.67	0.3	0.45	0.46	0.4	0.36	0.4	0.38	0.35	0.56	0.5	0.44
8	0.3	0.4	0.55	0.59	0.3	0.63	0.53	0.56	0.64	0.77	0.89	0.49	0.55

Gdzie:

y_n – grubość włosa w n-tym pomiarze;

\bar{y} – grubość włosa, wartość średnia .

W celu wyznaczenia równania wiążącego parametry wejściowe z grubością włosa szczotki przeprowadzono obliczenia [99]:

1. Obliczenie jednostki zmienności:

- Dla prędkości obrotowej:

$$\Delta x_1 = \frac{r_{max} - r_{min}}{2} = \frac{2000 - 1400}{2} = 300 \text{ rpm} \quad (5)$$

- Dla średnicy szczotki:

$$\Delta x_2 = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} = \frac{200 - 198}{2} = 1 \text{ mm} \quad (6)$$

- Dla ilości cykli:

$$\Delta x_3 = \frac{q_{max} - q_{min}}{2} = \frac{60 - 30}{2} = 15 \text{ szt} \quad (7)$$

2. Obliczenie wartości centralnych czynników wejściowych:

- Dla prędkości obrotowej:

$$x_{10} = \frac{r_{max} + r_{min}}{2} = \frac{2000 + 1400}{2} = 1700 \text{ rpm} \quad (8)$$

- Dla średnicy szczotki:

$$x_{20} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} = \frac{200 + 198}{2} = 199 \text{ mm} \quad (9)$$

- Dla ilości cykli:

$$x_{30} = \frac{q_{max} + q_{min}}{2} = \frac{60 + 30}{2} = 45 \text{ szt} \quad (10)$$

3. Zakodowanie czynników wejściowych:

- Dla prędkości obrotowej:

$$x_1 = \frac{\hat{x}_1 - \hat{x}_{10}}{\Delta \hat{x}_1} = \frac{r-1700}{300} \quad (11)$$

- Dla średnicy szczotki:

$$x_2 = \frac{\hat{x}_2 - \hat{x}_{20}}{\Delta \hat{x}_2} = \frac{d-199}{1} \quad (12)$$

- Dla ilości cykli:

$$x_3 = \frac{\hat{x}_3 - \hat{x}_{30}}{\Delta \hat{x}_3} = \frac{q-45}{15} \quad (13)$$

4. Obliczenie współczynników równania regresji:

Wariancja błędu pomiaru obliczona została na podstawie wzoru:

$$S^2(y)_i = \frac{\sum_{i=1}^j (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{j-1} \quad (14)$$

Wartości dla poszczególnych prób przedstawiono w tabeli 11.

Tab. 11. Wariancja błędu dla poszczególnych prób.

Numer próby	S2
1	0.0079
2	0.0253
3	0.0010
4	0.0070
5	0.0200
6	0.0171
7	0.0094
8	0.0276

Współczynniki równania regresji prezentują się następująco:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j x_{0i} y_i^2 = 0.600 \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j x_{1i} y_i^2 = 0.011 \quad (16)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j x_{2i} y_i^2 = 0.061 \quad (17)$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j x_{3i} y_i^2 = -0.043 \quad (18)$$

5. Ocena powtarzalności warunków realizacji doświadczenia:

- Obliczenie wartości współczynnika G:

$$G = \frac{S^2(y)_{i \max}}{\sum_{i=1}^n S^2(y)_i} = 0.151 \quad (19)$$

- Obliczenie liczby stopni swobody

$$f_1 = N = 8 \quad (20)$$

$$f_2 = r - 1 = 11 \quad (21)$$

- Określenie krytycznej wartości współczynnika G statystyki Cochra [99]

$$G_{kr} = G_{(\alpha; f_1; f_2)} = 0.2364 \quad (22)$$

Ponieważ jest spełniony następujący warunek:

$$G < G_{kr} \quad (23)$$

Doświadczenia były prowadzone z zadowalającą powtarzalnością.

6. Sprawdzenie istotności współczynników regresji
 - Obliczenie wariancji błędów pomiaru

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(y)_i = 0.014 \quad (24)$$

- Określenie liczby stopni swobody:

$$f = N(r - 1) = 88 \quad (25)$$

Określenie wartości krytycznej współczynnika t [99]

$$t_{kr} = t_{(\alpha; f)} = 1.99 \quad (26)$$

$$b_{kr} = t_{(\alpha; f)} \sqrt{\frac{S^2(y)}{Nr}} = 0.024 \quad (27)$$

Więc:

$$|b_0| > b_{kr} \text{ więc współczynnik uznaje się za istotny} \quad (28)$$

$$|b_1| < b_{kr} \text{ więc współczynnik uznaje się za nieistotny} \quad (29)$$

$$|b_2| > b_{kr} \text{ więc współczynnik uznaje się za istotny} \quad (30)$$

$$|b_3| > b_{kr} \text{ więc współczynnik uznaje się za istotny} \quad (31)$$

Równanie regresji po odrzuceniu członu nieistotnego przybiera postać

$$y = 0.600 + 0.061x_2 - 0.043x_3 \quad (32)$$

7. Ocena adekwatności równania regresji.

- Obliczenie wariancji adekwatności:

$$S_{ad}^2(y) = \frac{r \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1} = 0.033 \quad (33)$$

- Określenie wartości obliczeniowej współczynnika F:

$$F = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} = 2.278 \quad (34)$$

- Obliczenie liczby stopni swobody dla licznika:

$$f_1 = N - k - 1 = 5 \quad (35)$$

- Obliczenie liczby stopni swobody dla mianownika:

$$f_m = f_2 = N(r - 1) = 88 \quad (36)$$

- Obliczenie krytycznej wartości współczynnika testu F [99]:

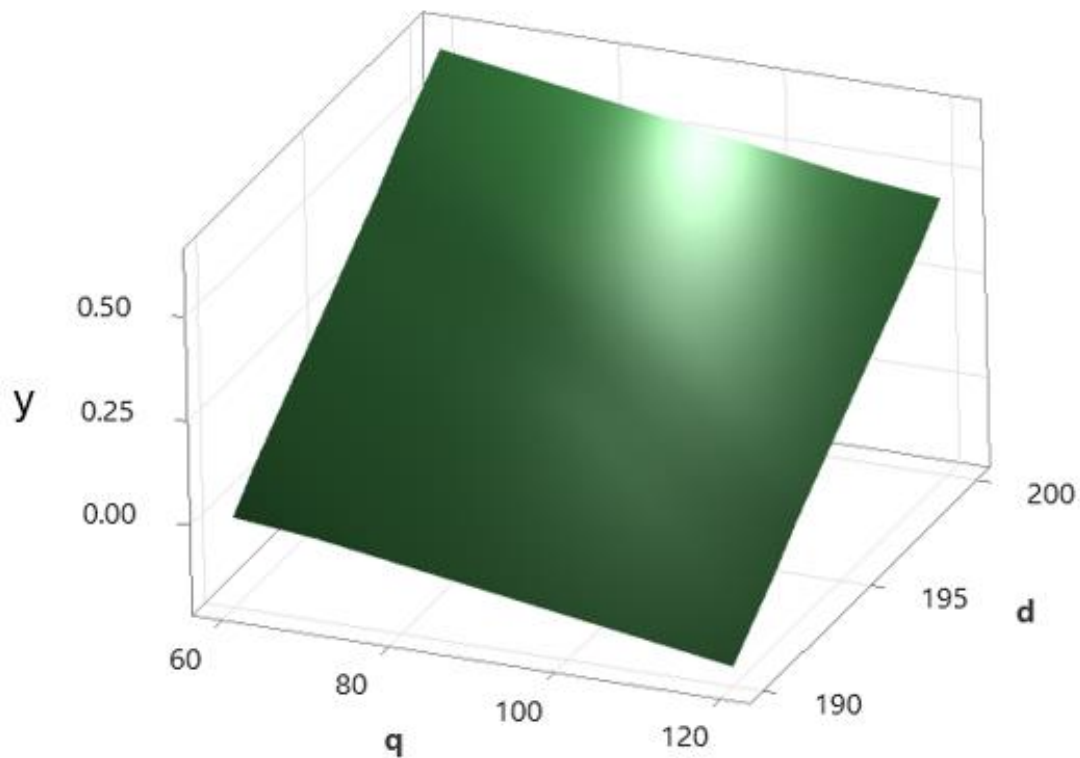
$$F_{kr} = F_{(\alpha, f_1, f_m)} = 2.33 \quad (40)$$

Ponieważ spełniona jest zależność $F < F_{kr}$ więc otrzymane równanie regresji uznaje się za adekwatne.

8. Odkodowanie równania regresji przed podstawienie do wzoru (32) równań (12) oraz (13) otrzymano:

$$y = 0.061458 d - 0.00288 q - 11.5 \quad (41)$$

Gdzie: y – grubość włosa, d – średnica zewnętrzna szczotki, q – liczba obrobionych detali.

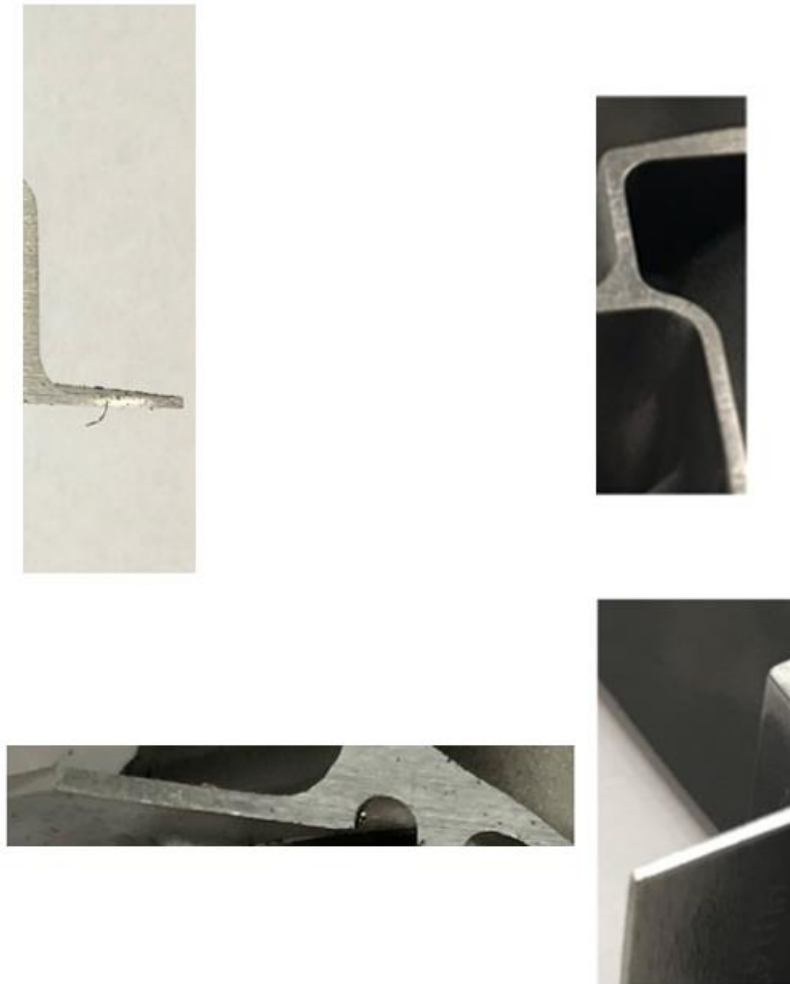


Rys. 15. Graficzna prezentacja równania (41) (y – grubość włosa mm, d – średnica szczotki mm, q – ilość obrobionych detali sztuki).

Graficzna prezentacja równania (41) jest przedstawiona na rysunku 15.

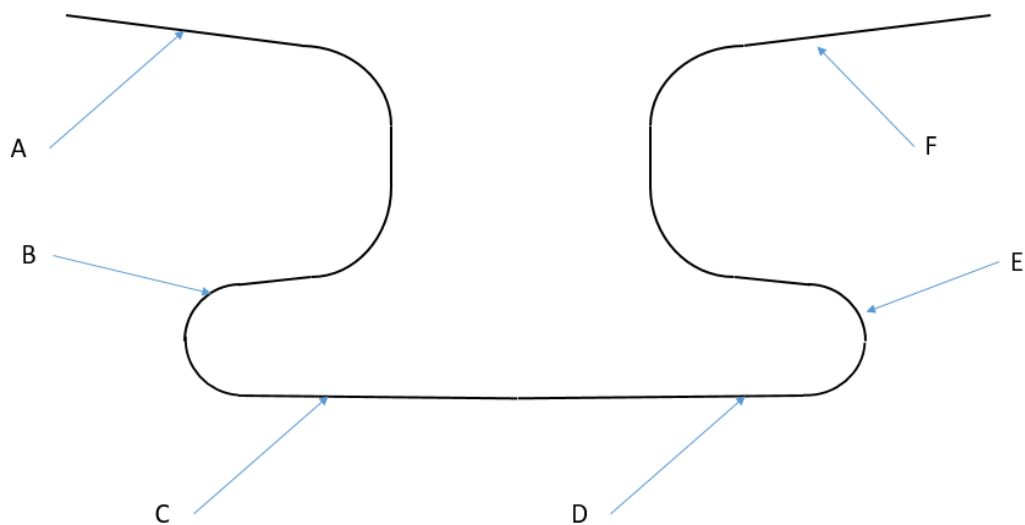
3.2. Analiza stanu części

Wynikiem poprawnie przeprowadzonego procesu szczotkowania powinno być usunięcie wszystkich zadziorów z obrabianego detalu. W celu zweryfikowania rezultatów, w postaci usuniętych zadziorów, zdecydowano przeprowadzić kontrolę wizualną wszystkich łopatek, które zostały wykorzystane w testach. Reprezentatywny stan łopatki przed i po procesie szczotkowania został przedstawiony na rysunku 16.



Rys. 16. Typowy stan krawędzi przed i po procesie szczotkowania.

W całej populacji łopatek, wykorzystanej do testów, zadziory zostały usunięte w 100%. Wynik ten świadczy o poprawności procesu szczotkowania. Drugim parametrem wyjściowym dla procesu szczotkowania jest promień załagodzenia krawędzi. W przypadku tego parametru zdecydowano się na dokonanie kontroli wrywkowej, tzn. dla losowo wybranych sztuk dokonano pomiarów promienia załamania krawędzi. Schemat kontroli przedstawiający rozmieszczenie punktów kontrolnych dla zamka łopatki został przedstawiony na rysunku 17.



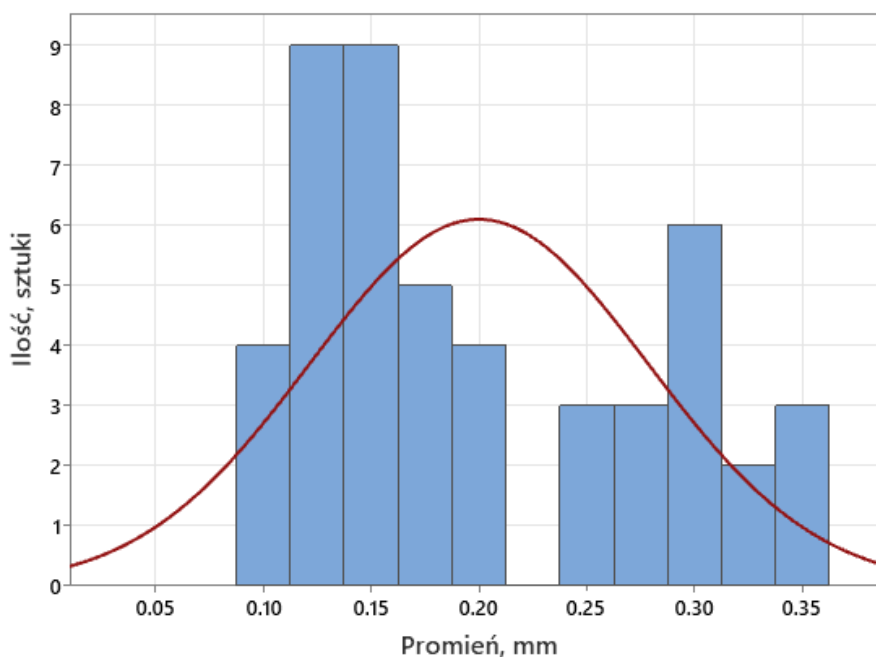
Rys. 17. Lokalizacja punktów pomiarowych w obszarze zamka łopatk.

Wyniki zebrano w formie tabeli (Tab.12).

Tab. 12. Wyniki przeprowadzonych prób - promień załamania krawędzi w wybranych miejscach detalu.

Numer testu	Zmierzona wartość promienia załamania, mm					
	A	B	C	D	E	F
-						
1	0.16	0.11	0.17	0.16	0.31	0.29
2	0.15	0.10	0.13	0.15	0.34	0.36
3	0.18	0.19	0.17	0.14	0.25	0.27
4	0.27	0.16	0.19	0.19	0.33	0.3
5	0.17	0.12	0.18	0.14	0.24	0.27
6	0.13	0.11	0.13	0.13	0.29	0.25
7	0.13	0.12	0.15	0.13	0.30	0.30
8	0.14	0.10	0.20	0.13	0.32	0.35

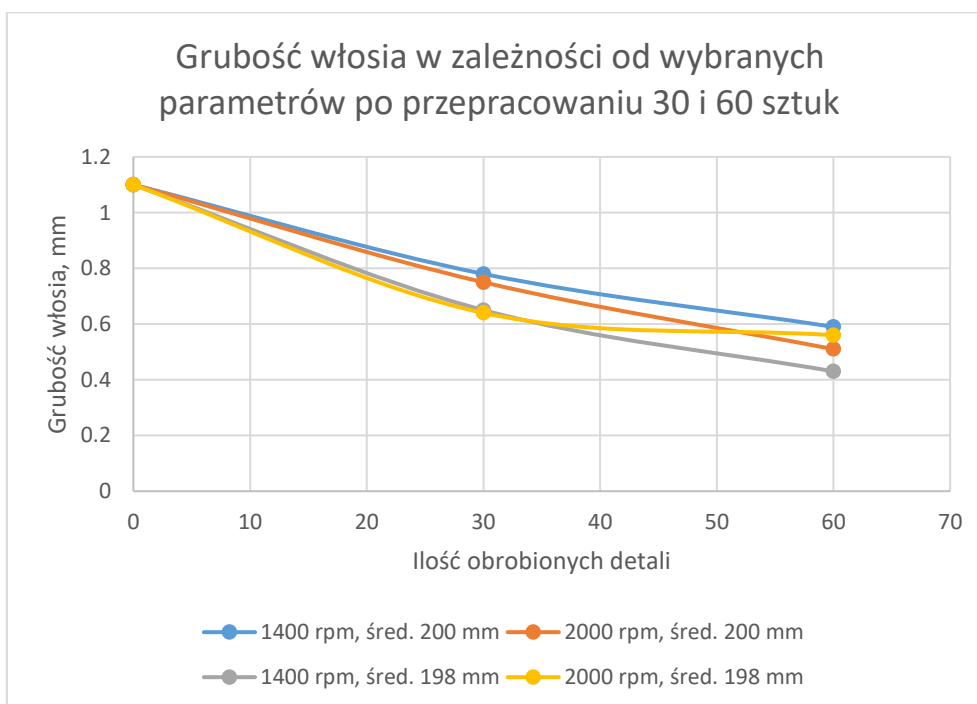
Z zebranych wyników przygotowano histogram (Rys. 18).



Rys. 18. Wyniki testu - histogram.

Uzyskane w testach wartości promienia załamania krawędzi, mieszczące się w przedziale 0.10 do 0.40 mm należy uznać za poprawne, z punktu widzenia wymogów projektowych szrotkowanych detali.

W celu wizualizacji zebranych danych podczas wszystkich prób testowych, przygotowano wykres (Rys. 19) obrazujący tempo zużywania się narzędzia w zależności od prędkości obrotowej oraz dosuwu (średnicy szczotki).



Rys. 19. Grubość włosa w zależności od wybranych parametrów po przepracowaniu 30 i 60 sztuk.

Z wykresu można odczytać, że włosie szczotki zostało najmniej zużyte, zarówno analizując okres pracy 30 jak i 60 sztuk, w przypadku następującego zestawu parametrów: prędkość obrotowa 1400 rpm oraz średnica szczotki 200 mm. Uzyskane wyniki zdecydowano się poddać weryfikacji poprzez opracowanie modelu szczotki, mającego na celu symulację zużycia ściernego z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

4. Symulacja procesu szczotkowania z wykorzystaniem MES

W celu weryfikacji wpływu parametrów technologicznych na długości eksploatacji narzędzia zdecydowano się przygotować model numeryczny w oparciu o metodę elementów skończonych w środowisku Ansys Workbench Mechanical [100]. Jednym z najważniejszych kroków przed przystąpieniem do opracowania modelu numerycznego, analizowanego zjawiska, jest podjęcie decyzji odnośnie przygotowania modelu w środowisku dwuwymiarowym lub trójwymiarowym. Bazując na obserwacji sposobu zużywania się narzędzi zdecydowano się przygotować model w środowisku dwuwymiarowym. Z obserwacji stanu zużycia narzędzi wynika jednoznacznie, że włosie zużywa się tylko i wyłącznie zgodnie z kierunkiem poślizgu (kierunek styczny, obwodowy narzędzia) po obrabianej powierzchni. Na rysunku 20 przedstawiono typowy stan włosia dla szczotki zużytej. Na rysunku 4 zaprezentowano stan włosia dla szczotki nowej.

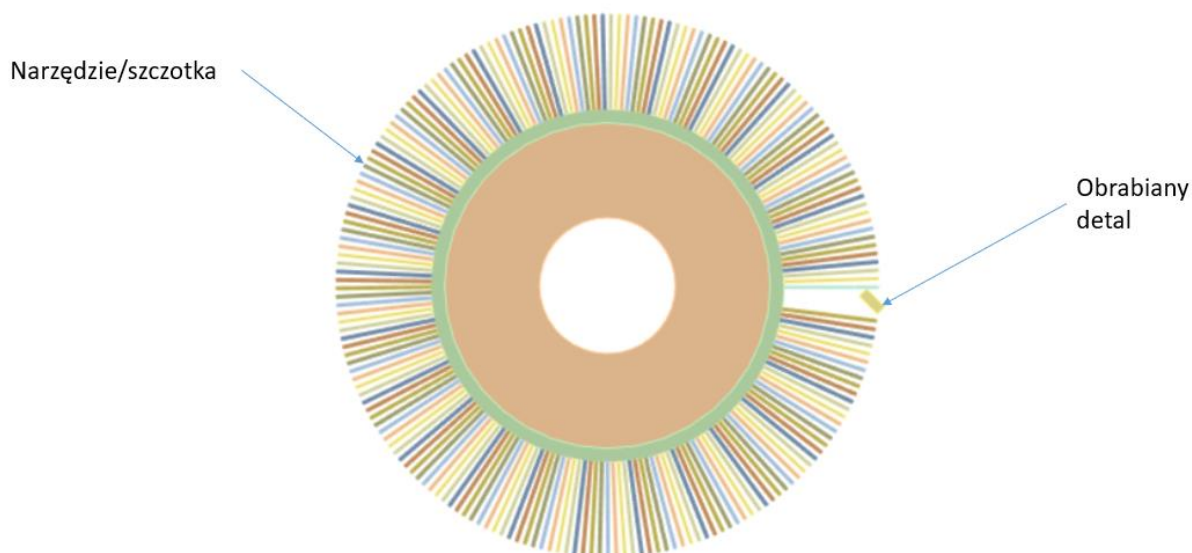


Rys. 20. Szczotka w stanie zużytym.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz ich porównania ze stanem początkowym stwierdzono brak istotnego zużycia włosa w kierunku osiowym szczotki. Interakcje pomiędzy poszczególnymi włóknami włosa tracą istotność w kontekście analizowanego zjawiska. W związku z tym zagadnienie kontaktu pomiędzy narzędziem, a detalem może zostać zredukowane do modelu dwuwymiarowego, co znacząco upraszcza proces analizy. Kolejnym z zastosowanych uproszczeń w budowie modelu numerycznego jest zobrazowanie obrabianego detalu poprzez prostokąt. Kształt ten odzwierciedla przekrój przez detal obrabiany w rzeczywistym procesie gratowania. Uproszczenie nie wpływa negatywnie na jakość otrzymanych wyników, gdyż przygotowany model nie służy do weryfikacji stanu zatępionych krawędzi (ich wymiarów) natomiast, głównym celem zbudowania tego modelu jest poznanie sposobu oraz stopnia zużywania się narzędzia ściernego podczas realizacji procesu wykańczania krawędzi zewnętrznych (ścierania się włosa).

4.1. Przygotowanie modelu MES

Model numeryczny składa się z następujących elementów: tarcza wraz z włosiem oraz prostokąt (przekrój przez detal) symulujący obrabiany detal. Wszystkie pokazane elementy geometryczne wchodzące w skład modelu numerycznego zaprezentowano na rysunku 21.



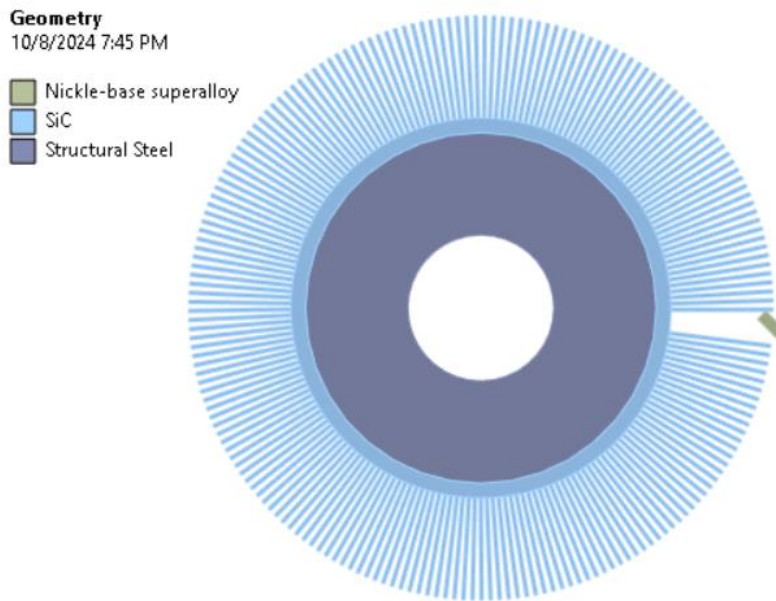
Rys. 21. Przygotowana geometria.

Dane materiałowe w postaci modułu Younga oraz liczby Poissona przedstawiono w tabeli 13.

Tab. 13. Dane materiałowe wykorzystane w modelu MES [101-103].

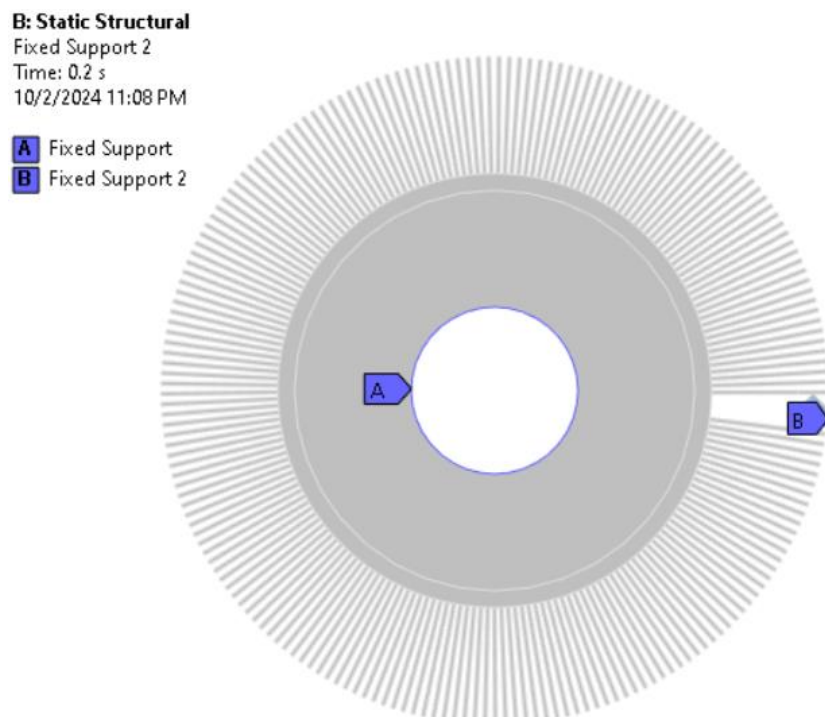
Materiał	Moduł Younga, MPa	Liczba Poissona
Stal konstrukcyjna	200000	0.30
Węglik krzemu (SiC)	410000	0.15
Nadstop niklu	156000	0.30

Przypisanie poszczególnych materiałów do odpowiednich ciał zostało zaprezentowane na rysunku 22. Szczotka podzielona jest na dwa ciała, wewnętrzny pierścień wykonany jest ze stali, natomiast włosie wykonane jest z węgla krzemu.



Rys. 22. Przypisanie danych materiałowych.

Na podstawie załączonej do oprogramowania Ansys Mechanical dokumentacji technicznej symulowanie ścierania następującego w procesie, gdzie przynajmniej jedno z ciał posiada prędkość obrotową można sprowadzić do analizy quasi statycznej. Korzystając z możliwości wykorzystania symulacji quasi-statycznej wprowadzono następujące warunki brzegowe w postaci utwierdzeń (Rys. 23).



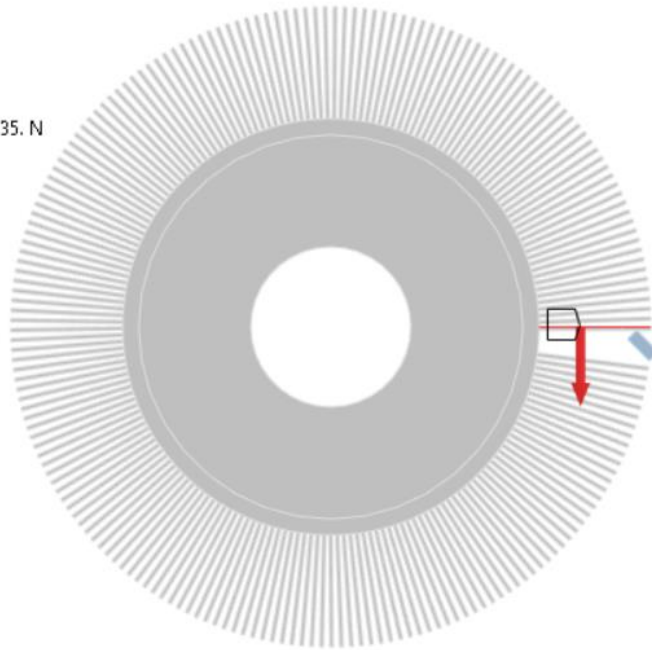
Rys. 23. Warunki brzegowe w modelu MES.

W celu uwzględnienia wzajemnego oddziaływania na siebie narzędzia oraz obrabianego detalu zdecydowano przyłożyć siłę, która została zmierzona w trakcie testów. Ze względu na małą wariację siły zdecydowano się, w celu uproszczenia modelowania, na przyjęcie

wartości średniej wyznaczonej dla skrajnych wartości parametrów związanych z prędkością obrotową oraz głębokością dosunięcia detalu do narzędzia. Wartość siły to 35 N [18]. Siłę przyłożono do powierzchni wskazanej na rysunku 24 w kierunku normalnym do krawędzi.

B: Static Structural
Force
Time: 0.2 s
10/2/2024 11:09 PM

Force: 35. N
Components: 0., -35. N

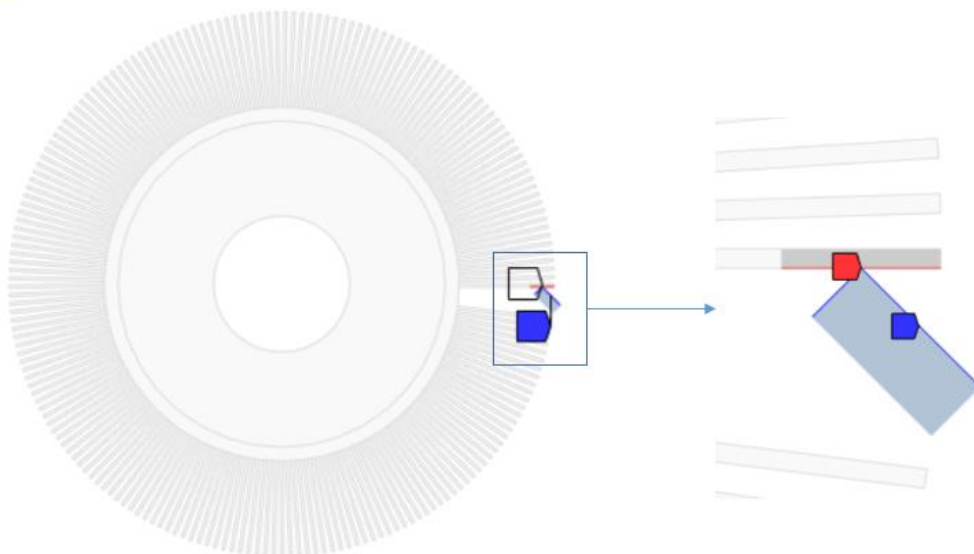


Rys. 24. Siła przyłożona w modelu.

W celu poprawnego zamodelowania wzajemnego oddziaływania na siebie ciał obecnych w modelu zdefiniowano parę kontaktową zgodnie ze szczegółami (Rys. 25).

Contact Region
10/2/2024 11:10 PM

Contact Region (Contact Bodies)
Contact Region (Target Bodies)



Rys. 25. Szczegóły modelowania kontaktu.

Konieczność uwzględnienia w analizie ścierania za pomocą modelu Archarda wymagała wprowadzenia szeregu specyficznych ustawień kontaktu [104], zgodnie z wymaganiami przedstawionymi przez producenta oprogramowania Ansys, takich jak:

- Sformułowanie kontaktu Augmented Lagrangian;
- Aktualizację sztywności kontaktu w każdej iteracji obliczeniowej;
- Lokalizacji punktów detekcji kontaktu w węzłach na kierunku normalny do powierzchni „target”.

Do symulowania zagadnienia zużycia ściernego wykorzystano równania Archarda. Równanie Archarda jest modelem wykorzystywanym do opisu zużycia ślizgowego oddziałujących ze sobą elementów i bazuje na teorii chropowatości. Przywołany model zużycia ściernego opiera się na założeniu, że ilość usuniętego materiału w wyniku zużycia ściernego jest proporcjonalna do pracy wykonanej przez siły tarcia. Istnieje szereg opracowań naukowych potwierdzających słuszność przytoczonego równania [105-109]. W niektórych źródłach [110] można spotkać się z określeniem prawa zużywania Reye’a – Archarda – Chruszczowa. Środowisko Ansys Workbench wraz z modułem Mechanical umożliwia symulację zużycia ściernego z wykorzystaniem dwóch podejść. Pierwszym z nich jest model ścierania Archarda, drugi natomiast może być dowolnie definiowany przez użytkownika oprogramowania. W niniejszej pracy zdecydowano się wybrać pierwszy z możliwych modeli. Model Archarda jest zdefiniowany za pomocą następującego równania (42):

$$Q = \frac{K \times W \times L}{H} \quad (42)$$

Gdzie:

Q – całkowita objętość zużycia ściernego;

K – stała wymiarowa;

W – siła normalna;

L – odległość poślizgu;

H – twardość materiału (najmniejsza wartość z pary kontaktujących się materiałów).

W oprogramowaniu Ansys następujące stałe muszą zostać zdefiniowane w celu obliczenia zużycia ściernego (Tab. 14).

Tab. 14. Lista parametrów konieczna do zdefiniowania w celu obliczenia zużycia ściernego.

Stała	Znaczenie
C1	Współczynnik zużycia ściernego, K
C2	Twardość materiału, H
C3	Wykładnik ciśnienia, m
C4	Wykładnik prędkości, n

Współczynnik zużycia K można skalować, aby uprościć modelowanie. Jako przykład rozważmy styk wirującego narzędzia z nieruchomym obrabianym przedmiotem, w którym narzędzie obraca się ze stałą prędkością. Jedynym efektem tego obrotu/ślizgania

na powierzchni styku jest wytworzenie zużycia. Współczynnik zużycia K można skalować tak, aby obrót nie był jawnie modelowany, ale jego wpływ był uwzględniany w obliczeniach zużycia. To znacznie skraca czas symulacji i wysiłek. Mówiąc dokładniej, współczynnik zużycia K można skalować według prędkości obrotowej. W tym modelu prędkość poślizgu wynosi $2\pi N \cdot R$, gdzie $N = 1400$ rpm, a R jest odległością od osi obrotu. Skalowanie współczynnika zużycia K przez $2\pi N \cdot R$ powoduje, że szybkość zużycia jest liniowo zależna od prędkości poślizgu bez jawnego modelowania poślizgu [104].

W przygotowanym modelu numerycznym zdefiniowano następujące stałe materiałowe (Tab. 15).

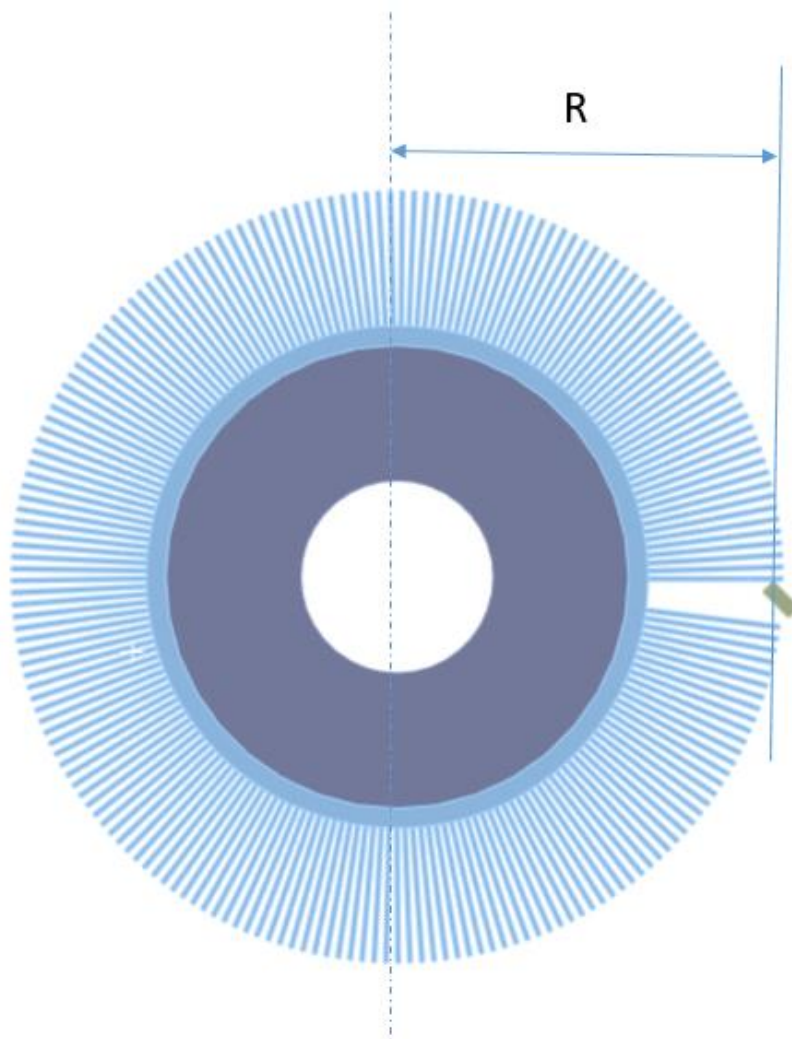
Tab. 15. Stałe materiałowe wykorzystane w modelu numerycznym.

Stała	Oznaczenie	Wartość
C1	Współczynnik zużycia ściernego, K	$1.7e-5$ [111]
C2	Twardość materiału, H	1290 [104,112]
C3	Wykładnik ciśnienia, m	1 [104]
C4	Wykładnik prędkości, n	0 [104]

Wartości współczynnika skalującego R (Rys. 26.) odpowiadającemu modelowemu miejscu styku włosa z detalem przedstawiono w tabeli (Tab. 16).

Tab. 16. Współczynnik R dla poszczególnych prób.

Numer próby	R , mm
1	98.5
2	97.5
3	96.5
4	95.5
5	94.5
6	93.5
7	92.5



Rys. 26. Współczynnik skalujący R – odległość od środka narzędzia do punktu styku włosia z detalem.

W celu poprawy jakości uzyskiwanych wyników zdecydowano się na implementację skryptu przygotowanego w języku APDL (Ansys Parametric Design Language). Przygotowany skrypt ma na celu aktywację w modelu adaptacyjnej regeneracji siatki w zależności od określonego warunku. Regeneracja siatki ma na celu podniesienie jakości uzyskiwanych wyników, a także wpływa korzystnie na zbieżność rozwiązania. Na końcu skryptu znajduje się komenda NLHIST mająca na celu śledzenie ilości usuwanego materiału w poszczególnych iteracjach obliczeniowych. Skrypt został załączony do tego opracowania i opisany ze szczegółami (Rys. 27).

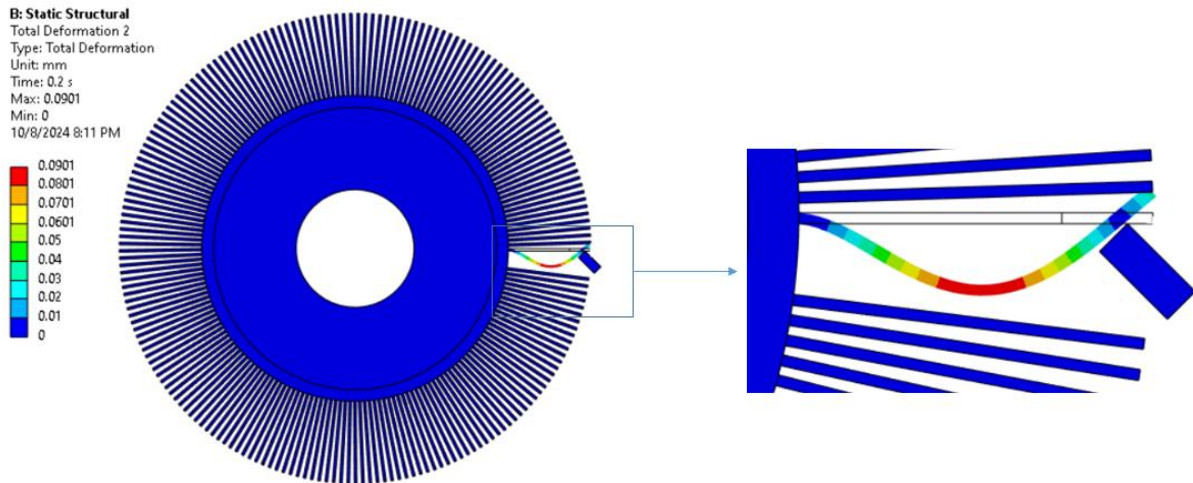
ESEL,s,real,,contact ! Wybierz elementy ze stałą rzeczywistą "target"
CM,conwearel,elem ! Utwórz komponent o nazwie "conwearel" z bieżącego wyboru elementów
ESEL,all ! Przywróć wybór do wszystkich elementów
CMSEL,all ! Przywróć wybór do wszystkich komponentów
NLAD,conwearel,add,contact,wear,0.50 ! Uruchom morfowanie po utracie 50% elementu
NLAD,conwearel,on,all,all,1.0.1 ! Aktywuj na pierwszym kroku
NLHIST,pair.blade_wear.cont.wear.203 ! Eksportuj objętość utraconego materiału

Rys. 27. Skrypt wykorzystany w analizie.

W tak przygotowanym modelu zdecydowano się na modyfikację głębokości dosunięcia detalu do szczotki w celu zweryfikowania wpływu wspomnianego parametru procesu technologicznego na modyfikację ilości ścieranego materiału.

4.2. Wyniki

Przykładowe rozwiązanie dla wybranej pary parametrów przedstawiono na rysunku 28.



Rys. 28. Odkształcenie całkowite, prędkość obrotowa 1400 rpm, głębokość zagłębienia 4.5 mm.

W wyniku aplikacji komendy NLHIST (Rys. 27) oprogramowanie podaje ilość startego materiału w poszczególnych iteracjach obliczeniowych. Przykład takich wyników zamieszczono na rysunku 29.

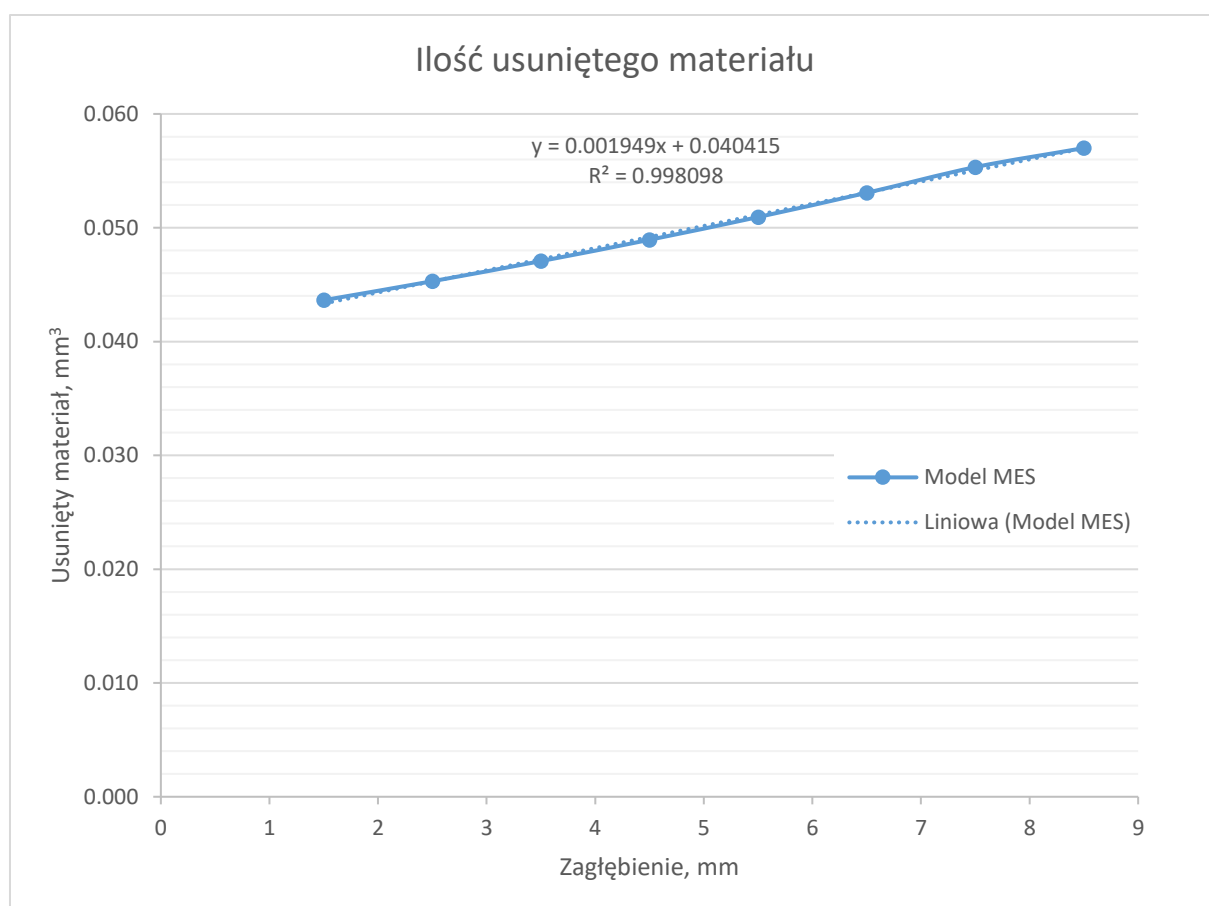
```
<SOLUTION>
<HEADER>
<COLUMN ID="          1">Time</COLUMN>
<COLUMN ID="          2">CONTACT_PAIR="          203" ITEM="CONT" COMP="WEAR">BRUSH_WEAR
</COLUMN>
<UNITS>MPA</UNITS>
</HEADER>
<COLDATA>
  0.1000000E-01      0.000000
  0.2000000E-01      0.1533851E-04
  0.3000000E-01      0.3820855E-04
  0.4000000E-01      0.6856606E-04
  0.5000000E-01      0.1064591E-03
  0.6000000E-01      0.1518862E-03
  0.7000000E-01      0.2048461E-03
  0.8000000E-01      0.2653371E-03
  0.9000000E-01      0.3333579E-03
  0.1000000          0.4089070E-03
  0.1100000          0.4919830E-03
  0.1200000          0.5825844E-03
  0.1300000          0.6807100E-03
  0.1400000          0.7863581E-03
  0.1500000          0.8995276E-03
  0.1600000          0.1020217E-02
  0.1700000          0.1148425E-02
  0.1800000          0.1284150E-02
  0.1900000          0.1427392E-02
  0.2000000          0.1578148E-02
</COLDATA>
</SOLUTION>
```

Rys. 29. Ilość startego materiału, prędkość obrotowa 1400 rpm, głębokość zagłębienia 4.5 mm.

Wyniki w postaci ilości startego materiału (z włosia szczotki) dla poszczególnych głębokości zagłębienia w zakresie od 2 do 8 mm oraz prędkości obrotowej 1400 rpm zaprezentowano w tabeli 17. Czas trwania analizy wynosi 50 sekund co odpowiada przybliżonej wartości średniej dla detali na których realizowano testy.

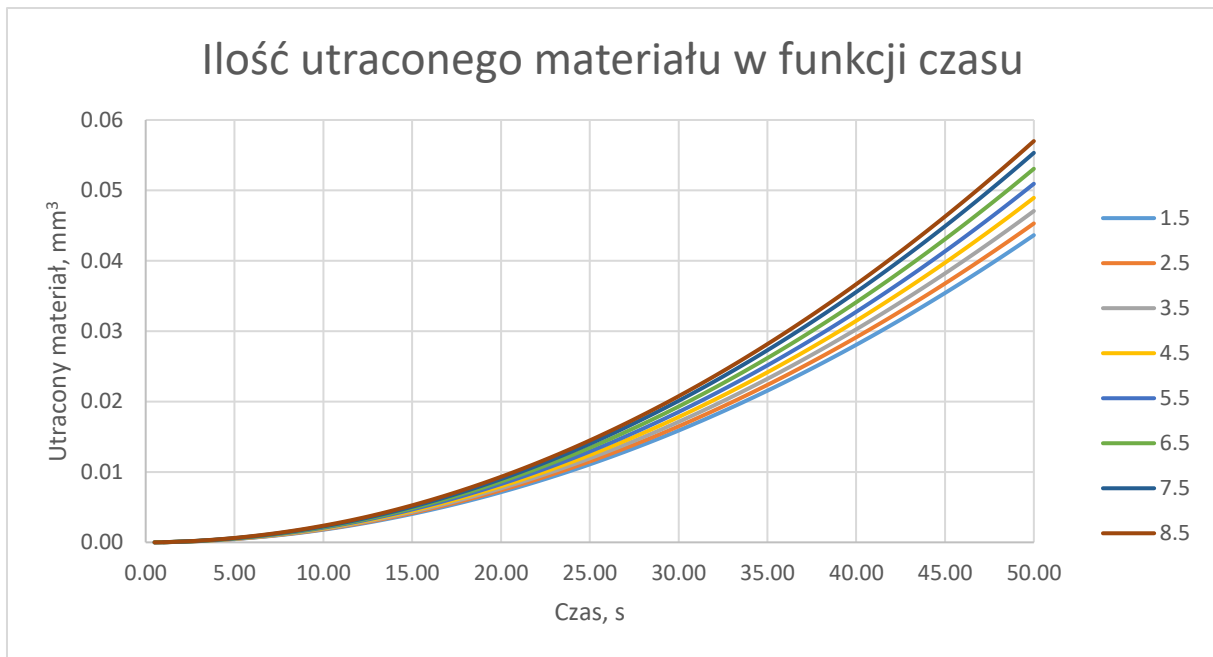
Tab. 17. Ilość startego materiału z włosa dla różnych prędkości obrotowych.

Próba numer	R, mm	Głębokość dosunięcia, mm	Prędkość obrotowa, rpm	Ilość materiału startego, mm ³
1	98.5	1.5	1400	0.044
2	97.5	2.5		0.045
3	96.5	3.5		0.047
4	95.5	4.5		0.049
5	94.5	5.5		0.051
6	93.5	6.5		0.053
7	92.5	7.5		0.055



Rys. 30. Ilość usuniętego materiału w zależności od głębokości dosunięcia, stała prędkość obrotowa.

Wyniki umieszczone w tabeli 19 oraz ich graficzna prezentacja (Rys. 30) świadczą o zbliżonej do liniowej zależności pomiędzy głębokością dosunięcia detalu do narzędzia, a objętością startego materiału.



Rys. 31. Ilość usuniętego materiału w czasie od 0 do 50 s dla poszczególnych głębokości dosunięcia detalu do narzędzia, stała prędkość obrotowa narzędzia.

Analizując ilość starego materiału w zależności od czasu trwania procesu można zauważyć nieliniowy charakter tej zależności (Rys. 31).

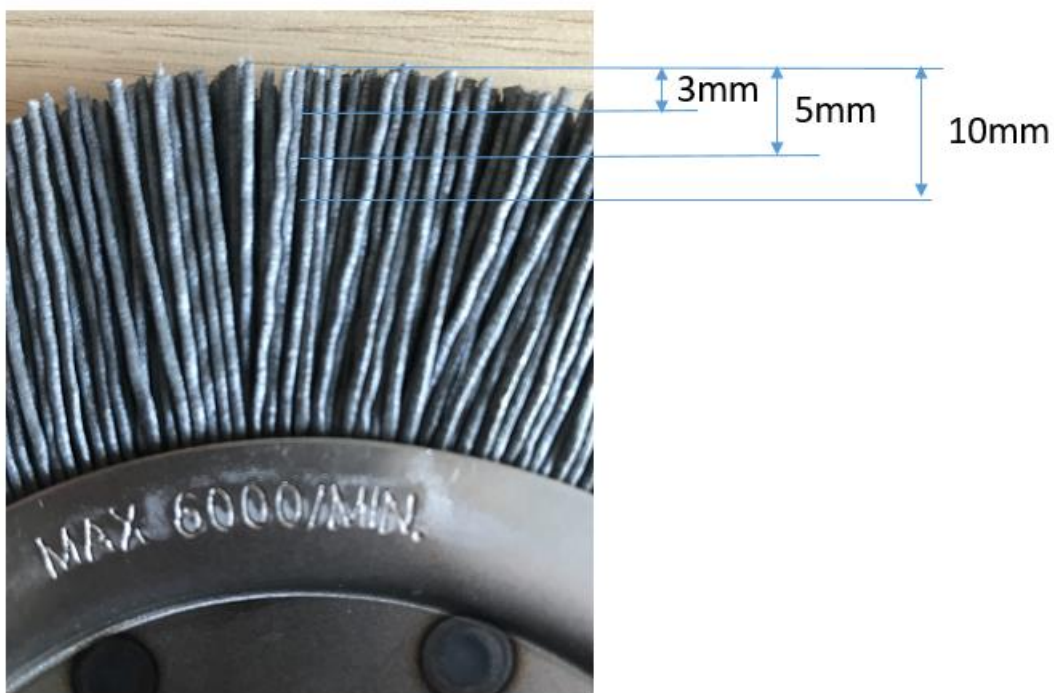
4.3. Porównanie z wynikami eksperymentalnymi

W celu określenia wpływu głębokości dosunięcia detalu do narzędzia na intensywność zużycia materiału ściernego, przeprowadzono serię analiz numerycznych, w których systematycznie modyfikowano wspomniany parametr. Każda z symulacji obejmowała okres 50 sekund, odpowiadający typowemu czasowi trwania operacji szczotkowania w warunkach produkcyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że ilość materiału usuniętego w tym czasie wykazuje zależność zbliżoną do liniowej względem głębokości dosunięcia detalu. Potwierdza to wysoki współczynnik determinacji $R^2=0.998$ obliczony dla zestawu danych uzyskanych w ramach przeprowadzonych analiz.

W kontekście prac nad optymalizacją parametrów procesu technologicznego szczotkowania – rozumianą jako maksymalizacja trwałości narzędzia przy zachowaniu wymaganej jakości obróbki – zaobserwowano analogiczną zależność pomiędzy głębokością dosunięcia detalu a stopniem zużycia materiału ściernego, wyrażonym jako redukcja grubości włosa szczotki (Rys. 6 oraz Rys. 7). Zbieżne wnioski uzyskano również na podstawie wyników modelu numerycznego, w którym parametr dosunięcia był reprezentowany przez średnicę szczotki. Zarówno eksperymenty przeprowadzone na zrobotyzowanej stacji roboczej, jak i obliczenia numeryczne, jednoznacznie wskazują na liniowy charakter zależności pomiędzy wartością zagłębienia detalu w narzędzie a intensywnością zużycia włosa przy zadanej prędkości obrotowej.

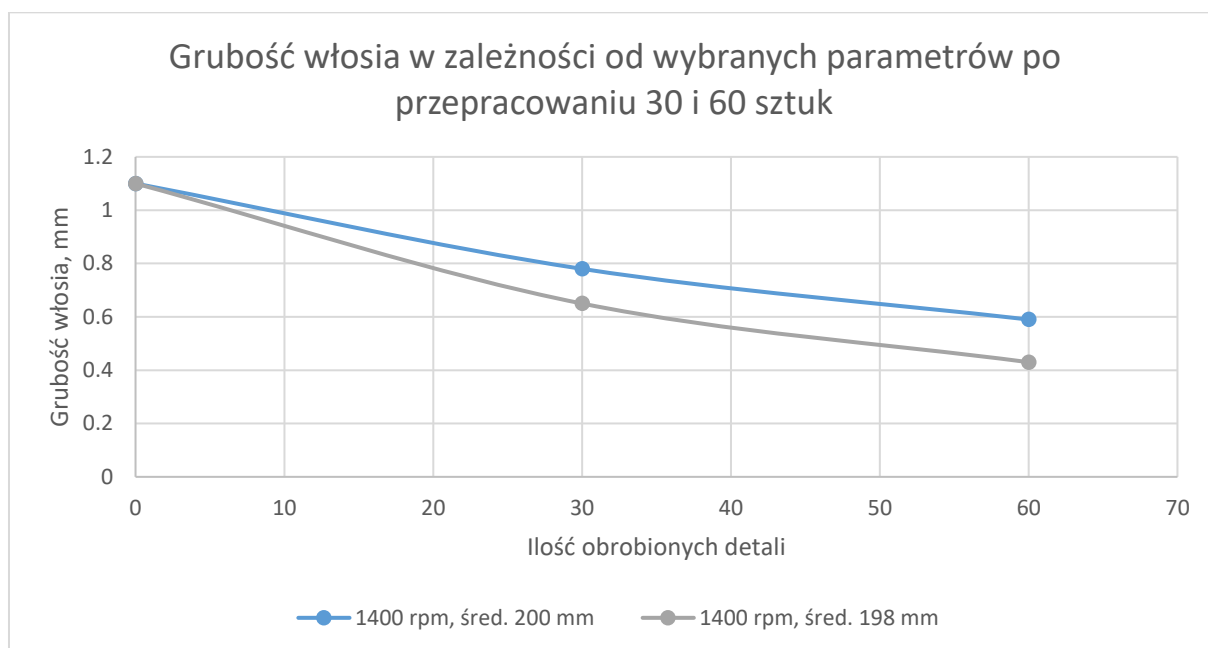
Zależność pomiędzy ilością usuniętego materiału, a czasem jest nieliniowa i zaobserwowano to dla wszystkich wartości głębokości dosunięcia detalu do narzędzia. Analogiczną zależność została zaobserwowana w trakcie prowadzenia testów (Rys.19.).

W trakcie przeprowadzanych testów zbierano informację dotyczące grubości włosa w trakcie pracy. Pomiarów dokonywano w trzech przekrojach włosa (Rys. 32).



Rys. 32. Schemat pomiaru grubości włosa.

Wartości dla środkowego pomiaru (odległość 5mm od obrysu zewnętrznego szczotki) po przetworzeniu 30 i 60 łopatek zaprezentowano na rysunku 33.



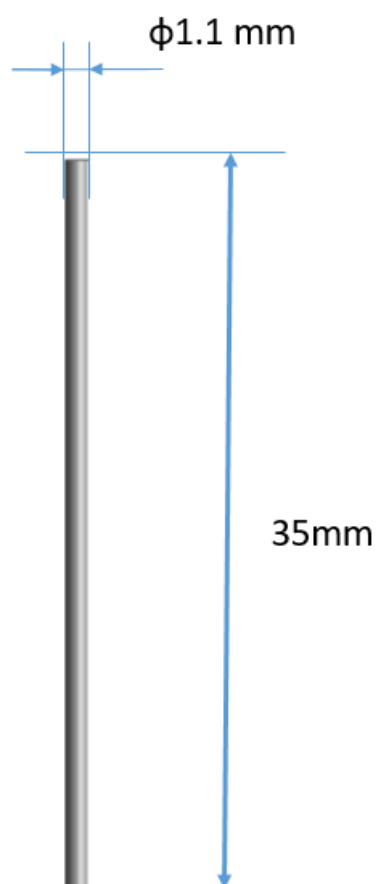
Rys. 33. Grubość włosa w zależności od wybranych parametrów po przetworzeniu 30 i 60 sztuk.

Wyniki pomiarów grubości włosa szczotki zaprezentowano w tabeli 18.

Tab. 18. Wartości pomiarów pojedynczego włókna szczotki wraz z obliczeniem jego objętości.

Głębokość dosunięcia, mm	Liczba obrobionych części	Głębokość, 3 mm	Głębokość, 5 mm	Głębokość, 10 mm
4.5	30	0.80	0.97	1.07
4.5	60	0.56	0.81	0.98
6.5	30	0.46	0.80	0.97
6.5	60	0.46	0.74	0.99

W celu korelacji wyników testów oraz modelu numerycznego zdecydowano się na obliczenie objętości pojedynczego włosa szczotki oraz odniesieniu tej wartości do ilości materiału usuniętego podczas analizy numerycznej. Nominalne wymiary włosa przedstawiono na rysunku 34.



Rys. 34. Nominalne wymiary włosa.

Objętość nominalnego pojedynczego włosa wynosi 33.26 mm^3 .

Przygotowano 4 modele CAD uwzględniając dane z tabeli 18 w celu wyznaczenia ilości usuniętego materiału. Na rysunku 35 zaprezentowano wybrany przykład wraz z zaznaczoną strefą ubytku materiału.

Ubytek materiału



Rys. 35. Włosie z zamodelowanym ubytkiem materiału.

W tabeli 19 przedstawiono objętości zużytego włosa dla poszczególnych testów oraz obliczono średnią ilość zużywanego materiału. W tabeli 19 zawarto także odniesienie do wyników uzyskanych za pomocą modelu MES.

Tab. 19. Porównanie objętości pojedynczego włókna.

Głębokość dosunięcia, mm	Liczba obrobionych części	Obliczona objętość pojedynczego włosa, mm ³	Ilość startego materiału, mm ³	Ilość startego materiału w przeliczeniu na jedno detal, mm ³	Starty materiał – dane z modelu MES, mm ³	Różnica, %
4.5	30	32.20	1.06	0.035	0.049	-39%
4.5	60	30.59	2.67	0.045	0.049	-10%
6.5	30	30.34	2.92	0.097	0.053	46%
6.5	60	30.18	3.08	0.051	0.053	-3%

Zaobserwowane różnice dla pomiarów dotyczących szczotek, które przepracowały 30 sztuk wynoszą od 39 do 46%. Zaobserwowane różnice dla pomiarów dotyczących

szczotek, które przepracowały 60 sztuk wynoszą od 3 do 10%. Biorąc pod uwagę także graficzną reprezentację wyników (Rys. 31) oraz (Rys. 19) można wysnuć wniosek, iż sam proces ścierania się materiału w zależności od czasu ma charakter nieliniowy. Natomiast różnice te spadają wraz z wydłużeniem się analizowanego okresu (ilością obrobionych sztuk). Różnice wahające się od 3 do 10% rozbieżności pomiędzy testem, a modelem numerycznym można uznać za poprawne.

5. Wdrożenie oraz weryfikacja nowych parametrów procesu szrotkowania

Opracowane w ramach realizacji prac badawczych parametry procesu technologicznego zostały zaproponowane na forum interdyscyplinarnego zespołu celem podjęcia dyskusji nad zasadnością ich wprowadzenia. W wyniku przeprowadzonej dyskusji oraz w oparciu o zrealizowane badania w warunkach produkcyjnych zdecydowano się na wdrożenie opracowanego zestawu parametrów mającego na celu wydłużenie okresu eksploatacji szrotek wykorzystywanych w procesie. Celem realizacji procesu szrotkowania jest zapewnienie odpowiedniej jakości obrabianych powierzchni oraz krawędzi. Podstawowym zadaniem koniecznym do realizacji w ramach operacji gratowania jest usunięcie wszelkich zadziorów powstałych na wcześniejszym etapie produkcji komponentów. Drugim równie istotnym zadaniem realizowanym w ramach operacji szrotkowania jest uzyskanie odpowiedniego stanu krawędzi zewnętrznych produkowanych detali. Niezbędnym jest z punktu widzenia następujących po etapie produkcji operacji montowania detali, uzyskanie krawędzi cechujących się zaokrągleniem, zamiast ostrego przejścia pomiędzy sąsiadującymi powierzchniami. Także ze względu na wytrzymałość zmęczeniową niezbędne jest uzyskanie odpowiedniego promienia zaokrąglenia krawędzi. Obecność jakichkolwiek zadziorów w warunkach pracy finalnego urządzenia mogłaby doprowadzić do propagacji pęknięcia, a w konsekwencji do ograniczenia czasu eksploatacji urządzenia. Z punktu widzenia bezpieczeństwa montażu oraz dalszej eksploatacji produkowanych detali za wartość poprawną należy przyjąć promień zatępienia w przedziale od 0.1 do 0.4 mm. W celu weryfikacji tego kryterium zdecydowano się na przeprowadzenie analizy statystycznej z wykorzystaniem rozkładu normalnego Gaussa. Przywołane kryteria są identyczne jak te stosowane we wszystkich fazach testów.

Na podstawie wyników z przeprowadzonych prób oraz weryfikacji za pomocą opracowanego modelu MES wybrano następujący zestaw parametrów jako optymalne pod kątem długości eksploatacji narzędzia: prędkość obrotowa 1400 rpm oraz średnica szrotki 200 mm (zagłębienie detalu w narzędzie ok 4mm) (Rys.19.). Uwzględniając uzyskane równanie (41) oraz dane dotyczące maksymalnego zużycia włosa (pocienienia) (Tab.10.) uzyskano wynik, że wybrany zestaw parametrów wraz z identycznym narzędziem powinien pozwolić na przygotowanie około 120 sztuk detali. W rzeczywistości przygotowany zestaw parametrów pozwolił na prawidłowe zatępienie około 100 sztuk. Różnica pomiędzy teoretyczną, a praktyczną ilością sztuk może wynikać z różnej ilości zadziorów do usunięcia pomiędzy poszczególnymi partiami detali. Także różny stosunek produkowanych detali (w fabryce wytwarza się kilka podobnych do siebie łopatek) różniących się od siebie długością krawędzi na których należy przeprowadzić operację szrotkowania może prowadzić do różnic w postaci teoretycznej, a rzeczywistej ilości przygotowanych detali. W trakcie przeprowadzania testów zdecydowano się na prowadzenie prób na jednym rodzaju detalu.

5.1. Ocena wizualna krawędzi

W celu weryfikacji stopnia usunięcia zadziorów można zastosować kontrole wizualną. Zdecydowano się, aby w trakcie weryfikacji skutków wprowadzenia nowo opracowanego zestawu parametrów przeprowadzać inspekcje dla wszystkich sztuk produkcyjnych. Typowy stan krawędzi przed i po procesie szczotkowania z wykorzystaniem zoptymalizowanych parametrów produkcyjnych został przedstawiony na rysunkach 36-42.



Rys. 36. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatk, widok z przodu.



Rys. 37. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatk, widok z boku.



Rys. 38. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatk, widok z tyłu.



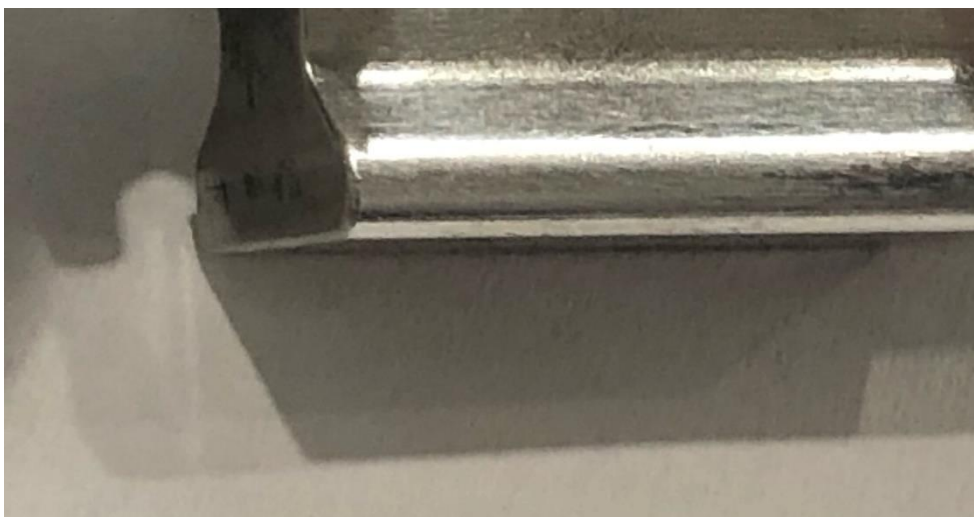
Rys. 39. Stan krawędzi przed operacją szcztokowania – zamek łopatkki, widok z boku.



Rys. 40. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szcztokowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatkki, widok z tyłu.



Rys. 41. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szcztokowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatkki, widok z boku.



Rys. 42. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szczotkowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatk, widok z boku.

Wyniki kontroli wizualnej obecności zadziorów po przeprowadzeniu operacji gratowania przedstawiono w tabeli 20.

Tab. 20. Wyniki kontroli wizualnej obecności zadziorów dla detali wyprodukowanych z wykorzystaniem zoptymalizowanych parametrów procesu szczotkowania.

Parametr wyjściowy	Ilość sztuk spełniających kryterium
Czy usunięto wszystkie zadziory?	Tak.

Na podstawie rezultatów kontroli wizualnej, przeprowadzonej dla wszystkich detali wyprodukowanych z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych, stwierdzono, iż ulepszony proces spełnia wymogi produkcyjne. Zadziory zostały usunięte ze wszystkich sztuk dla których przeprowadzono proces gratowania.

5.2. Ocena promienia załamania krawędzi

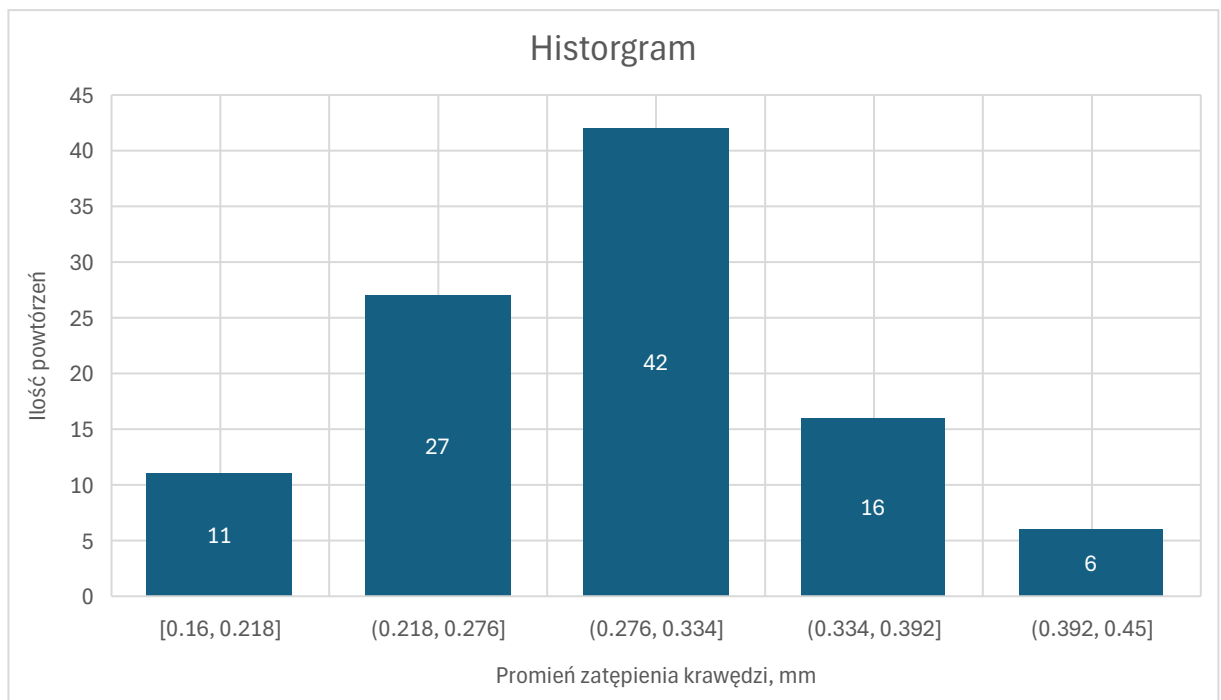
Drugim istotnym kryterium opisującym poprawność przeprowadzenia operacji gratowania jest promień załamania krawędzi. Otrzymanie odpowiedniej wartości promienia załamania krawędzi jest niezbędne dla dalszych procesów produkcyjnych, a także wymaganiem wpływającym na bezpieczeństwo oraz bezawaryjność eksploatacji. W przypadku ewaluacji tego kryterium zdecydowano się na wykorzystanie kontroli statystycznej w celu potwierdzenia poprawności realizacji operacji produkcyjnej. W tym celu zdecydowano się na losowy wybór kilku części, które przeszły przez operację gratowania realizowaną z wykorzystaniem przygotowanych parametrów technologicznych. Następnie zdecydowano się na przygotowanie wykresu Gaussa oraz na wyliczenie limitów w zakresie $\pm 3\sigma$. Tak wyliczone limity posłużą do oceny poprawności realizacji operacji szczotkowania po zmianie parametrów technologicznych. Pomiary realizowano w szeregu wybranych punktów pomiarowych zlokalizowanych w obszarze zamka łopatki. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych został zaprezentowany na rysunku 17. Wyniki pomiarów zebrano w tabeli 21.

Tab. 21. Pomiary promienia załamania dla losowej grupy części przygotowanych po wprowadzeniu nowych parametrów technologicznych.

numer	1	2	3	4	5	6
1	0.23	0.38	0.28	0.27	0.28	0.2
2	0.23	0.32	0.32	0.3	0.25	0.33
3	0.28	0.32	0.32	0.31	0.31	0.22
4	0.38	0.44	0.34	0.3	0.33	0.19
5	0.32	0.3	0.27	0.28	0.32	0.23
6	0.32	0.45	0.27	0.26	0.28	0.2
7	0.24	0.3	0.26	0.26	0.38	0.31
8	0.2	0.42	0.22	0.32	0.38	0.3
9	0.2	0.37	0.23	0.24	0.3	0.28
10	0.32	0.4	0.27	0.21	0.31	0.4
11	0.24	0.42	0.24	0.22	0.32	0.37
12	0.22	0.36	0.25	0.23	0.3	0.26

13	0.32	0.34	0.36	0.26	0.32	0.29
14	0.21	0.33	0.33	0.19	0.25	0.23
15	0.38	0.16	0.34	0.38	0.28	0.32
16	0.3	0.35	0.3	0.38	0.28	0.3
17	0.22	0.31	0.21	0.36	0.3	0.19

Histogram przedstawiający rozkład wartości promienia zatępienia dla losowo wybranej grupy 17 części (dane z Tab.21).



Rys. 43. Histogram przedstawiający wartość promienia zatępienia dla losowych detali wyprodukowanych w oparciu o nowe parametry operacji szrotkowania.

Analiza statystyczna dla uzyskanych pomiarów promienia zatępienia krawędzi z wykorzystaniem zmodyfikowanych parametrów procesu technologicznego:

$$\bar{X} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{n} = 0.29 \text{ mm} \quad (43)$$

Oraz odchylenie standardowe wg zależności (2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1-\bar{X})^2+(x_2-\bar{X})^2+\dots+(x_n-\bar{X})^2}{n}} = 0.062 \text{ mm} \quad (44)$$

A następnie obliczono zakresy $\pm 3\sigma$:

$$+3\sigma = \bar{X} + 3 \times \sigma = 0.48 \text{ mm} \quad (45)$$

$$-3\sigma = \bar{X} - 3 \times \sigma = 0.11 \text{ mm} \quad (45)$$

Otrzymane wartości promienia zatępienia krawędzi (45) oraz (46) spełniają zamierzenia projektowe. Żadna ze zmierzonych krawędzi nie miała wartości poniżej ustalonego wymagania projektowego. Wartości wykraczające poza pożądany zakres 0.10 – 0.40 mm nie wpływają niekorzystnie na poziom naprężeń w gotowym wyrobie więc także są uważane za poprawne.

Wszystkie założenia projektowe stawiane operacji szczotkowania polegające na całkowitym usunięciu wszystkich zadziorów oraz otrzymaniu odpowiedniego promienia zatępienia krawędzi zostały zrealizowane dla wszystkich produkowanych części. Świadczy to, że optymalizacja czasu eksploatacji narzędzia została przeprowadzona w sposób prawidłowy. Czas eksploatacji szczotki uległ znacznemu wydłużeniu z wartości początkowej około 60 sztuk na narzędzie, do wartości około 100 sztuk na narzędzie. Proces gratowania jest realizowany w sposób poprawny.

6. Analiza kosztów procesu szrotkowania

W czasach intensywnej konkurencji na rynkach globalnych, optymalizacja kosztów procesów produkcyjnych staje się kluczowym zadaniem wynikającej ze strategii przedsiębiorstw dążących do utrzymania lub zdobycia przewagi konkurencyjnej. Wzrost cen surowców, zmieniające się oczekiwania klientów oraz konieczność zachowania wysokiej jakości produktów wymuszają na firmach produkcyjnych ciągłe doskonalenie procesów technologicznych. Jednym z takich procesów, który odgrywa istotną rolę w wykańczaniu powierzchni, jest operacja szrotkowania. Proces ten, stosowany w wielu gałęziach przemysłu – od motoryzacji, przez produkcję maszyn, czy lotnictwo – pozwala na uzyskanie odpowiednich właściwości powierzchni oraz krawędzi. Ze względu na swoją powszechność operacja szrotkowania powinna być jednym z głównych obszarów w jakich można poszukiwać optymalizacji kosztów produkcyjnych.

Potrzeba optymalizacji kosztów procesów produkcyjnych, w tym operacji szrotkowania, wynika z szeregu kluczowych czynników. Po pierwsze, koszty materiałowe, energetyczne i robocizny stale rosną, co zmusza przedsiębiorstwa do poszukiwania efektywniejszych metod realizacji procesów. Po drugie, współczesne podejścia, takie jak Lean Manufacturing czy Przemysł 4.0, kładą nacisk na eliminację marnotrawstwa i zwiększenie efektywności, co obejmuje również precyzyjne zarządzanie kosztami jednostkowych operacji technologicznych. Po trzecie, analiza kosztów pozwala nie tylko na redukcję wydatków, ale także na lepsze planowanie produkcji, co jest szczególnie istotne w kontekście dynamicznie zmieniających się zamówień i wymagań rynkowych. W przypadku szrotkowania, które jest procesem zależnym od parametrów takich jak rodzaj narzędzia, prędkość obróbki czy czas pracy, istnieje znaczący potencjał do optymalizacji, jeśli podejście do analizy kosztów zostanie odpowiednio usystematyzowane.

Celem niniejszego rozdziału jest analiza kosztów procesu technologicznego operacji szrotkowania w kontekście kompleksowego podejścia do szacowania i minimalizacji wydatków produkcyjnych. Wstępna część rozdziału przedstawia ogólne ramy teoretyczne i znaczenie optymalizacji kosztów, natomiast w dalszej części, w odniesieniu do publikacji naukowych, omówione zostaną metody analizy kosztów wraz z równaniami matematycznymi, które uwzględniają kluczowe składowe kosztów produkcyjnych. Takie podejście pozwoli na utworzenie solidnej podstawy do wykazania wpływu wprowadzonych zmian na efektywność ekonomiczną operacji szrotkowania.

Analiza kosztów procesu technologicznego, takiego jak szrotkowanie, wymaga podejścia wielowymiarowego, uwzględniającego zarówno koszty bezpośrednie, jak i pośrednie, a także zmienne i stałe składowe wydatków. W literaturze naukowej [113-117] podkreśla się, że efektywne zarządzanie kosztami produkcyjnymi opiera się na precyzyjnym modelowaniu i identyfikacji czynników wpływających na końcowy koszt jednostkowy. W przypadku szrotkowania, kluczowe elementy kosztowe obejmują zużycie materiałów (np. szrotok), koszty energii, robocizny, amortyzacji sprzętu oraz koszty związane z organizacją procesu.

Przed przystąpieniem do optymalizacji parametrów procesu technologicznego zdecydowano się na weryfikację sposobu używania się narzędzi wykorzystywanych w procesie szczotkowania. Obserwacje wizualne oraz pomiary z wykorzystaniem suwmiarki zostały zawarte w tabelach 22 i 23. Stan szczotki nowej oraz zużytej został przedstawiony na rysunkach 4 i 20.

Tab. 22. Pomiar grubości włosa dla szczotki, stan szczotki – nowa.

Odległość od wierzchołka, [mm]	Grubość włosa pomiar 1	Grubość włosa pomiar 2	Grubość włosa pomiar 3	Wartość średnia
4	1.11	1.1	1.12	1.11
7	1.06	1.14	1.12	1.11
10	1.16	1.1	1.15	1.14

Tab. 23. Pomiar grubości włosa dla szczotki, stan szczotki – zużyta.

Odległość od wierzchołka, [mm]	Grubość włosa pomiar 1	Grubość włosa pomiar 2	Grubość włosa pomiar 3	Wartość średnia
4	0.55	0.59	0.47	0.54
7	1.08	1.09	1.13	1.1
10	1.2	1.15	1.1	1.15

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji ustalono, że szczotki zostały zużyte zaledwie na „głębokości” ok 7 mm mierząc od wierzchołka włosa. Biorąc pod uwagę, że cała długość włosa wynosi ok 35 mm, natomiast maksymalnie włosie było zużyte na długości ok 7 mm zdecydowano się na opracowanie procesu „odnawiania” narzędzi. Ów proces polega na obcięciu zużytego włosa oraz ponownym użyciu narzędzia do realizacji procesu zatępiania krawędzi. Koszt procesu obcinania włosa wynosi 5 zł/sztuka i został uwzględniony w dalszych obliczeniach.

Zgodnie z przywołanymi w niniejszej pracy w rozdziale 2. *Testy laboratoryjne* wynikami testów wstępnych optymalizacja zużycia narzędzia miała w rzeczywistości na celu ustalenie takiego zestawu parametrów technologicznych w analizowanym zakresie zmienności, który to przełoży się na jak najmniejsze obciążenia występujące podczas procesu zatępiania krawędzi. Pochodną tej akcji powinno być także zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną (konieczną do napędzania silników wprawiających w ruch obrotowy szczotki) niezbędną do realizacji procesu gratowania. Zautomatyzowana stacja robocza, na której przeprowadzono pracę optymalizacyjną, umożliwia pomiar momentu oporowego w czasie trwania procesu. Znając wartość wspomnianego momentu oraz rzeczywistą prędkość obrotową narzędzia można wyliczyć

moc pobieraną przez silniki wykorzystywane do napędzania szczotek. Na podstawie danych z procesu pochodzących z okresu przed optymalizacją parametrów procesu technologicznego ustalono, iż średnia moc wykorzystywana do napędu szczotki, na bazie 200 przepracowanych sztuk, wynosi 13.7 kW. Natomiast po optymalizacji parametrów procesu technologicznego przedstawionego w niniejszej pracy i w oparciu o 200 przepracowanych detali, moc konieczna do napędu szczotki wynosi 11.6 kW. Zmiana parametrów procesu technologicznego przełożyła się na redukcję zużycia energii elektrycznej o około 18%. W otwartych bazach opracowań naukowych można znaleźć szereg artykułów naukowych, w których to autorzy wykazywali także redukcję zużycia energii elektrycznej w wyniku odpowiedniego doboru parametrów technologicznych [118-122]. Wykazana ograniczenie zużycia energii elektrycznej w optymalizowanym procesie wpisuje się w ten trend.

6.1. Równania opisujące koszty procesu produkcyjnego

W celu kompleksowego uwzględnienia wszystkich składowych kosztów produkcji, w tym operacji szrotkowania, poniżej przedstawiono wybrane równania z literatury naukowej:

Koszty całkowite (TC) w publikacji "Management and Cost Accounting" [123] procesu produkcyjnego można wyrazić wzorem:

$$Tc = Fc + Vc \quad (47)$$

Gdzie:

Tc – koszty całkowite,

Fc – koszty stałe (np. amortyzacja maszyny do szrotkowania),

Vc – koszty zmienne (np. zużycie szrotki, energia).

W odniesieniu do operacji szrotkowania będącej tematem przewodnim niniejszej pracy, koszty stałe mogą obejmować zakup i utrzymanie maszyny, natomiast koszty zmienne zależą od ilości zużytej energii elektrycznej czy ilości zużytych w trakcie realizacji procesu narzędzi. W kontekście optymalizacji operacji szrotkowania to koszty zmienne będą odgrywać kluczową rolę, ze względu na uzależnienie procesu od wielu czynników operacyjnych, takich jak czas pracy, rodzaj wykorzystanych narzędzi czy wpływ parametrów procesowych na prędkość zużywania się narzędzi ściernych.

Z kolei koszty zmienne w odniesieniu do ilości wyprodukowanych detali (VCu) w publikacji "Time-Driven Activity-Based Costing" [124] można obliczyć na podstawie wzoru:

$$VCu = \frac{Cr + Ce + Cm + Co + Cp}{Q} \quad (48)$$

Gdzie:

VCu – jednostkowe koszty zmienne,

Cr – koszty robocizny bezpośredniej (np. wynagrodzenie operatora),

Ce – koszty energii (zależne zapotrzebowania na moc i czas pracy stacji roboczej),

Cm – koszty materiałów (np. zużycie szrotki),

Co – koszt odpadów i ich utylizacji

Cp – koszt przestoju i regulacji procesu

Q – liczba wyprodukowanych jednostek.

Składowe kosztów zmiennych w procesie szrotkowania:

- Najbardziej oczywistym elementem kosztów zmiennych w operacji szrotkowania jest zużycie materiałów eksploatacyjnych (Cm), takich jak szrotki, tarcze ściernie

czy inne narzędzia ściernie. Ich koszt zależy od rodzaju obrabianego materiału (np. stal, aluminium, drewno) oraz parametrów procesu, takich jak prędkość obrotowa czy nacisk. W przypadku intensywnego użytkowania, szczotki mogą ulegać szybkiemu zużyciu, co zwiększa koszty. Dodatkowo, jeśli proces wymaga stosowania środków wspomagających (np. past polerskich lub chłodziw), ich koszt również będzie zwiększał tę składową.

- Operacja szczotkowania, zwłaszcza przy wykorzystaniu maszyn elektrycznych lub pneumatycznych, generuje koszty związane ze zużyciem energii elektrycznej (Ce). Zużycie energii zależy od mocy urządzenia, czasu pracy oraz wykorzystywanych parametrów, takich jak prędkość obrotowa czy głębokość dosięgnięcia detalu do narzędzia.
- W przypadku szczotkowania ręcznego lub półautomatycznego, istotnym elementem kosztów zmiennych może być wynagrodzenie operatorów (Cr). Koszty te zależą od czasu pracy (np. liczby godzin potrzebnych na obróbkę danej partii detali) oraz stawki godzinowej. Nawet w procesach zautomatyzowanych, gdzie rola operatora jest ograniczona do nadzoru, czas poświęcony na przygotowanie maszyny, załadunek detali czy kontrolę jakości również wpływa na jednostkowy koszt produkcji.
- Proces szczotkowania generuje odpady, takie jak pył, drobiny materiału czy zużyte szczotki, których utylizacja wiąże się z dodatkowymi kosztami (Co). W zależności od rodzaju obrabianego materiału (np. metale ciężkie wymagające specjalnej utylizacji) oraz lokalnych regulacji środowiskowych, koszty te mogą się znacząco różnić.
- W przypadku konieczności dostosowania parametrów szczotkowania (np. zmiana rodzaju szczotki, regulacja prędkości) lub wystąpienia krótkotrwałych przestojów (Cp) spowodowanych błędami operatora czy awarią narzędzia, mogą powstać dodatkowe koszty zmienne.

6.2. Analiza zmian kosztów w procesie szczotkowania

W celu podsumowania zmian jednostkowych kosztów procesu szczotkowania zdecydowano się na porównanie wspomnianych kosztów przed oraz po procesie optymalizacji wybranych parametrów operacji gratowania. Dane zawarto w tabeli 24.

Tab. 24. Zmienne koszty operacji szczotkowania

Zmienna	Przed optymalizacją	Po optymalizacji	Komentarz
Cr	-	-	W niniejszej pracy zdecydowano się pominąć ten koszt ze względu na uwarunkowania rynkowe.
Ce	13.7 kWh → 0.12 PLN	11.6 kWh → 0.10 PLN	Zużycie energii elektrycznej podczas 1 godziny pracy napędów szczotek. Zakładany koszt MWh energii elektrycznej 850zł. Podana koszt jednostkowy przy założeniu przepływu części 100 szt na godzinę pracy urządzenia.
Cm	60 PLN 0 PLN	60 PLN 5 PLN	Koszt zakupu szczotki Koszt przycięcia szczotki
Co	5 PLN	5 PLN	Koszt utylizacji zużytego narzędzia.
Cp	0 PLN	0 PLN	Ze względu na dojrzałość procesu w operacji gratowania koszty te nie występują w tym konkretnym przypadku.
Q	60	170	Ilość detali obrobiona z wykorzystaniem jednego narzędzia. Wartość po optymalizacji uwzględnia wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia dzięki operacji „odnowienia szczotki” (70 szt) oraz zmianę kluczowych parametrów technologicznych procesu (100szt).

$$VCu_{\text{przed optymalizacją}} = Ce + \frac{Cm+Co+Cp}{Q} = 0.12 \text{ PLN} + \frac{60 \text{ PLN}+5 \text{ PLN}+0 \text{ PLN}}{60 \text{ sztuk}} = 1.20 \text{ PLN/sztukę} \quad (49)$$

$$VCu_{\text{po optymalizacji}} = Ce + \frac{Cm+Co+Cp}{Q} = 0.10 \text{ PLN} + \frac{65 \text{ PLN}+5 \text{ PLN}+0 \text{ PLN}}{170 \text{ sztuk}} = 0.51 \text{ PLN/sztukę} \quad (50)$$

Dzięki pracom optymalizacyjnym, a w szczególności pracom związanym z wydłużeniem okresu eksploatacji narzędzia, doprowadzono do znacznej redukcji kosztów

jednostkowych operacji szczotkowania (49) oraz (50). W dłuższej perspektywie pozwoli to firmie na utrzymanie przewagi konkurencyjnej, niezbędnej do utrzymania pozycji lidera w branży. Z kolei ograniczenie śladu węglowego poprzez ograniczenie zapotrzebowania na energię elektryczną, niezbędną do realizacji procesu gratowania, ograniczy ślad węglowy powstały w ramach procesu produkcji łopatek do turbiny niskiego ciśnienia.

7. Wnioski i kierunki dalszych badań

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto próbę wyznaczenia nowego zestawu parametrów technologicznych dla operacji gratowania oraz wprowadzenia tychże parametrów w środowisku produkcyjnym, mając na celu optymalizację procesów produkcyjnych oraz redukcję wpływu na środowisko naturalne i poprawę efektywności finansowej przedsiębiorstwa. Przeprowadzone badania oparto na analizie prac badawczych zrealizowanych na Politechnice Rzeszowskiej, które polegały na przygotowaniu zautomatyzowanego stanowiska roboczego mającego za zadanie realizować proces zatępienia krawędzi. W wyniku przeprowadzonych prac wykazano, że parametry technologiczne definiujące operacje szczotkowania takie jak prędkość obrotowa narzędzia czy głębokość dosunięcia detalu do szczotki w sposób istotny zmieniają wartość obciążeń powstałych w trakcie realizacji operacji gratowania. Przeprowadzone prace stanowiły inspirację w prowadzeniu dalszych badań mających na celu zweryfikowanie ustaleń laboratoryjnych w środowisku przemysłowym. Dzięki weryfikacji empirycznej udowodniono, że modyfikacja parametrów technologicznych prowadzi do znacznej redukcji zużycia narzędzi. Wykazano w oparciu o przygotowany model matematyczny, iż ilość detali opracowanych z użyciem tego samego narzędzia może wzrosnąć z wartości ok 60 sztuk do wartości ok 100 sztuk co istotnie ogranicza koszt materiałów ściernych.

Badania przeprowadzone w ramach zrealizowanej pracy doktorskiej są kluczowe zarówno z perspektywy ochrony środowiska, jak i efektywności finansowej firmy. Optymalizacja procesów produkcyjnych poprzez wprowadzenie nowych parametrów technologicznych pozwala na znaczną redukcję zużycia surowców, energii a w konsekwencji do ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery. W rezultacie, firma może zmniejszyć swój wpływ na środowisko naturalne, przyczyniając się do zrównoważonego rozwoju i spełnienia międzynarodowych norm ekologicznych. Z perspektywy finansowej, wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań technologicznych prowadzi do znaczącej redukcji kosztów operacyjnych, zwiększenia wydajności produkcji oraz poprawy konkurencyjności firmy na rynku. Dzięki optymalizacji procesów, firma może również poprawić jakość swoich produktów, co przyczynia się do zadowolenia klientów i zwiększenia bezpieczeństwa użytkowania produktów.

Otrzymane wyniki były skrupulatnie weryfikowane przy użyciu obliczeń numerycznych, co pozwoliło na dokładną analizę i ocenę skuteczności wprowadzonych parametrów technologicznych. Pomimo pewnych rozbieżności względem wyników przeprowadzonych testów praktycznych, uzyskane wyniki są zgodne z wynikami badań innych naukowców w tej dziedzinie. Rozbieżności te są normalne i wynikają z różnic w warunkach testowych oraz specyfikacji używanych narzędzi i materiałów. Wyniki badań potwierdzają zasadność wprowadzenia nowych parametrów technologicznych i wskazują na ich znaczący wpływ na poprawę efektywności produkcyjnej oraz redukcję negatywnego wpływu na środowisko.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków podsumowujących podjęte starania w ramach prac optymalizacyjnych:

- Zmiana parametrów technologicznych procesu szczotkowania, takich jak prędkość obrotowa oraz głębokość dosięgnięcia detalu do narzędzia istotnie wpływa na poziom obciążeń występujący w trakcie realizacji procesu gratowania;
- Optymalizacja z wykorzystaniem planu statystycznego dwupoziomowego pozwoliła na znaczące wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia. Wartości teoretyczne uzyskane na podstawie ograniczonej ilości przeprocesowanych sztuk wykazywały możliwość wydłużenia cyklu pracy szczotki z początkowej wartości 60 sztuk, do wartości 120 sztuk na narzędzie;
- Weryfikacja w środowisku produkcyjnym trwająca kilka miesięcy wykazała, że rzeczywista wartość możliwa do osiągnięcia wynosi 100 sztuk. Oznacza to znaczną redukcję kosztów jednostkowych poprzez wydłużenie cyklu wykorzystania narzędzia o około 66%. Różnice pomiędzy przeprowadzonym eksperymentem, a produkcją wielkoseryjną mogą wynikać z naturalnych wariacji procesu produkcyjnego
- Porównanie kosztów jednostkowych operacji szczotkowania dla operacji realizowanej przed oraz po pracach optymalizacyjnych umożliwiło poznanie wpływu prac, na jednostkowe koszty zmienne operacji szczotkowania. Z początkowego kosztu 1.2 PLN na wyprodukowaną sztukę zredukowano koszt do 0.51 PLN. Tak znacząca redukcja kosztów umożliwi zakładowi konkurowanie na otwartym rynku;
- Weryfikacja w oparciu o opracowany model numeryczny bazujący na komercyjnym oprogramowaniu realizującym obliczenia za pomocą metody elementów skończonych potwierdziła w pewnym zakresie poprawność przeprowadzonej optymalizacji. Oznacza to, że wybrane parametry technologiczne mają takie samo przełożenie (liniowe) na tempo zużywania się narzędzi. Ponadto ze względu na nieliniowość tempa zużywania się narzędzia w zależności od czasu model numeryczny wykazuje poprawną korelację z danymi pochodzącymi z testów w przypadku odniesienia wyników dla większej ilości obrobionych detali.

W ramach dalszych kierunków badań wskazano na konieczność eksperymentowania ze zmianą materiału narzędzia oraz jego parametrów (grubością włosa), co może prowadzić do dalszej optymalizacji procesów produkcyjnych. Zmiana materiału narzędzia może przyczynić się do zwiększenia jego trwałości, redukcji kosztów eksploatacyjnych oraz poprawy jakości finalnych produktów. Dalsze badania powinny również uwzględniać różnorodne warunki operacyjne i specyfikacje produkcyjne, aby uzyskać bardziej wszechstronne wyniki i lepiej zrozumieć wpływ nowych parametrów technologicznych na różne aspekty produkcji. Integracja nowoczesnych technologii, takich jak sztuczna inteligencja i analiza danych, może dodatkowo wspomóc proces optymalizacji i wdrażania innowacyjnych rozwiązań.

Podsumowując, wprowadzenie nowych parametrów technologicznych w środowisku firmy stanowi istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju, łączącego korzyści ekologiczne oraz finansowe. Wyniki przeprowadzonych badań i ich weryfikacja za pomocą obliczeń numerycznych potwierdzają zasadność wprowadzonych zmian oraz wskazują na dalsze możliwości optymalizacji. Przeprowadzone badania stanowią solidną podstawę do kontynuacji prac naukowych i wdrożeniowych w tym obszarze, przyczyniając się do poprawy efektywności operacyjnej oraz zrównoważonego rozwoju firmy. Ponadto, opracowanie modelu numerycznego operacji gratowania, istotnie

wpłynie na zmniejszenie czasu oraz środków niezbędnych do prowadzenia dalszych prac związanych z badaniem tempa zużywania się narzędzi.

Spis rysunków

Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska testowego.....	23
Rys. 2. Widok ogólny stanowiska testowego (1 – robot przemysłowy, 2 - szlifierka przemysłowa, 3 - profilometr laserowy).....	24
Rys. 3. Czujnik pomiarowy zamontowany na ramieniu robota (1 – Force Control, 2 – dedykowany uchwyt, 3 – detal).....	25
Rys. 4. Narzędzie typu szczotka wykorzystywana w procesie produkcyjnym.	27
Rys. 5. Proces programowania i pomiar wsunięcia detalu w narzędzie(1 – obrabiany detal, 2 – narzędzie, 3 – pomiar).....	30
Rys. 6. Zależność momentu od głębokości wsunięcia detalu w narzędzie dla dwóch prędkości obrotowych, nowe szczotki.....	31
Rys. 7. Zależność momentu od głębokości wsunięcia detalu w narzędzie dla dwóch prędkości obrotowych, używane szczotki.....	32
Rys. 8. Wyniki otrzymane za pomocą profilometru laserowego.....	32
Rys. 9. Histogram – wartość promienia krawędzi.....	34
Rys. 10. Stanowisko robocze (1 – manipulator przemysłowy, 2 - stół obrotowy, 3 – chwytak detalu, 4 - magazyn detali , 5 - uchwyt narzędziowy).....	38
Rys. 11. Moment oporowy narzędzia w zależności od ilości przepracowanych cykli.	39
Rys. 12. Schemat realizacji doświadczeń (3 czynniki wejściowe na 2 poziomach) [99].....	41
Rys. 13. Wymiar do jakiego została zużyta szczotka.....	42
Rys. 14. Miejsce pomiaru grubości włosa po przeprowadzonym teście.	42
Rys. 15. Graficzna prezentacja równania (41) (y – grubość włosa mm, d – średnica szczotki mm, q – ilość obrobionych detali sztuki).....	46
Rys. 16. Typowy stan krawędzi przed i po procesie szczotkowania.	47
Rys. 17. Lokalizacja punktów pomiarowych w obszarze zamka łopatkii.....	48
Rys. 18. Wyniki testu - histogram.	49
Rys. 19. Grubość włosa w zależności od wybranych parametrów po przepracowaniu 30 i 60 sztuk.....	49
Rys. 20. Szczotka w stanie zużytym.....	51
Rys. 21. Przygotowana geometria.	53
Rys. 22. Przypisanie danych materiałowych.	54
Rys. 23. Warunki brzegowe w modelu MES.	54
Rys. 24. Siła przyłożona w modelu.	55
Rys. 25. Szczegóły modelowania kontaktu.	55
Rys. 26. Współczynnik skalujący R – odległość od środka narzędzia do punktu styku włosa z detalem.	58
Rys. 27. Skrypt wykorzystany w analizie.....	59
Rys. 28. Odkształcenie całkowite, prędkość obrotowa 1400 rpm, głębokość zagłębienia 4.5 mm.	60
Rys. 29. Ilość startego materiału, prędkość obrotowa 1400 rpm, głębokość zagłębienia 4.5 mm.	60
Rys. 30. Ilość usuniętego materiału w zależności od głębokości dosunięcia, stała prędkość obrotowa.	61
Rys. 31. Ilość usuniętego materiału w czasie od 0 do 50 s dla poszczególnych głębokości dosunięcia detalu do narzędzia, stała prędkość obrotowa narzędzia.	62
Rys. 32. Schemat pomiaru grubości włosa.	64
Rys. 33. Grubość włosa w zależności od wybranych parametrów po przepracowaniu 30 i 60 sztuk.....	64

Rys. 34. Nominalne wymiary włosa.	65
Rys. 35. Włosie z zamodelowanym ubytkiem materiału.	66
Rys. 36. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatki, widok z przodu.	69
Rys. 37. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatki, widok z boku.	69
Rys. 38. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatki, widok z tyłu.	69
Rys. 39. Stan krawędzi przed operacją szczotkowania – zamek łopatki, widok z boku.	70
Rys. 40. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szczotkowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatki, widok z tyłu.	70
Rys. 41. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szczotkowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatki, widok z boku.	70
Rys. 42. Stan krawędzi po przeprowadzeniu operacji szczotkowania z wykorzystaniem opracowanych parametrów technologicznych – zamek łopatki, widok z boku.	71
Rys. 43. Histogram przedstawiający wartość promienia zatępienia dla losowych detali wyprodukowanych w oparciu o nowe parametry operacji szczotkowania.	73

Spis tabel

Tab. 1. Dane wejściowe i wyjściowe dla procesu gratowania.....	26
Tab. 2. Wybrane charakterystyki wymiarowe narzędzia wykorzystywanego w testach.....	27
Tab. 3. Wyniki testów początkowych.....	29
Tab. 4. Wyniki prób dla szczotki nowej.....	30
Tab. 5. Wyniki prób dla szczotki charakteryzującej się pewnym stanem zużycia.....	31
Tab. 6. Wyniki pomiaru promienia zatępienia.....	33
Tab. 7. Parametry wejściowe uwzględnione w procesie optymalizacji.....	39
Tab. 8. Parametry wyjściowe uwzględnione w procesie optymalizacji.....	40
Tab. 9. Matryca testów, kolumny X1, X2, X3 określają poziom dolny („-”) oraz poziom góry („+”) wybranych parametrów procesu.....	41
Tab. 10. Wyniki testu – zmierzona grubość włosa.....	43
Tab. 11. Wariancja błędu dla poszczególnych prób.....	44
Tab. 12. Wyniki przeprowadzonych prób - promień załamania krawędzi w wybranych miejscach detalu.....	48
Tab. 13. Dane materiałowe wykorzystane w modelu MES [101-103].....	53
Tab. 14. Lista parametrów konieczna do zdefiniowania w celu obliczenia zużycia ściernego.....	56
Tab. 15. Stałe materiałowe wykorzystane w modelu numerycznym.....	57
Tab. 16. Współczynnik R dla poszczególnych prób.....	57
Tab. 17. Ilość startego materiału z włosa dla różnych prędkości obrotowych.....	61
Tab. 18. Wartości pomiarów pojedynczego włókna szczotki wraz z obliczeniem jego objętości.....	64
Tab. 19. Porównanie objętości pojedynczego włókna.....	66
Tab. 20. Wyniki kontroli wizualnej obecności zadziorów dla detali wyprodukowanych z wykorzystaniem zoptymalizowanych parametrów procesu szczotkowania.....	71
Tab. 21. Pomiary promienia zatępienia dla losowej grupy części przygotowanych po wprowadzeniu nowych parametrów technologicznych.....	72
Tab. 22. Pomiar grubości włosa dla szczotki, stan szczotki – nowa.....	76
Tab. 23. Pomiar grubości włosa dla szczotki, stan szczotki – zużyta.....	76
Tab. 24. Zmienne koszty operacji szczotkowania.....	80

Literatura

- [1]. Bałon, P., Świątoniowski, A., Rejman, E., Kiełbasa, B., Smusz, R., Szostak, J., ... & Cieślak, J. (2020). Zastosowanie cienkościennych konstrukcji integralnych w lotnictwie na przykładzie projektu SAT-AM. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika.
- [2]. Tsai, W. H., Chang, Y. C., Lin, S. J., Chen, H. C., & Chu, P. Y. (2014). A green approach to the weight reduction of aircraft cabins. *Journal of Air Transport Management*, 40, 65-77.
- [3]. da Silva, W. A., Jorge, A. M., & Ogashawara, O. (2016, November). Weight reduction of amorphous alloy core electrical transformers for aircraft applications. In 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC) (pp. 1-4). IEEE.
- [4]. Zeng, Y., Li, J., Lin, S., He, X., Li, B., & Deng, T. (2022). Comparison of Manual Setting Weight Reduction and Topology Optimization of the Wing Tips of Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft. *Applied Sciences*, 12(11), 5548.
- [5]. Yang, S., & Ordonez, J. C. (2019). Aircraft Weight Reduction and Onboard Combined Power Cycle Efficiency Improvement—An Integrative Approach. In *AIAA Aviation 2019 Forum* (p. 3470).
- [6]. Zhaohui Deng, Hua Zhang, Yahui Fu, Linlin Wan, Wei Liu. Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption, *Journal of Cleaner Production*, Volume 166, 2017, Pages 1407-1414.
- [7]. Rajesh Kumar Bhushan. *Journal of Cleaner Production*, Volume 39, January 2013, pages 242-254. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites
- [8]. Szybicki, D.; Burghardt, A.; Kurc, K.; Gierlak, P. Device for Contact Measurement of Turbine Blade Geometry in Robotic Grinding Process. *Sensors* **2020**, 20, 7053. <https://doi.org/10.3390/s20247053>
- [9]. Burghardt, A., Kurc, K., Szybicki, D., Muszyńska, M. & Nawrocki, J. (2017). Robot-operated quality control station based on the UTT method. *Open Engineering*, 7(1), 37-42. <https://doi.org/10.1515/eng-2017-0008>
- [10]. Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Muszyńska M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force. *Tehnički vjesnik*, 29(1), 2022, pp. 15-22
- [11]. Sha, J., Wang, J., Hu, H., Ye, Y., & Xu, G. (2023). Development of an Accurate and Automated Quality Inspection System for Solder Joints on Aviation Plugs Using Fine-Tuned YOLOv5 Models. *Applied Sciences*, 13(9), 5290.
- [12]. Bernabei, M., Eugeni, M., Gaudenzi, P., & Costantino, F. (2023). Assessment of smart transformation in the manufacturing process of aerospace components through a data-driven approach. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 24(1), 67-86.

- [13]. Vasic, M., & Billard, A. (2013, May). Safety issues in human-robot interactions. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 197-204). IEEE.
- [14]. Chinniah, Y. (2016). Robot safety: overview of risk assessment and reduction. *Advances in Robotics & Automation*, 5(139), 2.
- [15]. Alvarado, M. L. (2002). A risk assessment of human-robot interface operations to control the potential of injuries/losses at XYZ manufacturing company.
- [16]. Yang, S., Zhong, Y., Feng, D., Li, R. Y. M., Shao, X. F., & Liu, W. (2022). Robot application and occupational injuries: are robots necessarily safer?. *Safety Science*, 147, 105623.
- [17]. Dhillon, B. S., & Anude, O. C. (1993). Robot safety and reliability: a review. *Microelectronics Reliability*, 33(3), 413-429.
- [18]. Falandys, K.; Kurc, K.; Burghardt, A.; Szybicki, D. Automation of the Edge Deburring Process and Analysis of the Impact of Selected Parameters on Forces and Moments Induced during the Process. *Appl. Sci.* **2023**, 13, 9646. <https://doi.org/10.3390/app13179646>
- [19]. Gusri, A. I., Yanuar, B., & Yasir, M. A. (2020). Burr Formation Analysis When Micro Milling Ti-6Al-4V Using End Mill Carbide Insert. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, 17(9), 4061-4067.
- [20]. Matuszak, J., & Zaleski, K. (2016). Warunki technologiczne procesu usuwania zadziorów z przedmiotów wykonanych ze stopów aluminium. *Przegląd Mechaniczny*, (12), 29-32.
- [21]. Kurniawan, R., Kumaran, S. T., Prabu, V. A., Zhen, Y., Park, K. M., Kwak, Y. I., ... & Ko, T. J. (2017). Measurement of burr removal rate and analysis of machining parameters in ultrasonic assisted dry EDM (US-EDM) for deburring drilled holes in CFRP composite. *Measurement*, 110, 98-115.
- [22]. Matuszak, J.; Zaleski, K.; Ciecieląg, K.; Skoczylas, A. Analysis of the Effectiveness of Removing Surface Defects by Brushing. *Materials* **2022**, 15, 7833. <https://doi.org/10.3390/ma15217833>
- [23]. [Matuszak, J.](#) and [Zaleski, K.](#) (2018), "Analysis of deburring effectiveness and surface layer properties around edges of workpieces made of 7075 aluminium alloy", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 90 No. 3, pp. 515-523. <https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2016-0074>
- [24]. Matuszak, J., Ciecieląg, K., Skoczylas, A., Zaleski, K. (2024). The Influence of Shot Peening and Brushing on the Deburring Effectiveness and Surface Layer Properties of 1.0503 Steel. In: Gapiński, B., Ciszak, O., Ivanov, V., Machado, J.M. (eds) *Advances in Manufacturing IV. MANUFACTURING 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56463-5_13
- [25]. Uhlmann, E.; Hoyer, A. Surface Finishing of Zirconium Dioxide with Abrasive Brushing Tools. *Machines* **2020**, 8, 89. <https://doi.org/10.3390/machines8040089>
- [26]. González, M., Rodríguez, A., Pereira, O. et al. Surface roughness evaluation when brushing heat-resistant alloy components. *Int J Adv Manuf Technol* **136**, 69–78 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13695-5>

- [27]. Salacinski, T., et al. "Roughness of Metal Surface After Finishing Using Ceramic Brush Tools" *Advances in Materials Science*, vol. 18, no. 1, Sciendo, 2018, pp. 20-27. <https://doi.org/10.1515/adms-2017-0024>
- [28]. Kulisz, M.; Zagórski, I.; Matuszak, J.; Kłonica, M. Properties of the Surface Layer After Trochoidal Milling and Brushing: Experimental Study and Artificial Neural Network Simulation. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 75. <https://doi.org/10.3390/app10010075>
- [29]. Rodríguez, A.; Fernández, A.; López de Lacalle, L.N.; Sastoque Pinilla, L. Flexible Abrasive Tools for the Deburring and Finishing of Holes in Superalloys. *J. Manuf. Mater. Process.* **2018**, *2*, 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040082>
- [30]. Wang C, Sun Q, Xu L. Analysis of helical abrasive brush filament force characteristics for surface treatment processes. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017;9(7). doi:[10.1177/1687814017715980](https://doi.org/10.1177/1687814017715980)
- [31]. Bhushan, R. K. (March 22, 2013). "Multiresponse Optimization of Al Alloy-SiC Composite Machining Parameters for Minimum Tool Wear and Maximum Metal Removal Rate." *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* April 2013; 135(2): 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4023454>
- [32]. Syed Adil, A. Krishnaiah, D. Srinivas Rao, Mathematical modelling and optimization of cutting conditions in turning operation on MDN 350 steel with carbide inserts, *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, Volume 9, 2025,ISSN 2949-9178,<https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100161>.
- [33]. Kompan Chomsamutr , Somkiat Jongprasithporn . *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 9, Issue 1, No 3, January 2012. Optimization Parameters of tool life Model Using the Taguchi Approach and Response Surface Methodology
- [34]. Guanghui Zhou, Chao Zhang, Fengyi Lu, Junjie Zhang, Integrated optimization of cutting parameters and tool path for cavity milling considering carbon emissions, *Journal of Cleaner Production*, Volume 250, 2020, 119454, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119454>.
- [35]. Wang, Guangdong Tian, Maoning Chen, Fei Tao, Chaoyong Zhang, Abdulraham Al-Ahmari, Zhiwu Li, Zhigang Jiang, Dual-objective program and improved artificial bee colony for the optimization of energy-conscious milling parameters subject to multiple constraints, *Journal of Cleaner Production*, Volume 245, 2020, 118714, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118714>.
- [36]. Jinling Wang, Yebing Tian, Xintao Hu, Yang Li, Kun Zhang, Yanhou Liu, Predictive modelling and Pareto optimization for energy efficient grinding based on aANN-embedded NSGA II algorithm, *Journal of Cleaner Production*, Volume 327, 2021, 129479, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129479>.
- [37]. Zixuan Wang, Tianqi Zhang, Tianbiao Yu, Ji Zhao, Assessment and optimization of grinding process on AISI 1045 steel in terms of green manufacturing using orthogonal experimental design and grey relational analysis, *Journal of Cleaner Production*, Volume 253, 2020, 119896, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119896>.
- [38]. MAREK WILKUS, SŁAWOMIR POLAK, ZBIGNIEW GRONOSTAJSKI, MARCIN KASZUBA, ŁUKASZ RAUCH, MACIEJ PIETRZYK "MODELLING OF THE DIE WEAR IN

THE HOT FORGING PROCESS USING THE ARCHARD MODEL " COMPUTER METHODS IN MATERIALS SCIENCE, 2015, Vol. 15. No.2

- [39]. Patel, K.V.; Jarosz, K.; Özel, T. Physics-Based Simulations of Chip Flow over Micro-Textured Cutting Tool in Orthogonal Cutting of Alloy Steel. *J. Manuf. Mater. Process.* **2021**, *5*, 65. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030065>
- [40]. Bang, J.; Kim, M.; Bae, G.; Kim, H.-G.; Lee, M.-G.; Song, J. Efficient Wear Simulation Methodology for Predicting Nonlinear Wear Behavior of Tools in Sheet Metal Forming. *Materials* **2022**, *15*, 4509. <https://doi.org/10.3390/ma15134509>
- [41]. G. Heike, M. Ramulu, E. Sorenson, P. Shanahan, K. Moynadeh, Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry, *International Journal of Production Economics*, Volume 72, Issue 2, 2001, Pages 103-120, ISSN 0925-5273, [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00089-X).
- [42]. Curran, R., Gilmour, M., MacAlleenen, C., Kelly, P., 2021, Aerospace Product Cost Management at the early Concept Operations Phase, The 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, <https://doi.org/10.2514/6.2008-8904>
- [43]. Hammar, E., Designing for cost In an aerospace company, 2014, Thesis: M.B.A., Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management, 2014. In conjunction with the Leaders for Global Operations Program at MIT. <http://hdl.handle.net/1721.1/90771>
- [44]. Facchini, F., De Chirico, A., Mummolo, G. (2019). Comparative Cost Evaluation of Material Removal Process and Additive Manufacturing in Aerospace Industry. In: Reis, J., Pinelas, S., Melão, N. (eds) *Industrial Engineering and Operations Management I. IJCIEOM 2018*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 280. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14969-7_5
- [45]. Curran, R., Kundu, A.K., Wright, J.M. et al. Modelling of aircraft manufacturing cost at the concept stage. *Int J Adv Manuf Technol* **31**, 407–420 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0205-8>
- [46]. Curran R, Kundu AK, Raghunathan S, Eakin D. Costing Tools for Decision Making within Integrated Aerospace Design. *Concurrent Engineering*. 2001;9(4):327-338. doi:[10.1177/1063293X0100900408](https://doi.org/10.1177/1063293X0100900408)
- [47]. Tran Hong Van Nguyen, Pei-Min Huang, Chen-Fu Chien, Chung-Kai Chang, Digital transformation for cost estimation system via meta-learning and an empirical study in aerospace industry, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 184, 2023, 109558, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109558>.
- [48]. Shehab, E., Ma, W., Wasim, A. (2013). Manufacturing Cost Modelling for Aerospace Composite Applications. In: Stjepandić, J., Rock, G., Bil, C. (eds) *Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4426-7_37
- [49]. Paduano, R., Employing Activity Based Costing and Management Practices Within the Aerospace Industry: Sustaining the Drive for Lean, 2001, Thesis: M.B.A.,

Massachusetts Institute of Technology,
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/91746/50932506-MIT.pdf?sequence=2>

- [50]. Otitigbe, E., Enablers and barriers to successful implementation of activity-based costing in the defense aircraft industry, 1999, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/8994>
- [51]. Maurice Gosselin, A Review of Activity-Based Costing: Technique, Implementation, and Consequences, Editor(s): Christopher S. Chapman, Anthony G. Hopwood, Michael D. Shields, Handbooks of Management Accounting Research, Elsevier, Volume 2, 2006, Pages 641-671, ISSN 1751-3243, ISBN 9780080447544, [https://doi.org/10.1016/S1751-3243\(06\)02008-6](https://doi.org/10.1016/S1751-3243(06)02008-6).
- [52]. Shannon W Anderson, James W Hesford, S.Mark Young, Factors influencing the performance of activity based costing teams: a field study of ABC model development time in the automobile industry, *Accounting, Organizations and Society*, Volume 27, Issue 3, 2002, Pages 195-211, ISSN 0361-3682, [https://doi.org/10.1016/S0361-3682\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0361-3682(01)00057-5).
- [53]. Katsuhiko Kokubu, Hirotsugu Kitada, Material flow cost accounting and existing management perspectives, Volume 108, Part B, 2015, Pages 1279-1288, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.037>.
- [54]. Annett Bierer, Uwe Götze, Lilly Meynerts, Ronny Sygulla, Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting, *Journal of Cleaner Production*, Volume 108, Part B, 2015, Pages 1289-1301, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.036>.
- [55]. Mario Schmidt, The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis, *Journal of Cleaner Production*, Volume 108, Part B, 2015, Pages 1310-1319, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.038>.
- [56]. Hayrettin Usul, Emre Betul Olgun, An analysis of material flow cost accounting in companies using different cost accounting systems, *Heliyon*, Volume 11, Issue 4, 2025, e42555, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42555>.
- [57]. Pascal Hubert, Timotei Centea, Lessa Grunefelder, Steven Nutt, James Kratz, et al.. Out-of-Autoclave Prepreg Processing. *Comprehensive Composite Materials II*, 2, Elsevier, pp.63-94, 2018.
- [58]. Phillips, Robert L.. *Pricing and Revenue Optimization: Second Edition*, Redwood City: Stanford University Press, 2021. <https://doi.org/10.1515/9781503614260>
- [59]. Ahmad, S., Wong, K.Y. and Rajoo, S. (2019), "Sustainability indicators for manufacturing sectors: A literature survey and maturity analysis from the triple-bottom line perspective", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 30 No. 2, pp. 312-334. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0091>
- [60]. Ferrazzi, M., Frecassetti, S., Bilancia, A. et al. Investigating the influence of lean manufacturing approach on environmental performance: A systematic literature review. *Int J Adv Manuf Technol* **136**, 4025–4044 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13215-5>

- [61]. Shahin, M., Maghanaki, M., Hosseinzadeh, A. i wsp. Usprawnienie operacji dzięki paradygmatowi szczupłej sztucznej inteligencji: spojrzenie na wspomaganą przez sztuczną inteligencję szczupłą produkcję za pośrednictwem wszechstronnej konwolucyjnej sieci neuronowej. *Int J Adv Manuf Technol* **133**, 5343–5419 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13874-4>
- [62]. Stezhko, N., Falah, M.W., Alasadi, L.A. (2025). Sustainable Material Management in Modern Manufacturing Systems. In: Obaid, A.J., Ika Joesidawati, M., Lafta Farhan, S., Al-Heety, E.A.M.S., Radwan, N. (eds) *Advances in Environment and Sustainability: Addressing Global Challenges. ICES 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97301-7_34
- [63]. Vincent, M.C., Maier, M. & Wegener, K. Optimizing process parameters in manufacturing to reduce carbon footprint with contextual Bayesian optimization. *Int J Adv Manuf Technol* (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16110-9>
- [64]. Diani, A., Aligod, L. (2025). Modeling the Relationships Between Green Supply Chain Practices and the Financial and Environmental Performance of the Company. In: El Mokhi, C., Hachimi, H., Nayyar, A. (eds) *The Future of Urban Living: Smart Cities and Sustainable Infrastructure Technologies. ICASET 2025. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98334-4_12
- [65]. Zhang, M., Aziz, A., Sibghatullah, A. et al. Green supply chain practices and leadership factors shaping sustainable entrepreneurship and business advantage through evolving sustainable attitudes. *Int Entrep Manag J* **21**, 93 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11365-025-01126-0>
- [66]. França, W.T., Barros, M.V., Salvador, R. et al. Integrating life cycle assessment and life cycle cost: a review of environmental-economic studies. *Int J Life Cycle Assess* **26**, 244–274 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01857-y>
- [67]. Jordaan, S.M. (2021). LCA Framework, Methods, and Application. In: Wells to Wire. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71971-5_2
- [68]. Norris, G.A. Integrating life cycle cost analysis and LCA. *Int. J. LCA* **6**, 118–120 (2001). <https://doi.org/10.1007/BF02977849>
- [69]. Burghardt, A.; Szybicki, D.; Gierlak, P.; Kurc, K.; Pietruś, P.; Cygan, R. Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 486. <https://doi.org/10.3390/app10020486>
- [70]. Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K. et al. Experimental Study of Inconel 718 Surface Treatment by Edge Robotic Deburring with Force Control. *Strength Mater* **49**, 594–604 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9903-3>
- [71]. Burghardt, A., Kurc, K., Szybicki, D., Robot-operated inspection of aircraft engine turbine rotor guide vane segment geometry, January 2017, *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette* 24(2):345-348, DOI:[10.17559/TV-20160820141242](https://doi.org/10.17559/TV-20160820141242)
- [72]. Burghardt, A., Kurc, K., & Szybicki, D. (2016). Robotic Automation of the Turbo-Propeller Engine Blade Grinding Process. *Applied Mechanics and Materials*, 817, 206–213. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.817.206>
- [73]. Liu, Y., Ding, Q., Zou, Y. et al. Multirobot conflict coordination and dynamic obstacle avoidance cooperative path planning. *Intel Serv Robotics* **18**, 413–432 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11370-025-00595-0>

- [74]. Sarker, I.H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN COMPUT. SCI.* **2**, 160 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>
- [75]. Choi, J., Lee, G. & Lee, C. Reinforcement learning-based dynamic obstacle avoidance and integration of path planning. *Intel Serv Robotics* **14**, 663–677 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11370-021-00387-2>
- [76]. Gualtieri, L., Palomba, I., Wehrle, E.J., Vidoni, R. (2020). The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human–Robot Collaboration. In: Matt, D., Modrák, V., Zsifkovits, H. (eds) *Industry 4.0 for SMEs*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_4
- [77]. Gaponenko, N.V., Glenn, J.C. Technology Industry 4.0: Problems of Labor, Employment and Unemployment. *Stud. Russ. Econ. Dev.* **31**, 271–276 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1075700720030065>
- [78]. Montero Barra, R., Garrido-Vásquez, P., Otto, K. et al. Uncertainty against Industry 4.0 and job insecurity: the moderated role of perceived employability, age, and educational level. *Int J Educ Vocat Guidance* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10775-023-09636-5>
- [79]. Eder, A., Koller, W. & Mahlberg, B. Economy 4.0: employment effects by occupation, industry, and gender. *Empirica* **49**, 1063–1088 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10663-022-09543-y>
- [80]. Pesotskiy, Y.O., Grigoreva, O.V. (2023). Cost Management and Financial Performance of Small Enterprises in the Kaizen Concept Format: Challenges to Sustainability. In: Maximova, S.G. (eds) *Complex Social Systems in Dynamic Environments*. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 365. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23856-7_67
- [81]. Helmold, M. (2020). Kaizen: Continuous Improvements in Small Steps. In: *Lean Management and Kaizen*. Management for Professionals. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46981-8_3
- [82]. Iwao, S. (2018). The Diversity and Reality of Kaizen in Toyota. In: Fujimoto, T., Ikuine, F. (eds) *Industrial Competitiveness and Design Evolution*. Evolutionary Economics and Social Complexity Science, vol 12. Springer, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55145-4_9
- [83]. Caggiano, A.; Teti, R. Digital factory technologies for robotic automation and enhanced manufacturing cell design. *Cogent Eng.* **2018**, 5, 1426676.
- [84]. Burghardt, A.; Szybicki, D.; Gierlak, P.; Kurc, K.; Muszyńska, M. Robotic Grinding Process of Turboprop Engine Compressor Blades with Active Selection of Contact Force. *Teh. Vjesn.* **2022**, 29, 15–22.
- [85]. Kurc, K.; Burghardt, A.; Gierlak, P.; Muszyńska, M.; Szybicki, D.; Ornat, A.; Uliasz, M. Application of a 3D Scanner in Robotic Measurement of Aviation Components. *Electronics* **2022**, 11, 3216.
- [86]. Zhao, X.; Lu, H.; Yu, W.; Tao, B.; Ding, H. Robotic grinding process monitoring by vibration signal based on LSTM method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2022**, 71, 1–10.
- [87]. Burghardt, A.; Gierlak, P.; Kurc, K.; Szybicki, D. Automatic Detection of Industrial Robot Tool Damage Based on Force Measurement. *Teh. Vjesn.* **2020**, 27, 1385–1393.

- [88]. Falandys, K.; Kurc, K.; Burghardt, A.; Szybicki, D. Automation of the Edge Deburring Process and Analysis of the Impact of Selected Parameters on Forces and Moments Induced during the Process. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 9646. <https://doi.org/10.3390/app13179646>
- [89]. Huo Z, Yuan M, Zhang S, Zhang X. Observer-Based Adaptive Robust Force Control of a Robotic Manipulator Integrated with External Force/Torque Sensor. *Actuators*. 2025; 14(3):116. <https://doi.org/10.3390/act14030116>
- [90]. Li C, Zhang Z, Xia G, Xie X, Zhu Q. Efficient Force Control Learning System for Industrial Robots Based on Variable Impedance Control. *Sensors*. 2018; 18(8):2539. <https://doi.org/10.3390/s18082539>
- [91]. Gattringer H, Müller A, Hoermandinger P. Design and Calibration of Robot Base Force/Torque Sensors and Their Application to Non-Collocated Admittance Control for Automated Tool Changing. *Sensors*. 2021; 21(9):2895. <https://doi.org/10.3390/s21092895>
- [92]. Johra M, Courteille E, Deblaise D, Guégan S. Elasto-Geometrical Model-Based Control of Industrial Manipulators Using Force Feedback: Application to Incremental Sheet Forming. *Robotics*. 2022; 11(2):48. <https://doi.org/10.3390/robotics11020048>
- [93]. Burghardt, A.; Gierlak, P.; Kurc, K.; Szybicki, D. Automatic Detection of Industrial Robot Tool Damage Based on Force Measurement. *Teh. Vjesn.* **2020**, *27*, 1385–1393.
- [94]. Villani, L.; De Schutter, J. Force Control. In *Springer Handbook of Robotics*; Siciliano, B., Khatib, O., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2016; pp. 195–220.
- [95]. Pires, J.N.; Afonso, G.; Estrela, N. Force control experiments for industrial applications: A test case using an industrial de-burring example. *Assem. Autom.* **2007**, *27*, 148–156.
- [96]. Szybicki, D.; Burghardt, A.; Kurc, K.; Pietruś, P. Calibration and verification of an original module measuring turbojet engine blades geometric parameters. *Arch. Mech. Eng.* **2019**, *66*, 97–109.
- [97]. Bilancia, P.; Schmidt, J.; Raffaelli, R.; Peruzzini, M.; Pellicciari, M. An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 2582.
- [98]. K. Falandys, K. Kurc, T. Zymróz, The Influence of Selected Brushing Process Parameters on the Tool's Operating Time, *Acta Mechanica et Automatica*, 2025.
- [99]. Mieczysław Korzyński, *Metodyka eksperymentu*, wydanie 2, 2017, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [100]. Falandys, K.; Kurc, K.; Tutak, J.S. Application and Empirical Verification of the Archard Model in the Deburring Process. *Materials* **2025**, *18*, 2387. <https://doi.org/10.3390/ma18102387>
- [101]. Banerjee, B.; Pradhan, S.; Das, S.; Dhupal, D. Surface topography characterization of USMM during machining of zirconia ceramic using silicon carbide abrasives: An experimental and simulation approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2024, *51*, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.03.009>
- [102]. Andraskar, N. D.; Tiwari, G.; Goel, M. D. Impact response of ceramic structures-A review. *Ceramics International* 2022, *48*(19), 27262-27279. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.313>

- [103]. Aba-Perea, P. E.; Pirling, T.; Withers, P. J.; Kelleher, J.; Kabra, S.; Preuss, M. Determination of the high temperature elastic properties and diffraction elastic constants of Ni-base superalloys. *Materials & Design* 2016, 89, 856-863. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.152>
- [104]. Ansys software help, Mechanical APDL 2022 R2, Contact Technology Guide, Chapter 14, Contact Surface Wear.
- [105]. Liu, Y.; Liskiewicz, T. W.; Beake, B. D. Dynamic changes of mechanical properties induced by friction in the Archard wear model. *Wear* 2019, 428, 366-375. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.004>
- [106]. Zhang, P.; Zhang, X.; Hu, X.; Zhang, L.; Shi, X.; Li, Z. (2024). Simulation and experimental study on frictional wear of plough blades in soil cultivation process based on the Archard model. *Biosystems Engineering* 2024, 248, 190-205. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.10.009>
- [107]. Mohta, K.; Gupta, S. K.; Goyal, P.; Dutta, A.; Chattopadhyay, J. Fretting wear assessment in PHWR pressure tubes using transient dynamic FEA and Archard's wear model. *Procedia Structural Integrity* 2024, 60, 402-410. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.061>
- [108]. Arunachalam, A. P. S.; Idapalapati, S. Material removal analysis for compliant polishing tool using adaptive meshing technique and Archard wear model. *Wear* 2019, 418, 140-150. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.015>
- [109]. Mattei, L.; Di Puccio, F. How accurate is the Archard law to predict wear of UHMWPE in hard-on-soft hip implants? A numerical and experimental investigation. *Tribology International* 2023, 187, 108768. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108768>
- [110]. Zemlik, M. Wpływ obróbki cieplnej stali Hardox i ich połączeń spawanych na odporność na zużywanie ściernie i obciążenia balistyczne. Wrocław, Rozprawa doktorska 2023, https://bip.pwr.edu.pl/fcp/uGBUKOQtTKlQhbx08SlkTVxZeUTgtCgg9ACFDC0RDSXVBG1gnBVcoFW8SBD RKHg/4/public/bip/doktoraty/zemlik_m/rozprawa_doktorska_martyna_zemlikpdf.pdf (accessed on 01 February 2025).
- [111]. Sharma, S. K.; Kumar, B.; Kim, Y. W.; Sharma, S. K.; Kumar, B. V. M.; Kim, Y. W. Tribological behavior of silicon carbide ceramics-a review. *Journal of the Korean Ceramic Society* 2016, 53(6), 581-596. <https://doi.org/10.4191/kcers.2016.53.6.581>
- [112]. Gancarczyk, N.; Gradzik, A.; Kościelniak, B.; Gancarczyk, K.; Góral, M. Influence of laser and TIG cladding methods on microstructure morphology and hardness of Stellite 694 overlay deposited onto DS200+Hf alloy substrate. *Mechanik* 2023,
- [113]. Islam, M. M., Hamid, A. B. A., Nyamasvisva, T. E., & Rafi, N. S. B. (2025). Advancement of Artificial Intelligence in Cost Estimation for Project Management Success: A Systematic Review of Machine Learning, Deep Learning, Regression, and Hybrid Models. *Modelling*, 6*(2), 35. <https://www.mdpi.com/2673-3951/6/2/35>
- [114]. Edlin, R., McCabe, C., Hulme, C., Hall, P., & Wright, J. (2015). *Cost Effectiveness Modelling for Health Technology Assessment: A Practical Course*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-15744-3>

- [115]. Towler, G., & Sinnott, R. (2008). Appendix D: Capital Cost Guidelines. In *Chemical Engineering Design** (2nd ed.). Wiley.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527611119.app4>
- [116]. Zhang, H., & Li, H. (2023). Cost Estimation in Manufacturing Using Hybrid Machine Learning Models. *Journal of Manufacturing Systems**.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612523000456>
- [117]. Kumar, R., & Singh, R. K. (2022). Cost Drivers in Lean Manufacturing: A Structural Equation Modeling Approach. *International Journal of Production Economics**.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527322001234>
- [118]. Jia S, Wang S, Lv J, Cai W, Zhang N, Zhang Z, Bai S. Multi-Objective Optimization of CNC Turning Process Parameters Considering Transient-Steady State Energy Consumption. *Sustainability*. 2021; 13(24):13803.
<https://doi.org/10.3390/su132413803>
- [119]. Öztürk B, Kara F. Multi-Objective Optimization of Machinability and Energy Consumption of Cast Iron Depending on Cooling Rate. *Machines*. 2025; 13(2):84.
<https://doi.org/10.3390/machines13020084>
- [120]. Shastri RK, Mohanty CP, Mishra U, Hotta TK, Patil VV, Prashanth KG. Optimizing the Electrical Discharge Machining Process Parameters of the Nimonic C263 Superalloy: A Sustainable Approach. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024; 8(3):126. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030126>
- [121]. Pawanr S, Gupta K. A Review on Recent Advances in the Energy Efficiency of Machining Processes for Sustainability. *Energies*. 2024; 17(15):3659.
<https://doi.org/10.3390/en17153659>
- [122]. Kuldip Singh Sangwan, Girish Kant, Optimization of Machining Parameters for Improving Energy Efficiency using Integrated Response Surface Methodology and Genetic Algorithm Approach, *Procedia CIRP*, Volume 61, 2017, Pages 517-522, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.162>.
- [123]. Drury, C. (2018). *Management and cost accounting* (10th ed.). Cengage Learning.
- [124]. Kaplan, R. S., & Anderson, S. R. (2007). *Time-driven activity-based costing: A simpler and more powerful path to higher profits*. Harvard Business School Press.

Załącznik 1

Tabela 1 Wyniki prędkości obrotowej, momentu oporowego oraz mocy dla procesu sprzed optymalizacji.

Ilość sztuk	Prędkość obrotowa, rpm	Moment, Nm	Moc, kW	Ilość sztuk	Prędkość obrotowa, rpm	Moment, Nm	Moc, kW
1	1540	111	17.9	101	1620	92	15.6
2	1544	93	15.0	102	1624	90	15.3
3	1548	100	16.2	103	1628	88	15.0
4	1552	102	16.6	104	1632	90	15.4
5	1556	100	16.3	105	1636	89	15.2
6	1560	90	14.7	106	1640	86	14.8
7	1564	96	15.7	107	1644	95	16.4
8	1568	95	15.6	108	1648	84	14.5
9	1572	96	15.8	109	1652	91	15.7
10	1576	85	14.0	110	1656	86	14.9
11	1580	98	16.2	111	1660	84	14.6
12	1584	92	15.3	112	1664	80	13.9
13	1588	94	15.6	113	1668	84	14.7
14	1592	93	15.5	114	1672	83	14.5
15	1596	94	15.7	115	1676	85	14.9
16	1600	92	15.4	116	1680	82	14.4
17	1604	98	16.5	117	1684	84	14.8
18	1608	100	16.8	118	1688	79	14.0
19	1612	83	14.0	119	1692	84	14.9
20	1616	92	15.6	120	1696	83	14.7
21	1620	81	13.7	121	1700	82	14.6
22	1624	96	16.3	122	1704	77	13.7
23	1628	77	13.1	123	1708	82	14.7
24	1632	91	15.6	124	1712	88	15.8
25	1636	75	12.8	125	1716	76	13.7
26	1640	90	15.5	126	1400	81	11.9
27	1644	74	12.7	127	1404	74	10.9
28	1648	89	15.4	128	1408	86	12.7
29	1652	77	13.3	129	1412	74	10.9
30	1656	88	15.3	130	1416	85	12.6
31	1660	80	13.9	131	1420	74	11.0
32	1664	91	15.9	132	1424	83	12.4
33	1668	91	15.9	133	1428	76	11.4
34	1672	88	15.4	134	1432	87	13.0
35	1676	84	14.7	135	1436	73	11.0
36	1680	88	15.5	136	1440	84	12.7
37	1684	83	14.6	137	1444	73	11.0
38	1688	91	16.1	138	1448	82	12.4
39	1692	81	14.4	139	1452	70	10.6

40	1696	88	15.6	140	1456	83	12.7
41	1700	81	14.4	141	1460	73	11.2
42	1704	90	16.1	142	1464	78	12.0
43	1708	82	14.7	143	1468	83	12.8
44	1712	89	16.0	144	1472	78	12.0
45	1716	82	14.7	145	1476	79	12.2
46	1400	88	12.9	146	1480	81	12.6
47	1404	84	12.3	147	1484	83	12.9
48	1408	88	13.0	148	1488	73	11.4
49	1412	88	13.0	149	1492	77	12.0
50	1416	88	13.0	150	1496	75	11.7
51	1420	90	13.4	151	1500	76	11.9
52	1424	89	13.3	152	1504	75	11.8
53	1428	88	13.2	153	1508	77	12.2
54	1432	86	12.9	154	1512	70	11.1
55	1436	93	14.0	155	1516	78	12.4
56	1440	88	13.3	156	1520	86	13.7
57	1444	84	12.7	157	1524	70	11.2
58	1448	85	12.9	158	1528	78	12.5
59	1452	81	12.3	159	1532	74	11.9
60	1456	83	12.7	160	1536	78	12.5
61	1460	80	12.2	161	1540	69	11.1
62	1464	87	13.3	162	1544	82	13.3
63	1468	79	12.1	163	1548	69	11.2
64	1472	81	12.5	164	1552	80	13.0
65	1476	81	12.5	165	1556	72	11.7
66	1480	82	12.7	166	1560	80	13.1
67	1484	82	12.7	167	1564	66	10.8
68	1488	87	13.6	168	1568	79	13.0
69	1492	77	12.0	169	1572	73	12.0
70	1496	85	13.3	170	1576	82	13.5
71	1500	77	12.1	171	1580	83	13.7
72	1504	84	13.2	172	1584	84	13.9
73	1508	83	13.1	173	1588	81	13.5
74	1512	79	12.5	174	1592	73	12.2
75	1516	86	13.7	175	1596	81	13.5
76	1520	75	11.9	176	1600	79	13.2
77	1524	83	13.2	177	1604	78	13.1
78	1528	76	12.2	178	1608	81	13.6
79	1532	87	14.0	179	1612	71	12.0
80	1536	86	13.8	180	1616	78	13.2
81	1540	89	14.4	181	1620	79	13.4
82	1544	87	14.1	182	1624	81	13.8
83	1548	85	13.8	183	1628	79	13.5
84	1552	88	14.3	184	1632	78	13.3
85	1556	92	15.0	185	1636	77	13.2

86	1560	84	13.7	186	1640	81	13.9
87	1564	90	14.7	187	1644	82	14.1
88	1568	84	13.8	188	1648	82	14.2
89	1572	84	13.8	189	1652	84	14.5
90	1576	77	12.7	190	1656	87	15.1
91	1580	89	14.7	191	1660	86	14.9
92	1584	84	13.9	192	1664	84	14.6
93	1588	87	14.5	193	1668	79	13.8
94	1592	83	13.8	194	1672	82	14.4
95	1596	80	13.4	195	1676	81	14.2
96	1600	80	13.4	196	1680	86	15.1
97	1604	86	14.4	197	1684	77	13.6
98	1608	79	13.3	198	1688	82	14.5
99	1612	83	14.0	199	1692	82	14.5
100	1616	87	14.7	200	1696	79	14.0

Załącznik 2

Tabela 2 Wyniki prędkości obrotowej, momentu oporowego oraz mocy dla procesu po optymalizacji.

Ilość sztuk	Prędkość obrotowa, rpm	Moment, Nm	Moc, kW	Ilość sztuk	Prędkość obrotowa, rpm	Moment, Nm	Moc, kW
1	1400	113	16.6	101	1400	75	11.0
2	1400	107	14.8	102	1400	77	10.7
3	1400	95	13.2	103	1400	78	10.8
4	1400	117	16.2	104	1400	121	16.8
5	1400	124	17.2	105	1400	89	12.3
6	1400	109	15.1	106	1400	83	11.5
7	1400	106	14.7	107	1400	82	11.4
8	1400	102	14.1	108	1400	83	11.5
9	1400	105	14.5	109	1400	81	11.2
10	1400	97	13.4	110	1400	71	9.8
11	1400	97	13.4	111	1400	69	9.6
12	1400	87	12.1	112	1400	94	13.0
13	1400	91	12.6	113	1400	62	8.6
14	1400	92	12.7	114	1400	69	9.6
15	1400	99	13.7	115	1400	67	9.3
16	1400	89	12.3	116	1400	74	10.3
17	1400	95	13.2	117	1400	68	9.4
18	1400	91	12.6	118	1400	70	9.7
19	1400	90	12.5	119	1400	72	10.0
20	1400	93	12.9	120	1400	84	11.6
21	1400	83	11.5	121	1400	99	13.7
22	1400	83	11.5	122	1400	80	11.1
23	1400	98	13.6	123	1400	75	10.4
24	1400	86	11.9	124	1400	69	9.6
25	1400	79	10.9	125	1400	92	12.7
26	1400	84	11.6	126	1400	73	10.1
27	1400	84	11.6	127	1400	76	10.5
28	1400	83	11.5	128	1400	73	10.1
29	1400	81	11.2	129	1400	67	9.3
30	1400	85	11.8	130	1400	65	9.0
31	1400	84	11.6	131	1400	76	10.5
32	1400	87	12.1	132	1400	71	9.8
33	1400	87	12.1	133	1400	78	10.8
34	1400	81	11.2	134	1400	66	9.1
35	1400	83	11.5	135	1400	77	10.7
36	1400	105	14.5	136	1400	66	9.1
37	1400	89	12.3	137	1400	113	15.7
38	1400	87	12.1	138	1400	83	11.5
39	1400	90	12.5	139	1400	77	10.7

40	1400	89	12.3	140	1400	77	10.7
41	1400	81	11.2	141	1400	103	14.3
42	1400	89	12.3	142	1400	83	11.5
43	1400	78	10.8	143	1400	79	10.9
44	1400	84	11.6	144	1400	67	9.3
45	1400	88	12.2	145	1400	88	12.2
46	1400	84	11.6	146	1400	75	10.4
47	1400	89	12.3	147	1400	78	10.8
48	1400	80	11.1	148	1400	77	10.7
49	1400	86	11.9	149	1400	80	11.1
50	1400	85	11.8	150	1400	74	10.3
51	1400	83	11.5	151	1400	85	11.8
52	1400	81	11.2	152	1400	82	11.4
53	1400	84	11.6	153	1400	90	12.5
54	1400	78	10.8	154	1400	85	11.8
55	1400	85	11.8	155	1400	81	11.2
56	1400	81	11.2	156	1400	67	9.3
57	1400	80	11.1	157	1400	74	10.3
58	1400	79	10.9	158	1400	84	11.6
59	1400	85	11.8	159	1400	80	11.1
60	1400	99	13.7	160	1400	79	10.9
61	1400	75	10.4	161	1400	83	11.5
62	1400	95	13.2	162	1400	81	11.2
63	1400	90	12.5	163	1400	73	10.1
64	1400	92	12.7	164	1400	76	10.5
65	1400	88	12.2	165	1400	75	10.4
66	1400	84	11.6	166	1400	81	11.2
67	1400	81	11.2	167	1400	68	9.4
68	1400	86	11.9	168	1400	80	11.1
69	1400	80	11.1	169	1400	82	11.4
70	1400	79	10.9	170	1400	79	10.9
71	1400	83	11.5	171	1400	77	10.7
72	1400	86	11.9	172	1400	78	10.8
73	1400	81	11.2	173	1400	80	11.1
74	1400	84	11.6	174	1400	79	10.9
75	1400	81	11.2	175	1400	82	11.4
76	1400	79	10.9	176	1400	74	10.3
77	1400	86	11.9	177	1400	75	10.4
78	1400	82	11.4	178	1400	76	10.5
79	1400	80	11.1	179	1400	77	10.7
80	1400	77	10.7	180	1400	83	11.5
81	1400	96	13.3	181	1400	70	9.7
82	1400	84	11.6	182	1400	68	9.4
83	1400	98	13.6	183	1400	72	10.0
84	1400	86	11.9	184	1400	84	11.6
85	1400	99	13.7	185	1400	83	11.5

86	1400	89	12.3	186	1400	80	11.1
87	1400	111	15.4	187	1400	87	12.1
88	1400	93	12.9	188	1400	82	11.4
89	1400	91	12.6	189	1400	73	10.1
90	1400	91	12.6	190	1400	79	10.9
91	1400	83	11.5	191	1400	77	10.7
92	1400	84	11.6	192	1400	79	10.9
93	1400	79	10.9	193	1400	85	11.8
94	1400	80	11.1	194	1400	78	10.8
95	1400	79	10.9	195	1400	83	11.5
96	1400	78	10.8	196	1400	79	10.9
97	1400	79	10.9	197	1400	82	11.4
98	1400	78	10.8	198	1400	80	11.1
99	1400	78	10.8	199	1400	87	12.1
100	1400	81	11.2	200	1400	81	11.2

STRESZCZENIE PRACY DYPLOMOWEJ

Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A.

Autor: Karol Falandys

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek Tutak

Słowa kluczowe: optymalizacja, szczotkowanie, łopatka, model Archarda

Praca dyplomowa skupia się na optymalizacji parametrów procesu gratowania ostrych krawędzi podczas produkcji łopatek turbiny niskiego ciśnienia. Celem prac było wydłużenie żywotności narzędzi przy zachowaniu wysokiej jakości detali, co ma kluczowe znaczenie w przemyśle lotniczym. Zwrócono uwagę na możliwość optymalizacji kosztów produkcji w sposób odpowiedzialny, przynoszący korzyści ekonomiczne, ekologiczne i społeczne. Badania wykazały istnienie lokalnego minimum zużycia materiałów ściernych, co umożliwia zwiększenie liczby obrabianych części z wykorzystaniem jednego narzędzia. Praca akcentuje konieczność dalszych badań nad zmianą materiałów oraz parametrów narzędzi w celu pogłębienia optymalizacji. Zbudowany model numeryczny procesu gratowania pozwala skrócić czas i ograniczyć koszty badań. Wypracowane rozwiązania zostały wdrożone i potwierdzają poprawność przeprowadzonych badań i wskazują na dalszy potencjał do optymalizacji. Praca stanowi solidną bazę do przyszłych badań naukowych i wdrożeń przemysłowych. Wprowadzenie nowych parametrów technologicznych wspiera zrównoważony rozwój firmy, łącząc korzyści ekologiczne z finansowymi.

DIPLOMA THESIS ABSTRACT

Multi-criteria optimization of the brushing process of the lock of the low-pressure turbine blade in the LEAP-1A engine.

Author: Karol Falandys

Supervisor: dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz

Assistant supervisor: dr inż. Jacek Tutak

Key words: optimization, brushing, blade, Archard model

The thesis focuses on optimizing the parameters of the deburring process for sharp edges during the production of low-pressure turbine blades. The aim of the work was to extend the tool life while maintaining high detail quality, which is crucial in the aviation industry. Attention was paid to the possibility of responsibly optimizing production costs, bringing economic, ecological, and social benefits. The research revealed the existence of a local minimum in abrasive material consumption, which enables an increase in the number of parts processed with a single tool. The thesis emphasizes the necessity for further research on changes in materials and tool parameters to deepen optimization. The developed numerical model of the deburring process makes it possible to reduce the time and costs associated with testing. The implemented solutions confirmed the validity of the conducted research and indicated further potential for optimization. The thesis provides a solid base for future scientific research and industrial implementations. The introduction of new technological parameters supports the company's sustainable development by combining ecological and financial benefits.