

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej

Rozprawa doktorska

Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych na
tokarkach CNC

mgr inż. Bartłomiej Krawczyk

Promotor: dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Szablewski

Poznań, 2024

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	3
1. Wprowadzenie	5
2. Analiza stanu wiedzy	7
2.1 Podstawy teoretyczne i podział gwintów	7
2.2 Analiza metod wytwarzania gwintów różnego typu	10
2.2.1 Obróbka plastyczna - walcowanie gwintów	10
2.2.2 Toczenie gwintów.....	11
2.2.3 Gwintowanie.....	14
2.2.4 Frezowanie gwintów	16
2.2.5 Szlifowanie gwintów	17
2.2.6 Nacinanie gwintu narzynką	17
2.2.7 Problemy wytwórcze występujące w procesie toczenia gwintów w przemyśle lotniczym	18
2.3 Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych	21
2.3.1 Metody stykowe	21
2.3.2 Metody bezstykowe	23
2.4 Pomiary na obrabiarkach	25
2.4.1 Systemy pomiarowe w Przemysle 4.0.....	25
2.4.2 Obrabiarkowe sondy pomiarowe.....	29
2.4.3 Problemy związane z In-process measurement	31
2.5 Podsumowanie stanu wiedzy.....	33
3. Cel i hipoteza pracy	35
4. Badania wstępne	36
4.1 Badanie topografii gwintów	36
4.1.1 Metodyka badań	36
4.1.2 Wyniki	38
4.1.3 Wnioski.....	44
4.2 Badania metalograficzne gwintów zewnętrznych.....	45
4.2.1 Metodyka badań	45
4.2.2 Wyniki	46
4.2.3 Wnioski.....	50
4.3 Badania porównawcze cech geometrycznych gwintów wybranymi metodami.....	51
4.3.1 Metodyka badań	51
4.3.2 Wyniki	57

4.3.3	Wnioski.....	57
4.4	Wnioski z badań wstępnych	58
5.	Badania zasadnicze.....	59
5.1	Badanie z zastosowaniem czujnika laserowego liniowego	59
5.1.1	Metodyka badań	59
5.1.2	Wyniki	64
5.1.3	Wnioski.....	78
5.2	Badanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania obrabiarki WFL M40.....	78
5.2.1	Metodyka badań	78
5.2.2	Wyniki	82
5.2.3	Wnioski.....	85
5.3	Porównanie sond pomiarowych	86
5.3.1	Metodyka badań	86
5.3.2	Wyniki	90
5.3.3	Wnioski.....	94
5.4	Pomiar średnicy podziałowej gwintu na obrabiarce CNC	95
5.4.1	Metodyka badań	95
5.4.2	Wyniki	101
5.4.3	Wnioski.....	113
5.5	Szacowanie niepewności pomiarowej	114
5.6	Wnioski z badań zasadniczych	118
6.	Podsumowanie i kierunek dalszych badań	120
	Streszczenie	122
	Abstract.....	123
	Bibliografia.....	124

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

ANSI	<i>Amerykańska organizacja zajmująca się standaryzacją (ang. American National Standards Institute)</i>
ASME	<i>Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników (ang. American Society of Mechanical Engineers)</i>
CAD	<i>Projektowanie wspomaganie komputerowo (ang. computer aided design)</i>
CCD	<i>Matryca światłoczuła (ang. charge-coupled device)</i>
CMM	<i>Współrzędnościowa maszyna pomiarowa (ang. coordinate measuring machine)</i>
CNC	<i>Komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych (ang. computerized numerical control)</i>
DIN	<i>Niemiecki Instytut Normalizacyjny (niem. Deutsches Institut für Normung)</i>
ISO	<i>Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ang. International Organization for Standardization)</i>
MR	<i>Wskaźnik obrabialności materiału (ang. machinability rating)</i>
NIST	<i>Krajowa Instytucja Metrologiczna (NMI) w Stanach Zjednoczonych (ang. National Institute Of Standards And Technology)</i>
d	<i>Średnica nominalna gwintu zewnętrznego (wierzchołkowa)</i>
d_1	<i>Średnica wrębu gwintu zewnętrznego</i>
d_2	<i>Średnica podziałowa gwintu zewnętrznego</i>
D	<i>Średnica nominalna gwintu wewnętrznego (wrębu)</i>
D_1	<i>Średnica wierzchołkowa gwintu wewnętrznego</i>
D_2	<i>Średnica podziałowa gwintu wewnętrznego</i>
d_o	<i>Średnica optymalna waleczków pomiarowych</i>
d_w	<i>Średnica waleczków pomiarowych</i>
P	<i>Skok gwintu</i>
α	<i>Całkowity kąt zarysu gwintu</i>
β	<i>Półkąt zarysu gwintu niesymetrycznego</i>
γ	<i>Półkąt zarysu gwintu niesymetrycznego</i>
ε	<i>$(\beta + \gamma)/2$</i>
Ψ	<i>Kąt wzniosu linii śrubowej gwintu</i>
M_p	<i>Wymiar zewnętrzny waleczków pomiarowych umieszczonych we wrębie</i>
p_1	<i>Poprawka na skręcenie waleczków w brzdach gwintu</i>
p_2	<i>Poprawka na odkształcenie sprężyste pod wpływem nacisku pomiarowego waleczków i gwintu w miejscach styku</i>
Q	<i>Nacisk pomiarowy</i>
k	<i>Współczynnik rozszerzenia dla wyznaczenia niepewności rozszerzonej</i>
u	<i>Standardowa niepewność pomiarowa</i>
U	<i>Rozszerzona niepewność pomiarowa</i>
σ	<i>Odchylenie standardowe</i>

\emptyset	<i>Symbol średnicy</i>
f	<i>Posuw</i>
v_c	<i>Prędkość skrawania</i>
R_a	<i>Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej</i>
S_a	<i>Średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni od powierzchni średniej</i>
S_{ku}	<i>Współczynnik nachylenia powierzchni</i>
S_p	<i>Najwyższe wzniesienie powierzchni</i>
S_q	<i>Średnie kwadratowe odchylenie powierzchni</i>
S_{sk}	<i>Współczynnik asymetrii powierzchni</i>
S_v	<i>Najniższe wgłębienie powierzchni</i>
S_z	<i>Maksymalna wysokość powierzchni między S_p a S_v</i>
B_i	<i>Luz nawrotny</i>
P_i	<i>Zadana pozycja pomiarowa dla badania interferometrem laserowym</i>
R_i	<i>Estymator powtarzalności jednokierunkowego pozycjonowania</i>

1. Wprowadzenie

Połączenia gwintowe to najczęściej stosowane połączenia rozłączne w procesie montażu części mechanicznych i są powszechnie wykorzystywane w przemyśle wytwórczym w tym w branży lotniczej [1]. Te niezwykle ważne elementy konstrukcyjne stanowią około 50% wśród wszystkich rozłącznych połączeń mechanicznych [2]. Połączenie to opiera się na współpracy dwóch nagwintowanych komponentów i ich wzajemne działanie możliwe jest dzięki siłom tarcia występującym na granicy styku powierzchni gwintu zewnętrznego oraz gwintu wewnętrznego. Gwintem nazywamy nacięcie równomiernie obrócone wzdłuż linii śrubowej na powierzchni bocznej walca lub stożka obrotowego prostego [3]. Oprócz funkcji montażowej gwinty mogą także stanowić połączenia ruchome w celu transformacji ruchu obrotowego w ruch postępowy i odwrotnie lub przełożenie siłowe mające za zadanie wytworzyć multiplikację.

Pierwsze wzmianki dotyczące połączeń gwintowych wykonywanych ręcznie sięgają czasów Archimedesusa, kiedy to używano ich w prasach winniczych [4]. Wraz z rozwojem technologii zaczęto udoskonalać metody wytwórcze gwintów np. poprzez odlewanie z brązu lub miedzi, aż do przełomu XIX i XX wieku kiedy to skonstruowano pierwsze nowoczesne tokarki. Pojawienie się maszyn do obróbki mechanicznej metali spowodowało gwałtowny rozwój w tej dziedzinie dzięki możliwości wykonywania w szybki i powtarzalny sposób dokładnych gwintów o dowolnych zarysach. Obecnie oprócz obróbki skrawaniem, m.in.: poprzez toczenie, frezowanie, gwintowanie oraz szlifowanie jedną z najczęściej stosowanych technologii wytwórczych gwintów stanowi obróbka plastyczna, a dokładniej walcowanie.

Udoskonalenie procesów technologicznych wpłynęło na popularyzację połączeń gwintowych w budowie maszyn i urządzeń. Należy zauważyć, że mechanizmy te odgrywają niezwykle istotną rolę nie tylko w prostych aplikacjach, ale również znajdują szerokie zastosowanie w połączeniach krytycznych jakie niewątpliwie występują w przemyśle lotniczym np. w silnikach odrzutowych. Specyfika tych wyrobów wymusza zachowanie najwyższej jakości wszelkich elementów, gdyż odpowiadają one za poprawne działanie napędu statku powietrznego. Pozwala to na zachowanie sprawności i niezawodności silnika, a tym samym zapewnienie bezpieczeństwa pasażerów podczas całego lotu, kiedy części narażone są na ekstremalne zmiany warunków pracy, zawierające się niejednokrotnie w temperaturach przekraczających $+50^{\circ}\text{C}$ na lotnisku, aż po wartości poniżej -50°C podczas lotu na wysokości przelotowych przekraczających 10000 metrów. Nie należy zapominać o tym, że oprócz warunków zewnętrznych dochodzi tu także aspekt spalania paliwa wewnątrz komory silnika gdzie temperatura może sięgać niemalże 1600°C [5]. Z tego względu komponenty napędu często produkowane są z trudnoobrabialnych, wysokowytrzymałościowych stopów żaroodpornych np. stopy w osnowie niklu (Inconel 718), kobaltu czy molibdenu [6-9]. Materiał ten w połączeniu z wysokimi wymaganiami wymiarowo-kształtowymi sprawia, że wykonywanie gwintów spełniających normy bezpieczeństwa jest niewątpliwie trudnym zadaniem co wymusza na przemyśle lotniczym wprowadzanie i przestrzeganie niezwykle restrykcyjnych przepisów i norm jakościowych.

Z tych powodów firmy z branży lotniczej takie jak np. Pratt & Whitney stosują i nieustannie wdrażają nowoczesne i innowacyjne rozwiązania dotyczące zarówno obrabiarek,

narzędzi, jak i metod obróbczych. W ostatnich latach rosnącym problemem przemysłu wytwórczego jest brak wykwalifikowanej kadry pracowniczej, dlatego ciągle doskonalenie procesów, a tym samym automatyzacja stają się działaniami niezbędnymi i pozwalającymi na zachowanie konkurencyjności na światowym rynku [10]. W nowoczesnych zakładach produkcyjnych jednym z kluczowych celów w ostatnich latach jest wdrażanie koncepcji Przemysłu 4.0, w myśl której obróbka maszynowa wykonywana jest w technologii tzw. „closed door machining”, czyli bez ingerencji operatora w proces obróbczy [11, 12]. Działanie to pozwala na zwiększenie wydajności produkcyjnej, a także zapewnia większą powtarzalność, co w konsekwencji wpływa na jakość końcowych produktów. Jednym z takich produktów są elementy gwintowane. Jednak oprócz powszechnie znanych połączeń metrycznych i calowych w silnikach lotniczych stosuje się bardziej wyrafinowane symetryczne i niesymetryczne rozwiązania specjalne, np. gwinty trapezowe niesymetryczne (ang. buttress thread). Wymagania jakościowe i dokładnościowe dla tego typu wyrobów są zdecydowanie wyższe, niż w przypadku tradycyjnych gwintów stosowanych podczas łączenia części maszyn. Przykładowo tolerancja średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego o wymiarze około 110 mm znajdującego się na wale silnika wykonanego z materiału Inconel 718 wynosi $\pm 70 \mu\text{m}$. Wynika z tego konieczność precyzyjnej kontroli takich wyrobów, a podążając za filozofią „closed door technology” również proces kontrolny powinien odbywać się bez ingerencji operatora. Pozwoliłoby to na skrócenie czasu pomiaru, zwiększenie jego powtarzalności i wyeliminowanie zawodnego czynnika ludzkiego oraz rozbudowę kontroli czynnej. Ze względu na specyfikę wyrobów, zdjęcie ich z tokarki sterowanej numerycznie praktycznie wyklucza w warunkach produkcyjnych możliwość wprowadzenia ewentualnych korekt.

Z tego powodu coraz częściej integralną częścią procesu wytwórczego staje się proces pomiarowy. Jeśli możliwa jest jego realizacja bezpośrednio na obrabiarce, to uzyskuje się skrócenie czasu poprzez eliminację transportu na stanowisko pomiarowe, redukcję kosztów poprzez eliminację stanowisk pomiarowych oraz możliwość prowadzenia bezpośrednich korekcji wyrobu. Rozwiązania tego typu spotykane są w odniesieniu do prostych wymiarów geometrycznych (i to w zakresie znacznie mniejszym niż pomiary realizowane na współrzędnościowych maszynach pomiarowych w laboratoriach), jednak w przypadku wykonywania gwintów na tokarkach CNC pomiary tego typu nie są dotychczas realizowane. Żadna firma produkująca sprzęt pomiarowy nie ma rozwiązania dostosowanego do tych wymagań. Stąd, nawet w tak zaawansowanym technologicznie przedsiębiorstwach jak np. Pratt & Whitney, pomiary gwintów realizowane są pomiędzy poszczególnymi przejściami narzędzia na obrabiarce za pomocą tradycyjnych, manualnych metod m.in. metodą trójwałeczkową. Wydłuża to czas procesu produkcyjnego, a ze względu na trudnoskrawalny materiał konieczne są częste pomiary międzyoperacyjne. Zatem omawiany w tej pracy temat jest innowacyjnym podejściem do kontroli gwintów, a zaproponowane rozwiązanie pozwala na ich badanie za pomocą układu pomiarowego zlokalizowanego bezpośrednio w przestrzeni obróbczej. Należy jednak pamiętać, iż warunki środowiskowe panujące w przestrzeni obrabiarki znacznie odbiegają od tych panujących w izbach kontroli jakości.

W ramach niniejszego doktoratu wdrożeniowego opracowana została metoda pomiaru gwintu bezpośrednio na tokarce sterowanej numerycznie. Pozwala ona na zautomatyzowaną kontrolę tych specyficznych wyrobów i stanowi unikalne na skalę światową rozwiązanie.

2. Analiza stanu wiedzy

2.1 Podstawy teoretyczne i podział gwintów

Linie śrubową, czyli krzywą przestrzenną wzdłuż, której powstaje gwint można w prosty sposób opisać za pomocą szkicu (rys. 2.1). Powstaje ona poprzez synchronizację jednostajnego ruchu postępowego punktu M_1 wzdłuż tworzącej obracającego się ze stałą prędkością obrotową walca (gwint walcowy) lub stożka (gwint stożkowy). Odległość o jaką przemieści się punkt podczas pełnego obrotu walca od M_1 do M_2 definiujemy jako skok linii śrubowej P . Kąt ψ nazywamy kątem wzniosu linii śrubowej i możemy go obliczyć za pomocą wzoru (2.1):

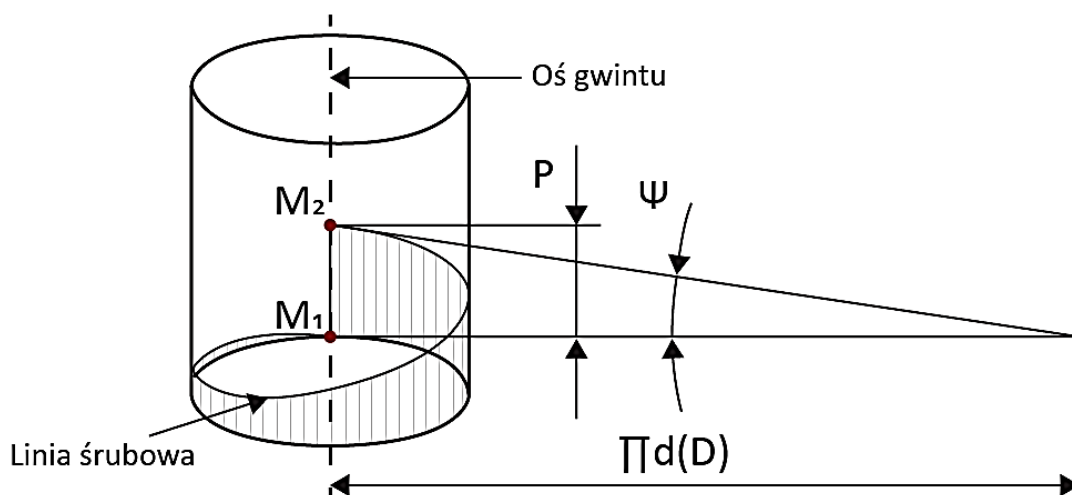
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{P}{\pi d} \quad (2.1)$$

gdzie:

ψ – kąt wzniosu linii śrubowej,

P – skok linii śrubowej,

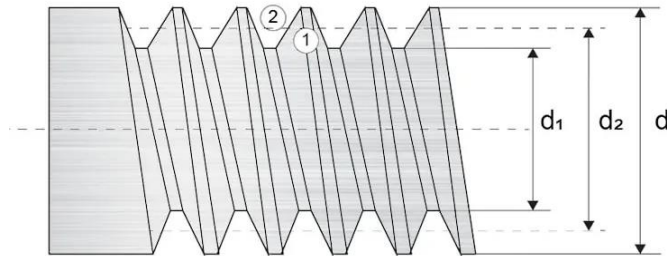
d (D) – średnica walca.



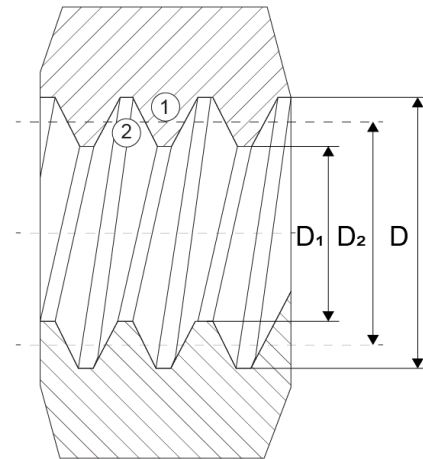
Rys. 2.1 Linia śrubowa gwintu walcowego [13].

Jeżeli zamiast punktu wzdłuż linii śrubowej zostanie obrócony określony kształt wyznaczy on w ten sposób powierzchnię gwintu. W zależności od kierunku obrotu walca gwint może być prawy lub lewy. Rozmieszczenie zarysu możliwe jest zarówno na powierzchni bocznej wewnętrznej jak i zewnętrznej walca, w związku z czym istnieje podział na gwinty zewnętrzne zwane także śrubami (rys. 2.2a) oraz gwinty wewnętrzne zwane nakrętkami (rys. 2.2b). Cechą charakterystyczną dla tych elementów konstrukcyjnych jest występ (1 – rys. 2.2) oraz wrób zwany bruzdą (2 – rys. 2.2). Miejsca te wzajemnie ze sobą współpracują tworząc połączenie gwintowe. Gdy zarys gwintu tworzy kilka linii śrubowych o cyklicznie zmiennym przebiegu wówczas gwint nazywamy wielokrotnym. Liczba cykli zmian zarysu nazywamy krotnością gwintu. Stosunek skoku gwintu do jego krotności nazywamy podziałką. Zwiększenie liczby zwojów pozwala na szybsze dokonanie połączenia i rozłączenia pary gwintowej, jednak także może ułatwić luzowanie [4].

a)



b)



Rys. 2.2 a) gwint walcowy zewnętrzny, b) gwint walcowy wewnętrzny [13].




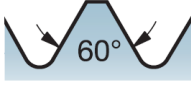
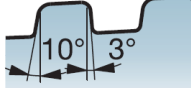

Średnica nominalna gwintu zewnętrznego d to średnica opisana na wierzchołkach występów, natomiast średnica d_1 wyznaczona jest poprzez dno wrębów i zwana jest średnicą wewnętrzną gwintu. Z kolei średnica podziałowa d_2 definiowana jest przy pomocy teoretycznej osi równoległej do osi walca. Dzieli ona występ i wręb tak, że szerokość tych elementów mierzona na wysokości średnicy podziałowej ma jednakową wartość równą połowie wartości skoku gwintu.

Zasadniczo zarys gwintu może mieć dowolny kształt jednak ze względów praktycznych oraz konieczności zapewniania bezproblemowej montowalności połączenia gwintowego już w 1841 roku Joseph Whirtworth dokonał pierwszej normalizacji systemu wymiarów gwintów, obejmującego średnice, podziałki i zarys gwintu o kącie 55° [14]. W 1906 roku Wiliam Taylor w celu zapewnienia zamienności elementów gwintowych opatentował pierwszy system sprawdzianów do gwintów [15]. W zależności od systemu miar rozróżniamy obecnie gwinty metryczne oraz calowe. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO - International Organization for Standardization) oraz Niemiecki Instytut Normalizacyjny (DIN - Deutsches Institut für Normung) określiły w normach wymiary nominalne gwintów metrycznych. Gwinty calowe z kolei zostały zdefiniowane przez amerykańską organizację ANSI (American National Standards Institute). W normach tych opisane zostały szeregi gwintów zwykłych, w których do określonej średnicy znamionowej przypisana została odpowiednia podziałka. Gwinty o podziałce większej od podziałki przyporządkowanej dla gwintu zwykłego nazywamy grubozwojnymi, mniejszej natomiast drobnozwojnymi. Warto zauważyć, iż w wyniku opracowania Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (układ SI) podjęto decyzję o ustanowieniu jako podstawowego systemu metrycznego. W związku z tym, w amerykańskiej normie ANSI B1.1 zawarto zunifikowane gwinty UN (ang. Unified National) będące calowymi odpowiednikami europejskich gwintów metrycznych o kącie zarysu 60° .

Gwinty wytwarza się różnymi technikami w zależności od ilości oraz przeznaczenia i rozmiarów. Z punktu widzenia zastosowania wyróżniamy gwinty ogólnego przeznaczenia, które najczęściej są wykonywane narzynkami, gwintownikami, poprzez toczenie lub walcowanie oraz gwinty dokładne, które są szlifowane i znajdują zastosowanie między innymi

jako wzorce. Gwinty w zależności od przeznaczenia oprócz kryteriów tolerancji wykonania dzielimy także ze względu na kształt zarysu. W tabeli 2.1 przedstawiono podział zarysów ze względu na przeznaczenie. Najbardziej rozpowszechnione są gwinty o kącie zarysu 60° zwane trójkątnymi. Są to najczęściej spotykane gwinty w urządzeniach ogólnego użytku. Gwinty rurowe lub też okrągłe używane są w połączeniach często rozłączanych, jak również w połączeniach narażonych na duże zanieczyszczenia oraz korozję (przemysł spożywczy, naftowy, armatura przeciwpożarowa i hydrauliczna). Cechują się one dużą szczelnością połączenia. Gwinty trapezowe niesymetryczne odznaczają się dużą wytrzymałością w warunkach obciążeń zmiennych, gdzie przenoszone są obciążenia w jednym kierunku. Powierzchnią nośną jest wówczas powierzchnia o mniejszym kącie boku np. 3° . Stosuje się je często w przemyśle lotniczym, a także naftowym i gazowym. Gwinty trapezowe symetryczne stosuje się w mechanizmach przenoszących duże obciążenia w dwóch kierunkach. Ze względu na dużą powierzchnię styku oraz sztywną konstrukcję znajdują one zastosowanie w połączeniach ruchomych.

Tab. 2.1 Podział typów gwintów ze względu na zastosowanie [16].

Zastosowanie	Kształt zarysu gwintu	Rodzaj (typ) gwintu
Połączenia Do użytku ogólnego		Metryczne ISO, amerykańskie UN
Gwinty rurowe		Whitworth, British Standard (BSPT), American National, gwinty rurowe, NPT, NPTF
Przemysł spożywczy i przeciwpożarowy		Okrągły DIN 405
Przemysł lotniczy		MJ, UNJ
Przemysł naftowy i gazowy		API okrągły, API Buttress, VAM
Elementy ruchome Do użytku ogólnego		Trapezowy/ DIN 103, ACME, Stub ACME

Podział gwintów jest bardzo złożony i można wyróżnić szereg kryteriów.

Podsumowując gwinty dzielimy głównie ze względu na:

- powierzchnię tworzącą:
 - walcowe,
 - stożkowe,
- kierunek obrotu:
 - prawe,
 - lewe,
- położenie:
 - wewnątrz,

- zewnętrzne,
- kształt:
 - trójkątne,
 - okrągłe,
 - trapezowe symetryczne,
 - trapezowe niesymetryczne,
 - prostokątne,
- jednostkę miary:
 - metryczne,
 - calowe,
- krotność:
 - jednokrotne,
 - wielokrotne,
- podziałkę:
 - zwykłe,
 - drobnozwojne,
 - grubozwojne.

2.2 Analiza metod wytwarzania gwintów różnego typu

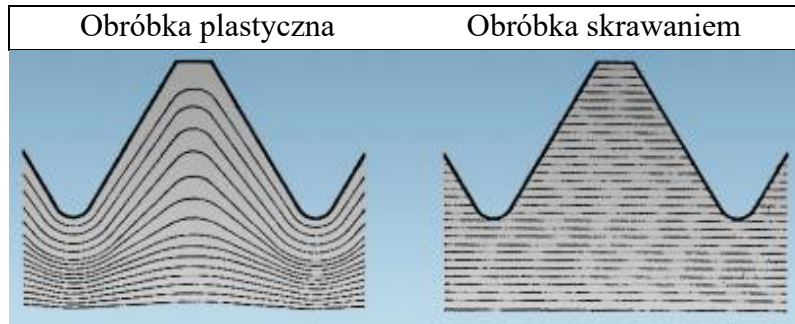
2.2.1 Obróbka plastyczna - walcowanie gwintów

Gwinty wytwarza się w różny sposób w zależności od przeznaczenia, dokładności czy wielkości produkcyjnej. Najprostsze i najmniej wymagające rozwiązania jakie spotykamy na co dzień wykonywane są z tworzyw sztucznych i w dużym stopniu dotyczą przemysłu spożywczego np. nakrętka współpracująca z butelką. Są one formowane w trakcie kształtowania całego produktu. Metoda ta jednak nie wymaga dodatkowych zabiegów więc trudno tu mówić o wytwarzaniu gwintu gdyż jest on integralną częścią i odzwierciedleniem formy będącej częścią kształtu danego produktu.

Analizując sposoby stosowane do produkcji samych gwintów spotykamy przede wszystkim podział na obróbkę plastyczną, a także mechaniczną, czyli skrawanie, gdzie znajdziemy takie procesy jak toczenie, frezowanie, gwintowanie oraz szlifowanie. Biorąc pod uwagę fakt, że komponenty w produkcji lotniczej wymagają wysokiej precyzji oraz są w dużym stopniu obrabiane mechanicznie to właśnie ta metoda wytwórcza jest tutaj dominująca. Wykonywanie gwintów w jednej operacji z obróbką reszty części produkcyjnej pozwala na spełnienie wysokich wymagań wymiarowo-kształtowych.

Wytwarzanie bezwiórowe jest jedną z najczęściej stosowanych metod w zakresie produkcji gwintów ogólnego przeznaczenia. Kształtowanie zarysu wrębu i występu odbywa się tu poprzez walcowanie lub wygniatanie. W porównaniu do obróbki skrawaniem technikę tą cechuje szereg zalet. Wytwarzanie gwintów poprzez obróbkę plastyczną na zimno odbywa się w szybki i ekonomiczny sposób [17]. Nie ma tutaj ubytku materiału, a więc materiał zostaje poddany deformacji w skutek czego następuje wydłużenie się ziaren sieci krystalicznej wzdłuż powierzchni bocznej gwintu (rys. 2.3). Dzięki zniekształceniu struktury warstwa wierzchnia ma podwyższoną twardość i występują w niej szczytkowe naprężenia ściskające [18]. Mamy tu do czynienia z samoistnym umocnieniem się materiału w związku z czym otrzymany gwint charakteryzuje się dużą wytrzymałością [19]. Jakość uzyskanej w ten sposób powierzchni jest

znacznie lepsza od tej którą uzyskujemy za pomocą skrawania i może sięgać nawet $Ra=0,07 \mu\text{m}$ [20].



Rys. 2.3 Schematyczne różnice kształtu ziaren w gwintach wytwarzanych plastycznie i poprzez skrawanie [21].

Mimo iż chropowość gwintu wykonanego metodą walcowania jest bardzo wysoka to jednak obróbka skrawaniem pozwala wytworzyć gwinty w węższym zakresie tolerancji wymiarowej [22]. Należy zauważyć, że podczas walcowania może tworzyć się trudna do usunięcia wypływka materiału, która jest nieakceptowalna w zastosowaniach lotniczych.

2.2.2 Toczenie gwintów

Toczenie gwintów to wydajna i powszechna metoda m. in. wykonywania tego rodzaju elementów w przedmiotach obrotowych o czym świadczy dostępność gotowych cykli obróbczych na obrabiarki sterowane numerycznie [23]. Pewnym ograniczeniem w zastosowaniu tej metody może być średnica otworu w przypadku gwintu wewnętrznego, ze względu na rozmiar noża tokarskiego. Proces ten zapewnia małą chropowość powierzchni i dobrą jakość gwintu. Spełnienie wymagań wymiarowo-kształtowych gwintu uwarunkowane jest jednak w sporym stopniu od doboru właściwego narzędzia, strategii obróbczej, a także parametrów, gdyż istnieje tutaj duża dowolność. Jeżeli chodzi o płytki skrawające w zasadzie występują trzy podstawowe rodzaje przedstawione w tabeli 2.2.

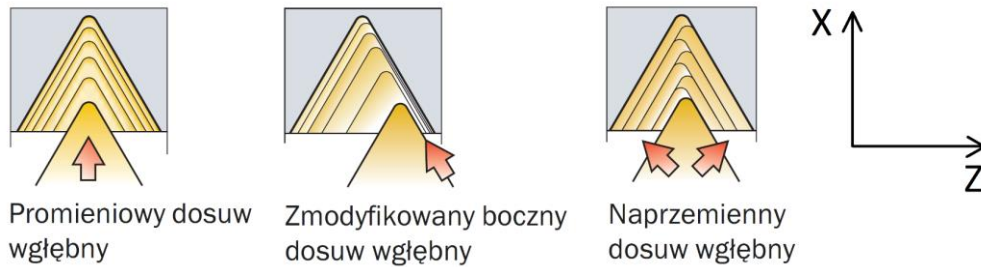
Tab. 2.2 Podstawowe rodzaje płytek do toczenia gwintów [16].

Płytko o pełnym zarysie	Płytko o zarysie „V”	Płytko wielopunktowe

Pierwszym wyborem wg firmy Sandvik [24] powinna być płytka o pełnym zarysie, gdzie cały kształt wrębu oraz wierzchołka powstaje z odwzorowania geometrii jednego narzędzia. Zaleca się pozostawienie około 0,05-0,07 mm nadkładu na średnicy wierzchołkowej po obróbce zgrubnej celem jej wykończenia płytką do gwintu o pełnym zarysie. Ważną zaletą stosowania tego rodzaju płytki jest brak zadziorów co ułatwia pomiar z użyciem sprawdzianu oraz eliminuje konieczność przeprowadzenia operacji ślusarskiej. Wadą stosowania tego typu

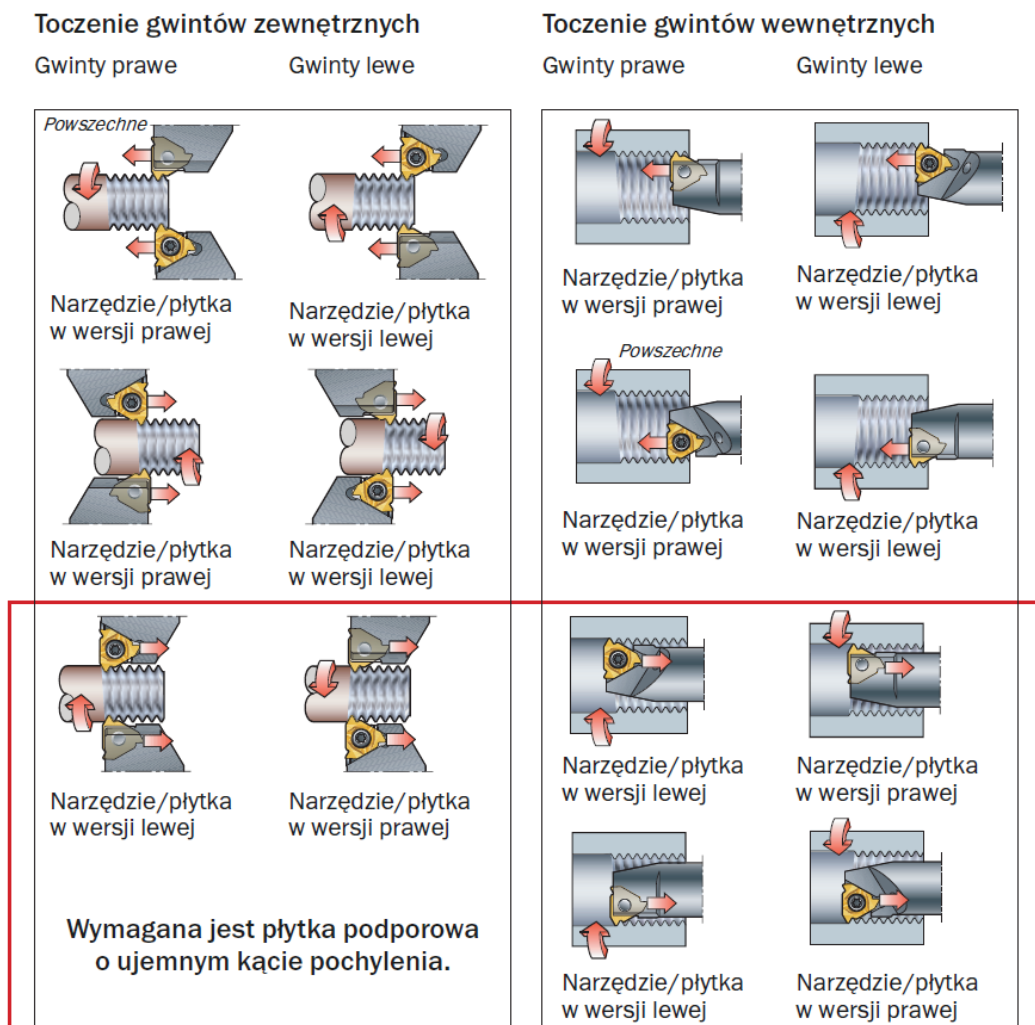
ostrza jest mała uniwersalność, gdyż do każdego skoku oraz zarysu wymagana jest inna płytka. Większą elastyczność uzyskujemy korzystając z płytki typu „V”. Ta sama płytka umożliwia wykonanie gwintów o różnej podziałce (z określonego zakresu wielkości) przy zachowaniu kątów zarysu. W tym przypadku toczonej jest wręb gwintu wraz z powierzchniami bocznymi, a średnica wierzchołkowa zostaje wykonana przy pomocy innego narzędzia. Z tego względu występują tu niższe opory toczenia. Mniejszy kontakt z materiałem to też niższa skłonność do wystąpienia drgań, co jest szczególnie istotne przy obróbce wyrobów cienkościennych. Wadą tego rozwiązania jest powstawanie zadziorów oraz mniejsza precyzja w uzyskaniu wymiaru stanowiącego głębokość od dna wrębu od wierzchołka [25]. Trzecią alternatywę stanowią płytki wielopunktowe, które pracują podobnie jak płytki o pełnym zarysie, z tym, że zwiększenie liczby ostrzy umożliwia zwielokrotnienie posuwu (np. płytka dwuostrzowa to dwa razy większy posuw) oraz zmniejszenie liczby przejść co w konsekwencji prowadzi do wzrostu produktywności. Stosowanie tego typu ostrza wymaga dużej sztywności narzędzia oraz przedmiotu obrabianego, a także obrabiarek o dużej mocy. W literaturze spotkać można próby modyfikacji standardowych płytek w celu poprawy wydajności toczenia. Przykładem może być praca [26], gdzie zaobserwowano pozytywny wpływ mikrotekstury na powierzchni natarcia płytki węglkowej na obniżenie sił skrawania podczas toczenia gwintów w stopie lotniczym na bazie aluminium 7075.

W przypadku toczenia gwintów mamy do wyboru trzy rodzaje dosuwu wglębnego widoczne na rysunku rys. 2.4, które mają wpływ na kontrolę wiórów, trwałość narzędzia czy też jakość uzyskanej powierzchni. Zostały one opisane w pracach [24, 27, 28]. Najprostsza, a zarazem najpopularniejsza metoda to promieniowy dosuw wglębny, gdzie ostrze pozycjonuje się w jednej osi - X przy kolejnych przejściach. Zaletą tego rozwiązania jest łatwość programowania oraz równomierne zużywanie ostrza po obu stronach. Niestety, strategia ta powoduje powstawanie trudnego do złamania wióra w kształcie litery V oraz zwiększa skłonność do występowania drgań. Udoskonaleniem tej metody jest zmienna, malejąca głębokość skrawania przy kolejnych przejściach stosowana w celu zachowania stałego przekroju warstwy skrawanej. Lepsze rozwiązanie stanowi zmodyfikowany boczny dosuw wglębny, który cechuje wiele zalet w porównaniu z dosuwem promieniowym, a większość obrabiarek CNC jest wyposażonych w program przeznaczony do stosowania tej metody. W tym przypadku płytka, przy kolejnych przejściach przesuwana jest nie tylko w osi X, ale także w osi Z. Dużą przewagę sprawia tutaj lepsza kontrola spływu wiórów, który mimo iż jest on grubszy, ale powstaje tylko po jednej stronie płytki, co powoduje, że łatwiej go odciąć. Strategia ta charakteryzuje się większą wydajnością, ponieważ do płytki przenoszona jest mniejsza ilość ciepła, dzięki czemu możliwe jest zastosowanie większej głębokości skrawania, a tym samym zmniejszenie liczby przejść. Kolejne rozwiązanie stanowi naprzemienny dosuw wglębny, mimo iż poprawia znacząco trwałość ostrza to wymaga specjalnego cyklu oprogramowania obrabiarki oraz może prowadzić do kłębienia się wiórów formowanych w różnych kierunkach [22, 27]. Strategia ta jest zalecana dla skoków większych niż 5 mm.



Rys. 2.4 Rodzaje dosuwów wglębnych promieniowych podczas toczenia gwintów [16].

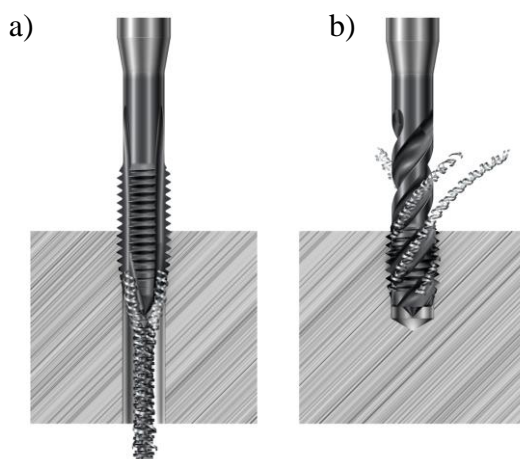
Istnieje kilka metod toczenia gwintów mając na uwadze konfigurację narzędzia oraz kierunek obróbki (rys. 2.5). Wrzeciono obrabiarki może obracać się zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub odwrotnie do niego, a posuw narzędzia może być skierowany do uchwytu lub przeciwnie. Narzędzie można ustawić w podstawowej pozycji lub odwrócić (w celu sprawniejszego odprowadzania wiórów). Stosowanie narzędzi prawych do gwintów lewych (i odwrotnie) sprzyja oszczędnościom poprzez zmniejszenie zapasów magazynowych narzędzi. Daje to dużą elastyczność oraz możliwość wyboru najkorzystniejszego z punktu widzenia danej aplikacji rozwiązania, jednak wymaga także wielkiej uwagi oraz w pewnym stopniu pokazuje jak skomplikowany jest proces toczenia gwintów.



Rys. 2.5 Rodzaje strategii skrawania podczas toczenia gwintów [16].

2.2.3 Gwintowanie

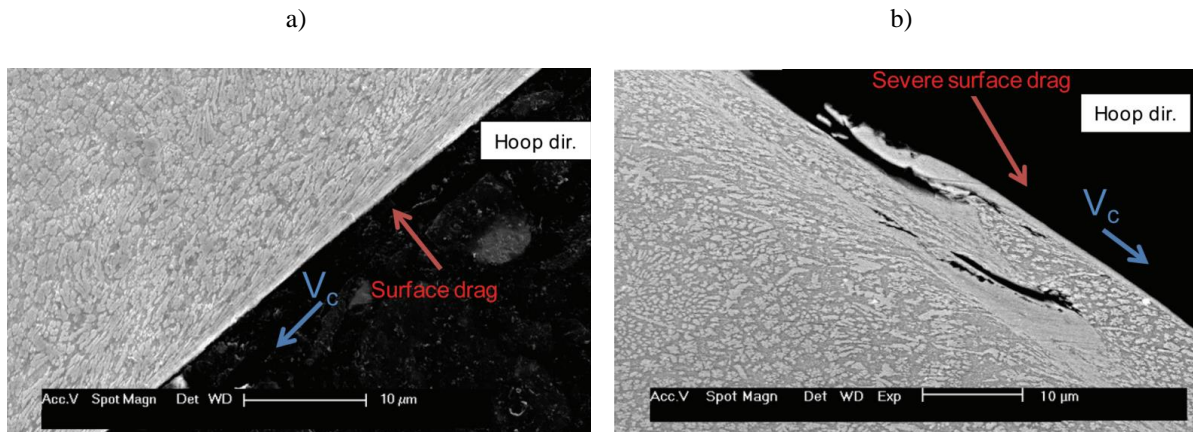
Gwintowanie jest jedną z prostszych metod ograniczoną jedynie do wytwarzania gwintów wewnętrznych. W tym procesie wykorzystywane są narzędzia zwane gwintownikami, które są dobierane indywidualnie w zależności od rodzaju gwintu, a także rodzaju otworu czy też materiału obrabianego. Gwintowanie może odbywać się ręcznie lub maszynowo, dlatego technologię tą stosuje się nie tylko w celach przemysłowych, ale także warsztatowo. W przypadku rozwiązań domowych używa się zazwyczaj kompletu gwintowników pozwalającego na wykonanie gwintu w kilku przejściach. Gwintowniki maszynowe dedykowane są do określonych rozwiązań i różnią się nie tylko geometrią ostrza, ale także rowków wiórowych oraz powierzchni prowadzącej. Na rysunku 2.6a przedstawiono przypadek zastosowania narzędzia do otworów przelotowych, gdzie ma ono proste rowki wiórowe, a geometria części prowadzącej pozwala na formowanie się wiórów przed gwintownikiem. Proces ten jest znacznie bardziej wymagający w przypadku gwintowania otworu nieprzelotowego. W tym przypadku ewakuacja wiórów jest utrudniona i konieczne jest skierowanie ich za narzędzie, w kierunku uchwytu. W tym celu stosowane są rowki wiórowe o kształcie śrubowym (rys. 2.6b).



Rys. 2.6 Nacinanie gwintu gwintownikiem a) otwór przelotowy, b) otwór nieprzelotowy [29].

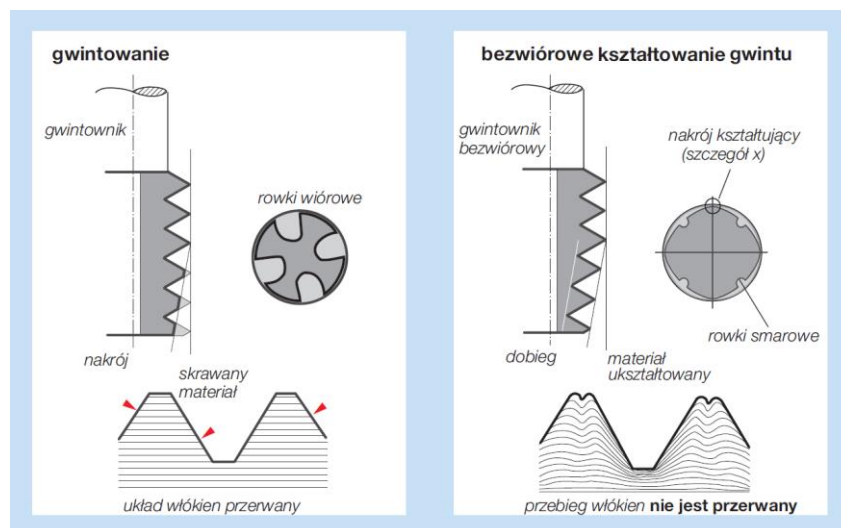
Proces gwintowania ze względu na występowanie dużych oporów skrawania jest dość wymagający, szczególnie w przypadku materiałów trudnoobrabialnych. Gwintowanie stosowanych w przemyśle lotniczym stopów niklu powoduje szybkie zużywanie się narzędzia skrawającego [30]. Wiąże się to z ryzykiem pęknięcia gwintownika, a tym samym zniszczenia otworu. W celu zapewnienia jak najbardziej stabilnego procesu niezwykle istotne jest stosowanie gwintowników dedykowanych do danego typu materiałów, z odpowiednio ukształtowanymi rowkami wiórowymi oraz częścią prowadzącą. Szczególną uwagę należy zwrócić na długość nakroju, czyli liczbę zwojów o niepełnej średnicy znajdujących się w części wierzchołkowej narzędzia. Dłuższy nakrój ma za zadanie redukcję obciążenie krawędzi skrawających co przekłada się między innymi na uzyskiwaną jakość powierzchni (rys. 2.7). Potwierdzili to m. in. Marinescu i inni podczas badania procesu gwintowania stopu lotniczego na bazie niklu [31]. Ważnym aspektem, na który należy zwrócić uwagę jest także dobór odpowiedniej średnicy wiertła w celu przygotowania naddatków we wstępnym otworze. W procesie gwintowania kluczową rolę zapewnia ciecz chłodząco smarująca, która ułatwia

ewakuację wiórów oraz zwiększa trwałość narzędzia, a tym samym poprawia jakość gwintu. Żywotność gwintownika może zostać także zwiększona poprzez regenerowanie ostrzy oraz nakładanie powłok [32]. Warto zauważyć, iż gwintownik może być zamocowany w oprawce sztywnej lub kompensacyjnej, która chroni go przed nagłym wzrostem sił spowodowanych różnicami w skoku gwintownika i posuwem maszyny. Oprawka sztywna zapewnia wykonanie gwintu o lepszej precyzji geometrycznej jednak istnieje większe ryzyko gwałtownego pęknięcia narzędzia na skutek przeciążenia.



Rys. 2.7 Struktura powierzchni stopu lotniczego po gwintowaniu gwintownikiem a) z długim nakrojem, b) z krótkim nakrojem [31].

Specyficznym rozwiązaniem gwintowników są gwintowygniataki, pozwalające na obróbkę bezwiórową [24]. Stosowane są one głównie do miękkich stali, czy też aluminium. Podczas pracy narzędzia materiał nie jest skrawany, a odkształcany plastycznie. Dzięki temu układ włókien w materiale nie jest przerwany, następuje umocnienie w wyniku odkształceń plastycznych, a otrzymana powierzchnia ma większą wytrzymałość niż podczas standardowego gwintowania (rys. 2.8).

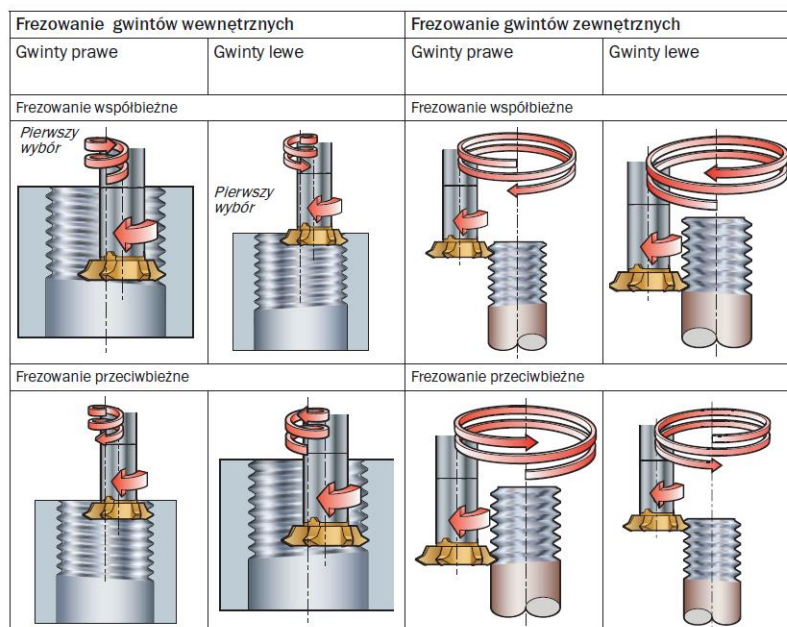


Rys. 2.8 Porównanie gwintowania z gwintowygnianiem [33].

2.2.4 Frezowanie gwintów

Frezowanie gwintów to technologia stosowana dla produkcji zarówno gwintów zewnętrznych jak i wewnętrznych. Nie jest ona tak popularna jak walcowanie, toczenie czy też gwintowanie, ale z pewnością ma szereg zalet, które sprawią, iż metoda ta zyskuje coraz większe znaczenie zwłaszcza w przypadku obróbki materiałach trudnoskrawalnych oraz dla gwintów o dużych średnicach [34]. Aby wykonać taki gwint, niezbędne jest zastosowanie obrabiarki posiadającej możliwość zaprogramowania ruchu narzędzia w trzech osiach. Frez musi bowiem poruszać się jednocześnie po okręgu i wykonywać ruch postępowy. W wyniku złożenia tych dwóch ruchów, torem obrazującym przemieszczanie się narzędzia jest linia śrubowa. Frezowanie gwintu najczęściej stosowane jest w elementach niesymetrycznych lub nieobrotowych, gdzie występuje brak możliwości toczenia. Występują tutaj mniejsze siły skrawania, co stanowi przewagę podczas obróbki podzespołów na długich wysięgach oraz o cienkich ściankach, a także zwiększa szansę na wykonanie gwintów o dużej średnicy na obrabiarkach o niskiej mocy. Frezowanie jest także zalecane w przypadku kosztownych przedmiotów, ponieważ frezy gwintujące w przypadku złamania dużo łatwiej usunąć z otworu, a niżeli gwintowniki. Problemem może być frezowanie gwintów trapezowych co udowodnił Shchurov i inni [35].

W porównaniu do gwintowania, frezowanie pozwala na zmniejszenie kosztów narzędziowych z tego względu, iż jednym ostrzem możemy wykonać zarówno gwint prawy jak i lewy, oraz gwinty o różnych średnicach. Ważne jest tutaj zastosowanie odpowiedniej strategii polegającej na synchronizacji kierunku ruchów obrotowego oraz postępowego narzędzia (rys. 2.9). Zaleca się frezowanie współbieżne z łagodnym wejściem narzędzia w materiał oraz wykonanie gwintu w kilku przejściach.



Rys. 2.9 Strategie obróbki podczas frezowania gwintów [16].

Kolejną korzyścią frezowania jest możliwość wykonania gwintu blisko dna otworu nieprzelotowego, w przeciwieństwie to gwintowników, gdzie zalecane są duże nakroje w części wierzchołkowej. Należy także zauważyć, iż ze względu na przerywany charakter obróbki w procesie tym nie tworzą się długie wióry, a mniejsza średnica narzędzia w stosunku do

otworu pozwala na lepszą ich ewakuację, a także łatwiejsze podawanie chłodziwa. Z tego względu jakość powierzchni gwintu po frezowaniu jest wyższa niż po gwintowaniu, co potwierdzono badaniami porównawczymi podczas obróbki stopu lotniczego [31].

Jedną z wad frezowania gwintów jest mała sztywność i odginanie się narzędzia. Z tego względu konieczne jest „dogrywanie” średnicy gwintu na obrabiarce. Gwintowanie zapewnia uzyskanie wymiarów, które są odwzorowaniem ostrza gwintownika, natomiast frezowanie często wymaga interwencji operatora i wstępny pomiar uzyskanego otworu, a następnie skorygowanie narzędzia. Możliwość korekcy średnicy frezowanego gwintu jest z jednej strony zaletą, z drugiej natomiast stanowi dużą przeszkodę w automatyzacji tego procesu.

2.2.5 Szlifowanie gwintów

Gwinty można kształtować również w procesie szlifowania [36]. Szlifowanie gwintów jest procesem czasochłonnym i kosztownym wymagającym precyzyjnych maszyn – szlifierek oraz wysoko wykwalifikowanej obsługi [37]. Z tego względu stosowane jest tylko wtedy, gdy występuje taka konieczność np. ze względu na specyficzny kształt, rodzaj materiału lub wysokie wymagania wymiarowo-kształtowe. Obróbka ta pozwala na wykonanie najdokładniejszych gwintów i jest stosowana w produkcji wzorców i sprawdzianów. Najczęściej szlifowanie wykonuje się w celach wykończeniowych, a obróbka wstępna realizowana jest w innym procesie np. toczenia. Szlifowanie całego gwintu w pełnym materiale stosowane jest głównie w przypadku bardzo małych średnic lub materiału o dużej twardości, gdzie inne metody zawodzą [38].

2.2.6 Nacinanie gwintu narzynką

Nacinanie gwintu narzynką to najprostszy sposób, spotykany głównie w domowych warsztatach. Dzięki tej metodzie możemy wykonywać jedynie gwinty zewnętrzne. Jest to bardzo prosta, manualna metoda, w której gwint kształtowany jest przy pomocy odpowiedniego narzędzia zwanego narzynką (rys. 2.10). Narzędziem takim można naciąć tylko jeden, wybrany rodzaj gwintu. Jak łatwo się domyślić, wytwarzane w ten sposób gwinty nie cechują się dobrymi parametrami wymiarowymi i jakościowymi powierzchni jednak narzędzie to z pewnością pozwala na wykonywanie w szybki i tani sposób pojedynczych gwintów, które często są wystarczające w zastosowaniach codziennego użytku.



Rys. 2.10 Nacinanie gwintu narzynką [39].

2.2.7 Problemy wytwórcze występujące w procesie toczenia gwintów w przemyśle lotniczym

Firma Pratt & Whitney będąca częścią międzynarodowej korporacji Raytheon Technologies z główną siedzibą w Stanach Zjednoczonych jest jednym z trzech wiodących na świecie producentów silników lotniczych. Zakład w Kaliszu zajmuje się produkcją wybranych komponentów, a główny nacisk skupiony jest na obróbce skrawaniem. W związku z omawianym tematem, należy podkreślić, iż wytwarzane elementy często w swojej konstrukcji zawierają gwinty, które zaprojektowane są według norm amerykańskich. W zasadzie dominują tu trzy podstawowe rodzaje zarysów gwintowych: UNJ - Unified Inch [40], ACME [41] oraz BUTTRESS [42]. Pierwszy z nich to zunifikowany, całowy odpowiednik gwintu metrycznego o zarysie trójkątnym 60° , drugi to gwint o zarysie trapezowym symetrycznym, trzeci natomiast trapezowym niesymetrycznym. Gwinty wytwarzane są w procesach toczenia, gwintowania oraz frezowania.

W związku z realizowaną wdrożeniową rozprawą doktorską, w niniejszym podrozdziale omówione zostaną najważniejsze problemy wytwórcze spotykane podczas toczenia gwintów typu BUTTRESS. Gwint ten cechuje niesymetryczny profil z półkątami zarysu 45° i 7° oraz 30° i 3° . Specyficzna konstrukcja zapewnia możliwość przenoszenia dużych obciążeń osiowych skierowanych w kierunku powierzchni nośnej, którą jest bok o mniejszym kącie. Gwinty tego typu wytwarzane są na wałach o długości $L \approx 1200$ mm i średnicy zewnętrznej $\varnothing \approx 110$ mm oraz średnicy wewnętrznej $\varnothing \approx 100$ mm. Są to elementy cienkościenne, gdzie wymiar od dna wrębu gwintu zewnętrznego do średnicy wewnętrznej wału wynosi około 3-4 mm. Z powodów bezpieczeństwa, tolerancje wykonania tego typu elementów są często zawężane w stosunku do normy ANSI B1.9 i np. dla średnicy podziałowej gwintu jest ona równa $\pm 0,07$ mm, a dla promienia dna wrębu $\pm 0,026$ mm. Biorąc pod uwagę zastosowanie omawianych wałów są to tzw. części krytyczne dla działania silnika lotniczego, czyli ich awaria może prowadzić do unieruchomienia napędu, a tym samym wpływać bezpośrednio na bezpieczeństwo pasażerów statków powietrznych. Wymagania jakościowe dla tego typu części wymuszają stosowanie procedury zatwierdzenia procesu wytwórczego. Niedopuszczalne jest zatem dokonywanie wszelkich zmian dotyczących parametrów, czy też narzędzi skrawających. Zatwierdzeniu podlega nawet przestawienie maszyny na hali produkcyjnej. Istnieje możliwość optymalizacji, czy też usprawnień procesu wytwórczego jednak każdorazowo działanie to związane jest z kosztownym, niszczącym badaniem metalograficznym pozwalającym na zbadanie stanu warstwy wierzchniej materiału.

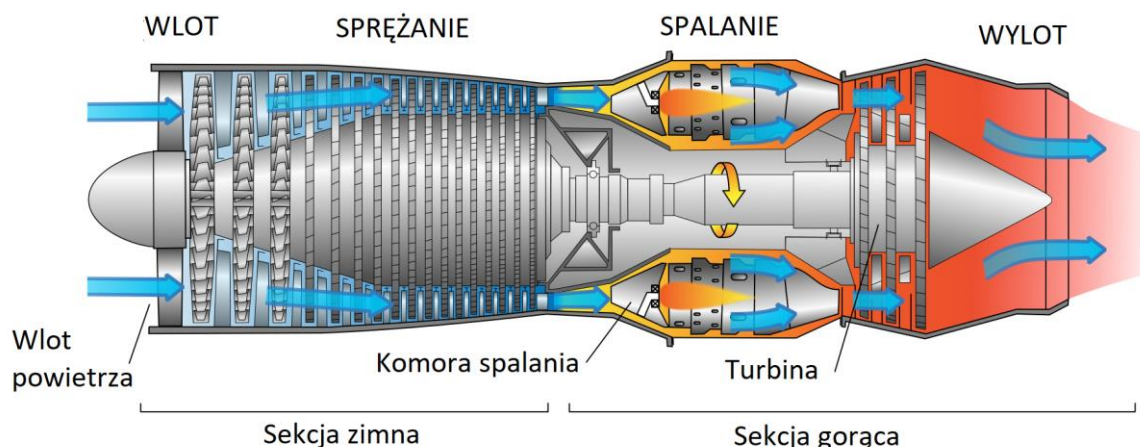
Światowy przemysł lotniczy nieustannie rozwija materiały, z których produkowane są poszczególne komponenty. Niezależnie od zastosowania dąży się do zwiększania wytrzymałości materiałów oraz zmniejszania ich masy. Dodatkowo biorąc pod uwagę wymagające, zmienne warunki zewnętrzne ale także i warunki pracy samych komponentów np. wysoka temperatura oraz ciśnienie panujące wewnątrz silnika, idealne zastosowanie znajdują wyselekcjonowane stopy stali, aluminium [43], a także przede wszystkim tzw. superstopy zwane też nadstopami [10, 44]. Jest to grupa materiałów na bazie niklu, kobaltu, molibdenu cechująca się dużą żaroodpornością [9, 45], spośród której wyróżniamy stop Inconel 718 będący materiałem, z którego wykonywane są wały zawierające omawiane gwinty typu BUTTRESS. Materiał ten utwardzany wydzieleniowo zbudowany jest na osnowie niklu (tab. 2.3) i charakteryzuje się dużą wytrzymałością [46] oraz odpornością na pełzanie w wysokich temperaturach, nawet do 650°C , podczas gdy jego temperatura topnienia

sięga 1300°C. Inconel cechuje antykorozyjność oraz trudnoobrabialność. Wskaźnik obrabialności materiału MR (ang. machinability rating) dla omawianego stopu niklu wynosi 14%.

Tab. 2.3 Przybliżony skład stopu Inconel 718 [47].

Ni	Cr	Fe	Mo
52,5 %	19 %	17 %	3,5 %

Niestety ze względu na wysoką cenę materiał ten jest stosowany jedynie tam, gdzie wymagają tego warunki np. w gorącej sekcji silnika lotniczego (rys. 2.11) [45, 48]. Wyjątkowość tego superstopu powoduje, że mimo iż coraz częściej jest on obiektem badań, jego obróbka nadal dostarcza wielu problemów. Szczególnym przypadkiem są gwinty wykonane w tego rodzaju materiale, których toczenie jest jednym z trudniejszych procesów obróbki skrawaniem. Niemniej jednak badacze poszukują rozwiązań mających na celu poprawę wytwarzania gwintów w superstopach. Przykładem są He i inni, którzy wykazali pozytywny wpływ obróbki wspomagananej drganiami ultradźwiękowymi na uzyskiwaną morfologię powierzchni gwintów toczonego w Inconelu 718 [45, 49]. Udowodnili także nieliniowy wpływ prędkości skrawania na jakość powierzchni gwintu.



Rys. 2.11 Schematyczny przekrój silnika odrzutowego [50].

Narzędzie skrawające podczas toczenia tego nadstopu szybko się zużywa, głównie z powodu wysokiej temperatury, jaką pochłania płytka, czego przyczyną jest żaroodporność [51]. Struktura Inconelu zawiera wtrącenia tlenków tytanu i niobu, które mają ogromny wpływ na zwiększoną ścieralność ostrza skrawającego [52]. Powoduje to zmianę geometrii płytki, a tym samym trudności w uzyskaniu wymiarów o wąskich tolerancjach jakie są wymagane w przemyśle lotniczym. Należy zatem unikać nadmiernego zużycia ostrza, w związku z tym konieczne jest stosowanie niższych prędkości skrawania, a obecność cieczy chłodząco smarującej jest niezwykle istotna w porównaniu do obróbki konwencjonalnych stopów.

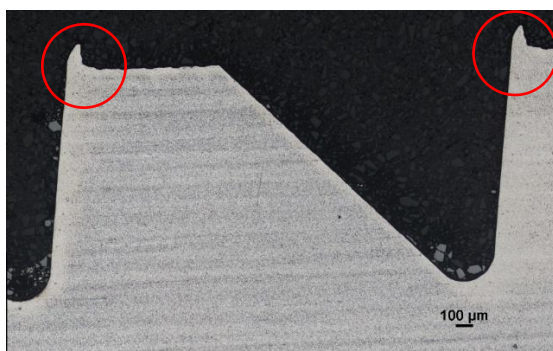
Z tych powodów uzyskanie gładkiej, pozbawionej defektów powierzchni jest dość trudnym zadaniem podczas obróbki Inconelu 718. Szczególną ostrożność należy zachować przy toczeniu elementów cienkościennych, które mają tendencję do odkształceń i drgań [10].

Mając na uwadze fakt, iż wymagania dotyczące chropowatości powierzchni nośnej gwintu typu BUTTRESS w omawianym przypadku wynoszą $Ra=0,8 \mu\text{m}$, zachowanie sztywności układu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie) oraz zastosowanie odpowiednich parametrów skrawania jest kluczowe. Należy zaznaczyć, że prędkość oraz głębokość skrawania mają tutaj główne znaczenie, ponieważ wartość posuwu przy toczeniu gwintu jest stała i określona przez jego skok. W przypadku gwintów trapezowych niesymetrycznych zalecany jest kierunek obróbki w stronę boku o mniejszym kącie. Przy dużych kątach gwintu tj. 45° , występują duże składowe siły w kierunku promieniowym, co może skutkować zwiększoną skłonnością do drgań, zwłaszcza w elementach o małej sztywności. Z drugiej strony przy małym półkącie zarysu wynoszącym 7° zostaje niewiele naddatku do obróbki wykańczającej, a co za tym idzie występuje tendencja płytki do ślizgania się po materiale bez odpowiedniego skrawania, dlatego należy dobrać odpowiednio głębokość skrawania przy kolejnych przejściach. Ślizganie się ostrza po powierzchni Inconelu 718 powoduje jego utwardzenie. Zapewnienie stabilnych warunków w procesie toczenia gwintów, nie tylko w superstopach jest złożonym zagadnieniem, który stanowi przedmiot wielu badań. Gunay wskazał, że zwiększenie siły promieniowej związanej ze strategią dosuwu wgłębnego może spowodować słabą jakość powierzchni [22]. An i inni wykazali, że zużycie powierzchni przyłożenia na lewej krawędzi płytki jest poważniejsze niż na prawej podczas procesu toczenia gwintu BUTTRESS [53]. W tej samej pracy badacze doszli do wniosku, że nieregularny wiór może porysować obrabianą powierzchnię i pogorszyć jej jakość. Jiang i inni stwierdzili, że siły skrawania podczas tego procesu związane są nie tylko z drganiami i zużyciem narzędzia, ale także wieloma innymi czynnikami takimi jak np. wejście i wyjście narzędzia w materiał obrabiany, co utrudnia identyfikację aspektów wpływających na stabilność toczenia oraz kontrolę procesu toczenia gwintu [54]. Erbao i Guotong opisali najczęstsze przyczyny błędów podczas toczenia gwintów, a także wskazali możliwości ich kompensacji [55].

W celu uniknięcia deformacji cienkościennych wałów, obróbkę zgrubną gwintu trapezowego przeprowadza się na początku procesu kiedy obrabiany przedmiot jest sztywniejszy ze względu na większą grubość ścian. Obróbkę wykańczającą wykonuje się jako jeden z ostatnich zabiegów. W omawianym przypadku czas między zabiegiem obróbki zgrubnej, a wykańczającej to prawie 8 godzin. W tym czasie wał jest kilkakrotnie przemocowywany przy użyciu kła oraz podtrzymki. Powoduje to minimalne zmiany długości części wykonywanej z Inconel 718, przez co występują trudności z „trafianiem” w gwint. Konieczna jest zatem kontrola długości części i korekcja położenia osiowego narzędzia w trakcie procesu.

Z powodu dużych obciążeń unika się stosowania płytek pełnoprofilowych, które mogą zwiększać deformację wału oraz wprowadzać drgania. Niestety jednym z problemów występujących podczas toczenia gwintów BUTTRESS płytką typu „V” w omawianym przypadku jest powstawanie charakterystycznej wypływkii materiału (rys. 2.12). Zjawisko to jest niekorzystne z punktu widzenia kontroli gwintu sprawdzianem, gdyż uniemożliwia jego wkręcenie. Usunięcie wypływkii możliwe jest na stanowisku ślusarskim, co wymaga zdjęcia przedmiotu z obrabiarki. Działanie takie z kolei prowadzi do braku możliwości poprawy źle wykonanego gwintu. Co więcej, manualne usunięcie twardego materiału wymaga dużego doświadczenia operatora, gdyż nieostrożne postępowanie może prowadzić do zmian w stanie powierzchni gwintu, co jest niedopuszczalne z punktu widzenia zatwierdzanego procesu

wytwarzania tzw. części krytycznych. W związku z czym stosowane są płytki typu „V” z nałożonym promieniem mającym za zadanie zaokrąglić krawędź między powierzchnią boczną gwintu, a średnicą zewnątrz wykonywaną innym narzędziem, dzięki czemu możliwe jest skontrolowanie części przed zdjęciem z obrabiarki. W celu wygładzenia krawędzi oraz usunięcia drobnych wiórów przyklejonych do materiału po toczeniu gwintu zalecane jest jego wyczyszczenie szczotką wykonaną z włókna ściernego.



Rys. 2.12 Wyplývka materiału po toczeniu gwintu trapezowego w Inconel 718 [Opracowanie własne przy pomocy mikroskopu Eclipse MA200 firmy Nikon].

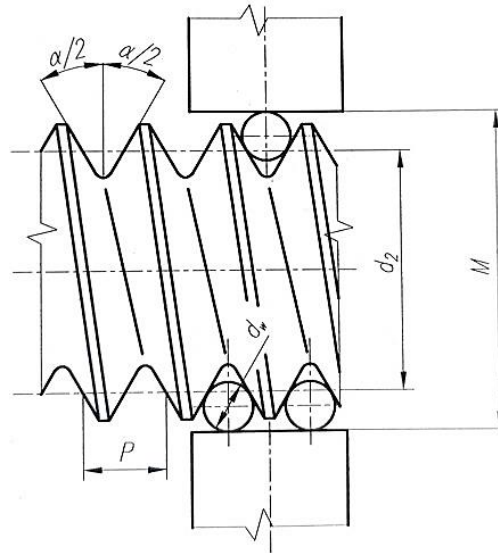
2.3 Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych

2.3.1 Metody stykowe

W większości przypadków w celu sprawdzenia poprawności wykonania gwintu wystarczająca jest kontrola za pomocą dedykowanych sprawdzianów: przechodniego oraz nieprzechodniego. Główną zaletą tego rozwiązania jest szybkość weryfikacji, niskie wymagania co do umiejętności operatora oraz możliwość sprawdzenia funkcjonalności całego gwintu za jednym razem [56]. Niestety sposób ten obarczony jest wieloma wadami. Przede wszystkim sprawdzian daje jedynie wynik binarny i w przypadku wykrycia nieprawidłowości nie jesteśmy w stanie zidentyfikować, której cechy ona dotyczy. Co więcej, Kosarevsky zauważył, że łatwo przeoczyć nieprawidłowe wykonanie gwintu jeżeli mimo odchyłki wymiarowej spełnia on funkcjonalność np. błąd skoku może być ukryty wykonaniem większej średnicy podziałowej [57]. W tej samej pracy wskazał także inne wady sprawdzianów takie jak wysoki koszt wykonania oraz zużywanie się, przez co konieczna jest ich regularna kalibracja. Suliga zauważył, że bazując jedynie na sprawdzianie można pominąć defekty, które w pewnych sytuacjach mogą być krytyczne np. pęknięcia [60]. Metody kalibracji sprawdzianów gwintowych zostały przedstawione w pracach [61- 65].

Klasyczne metody pomiarowe zostały w czytelny i przejrzysty sposób opisane przez Malinowskiego w podręczniku dedykowanym pomiarom gwintów [3]. Półką zarysu oraz promień mierzy się techniką optyczną za pomocą mikroskopu lub projektora. Do mierzenia elementów geometrycznych zarysu gwintu można użyć także konturografu wyposażonego w ciekłą i sztywną końcówkę zakończoną małym promieniem (około 0,01 mm). Autor podkreśla jednak, że w ten sposób uzyskamy informację o całkowitym kącie gwintu α , a nie kąty poszczególnych boków α_1 i α_2 . Wartość średnicy podziałowej można wyznaczyć za pomocą mikroskopu lub projektora, a także stykowo za pomocą mikrometru ze specjalną, wymienną końcówką o stożkowym i pryzmatycznym kształcie dobraną w zależności od wartości nominalnej podziałki. Najdokładniejsza jednak w tym przypadku będzie metoda pośrednia zwana metodą trójwałeczkową. Odpowiednio dobrane wałeczki pomiarowe

umieszcza się we wrębie gwintu i prostopadłe do osi gwintu mierzony jest ich wymiar zewnętrzny. Sposób ten można wykorzystać także przy wyznaczaniu średnicy podziałowej gwintów stożkowych jak opisano w pracy [66]. Zależność między pomiarem bezpośrednim M_p , a wartością szukanej średnicy podziałowej d_2 (rys. 2.13) określa równanie (2.2) [3].



Rys. 2.13 Zasada pomiaru średnicy podziałowej metodą trójwałeczkową [3].

$$d_2 = M_p - d_w \left[1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] + \frac{P}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + p_1 + p_2 \quad (2.2)$$

gdzie:

M_p – wymiar zewnętrzny wałeczków pomiarowych umieszczonych we wrębie,

d_w – średnica wałeczków,

α – kąt gwintu,

P – podziałka,

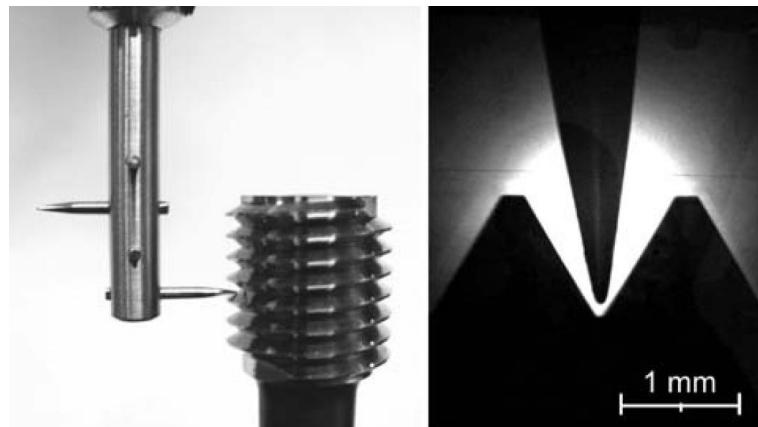
p_1 – poprawka na skrzywienie wałeczków w brzdach gwintu,

p_2 – poprawka na odkształcenie sprężyste pod wpływem nacisku pomiarowego wałeczków i gwintu w miejscach styku.

Średnicę zewnętrzną gwintu zewnętrznego mierzymy przy użyciu tych samych przyrządów, których używamy do pomiaru średnic zewnętrznych wałków. W przypadku średnicy wrębu stosowane są pomiary optyczne jak i pomiary stykowe np. przy użyciu mikrometru do gwintów. Sheng i inni opracowali metodę pomiaru średnicy podziałowej wykorzystującą urządzenie do skanowania profilu [67]. Podobnie badanie wykonał Kosarevsky, który badał gwinty konturografem [68].

Nieustanny rozwój współrzędnościowej techniki pomiarowej umożliwił pomiary wybranych cech gwintu na CMM. Mimo wysokiej ceny maszyny, jej uniwersalizm powoduje, iż coraz więcej firm decyduje się na wykorzystanie tych urządzeń. Warto zauważyć, że kosztowny sprawdzian dedykowany jest dla konkretnego, jednego gwintu natomiast maszyna pomiarowa nie ma tego typu ograniczeń i jest o wiele bardziej uniwersalna. Pomiary

gwintów na CMM ograniczone są przede wszystkim wielkością kulki, która nie rzadko nie jest w stanie dotrzeć do dna wrębu [60]. Zbyt mała końcówka może spowodować, że pomiar nastąpi nie kulką, a trzpieniem [69]. Czasami wygodnym, szybszym rozwiązaniem może okazać się skanowanie gwintu większą kulką stykającą się równocześnie z obiema flankami gwintu [70]. W teorii podczas pomiarów gwintów wewnętrznych rozpatruje się kontakt kuli w przekroju 2D, gdzie pozycja odnosi się do środka kulki. W rzeczywistości styk następuje powierzchnią sferyczną, a gwint jest trójwymiarowy co powoduje błędy [70]. Carmignato przeprowadził test przy użyciu specjalnej końcówki w kształcie igły o promieniu zaokrąglenia końcówki mniejszym niż 0,1 mm (rys. 2.14) [72]. Badania te zakończyły się uzyskaniem niepewności pomiaru średnicy podziałowej na poziomie 2 μm . Shchurov użył chmury punktów z CMM do obliczenia wirtualnej średnicy podziałowej [73].



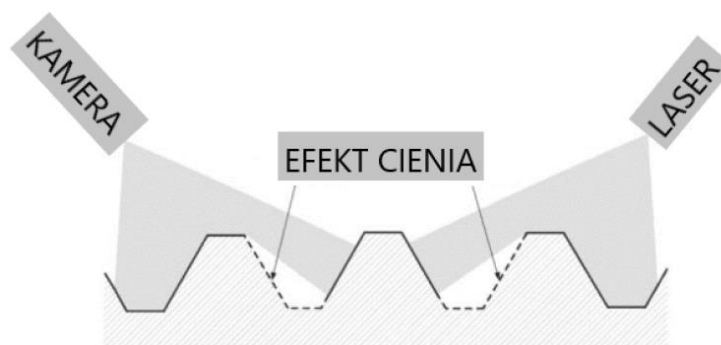
Rys. 2.14 Pomiar gwintu końcówką w kształcie igły [72].

Mierząc gwinty przy pomocy technik współrzędnościowych wskazujemy interesujące nas wymiary oraz co więcej, pomiar odbywa się jedynie w wybranych przekrojach, przez co możliwe jest pominięcie defektu wpływającego na funkcjonalność. Tutaj przewagę mają sprawdziany, jednak w przypadku problemu montażowego sprawdzian nie da nam informacji, gdzie występuje problem, a CMM już tak [56]. Przygotowanie programu na CMM z pewnością jest czasochłonne i wymaga wykwalifikowanego operatora, jednak już kolejne pomiary odbywają się automatycznie co eliminuje czynnik ludzki, który występuje przy metodach manualnych [74].

2.3.2 Metody bezstykowe

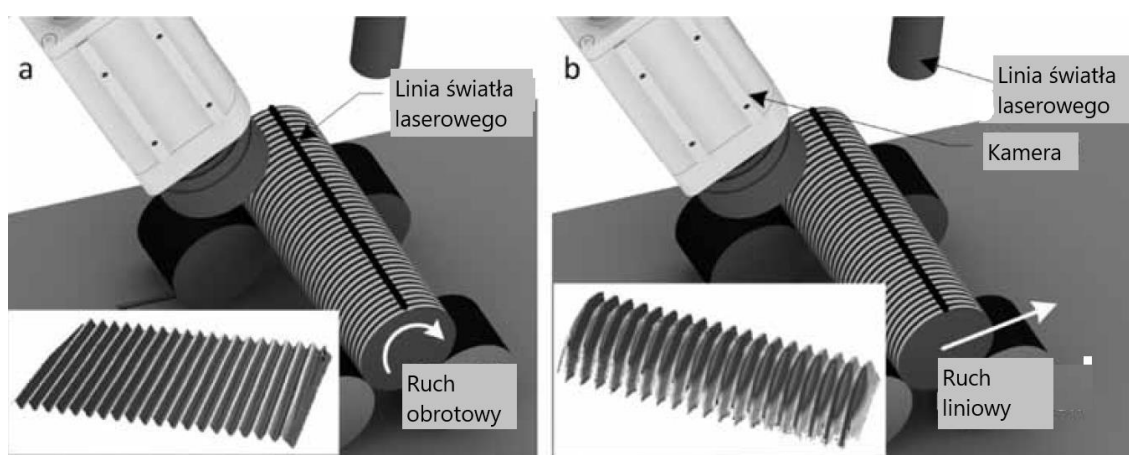
Mimo wielu zalet pomiarów stykowych, które są już dobrze rozeznane analizując najnowszą literaturę nasuwa się wniosek, iż coraz więcej uwagi i badań dotyczy pomiarów bezstykowych gwintów. Przemawia za nimi szybkość, możliwość pomiaru wielu cech jednocześnie, łatwość zbierania oraz gromadzenia danych w cyfrowej formie. Wybierając metodę bezkontaktową eliminuje się możliwość zarysowania powierzchni gwintu. Większość cech geometrycznych gwintu z łatwością można zmierzyć za pomocą mikroskopu pomiarowego, czy też projektoru. Są to jednak klasyczne manualne sposoby. Oprócz nich podejmowane są próby wprowadzania nowych metod takie jak triangulacyjne urządzenie laserowe, czy też kamera CCD. Jedną z takich metod, opartą na triangulacji laserowej opisał Suliga [60]. Badacz podkreślił, że dokładność pomiarowa ograniczona jest rozdzielczością czujnika, a zwiększanie rozdzielczości wpływa negatywnie na czas przetwarzania danych.

Suliga w eksperymencie zwrócił uwagę na „efekt cienia” czyli występowania martwych punktów, które nie są rejestrowane poprzez układ pomiarowy (rys. 2.15). W pracy wskazał zalety ruchu obrotowego mierzonego elementu względem układu pomiarowego w stosunku do klasycznego podejścia jakim jest przemieszczenie się liniowe.



Rys. 2.15 „Efekt cienia” podczas pomiaru triangulacyjną głowicą pomiarową [60].

Pomiary na zasadzie triangulacji laserowej zostały przedstawione w [75-82]. Farana i inni pokazali różnice w uzyskanym obrazie w zależności od strategii pomiaru (rys. 2.16) [76]. Dużym utrudnieniem w pomiarach optycznych są refleksy świetlne zależne od rodzaju i jakości mierzonej powierzchni oraz rozpraszanie się wiązki światła na krawędziach [12].



Rys. 2.16 Obraz gwintu w zależności od strategii pomiaru [76].

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój technologii informatycznych wspieranych coraz częściej także sztuczną inteligencją. Rozwój algorytmów przetwarzania obrazu sprawia, że systemy wizyjne coraz częściej wspierają procesy kontroli jakości. Opracowany przez Gadelmawla system pomiarowy oparty o kamerę CCD pozwala na ocenę aż 18 cech gwintu z dokładnością odbiegającą od standardowych metod pomiarowych o $\pm 5,4 \mu\text{m}$ [83, 84]. W innej pracy autor przedstawił podobne rozwiązania zbierając dane uzyskane za pomocą mikroskopu [85]. He, Zhang i inni zaproponowali metodę oceny zniszczeń oraz pomiaru zniszczonych gwintów stożkowych bazując na CCD [86]. Chen i inni zauważyli, że w przypadku bezstykowego wykrywania granic profilu gwintu, wyzwaniem pozostaje zapewnienie, aby oś gwintu przecinała oś kamery CCD prostopadle [87]. Badacze opisali algorytm pozwalający zmniejszyć błąd pochylenia detalu o 50%. Erbao i Guotong przedstawili sposób wyznaczania wybranych cech gwintu na podstawie analizy obrazu podkreślając

konieczność filtracji w celu usunięcia szumów [55]. Algorytmy wykrywania krawędzi zmierzonego profilu opisano w pracach [88-92]. Kosarevsky i Latypow mierzyli z kolei gwinty za pomocą tomografii komputerowej [57]. Robertson i Fisher badali metody pomiarowe gwintów o średnicach około 500 mm za pomocą skanera 3D [93]. W pracy [94] opisano możliwość wykorzystania do pomiaru wybranych cech gwintów zewnętrznych specjalistycznego urządzenia, jakim jest skaner elementów obrotowych Opticline. W [82, 95-97] opisano także próby wprowadzenia układu pomiarowego bazującego na systemach wizyjnych bezpośrednio w przestrzeń obrabiarki.

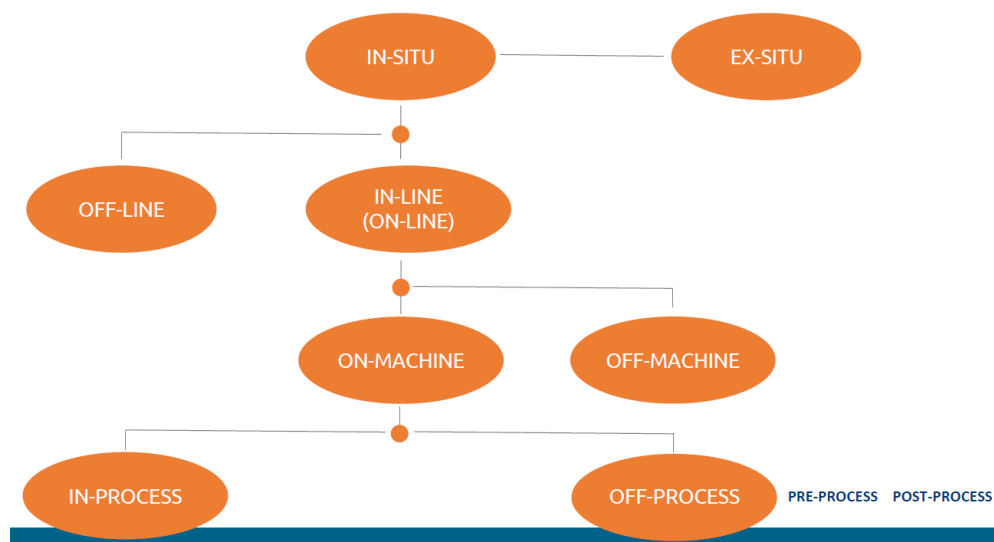
Niestety obecnie dużym problemem, praktycznie uniemożliwiającym takie rozwiązanie w kontroli czynnej jest wpływ cieczy smarująco-chłodzącej na osiągane wyniki pomiarów. Zależą one od lepkości oleju, a także od mierzonej cechy. Największy błąd zaobserwowano podczas pomiaru średnicy wrębu gwintu zewnętrznego [98]. Występowanie wirów, wahania temperatury to także czynniki utrudniające zastosowanie automatycznego układu pomiarowego w trakcie procesu.

2.4 Pomiary na obrabiarkach

2.4.1 Systemy pomiarowe w Przemysle 4.0

Pojęcie Przemysłu 4.0 (ang. Industry 4.0) bardzo często w ostatnich latach spotykane jest zarówno w publikacjach naukowych, podczas prezentacji konferencyjnych, ale także w praktyce przemysłowej [99, 100]. Koncepcja ta zaprezentowana po raz pierwszy w 2011 roku podczas targów w Hanowerze zakłada integrację wirtualnych systemów informatycznych z rzeczywistymi maszynami produkcyjnymi. W czwartej rewolucji przemysłowej maszyny połączone są w sieć (ang. Internet of Things - IoT) i potrafią komunikować się między sobą. Duże ilości danych (ang. Big Data) zbierane są w czasie rzeczywistym i przesyłane w celu przetworzenia do chmury (ang. Cloud Computing), skąd dostępne są dla personelu nadzorującego oraz wspierającego procesy produkcyjne w zasadzie z dowolnego miejsca. Idea ta wspomagana jest w dużym stopniu poprzez sztuczną inteligencję (ang. Artificial Intelligence) tworząc tzw. inteligentną fabrykę (ang. Smart Factory). Nie trudno sobie wyobrazić, iż rewolucja ta dotyczy także procesów pomiarowych wprowadzając pojęcia takie jak In-process metrology [101], On-Machine Measurement [102] lub The Cyber-Physical Manufacturing Metrology [103]. Zakładają one integrację procesu pomiarowego z procesem produkcyjnym. Wymiary kontrolowane są na bieżąco w trakcie procesu wytwórczego, a wyniki przetwarzane są i analizowane automatycznie zapobiegając w czasie rzeczywistym rozregulowaniu się procesu. Wyzwania Metrologii 4.0 zostały przedstawione w [104-106]. Autorzy podkreślają, że kluczowe jest zapewnienie powtarzalności i stabilności pomiarów automatycznych w warunkach hali produkcyjnej. Trudnym zadaniem z pewnością jest określenie niepewności pomiarowej wynikającej ze złożenia błędów maszyny obróbczej jak i urządzenia pomiarowego.

Pomocnym rozwiązaniem, które należy rozwijać są z pewnością bliźniaki cyfrowe, czyli tzw. digital twins mające na celu zaprojektowanie pomiaru oraz jego symulowanie za pomocą systemu informatycznego. Klasyfikację systemów pomiarowych w zależności od miejsca i czasu występowania przedstawiono na rys. 2.17.



Rys. 2.17 Klasyfikacja systemów pomiarowych [105].

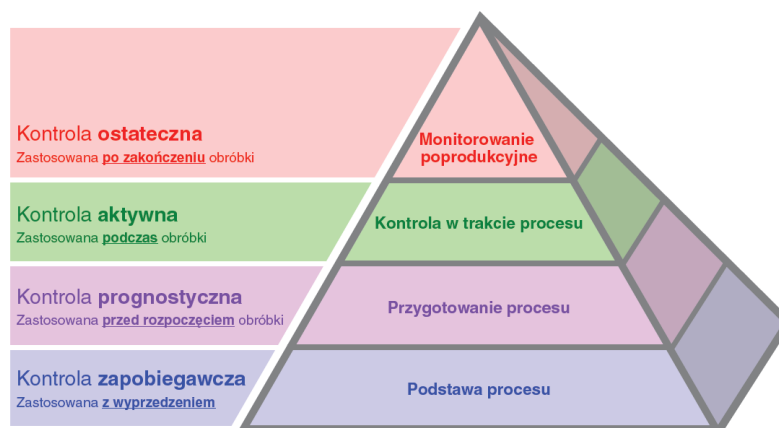
W dokumencie opublikowanym przez NIST (National Institute of Standards and Technology) [107] postanowiono zdefiniować wyżej wymienione pojęcia oraz przedstawiono studium przypadków zastosowań przykładowych rozwiązań. Terminy określające rodzaj pomiaru podzielono w zależności od tego gdzie i kiedy ma ono miejsce. Definicje przedstawiono w tabeli 2.4.

Tab. 2.4 Klasyfikacja systemów pomiarowych [107].

Miejsce występowania	Nazwa	Definicja
Gdzie	<i>On-machine</i>	Mierzony element jest umieszczony w przestrzeni maszyny, a urządzenie pomiarowe znajduje się wewnątrz lub w pobliżu maszyny
	<i>In-situ</i>	Mierzony element jak i urządzenie znajdują się w pobliżu maszyny lub wewnątrz maszyny
	<i>Off-machine</i>	Pomiar odbywa się poza maszyną
Kiedy	<i>At-design</i>	Czynność planowania pomiarów wykonywana przed rozpoczęciem jakichkolwiek pomiarów fizycznych
	<i>Pre-process</i>	Pomiar wykonywany przed jakąkolwiek operacją obróbki skrawaniem, ale po zaprojektowaniu pomiaru i wykonywany na elementach takich jak uchwyty, półfabrykat, obrabiarka, narzędzia skrawające, przyrządy do ustawiania sond/narzędzi
	<i>In-process</i>	Pomiar wykonywany po rozpoczęciu obróbki i przed zdjęciem części z uchwytu, bez przerywania/wstrzymywania operacji skrawania

	<i>In-process-intermittent</i>	Pomiar wykonywany po obróbce rozpoczyna się podczas przerwy w obróbce, zanim część zostanie ostatecznie usunięta z uchwytu obrabiarki
	<i>In-line</i>	Pomiar wykonywany na części lub zespole między operacjami produkcyjnymi w kontekście operacji ciągłej, komórki produkcyjnej lub operacji wieloetapowej
	<i>Post-process</i>	Pomiar gotowego wyrobu na końcu procesu wytwarzania, przed dostawą do klienta lub przed kolejną operacją na linii montażowej, niezależnie od tego, czy jest to monolityczna część, czy cały zespół. Pomiar ma zwykle jedną lub więcej z następujących cech: kontrolowane warunki środowiskowe (np. temperatura, jakość powietrza, wilgotność), bardzo dokładną operację pomiarową (np. dokładne sondy, precyzyjne maszyny współrzędnościowe lub przyrządy pomiarowe) i często są wymagane do częściowego odbioru przez klienta

Ciekawe podejście do systemów pomiarowych zostało przedstawione przez firmę Renishaw [108]. Producent sond pomiarowych sklasyfikował kolejne poziomy kontroli wyrobów w formie tzw. piramidy produktywności (rys. 2.18). Znajdziemy tu podział na cztery poziomy kontroli przy czym każdy kolejny stopień powinien zostać wdrożony po zagwarantowaniu poziomu niższego.

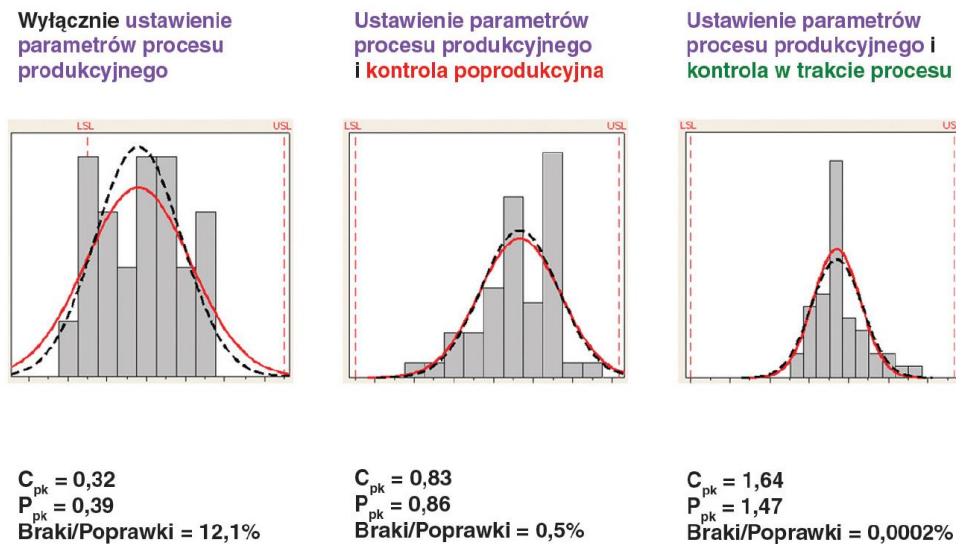


Rys. 2.18 Koncepcja piramidy produktywności [108].

U podstaw piramidy występuje kontrola zapobiegawcza związana z regularną diagnostyką i zapewnieniem dobrego stanu technicznego obrabiarek. Kolejnym etapem jest kontrola prognostyczna zastosowana przed rozpoczęciem obróbki. Ma ona na celu zlikwidowanie oddziaływania operatora na proces ustawienia części poprzez wykorzystanie sond pomiarowych do ustawienia baz obróbczych, ale obejmuje także kalibrację sond i pomiary geometrii narzędzi. Zabieg ten znacznie przyspiesza proces przezbrojenia maszyny oferując

więcej czasu na obróbkę skrawaniem. Następnym stopniem jest kontrola aktywna, do której możemy przypisać działania dokonywane z omawianym tematem, czyli pomiar i automatyczna korekcja narzędzia skrawającego. Osiągnięcie tego poziomu gwarantuje wykonywanie za pierwszym razem części zgodnych. Eliminuje oczekiwanie obrabiarki na wykonanie poprawek, a także pozwala na zminimalizowanie ilości potrzebnych urządzeń pomiarowych, gdyż sonda obrabiarkowa umożliwia zastąpienie wielu z nich. Najwyższym poziomem jest monitorowanie poprodukcyjne, w którym produkt sprawdzany jest względem swoich specyfikacji. Część weryfikacji można wykonać na obrabiarce, ale większość zadań jest wykonywana w placówkach kontroli jakości. Warto zauważyć, że kontrola ostateczna w przeciwieństwie do trzech wcześniejszych etapów nie wpływa bezpośrednio na jakość produkowanych części.

Na rys. 2.19 przedstawiono wyniki oceny zdolności procesu uzyskane w wyniku badań przeprowadzonych przez Renishaw. Widać wyraźnie, iż zastosowanie kontroli aktywnej przyczyniło się do uzyskania zadowalającej wartości wskaźnika zdolności procesu $C_{pk}=1.64$, a poziom braków i poprawek zmniejszył się około 2500 razy w stosunku do ograniczenia się jedynie do kontroli poprodukcyjnej.

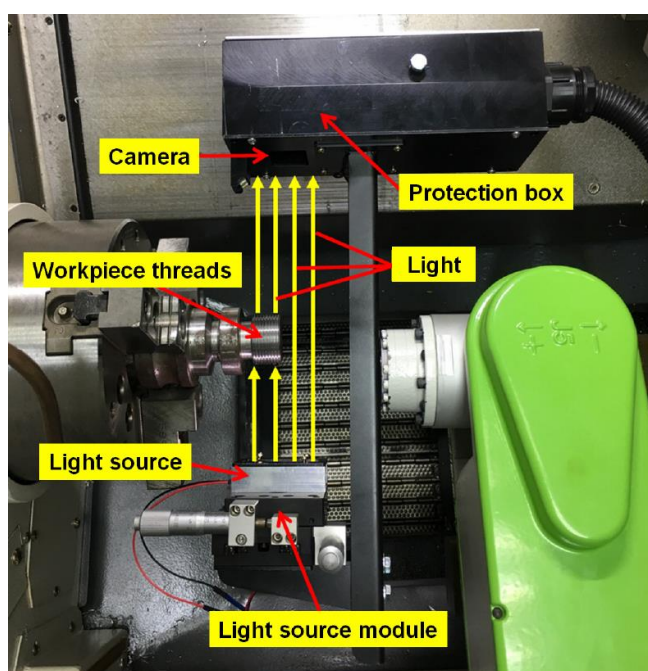


Rys. 2.19 Wykresy zdolności procesu [108].

Przykład procesu w którym zastosowano tzw. „In-process measurement” opisano w [109]. Podczas formowania uzębień wybrane parametry były kontrolowane przy pomocy bezstykowego czujnika zbliżeniowego. W pracy [110] opisano procedurę postępowania podczas „On-machine measurement”, przy zastosowaniu stykowej sondy pomiarowej na tokarko-frezarce CNC. Zauważono, że większe błędy pomiaru występują podczas kontroli wymiarów obróbki zgrubnej. W artykule [111] zbadano możliwości pomiarowe przemysłowego skanera 3D na obrabiarce CNC zauważając problem skanowania błyszczących powierzchni. Pokrycie powierzchni sprayem matującym może być utrudnione do wykonania po lub w trakcie obróbki, ponieważ przedmiot obrabiany pozostaje mokry w wyniku zastosowania chłodziwa. W takim przypadku przyszłe zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji mogą być pomocne w ustawieniu głowicy skanującej tak, aby jak największa powierzchnia mogła zostać poprawnie zeskanowana poprzez uniknięcie lub zminimalizowanie

efektów odbicia. Przegląd rozwiązań zarówno stykowych jak i bezstykowych stosowanych do pomiaru powierzchni bezpośrednio na obrabiarce możemy znaleźć w [112].

W literaturze znaleźć można także przykłady pomiaru gwintów bezpośrednio w przestrzeni obrabiarki. W pracy [97] opisano przykład pomiaru zarysu stożkowego, wewnętrznego gwintu rurowego przy pomocy laserowego czujnika przemieszczenia uzyskując dokładność $\pm 8 \mu\text{m}$. Autorzy zwrócili uwagę na dużą szybkość kontroli wyrobu. W pracach [95, 96] zaprezentowano układ pomiarowy z wykorzystaniem systemu wizyjnego, który został umieszczony na manipulatorze znajdującym się obok obrabiarki (rys. 2.20). Uzyskano również zadowalające wyniki różniące się od tych z mikroskopu o niecałe $6 \mu\text{m}$. Warto podkreślić jednak, że badania te odbywały się w warunkach laboratoryjnych minimalizując wpływ czynników występujących podczas rzeczywistej pracy maszyny w cyklu obróbczym.



Rys. 2.20 System pomiaru wizyjnego umieszczony w przestrzeni obrabiarki [96].

2.4.2 Obrabiarkowe sondy pomiarowe

Przełóżając wyniki badań prowadzone przez środowisko naukowe znajdziemy szereg rozwiązań pozwalających na wdrożenie koncepcji „On-machine measurement”, gdzie pomiary odbywają się w przestrzeni obróbczej obrabiarki sterowanej numerycznie. Jest to możliwe nawet w przypadku gwintów, co przytoczono w poprzednich rozdziałach. Rozwiązania te często opierają się na urządzeniach optycznych i wiele wskazuje na to, że pomiary bezkontaktowe będą mocno rozwijane w najbliższych latach.

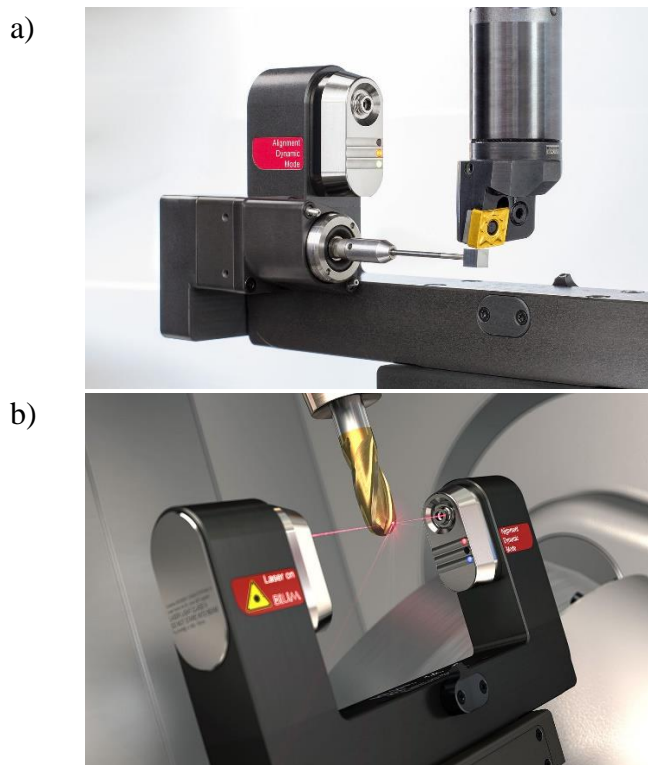
Warto jednak mieć na uwadze fakt, iż obrabiarkowe urządzenia pomiarowe dostępne i wykorzystywane obecnie na skalę przemysłową możemy podzielić zasadniczo na dwa typy:

- sondy narzędziowe zwane ustawczymi,
- sondy przedmiotowe zwane inspekcyjnymi.

Sondy narzędziowe służą przede wszystkim do pomiaru geometrii narzędzia skrawającego, ale także do detekcji wykruszenia lub złamania ostrza [113]. Dzięki nim obniżane jest znacząco ryzyko popełnienia błędu nieprawidłowego opisu narzędzia. Ponadto

wykrycie złamania ostrza między cyklami obróbczymi zapobiega dalszym uszkodzeniom (np. wykrycie złamania wiertła uniemożliwiające wykonaniu otworu przed operacją gwintowania lub rozwiercania).

Sondy ustawcze mogą być stykowe, mierzące geometrię w momencie kontaktu ostrza skrawającego z końcówką stanowiącą czujnik pomiarowy lub też bezstykowe działające na zasadzie wykrywania przecięcia wiązki lasera poprzez narzędzie umieszczone w przestrzeni pomiarowej (rys. 2.21).



Rys. 2.21 Sonda narzędziowa a) stykowa, b) laserowa [114].

Sondy inspekcyjne mocowane we wrzecionie lub też głowicy rewolwerowej używane są głównie do pomiaru powierzchni bazowych elementów [115], kontroli zamocowania części w przyrządzie oraz pomiaru geometrii obrabianego przedmiotu [116]. Dzięki temu możliwa jest kontrola wyrobu bezpośrednio na obrabiarce, ale także dokonywanie automatycznych korekt narzędzia w trakcie obróbki i korygowania takich czynników jak zużycie się ostrza lub ugięcie się narzędzia. Wśród wiodących producentów sond pomiarowych takich jak: Renishaw, Blum, Metrol, Marposs [108, 114, 117, 118] znajdziemy szereg głowic stykowych przeznaczonych dla obrabiarek sterowanych numerycznie. Dzielą się one w zależności od układu pomiarowego na:

- elektrostykowe

Sondy kinematyczne zawierają obciążony sprężyną, trójramienny układ zamocowania kinematycznego drążków i kulek pozycjonujących trzpień pomiarowy. Każda z trzech par kulek stanowi przerwę w obwodzie elektrycznym. Gdy trzpień znajduje się w położeniu neutralnym, trójramienny element zamyka obwód. W miarę wzrostu siły nacisku na trzpień pomiarowy zostaje on wychylony razem z ruchomą częścią przetwornika, a obwód elektryczny zostaje przerwany co stanowi impuls generujący sygnał pomiarowy.

- tensometryczne

W sondach tensometrycznych zachowano układ zamocowania kinematycznego rezystancyjnych sond kinematycznych, lecz do pomiaru siły zetknięcia, działającej na trzpień pomiarowy i wygenerowania sygnału wyzwolenia wykorzystano czujniki tensometryczne przez co siła wyzwolenia jest mniejsza. Sondy te pozwalają na pomiary powierzchni trójwymiarowych np. stożkowych gdzie siła wyzwolenia oddziałuje na układ pomiarowy w kilku osiach.

- skanujące

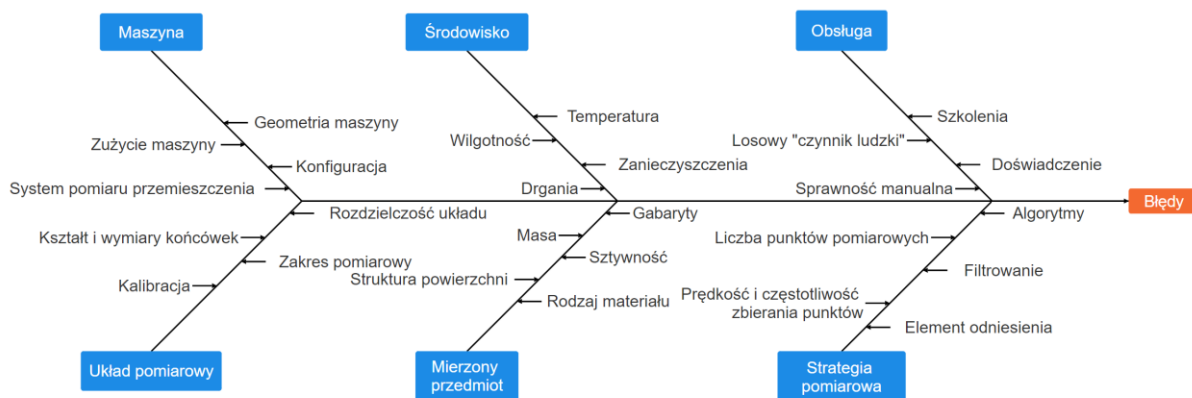
Sondy te są czułe na zmiany kształtu powierzchni i wykrywają submikrometryczne przemieszczenia na końcówce trzpienia pomiarowego. Rejestrują 1000 punktów pomiarowych 3D w każdej sekundzie. Do ich zastosowania wymagana jest duża pamięć robocza w układzie sterowania obrabiarki.

Obrabiarkowe sondy inspekcyjne mają konstrukcję modułową, dzięki czemu można je konfigurować w zależności od przeznaczenia. Istnieje także możliwość zamówienia specjalnej konstrukcji końcówki, dostosowanej do potrzeb klienta. Transmisja sygnału z układu pomiarowego do sterownika CNC może odbywać się przewodowo, optycznie (podczerwień) lub radiowo.

Stosowanie sond zarówno ustawczych jak i inspekcyjnych możliwe jest do zaprogramowania w kodzie NC. Korzyści jakie wynikają z używania tego typu urządzeń prowadzą przede wszystkim do skrócenia przestojów maszyn oraz zapewnienia poprawności produkcji w procesie bezobsługowym. Wadą rozwiązania jest wysoki koszt zakupu, przez co opracowywane są różnego rodzaju alternatywne metody, jak prosta sonda do pomiaru średnicy na podstawie jednego punktu [119], lub też układ pomiarowy pozwalający na pomiar przedmiotu narzędziem skrawającym [120]. Układ ten działa w oparciu o wytwarzanie impulsu elektrycznego w wyniku styku ostrza z obrabianą częścią.

2.4.3 Problemy związane z In-process measurement

Pomiary w trakcie procesu, czyli tzw. „In-process measurement” stosowane są w przemyśle dość powszechnie [121, 122]. Niestety, w przypadku precyzyjnych części, jakie produkowane są w branży lotniczej pomiary te stanowią pewnego rodzaju usprawnienie i zabezpieczenie, ale nadal nie są one zatwierdzone poprzez wymagane certyfikaty jakościowe aby można było je traktować na równi z laboratoryjną kontrolą ostateczną. Różnice w dokładności pomiaru laboratoryjnego i na stanowisku obróbczym przy użyciu tej samej sondy potwierdzają badania np. [123]. Istnieje szereg czynników, które mogą wpłynąć na wzrost niepewności wyniku pomiaru (rys. 2.22). Ze względu na dość duży zbiór składników potencjalnych nieprawidłowości, zdefiniowanie rzeczywistej przyczyny błędów pomiaru nie jest oczywistym zadaniem. Podejmowane są próby opracowania modeli matematycznych pozwalających na przewidywanie oraz kompensację błędów [124]. Badacze poruszają także niezwykle istotną kwestię szacowania niepewności pomiarowej o czym możemy przeczytać w [125-129].

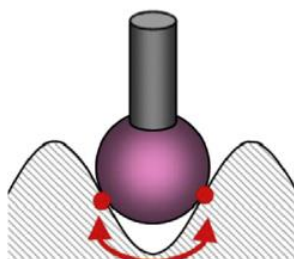


Rys. 2.22 Potencjalne przyczyny nieprawidłowego pomiaru.

Jedną z głównych przyczyn występowania rozbieżności w pomiarach laboratoryjnych a pomiarach „In-situ”, czyli na linii produkcyjnej są z pewnością warunki środowiskowe. Różnice temperaturowe wpływają na rozszerzalność cieplną mierzonego materiału [127]. Ponadto występowanie cieczy chłodząco smarującej, a także zanieczyszczeń w postaci wiórów przyczyniają się do powstawania losowych błędów. Kolejna składowa wynika z samej obrabiarki. Naturalne zużycie się przewodnic maszyny, czy też spowodowane kolizją powodują problemy z powtarzalnością oraz dokładnością pozycjonowania. Przyczyn błędów należy także upatrywać w samym układzie pomiarowym przesuwu osi. Obrabiarki z liniałem pomiarowym będą dokładniejsze, a niżeli z enkoderem instalowany na układzie napędowym. Kluczową rolę odgrywa tutaj diagnostyka i kontrola dokładności pozycjonowania poszczególnych osi, ale także ich złożenia powodujące tzw. błędy wolumetryczne [130, 131].

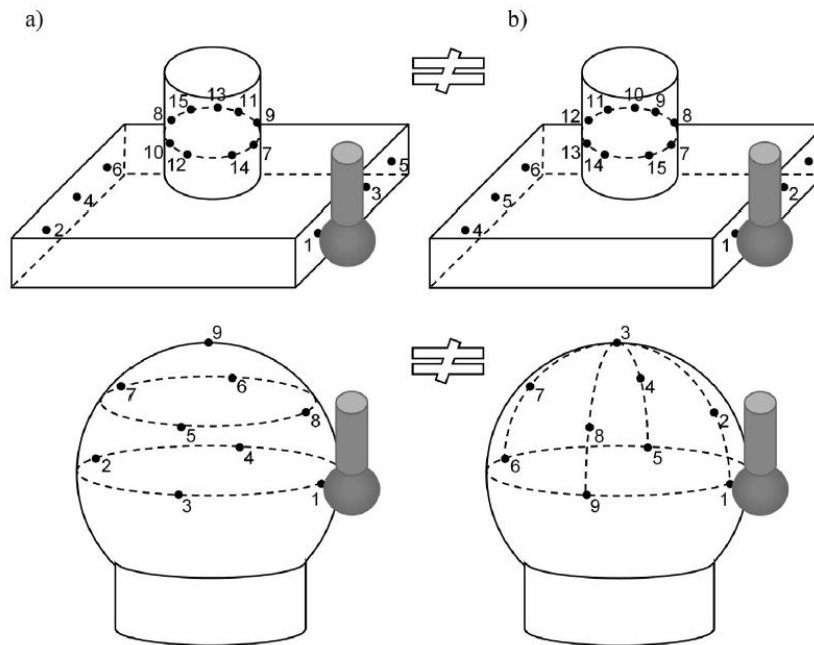
Dokładność pozycjonowania obrabiarki może być sprawdzana między innymi przy pomocy urządzenia zwanego interferometrem laserowym [131, 132]. Przegląd podsumowujący główne metody sprawdzania geometrii obrabiarki zawarto w pracy [133].

Następnym czynnikiem powodującym nieprawidłowości jest mierzony przedmiot. Jak zbadano w [134] sztywność części oraz chropowatość powierzchni rzutują na wynik pomiaru. Co więcej, mierzony element ma znaczący udział w całkowitej niepewności pomiaru, głównie ze względu na jego odkształcenia termomechaniczne [135]. Problemów z uzyskaniem prawidłowych wyników należy także szukać w układzie pomiarowym oraz strategii zbierania punktów. Należy między innymi pamiętać o doborze odpowiedniego rozmiaru końcówki, gdyż zbyt duża kulka uniemożliwi dotarcie do niektórych powierzchni (rys. 2.23), jednocześnie zbyt mała końcówka jest mało sztywna.



Rys. 2.23 Wpływ wielkości kulki na dokładność pomiaru [136].

W pracy [137] zauważono, że czynniki takie jak filtrowanie oraz sposób transmisji sygnału wpływają na opóźnienie przekazywania informacji między momentem styku, a otrzymaniem wyniku. Wykazano, że filtrowanie sygnału generuje większe opóźnienie, a niżeli sama transmisja bezprzewodowa. W publikacji [116] udowodniono, że opóźnienie wzrasta wraz z długością trzpienia oraz wraz ze zmniejszaniem prędkości posuwu. Z tego powodu producenci zalecają minimalną prędkość rejestracji kontaktu pomiarowego. Wpływ prędkości na siły występujące podczas pomiaru zbadano w [138]. Histerezę można zminimalizować, gdy kolejne punkty pomiarowe są zbierane w tym samym kierunku (rys. 2.24b), a nie po przeciwnej stronie (rys. 2.24a).



Rys. 2.24 Różnice w strategiach pomiarowych [116].

Przy pomocy sond stykowych możliwe są pomiary powierzchni swobodnych [139]. Stwierdzono jednak, że pomiary 3D są obarczone nawet pięciokrotnie większym błędem niż pomiary charakterystyk dwuwymiarowych. W pracy [140] poddano ocenie proces pomiaru sondą na maszynie CNC i porównano wyniki z klasycznymi metodami. Wykazano różnice w uzyskanych wynikach cech 2D na poziomie około 0,04 mm, natomiast 3D ponad 0,2 mm.

2.5 Podsumowanie stanu wiedzy

Przeprowadzona analiza literatury dotyczyła stosowanych w przemyśle zarysów gwintów oraz metod ich wytwarzania. Porównano najpopularniejsze metody wytwórcze, takie jak toczenie, frezowanie, gwintowanie, szlifowanie oraz walcowanie bezwiórowe. Stwierdzono, że dostępne publikacje koncentrują się głównie na najpopularniejszych zarysach gwintów trójkątnych, podczas gdy znacznie mniej prac dotyczy gwintów trapezowych niesymetrycznych, zwłaszcza tych nacinanych w trudnoskrawalnych materiałach, takich jak Inconel 718. Przeanalizowano również literaturę pod kątem prac dotyczących toczenia gwintów, uwzględniając problemy produkcyjne wpływające na jakość produktów oraz wskazówki pomocne w ich eliminacji, na przykład strategie toczenia.

Przeanalizowano stosowane obecnie innowacyjne metody pomiaru gwintów zewnętrznych. Pomimo ciągłego postępu technologicznego, najczęściej stosowane metody

pomiarowe gwintów nadal są manualne. Może to wynikać z kosztów oraz niższych wymagań jakościowych dotyczących produktów przeznaczonych do ogólnego użytku, gdzie nie jest konieczna kontrola każdego elementu. Powszechną metodą weryfikacji gwintu jest sprawdzian, który jednak pozwala uzyskać informacje jedynie o funkcjonalności produktu, nie dostarczając konkretnych danych wymiarowych, co utrudnia lokalizację problemów jakościowych. Dodatkowo, możliwe jest przeoczenie błędów wymiarowych, które nie wpływają na użyteczność połączenia gwintowego. Sprawdziany zużywają się i są kosztowne ze względu na konieczność regeneracji i brak uniwersalności. Inne manualne metody, takie jak metoda trójwałeczkowa, pomiar za pomocą mikroskopu lub projektora, są czasochłonne i narażone na błąd ludzki. Istnieją bardziej zaawansowane i automatyczne metody kontroli, takie jak współrzędnościowa maszyna pomiarowa czy konturograf, które dostarczają kompleksowych informacji. Jednakże, przeniesienie tych metod bezpośrednio na tokarkę CNC jest niemożliwe. Można jedynie się na nich wzorować.

W przeglądzie dostępnych badań literaturowych zauważono, że próby automatyzacji pomiaru gwintów najczęściej koncentrowały się na bezstykowych metodach optycznych, wykorzystujących głowice laserowe lub kamery CCD oraz analizę obrazu. Te metody pozwalają na szybki i kompleksowy pomiar wielu cech gwintów. Dzięki cyfrowemu przetwarzaniu danych, mogą być one zintegrowane z obrabiarkami CNC, choć większość badań dotyczyła osobnych stanowisk pomiarowych. Głównym problemem jest wpływ warunków panujących wewnątrz obrabiarki, takich jak zmienna temperatura, obecność cieczy smarująco-chłodzącej, wióry i refleksy świetlne. Metody stykowe były opisywane znacznie rzadziej. Publikacje dotyczące wykorzystania sond pomiarowych montowanych na obrabiarkach, takich jak Renishaw RMP600, są niezwykle rzadkie, nie znaleziono żadnego artykułu opisującego użycie sondy CNC do pomiaru gwintów.

W wyniku przeglądu literatury stwierdzono, że temat podjęty w ramach doktoratu jest innowacyjny. Prace innych badaczy w tej dziedzinie są bardzo sporadyczne, co podkreśla unikalność i nowatorski charakter podjętego tematu.

3. Cel i hipoteza pracy

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest analiza dostępnych metod pomiaru gwintów zewnętrznych, ich weryfikacja pod kątem możliwości zastosowania bezpośrednio na tokarce CNC oraz w konsekwencji opracowanie układu pomiarowego, który zostanie zbadany w warunkach produkcyjnych. Zakłada się, że istnieje metoda, która pozwoli na powtarzalny, możliwy do zaimplementowania na obrabiarce, sposób pomiaru gwintu. Powinno to umożliwić zebranie danych do automatycznego korygowania nastaw narzędzia skrawającego w zależności od aktualnie wykonanego gwintu. W ramach niniejszego doktoratu wdrożeniowego jest opracowanie metody pomiaru gwintu bezpośrednio na tokarce sterowanej numerycznie. Pozwoli ona na zautomatyzowaną kontrolę tych specyficznych wyrobów. Osiągnięcie tego efektu umożliwi zwiększenie wydajności produkcyjnej, a także zapewni możliwość monitorowania otrzymanych wyników, co w konsekwencji wpłynie na jakość końcowych produktów.

Zastąpienie stosowanej obecnie metody trójwałeczkowej metodą automatyczną pozwoli na skrócenie czasu pomiaru i przestoju maszyny oraz zredukuje możliwość popełnienia błędu tzw. czynnika ludzkiego wpisując się w filozofię „closed door machining”.

Teza badawcza:

Wprowadzenie pomiaru gwintu bezpośrednio na obrabiarce, przy zachowaniu wymagań dokładnościowych, pozwoli na skrócenie czasu obróbki oraz zachowanie zasady „closed door manufacturing”.

4. Badania wstępne

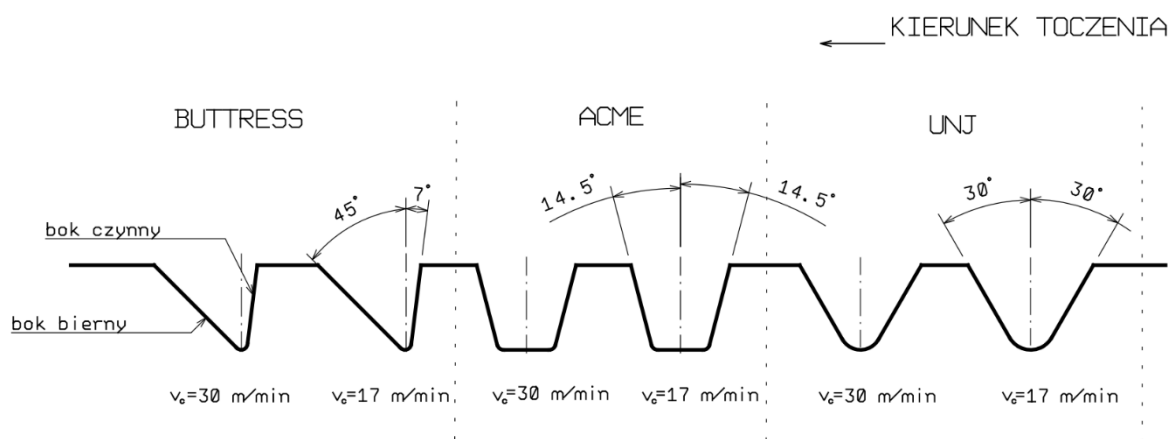
4.1 Badanie topografii gwintów

4.1.1 Metodyka badań

W celu sprawdzenia stanu wyjściowego powierzchni gwintów wykonywanych w przemyśle lotniczym wykonano badanie topografii trzech typów gwintów. Działanie to jest istotne w kontekście pomiarów geometrycznych bezstykowych jak i stykowych, gdyż jakość powierzchni istotnie wpływa na wiarygodność uzyskiwanych wyników. Wyniki badań zostały opublikowane w [141, 142].

Badane gwinty wykonano na maszynie Mori Seiki NL2500. Wykorzystano półfabrykat w formie wałka z materiału Inconel 718, o długości 340 mm i średnicy zewnętrznej o wymiarze 53 mm, stanowiącej jednocześnie średnicę zewnętrzną gwintów. Wykonano gwinty w trzech rodzajach zarysów stosowanych w przemyśle lotniczym: trójkątny - UNJ, trapezowy symetryczny - ACME oraz trapezowy niesymetryczny - BUTTRESS. Każdy z nich został nacięty dwukrotnie, raz z prędkością skrawania $v_c=17$ m/min, drugi $v_c=30$ m/min (wykonano łącznie 6 gwintów). Gwint za każdym razem toczono nową płytką, będącą nominalnym odwzorowaniem zarysu wrębu. Zastosowano strategię dosuwu wgłębnego promieniowego ze zmienną głębokością utrzymując stały przekrój warstwy skrawanej. Użyto cieczy chłodząco-smarującej Ecocool Global 10, o stężeniu 8% emulsji na bazie oleju mineralnego i 92% wody.

W celu ułatwienia interpretacji wyników, zdecydowano się na stosowanie określonego nazewnictwa dla poszczególnych powierzchni. Jako punkt odniesienia przyjęto gwint trapezowy niesymetryczny, którego zadaniem jest przenoszenie obciążeń w kierunku siły naporu na powierzchnię o mniejszym kącie - w tym przypadku 7° . Stronę obciążoną nazwano bokiem czynnym, a stronę nieobciążoną - bokiem biernym (rys. 4.1). Analogicznie postąpiono w przypadku pozostałych zarysów. Stronę w kierunku posuwu płytki określono jako bierną, a przeciwną stronę - jako czynną. Schematyczna reprezentacja obiektu testowego z opisanymi kątami boków dla każdego rodzaju gwintu przedstawiona jest na rys. 4.1.

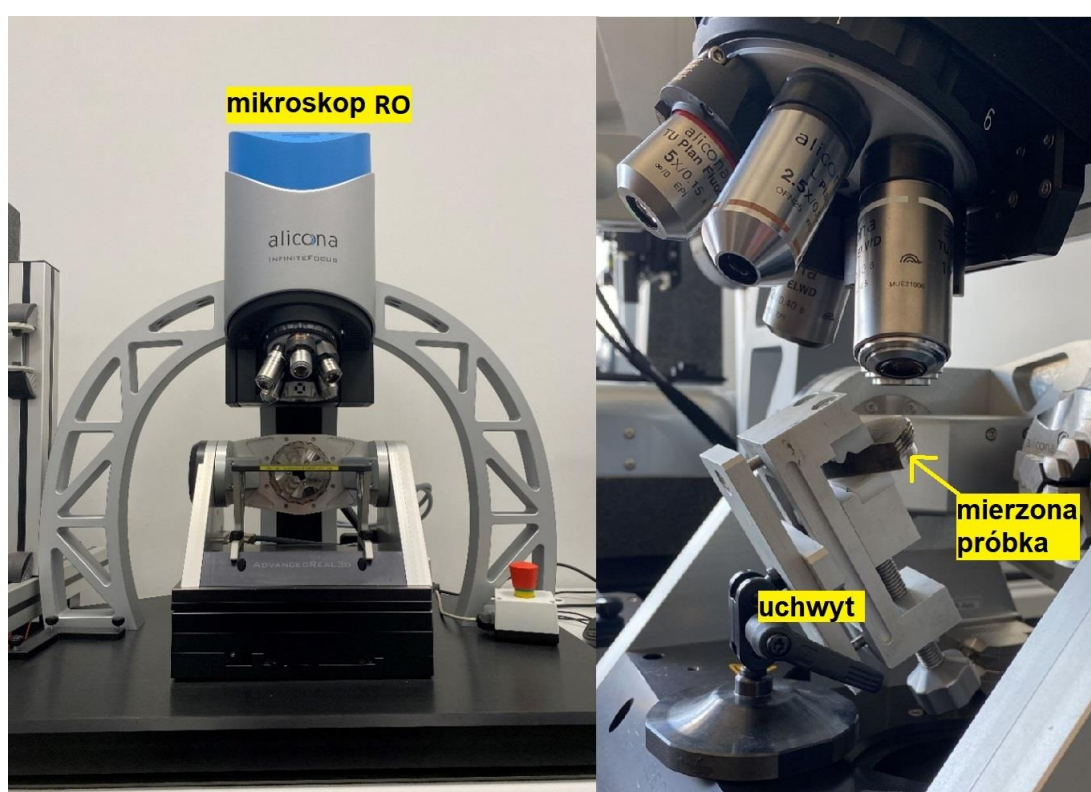


Rys. 4.1 Schematyczne przedstawienie obiektu badań [141].

Przygotowane gwinty zostały przecięte za pomocą elektrodrażarki, aby umożliwić dostęp do ocenianych powierzchni. Całkowita liczba ocenianych powierzchni bocznych wrębów wynosiła dwanaście (6 gwintów po dwa boki). Analizę topografii przeprowadzono w sposób

optyczny, korzystając z mikroskopu różnicowania ogniskowego InfiniteFocus G5, firmy Alicona (rys. 4.2).

Mikroskopia różnicowania ogniskowego to metoda optycznego obrazowania powierzchni, w której mikroskopowy układ optyczny przemieszcza się nad powierzchnią, a zmiany ostrości obserwowanego obrazu są rejestrowane w sposób ciągły. W celu określenia współrzędnej wysokości dla punktu na powierzchni obserwowanego przez dany piksel na matrycy, system korzysta z informacji o kontraście w porównaniu z sąsiednimi pikselami. W trakcie ruchu skanującego, w ustalonych interwałach przesunięcia (rozdzielczości pionowej), rejestrowane są informacje o wartości kontrastu w danym punkcie. Po zakończeniu pełnego ruchu skanującego, do tych wartości dopasowywana jest krzywa, określająca współrzędną maksymalnej wartości ostrości. W celu uzyskania precyzyjnych wyników pomiarów, zastosowano odpowiednie oświetlenie zgodnie z wprowadzoną procedurą [143].



Rys. 4.2 Stanowisko badawcze do pomiaru topografii powierzchni [141].

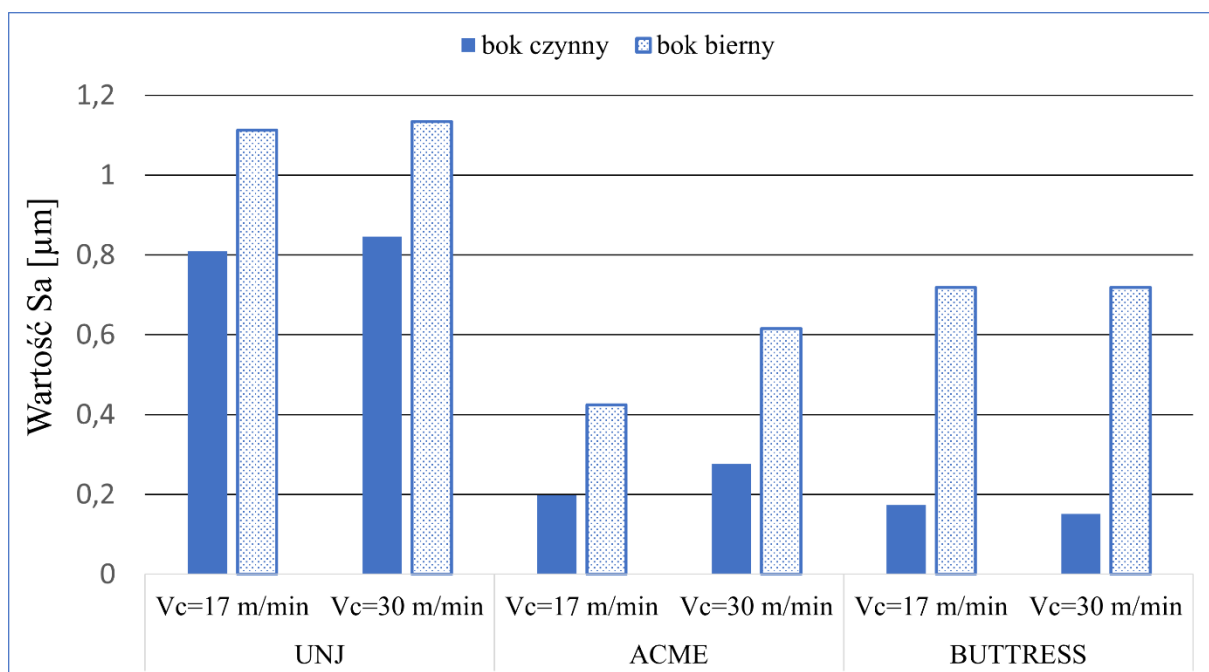
W przeprowadzonych pomiarach użyto obiektywu o powiększeniu 50x, co umożliwiło pomiar chropowatości o średniej arytmetycznej powyżej wartości $0,05 \mu\text{m}$. Wycięte fragmenty gwintów były stabilnie zamocowane w miniaturowym imadle na uchwycie z podstawką, co umożliwiło precyzyjne ustawienie poszczególnych próbek tak, aby mierzona powierzchnia była ustawiona prostopadle do osi optycznej. Obszar pomiarowy obejmował pełną wysokość boków czynnych i biernych. Zastosowano oświetlenie koaksjalne. Rozdzielczość pionowa wynosiła $0,041 \mu\text{m}$, natomiast pozioma $2 \mu\text{m}$. Kształt ocenianej powierzchni został odfiltrowany przy użyciu wielomianu trzeciego stopnia, a także zastosowano filtr Gaussowski o parametrach S : $2,5 \mu\text{m}$, L : $0,25 \text{ mm}$. Parametry przestrzenne topografii, takie jak S_a , S_q , S_{ku} , S_{sk} , S_p , S_v oraz S_z zostały określone zgodnie z normą ISO 25178-2 [144, 145].

4.1.2 Wyniki

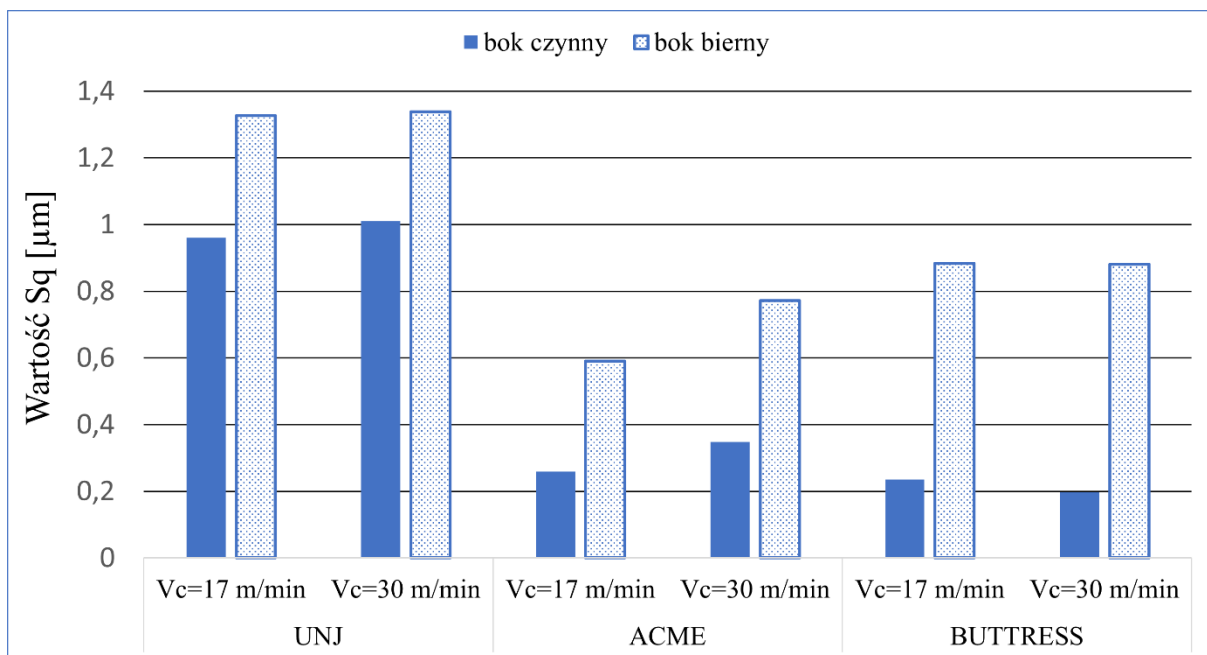
Wyniki pomiarów wybranych parametrów topografii zostały przedstawione w tabeli 4.1. Na potrzeby analizy uzyskanych rezultatów wartości te zostały zaprezentowane w postaci wykresów. Rysunek 4.3 przedstawia średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni od powierzchni średniej S_a , natomiast rysunek 4.4 średnie kwadratowe odchylenie powierzchni S_q .

Tab. 4.1 Uzyskane parametry topografii powierzchni zgodnie z ISO 25178-2 [144].

Typ gwintu	UNJ				ACME				BUTTRESS			
	17		30		17		30		17		30	
v_c [m/min]												
Strona	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>	<i>czynna</i>	<i>bierna</i>
S_a [μm]	0,810	1,113	0,846	1,134	0,199	0,425	0,277	0,615	0,174	0,719	0,151	0,718
S_q [μm]	0,960	1,327	1,011	1,338	0,259	0,590	0,348	0,772	0,235	0,884	0,198	0,881
S_{sk}	-0,460	-0,811	-0,372	0,072	-0,002	0,683	-0,237	-0,305	0,674	0,095	0,618	0,495
S_{ku}	2,238	4,237	3,068	2,079	5,581	4,072	3,340	3,148	6,498	2,742	5,283	2,590
S_p [μm]	2,176	4,119	3,485	4,114	2,611	2,888	1,466	3,485	1,800	3,719	1,547	3,263
S_v [μm]	2,511	7,064	4,282	2,781	1,272	1,842	1,712	2,506	1,318	5,256	0,970	2,121
S_z [μm]	4,687	11,183	7,767	6,895	3,883	4,729	3,178	5,990	3,118	8,975	2,517	5,384



Rys. 4.3 Wykres uzyskanych wartości parametru S_a .



Rys. 4.4 Wykres uzyskanych wartości parametru S_q .

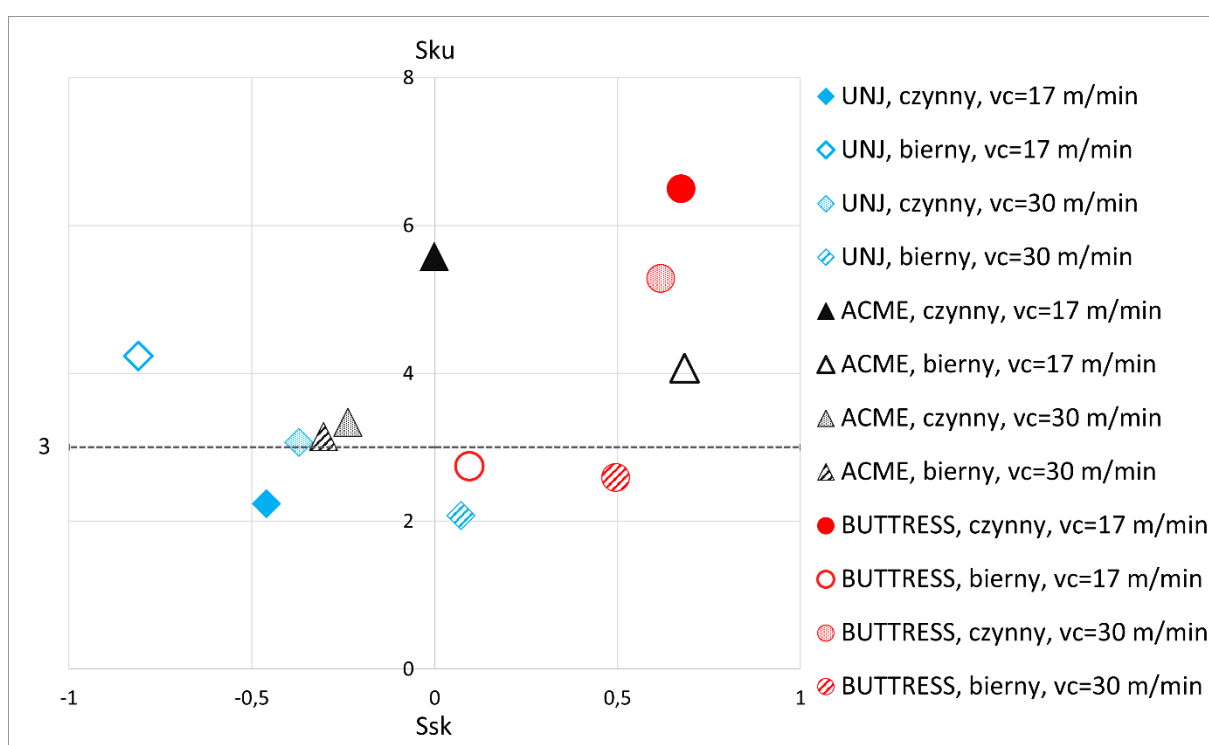
Analizując dane przedstawione na rys. 4.3 i rys. 4.4, zauważamy ich korelację, co jest naturalne, gdyż parametry te są wzajemnie powiązane ze względu na ich matematyczny opis. Wartości S_a i S_q na boku biernym były wyższe niż na boku czynnym dla każdego z gwintów. Ta zależność może wynikać z kierunku splotu wióra oraz utrudnionej ewakuacji wiórow z tego obszaru. Ponadto, na boku biernym występują większe siły skrawania, związane z naciskiem płytki. W odniesieniu do wpływu prędkości skrawania, nie zauważono istotnych różnic w uzyskanych wartościach S_a i S_q . Dla gwintów typu UNJ i ACME zwiększenie prędkości skrawania spowodowało niewielki wzrost wartości tych parametrów, natomiast dla gwintu BUTTRESS odnotowano minimalny spadek.

Zauważono również, że dla gwintów o zarysie trójkątnym wartości średnie chropowatości przestrzennej są wyższe niż dla gwintów trapezowych. Maksymalną wartość $S_a=1,134 \mu\text{m}$ uzyskano dla powierzchni biernej gwintu UNJ przy prędkości skrawania $v_c=30 \text{ m/min}$, natomiast minimalną $S_a=0,151 \mu\text{m}$ powierzchni czynnej gwintu BUTTRESS przy prędkości $v_c=30 \text{ m/min}$. Zastosowana strategia toczenia z dosuwem wgłębnym promieniowym bez przesunięcia w kierunku osiowym przy kolejnych przejściach może wpływać na uzyskane wyniki. Pomimo utrzymania stałej wartości warstwy skrawanej, naddatki w kolejnych przejściach są znacznie mniejsze przy mniejszych kątach zarysu, co sprawia, że kąt 7° został bardziej „wygładzony” niż kąt 30° .

Parametry S_a i S_q często są niewystarczające, gdyż nie przekazują informacji dotyczącej rozmieszczenia cech, takich jak wierzchołki, wgłębienia, czy doliny, a te elementy są istotne w kontekście zużycia współpracujących powierzchni [145]. Analiza bardziej szczegółowych danych dotyczących charakterystyki powierzchni staje się możliwa poprzez uwzględnienie parametrów S_{sk} , czyli współczynnika asymetrii powierzchni, który informuje, czy dominujące są wgłębienia ($S_{sk}<0$) czy wystające wierzchołki ($S_{sk}>0$). Natomiast parametr S_{ku} wyraża charakter nierówności i ich rozmieszczenie. W przypadku $S_{ku}=3$ mamy do czynienia z rozkładem normalnym Gaussa, co oznacza, że powierzchnia jest stosunkowo równa. Niższe wartości S_{ku} wskazują na płaską powierzchnię z łagodnymi nierównościami, natomiast $S_{ku}>3$

wskazuje na obszar zawierający ostre piki lub wgłębienia. Wartość kurtozy, czyli Sku , jest proporcjonalna do ilości defektów na powierzchni. Czasem te współczynniki są zestawiane w formie mapy Sku - Ssk [146].

Przy analizie uzyskanej mapy, zawierającej dane z dwunastu badanych powierzchni (rys. 4.5), odnotowano brak jednoznacznych zależności, jakie obserwowano w przypadku parametrów Sa i Sq . Jedynie cztery powierzchnie boczne wrębu, w tym dwie gwintu o zarysie trójkątnym oraz dwie trapezowego niesymetrycznego, charakteryzują się wartością $Sku < 3$. Wnioski mogą sugerować, że nierówności na powierzchni gwintów są na ogół nieregularne, a ich charakter, jak wskazują wartości Ssk , może zmieniać się od wgłębien do ostro wystających pików. Taki nieregularny rozkład może wynikać z dużych oporów toczenia, które mają wpływ na podwyższenie temperatury w obszarze skrawania, a także zwiększają skłonność do występowania drgań.



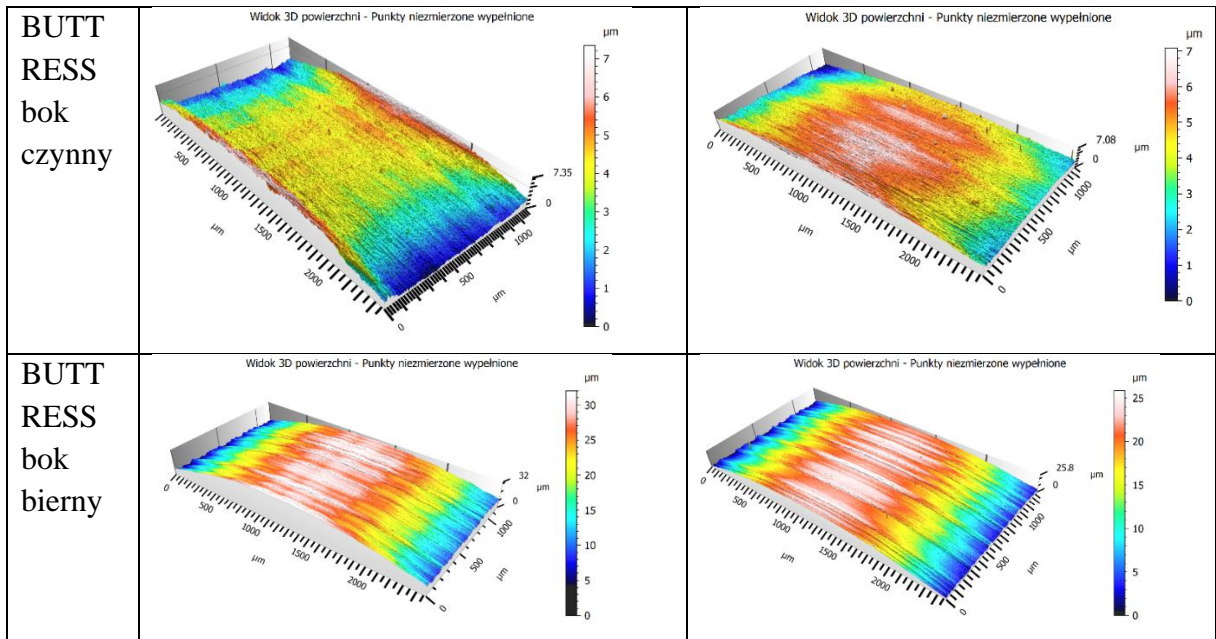
Rys. 4.5 Wykres uzyskanych wartości parametrów Ssk , Sku .

Pomimo wyższych wartości Sa i Sq dla gwintów UNJ, ich wskaźnik kurtozy jest niższy, niż dla gwintów trapezowych. To sugeruje, że nierówności na powierzchniach UNJ są bardziej przewidywalne i łagodniejsze. Dodatkowo, analizując wskaźnik Ssk dla gwintów trójkątnych, który w większości przypadków przyjmuje wartości ujemne lub bliskie zeru, można wnioskować, że defekty na powierzchniach UNJ przeważają w formie wgłębien, co może być korzystne z punktu widzenia odporności na ścieranie się materiału. W przypadku powierzchni gwintu BUTTRESS, wszystkie cztery charakteryzują się wartościami dodatnimi Ssk , zwłaszcza trzy z nich przekraczające 0,49. To świadczy o przewadze wystających wierzchołków, a skoro wartości Sku dla boków czynnych są znacznie powyżej 3, można przypuszczać, że te wierzchołki są ostre. Z perspektywy tribologicznej, takie ostre piki mogą ulec zniszczeniu z powodu dekohezji warstwy wierzchniej, co jest zjawiskiem niekorzystnym. W przypadku gwintów typu ACME, zaobserwowano, że para wartości Ssk - Sku uzyskuje korzystniejsze

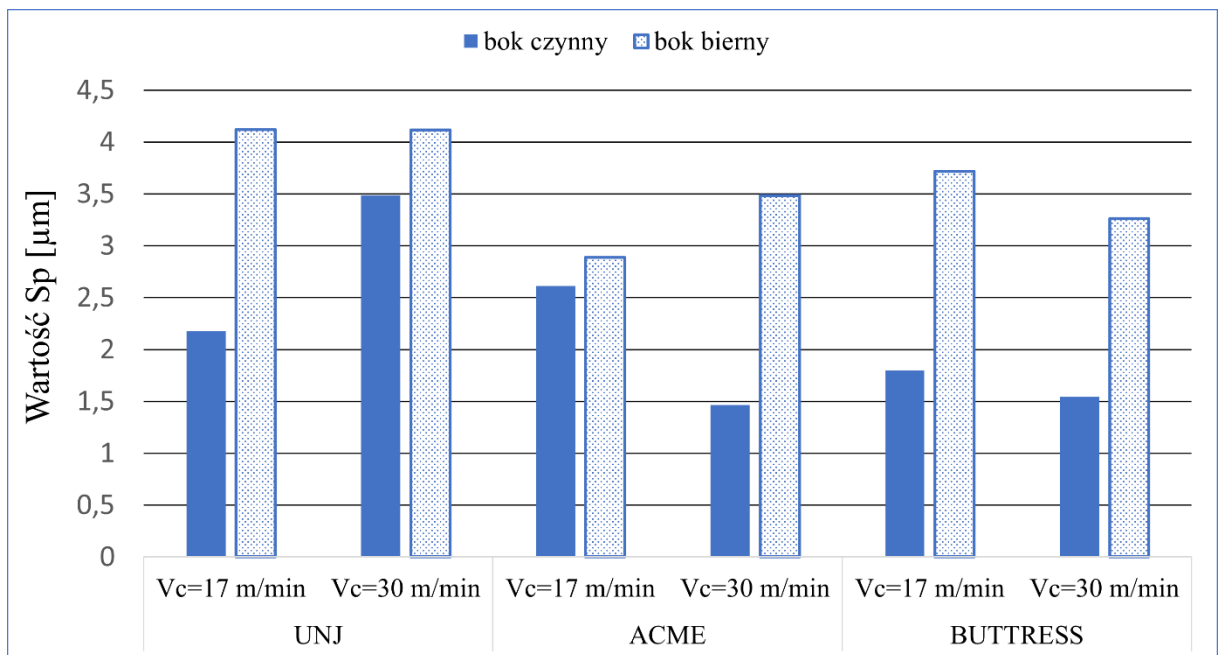
wyniki dla prędkości skrawania $v_c=30$ m/min, w porównaniu do $v_c=17$ m/min. W celu lepszego zobrazowania wyników w tabeli 4.2 zestawiono widoki topografii dla wszystkich badanych powierzchni.

Tab. 4.2 Widok topografii powierzchni badanych gwintów.

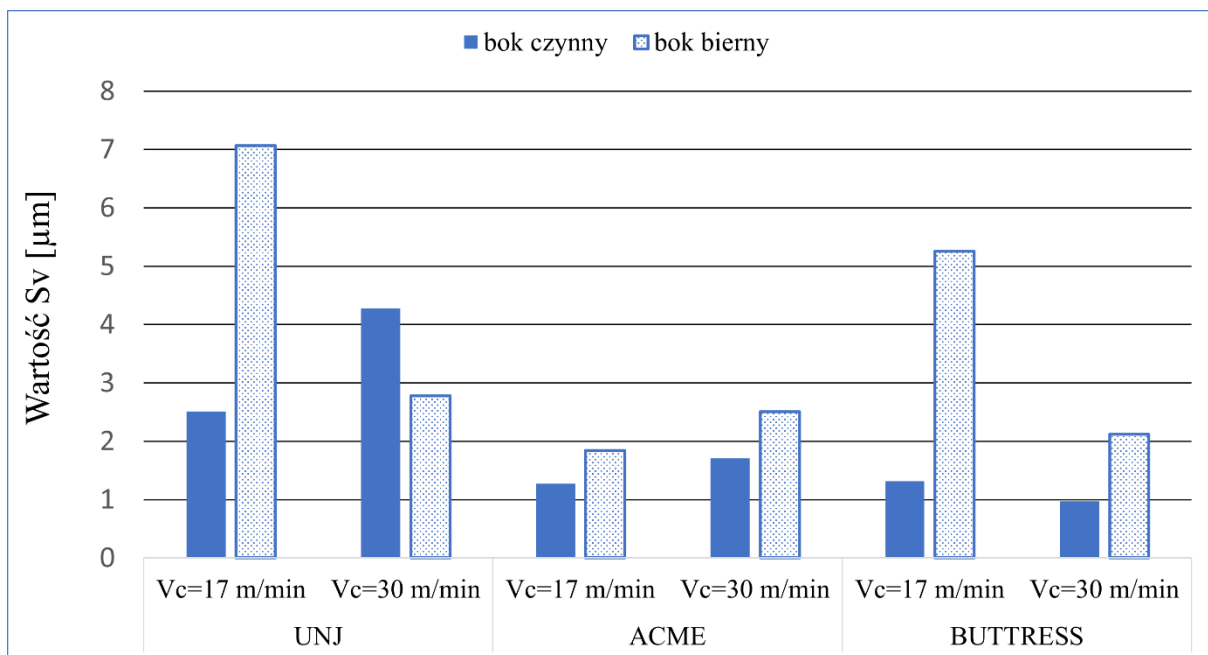
	$v_c=17$ m/min	$v_c=30$ m/min
UNJ bok czynny		
UNJ bok bierny		
ACME bok czynny		
ACME bok bierny		



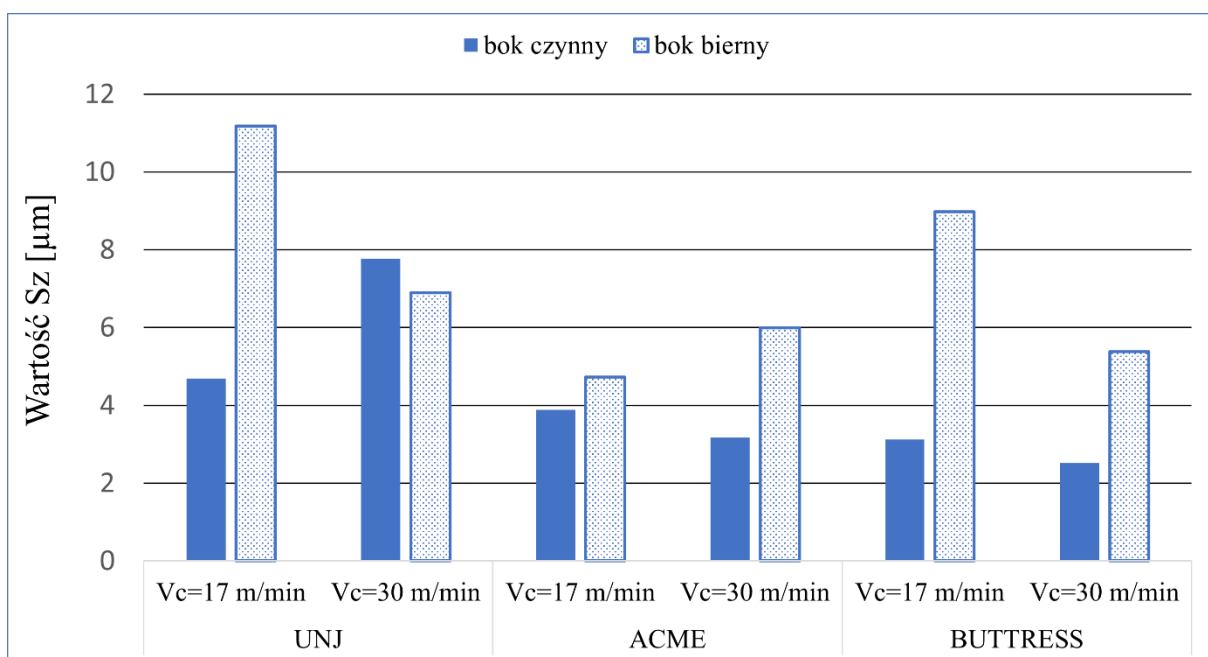
Ostatnią grupę parametrów analizy wysokościowej, dotyczących przestrzennej chropowatości, stanowią: Sp – największy wierzchołek, Sv – najgłębsze wgłębienie oraz Sz , będący sumą Sp i Sv , czyli odległością między najniższym, a najwyższym punktem. Zastosowanie parametru Sp odnosi się do powierzchni ślizgowych, natomiast Sv jest istotne, gdy głębokość dolin, wgłębień czy rowów wpływa na zatrzymywanie płynów na powierzchni, na przykład na powierzchniach powlekanych, wymagających smarowania. Wyniki pomiaru parametru Sp , Sv , Sz zostały przedstawione na wykresach rys. 4.6, rys. 4.7, rys. 4.8.



Rys. 4.6 Wykres uzyskanych wartości parametru Sp .



Rys. 4.7 Wykres uzyskanych wartości parametru Sv.



Rys. 4.8 Wykres uzyskanych wartości parametru Sz.

Na każdym analizowanym gwincie, powierzchnia biernej strony wykazywała wyższe wartości S_p niż powierzchnia czynna. Obserwuje się tutaj korelację z wartościami S_a oraz S_q . Maksymalny wierzchołek został zmierzony na powierzchni biernej gwintu o zarysie trójkątnym, zarówno dla prędkości skrawania $v_c=17$ m/min, jak i $v_c=30$ m/min, gdzie $S_p=4,11$ μm. Analizując wartości S_v rozkład wartości jest mniej przewidywalny w porównaniu do parametru S_p . Na trzech powierzchniach: UNJ, bok bierny, $v_c=17$ m/min; UNJ, bok czynny, $v_c=17$ m/min oraz BUTTRESS, bok bierny, $v_c=17$ m/min, wartości odbiegają od reszty. Maksymalne zarejestrowane wgłębienie wystąpiło, podobnie jak w przypadku parametru S_p , dla powierzchni gwintu o zarysie trójkątnym, bok bierny, $v_c=17$ m/min, i wynosi $S_v=7,06$. Pewną anomalię zaobserwowano dla tego zarysu dla prędkości skrawania $v_c=30$ m/min,

gdzie powierzchnia czynna ma większe wartości S_v od biernej. Wyniki te potwierdza parametr S_z , dla którego wspomniane powierzchnie osiągają także najwyższe wartości. Najniższe wartości S_z uzyskano dla boków czynnych gwintów BUTTRESS. Z uwzględnieniem mapy $Ssk-Sku$, wiadomo, że deformacje na tych powierzchniach są nierównomierne, a przeważające defekty to piki, niekorzystne z punktu widzenia zużycia powierzchni. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę wartości parametrów wysokościowych, można stwierdzić, że uzyskano satysfakcjonującą charakterystykę nierówności powierzchni.

4.1.3 Wnioski

Podsumowując, analiza topografii powierzchni stanowi złożony proces, a duża liczba parametrów może być czasem myląca. Badanie topografii powierzchni metodami optycznymi wymaga prowadzenia pomiarów prostopadle do ocenianej powierzchni. W przypadku gwintów ta powierzchnia nie jest bezpośrednio dostępna, co oznacza, że aby dokonać pomiaru topografii, element musi zostać zniszczony poprzez przecięcie, co z pewnością ogranicza powszechne stosowanie tej metody. Określenie ilościowego wpływu parametrów, takich jak S_a , S_q , S_p , S_v , S_z , Ssk i Sku , na jakość obrabianych części stanowi wyzwanie. Parametry te wpływają na kontakt powierzchniowy, smarowanie, tarcie, zużycie i zmęczenie [147]. Bez wątpienia, aby kompleksowo scharakteryzować badany obszar, najlepiej jest poddać ocenie zbiór kilku parametrów jednocześnie [143, 148]. Podjęto się analizy topografii powierzchni gwintów, co ze względu na złożony kształt powierzchni oraz duże obciążenia podczas skrawania, powodujące nieregularne nierówności, stwarza dodatkowe trudności. Niemniej jednak zidentyfikowano kilka istotnych zależności.

Powierzchnie obrabiane w kierunku toczenia płytki uzyskały gorszą jakość powierzchni w porównaniu do przeciwnych. To może wynikać z problemów z odprowadzaniem wiórów i nierównomiernego rozkładu sił skrawania. Znaczenie wyboru kierunku skrawania podczas toczenia gwintów zewnętrznych jest istotne z punktu widzenia wymagań jakościowych, szczególnie w kontekście obciążonej strony gwintu podczas pracy połączenia gwintowego.

Powierzchnie boczne gwintów o zarysie trójkątnym wykazały gorszą jakość powierzchni, zwłaszcza jeśli chodzi o parametry średnie S_a oraz S_q . To może być rezultatem strategii toczenia z dosuwem wglębny promieniowym, gdzie mniejsze kąty zarysu skutkują niższymi naddatkami, co prowadzi do „dogładzania” powierzchni.

Analiza mapy $Sku-Ssk$ potwierdza występowanie licznych nieregularnych nierówności na obrobionych powierzchniach. Przestrzenne nieregularności ostrych pików lub głębokich wgłębień nie zostały odzwierciedlone w wartościach S_a oraz S_q . Gwinty UNJ wykazują bardziej przewidywalny rozkład wzgórz i dolin, przeważając w nich wgłębienia, co jest korzystne z punktu widzenia zużycia.

Skrajnie wysokie wartości S_p , S_v oraz S_z występują na bokach biernych, co koreluje z wartościami S_a i S_q . Ten aspekt jest ważny przy wytwarzaniu gwintu, który będzie poddawany obciążeniom z powodu skłonności do większego zużycia powierzchni zawierającej ostre wierzchołki.

Porównując dwie prędkości skrawania, w większości przypadków uzyskano niższe wartości parametrów wysokościowych topografii dla $v_c=17$ m/min, jednak różnice nie były znaczące.

Podsumowując, analiza topografii powierzchni gwintów wymaga uwzględnienia wielu parametrów jednocześnie, a wyniki te mogą być kluczowe dla optymalizacji procesu toczenia

i poprawy jakości obrabianych części. Należy zwrócić uwagę, że ocena wizualna sugerowała, iż powierzchnia toczona przy wyższej prędkości skrawania wydaje się być gładsza. Ten wniosek jest niezmiernie istotny i podkreśla, że ocena oparta na zmysłach wzrokowych jest w dużym stopniu subiektywna. Wskazuje to na konieczność zachowania wyjątkowej ostrożności przy podejmowaniu decyzji dotyczących akceptacji spełnienia kryteriów jakościowych wytwarzanego produktu jedynie na podstawie oceny wizualnej.

Na podstawie badania można dojść do wniosku, iż mimo tego, że powierzchnie gwintów zostały wykonane z trudnoobrabialnego materiału Inconel 718 to jakość otrzymanej powierzchni była bardzo zadowalająca. Dzięki temu można założyć, że stan powierzchni nie powinien wpływać negatywnie na możliwość prawidłowego pomiaru wymiarów geometrycznych realizowanych stykowo czy też bezstykowo.

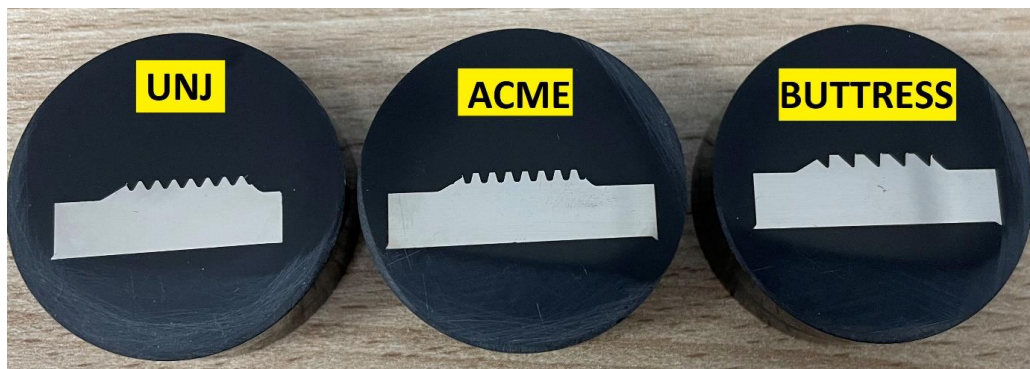
4.2 Badania metalograficzne gwintów zewnętrznych

4.2.1 Metodyka badań

W niniejszym badaniu podobnie jak w rozdziale 4.1 poddano ocenie jakość stanu warstwy wierzchniej gwintów wytworzonych w procesie toczenia. Celem prac było wykrycie potencjalnych wad, czy defektów, które mogłyby wpłynąć negatywnie na wybór metody pomiarowej. Rezultaty niniejszego badania zostały przedstawione [149] oraz opublikowane jako rozdział w monografii [150].

Badane gwinty zostały wytwarzane przy użyciu maszyny Mori Seiki NL2500. Do tego celu zastosowano półprodukt w postaci wałka wykonanego z materiału Inconel 718 o długości 340 mm i średnicy zewnętrznej wynoszącej 53 mm, stanowiącej średnicę zewnętrzną gwintu. Gwinty były toczone w trzech różnych zarysach zgodnych z praktykami przemysłu lotniczego: trójkątnym - UNJ, trapezowym symetrycznym - ACME oraz trapezowym asymetrycznym - BUTTRESS. Każdy z tych gwintów był nacinany przy prędkości skrawania $v_c=17$ m/min. W przypadku gwintu UNJ, płytka skrawająca miała nałożony promień, którego zadaniem było zaokrąglenie ostrej krawędzi pomiędzy średnicą wierzchołkową, a bokiem wrębu. W każdym przypadku zastosowano strategię dosuwu promieniowego o zmiennym stopniu wgłębienia, w celu utrzymania stałego przekroju warstwy podczas procesu skrawania. Prędkość skrawania została dobrana na podstawie wcześniejszych badań wstępnych przeprowadzonych podczas procesów produkcyjnych na wałach głównych silników lotniczych. Podczas procesu toczenia gwintu ostrze skrawające poruszało się wzdłuż osi Z, równoległe do osi wałka, na którym był wykonywany gwint. Kierunek ruchu skrawającego odbywał się od prawej do lewej strony w kierunku wrzeciona. Jako płyn chłodząco-smarujący zastosowano Ecocool Global 10 o stężeniu 8% emulsji olejowej i 92% wody.

Dla wykonanych gwintów przeprowadzono analizę mikroskopową. Dla każdej z próbek wykonano zgląd metalograficzny w kierunku poprzecznym do zarysu gwintowego. Próbkę przeznaczoną do badań zostały zatopione w żywicy Duracryl, a następnie dokładnie wypolerowane i poddane trawieniu odczynnikami Kallings. Proces przygotowania próbek, które przedstawiono na rysunku 4.9 zapewnił odpowiednią klarowność i dostęp do struktury materiału.

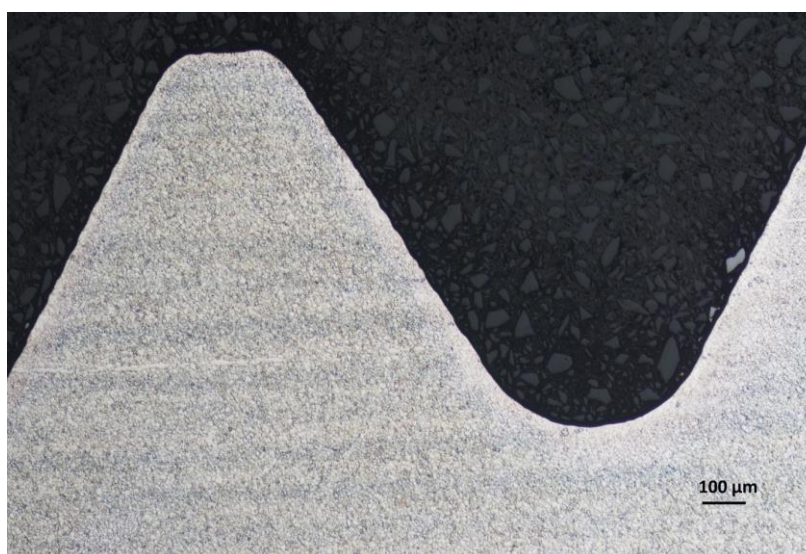


Rys. 4.9 Przygotowane do badań zglady metalograficzne w żywicy Duracryl.

Mikrofotografie zostały zarejestrowane przy użyciu mikroskopu Eclipse MA200 firmy Nikon. W trakcie analizy każdego gwintu uzyskano obrazy zarysu przy powiększeniu 50x. Kolejnym etapem było dokładne zbadanie prawej i lewej strony oraz dna wrębu przy wykorzystaniu powiększenia 200x oraz 500x. To precyzyjne badanie miało na celu uchwycenie wszelkich subtelnych zmian i cech charakterystycznych dla poszczególnych gwintów, co w rezultacie pozwoliło na dokładną ocenę jakości i właściwości materiału.

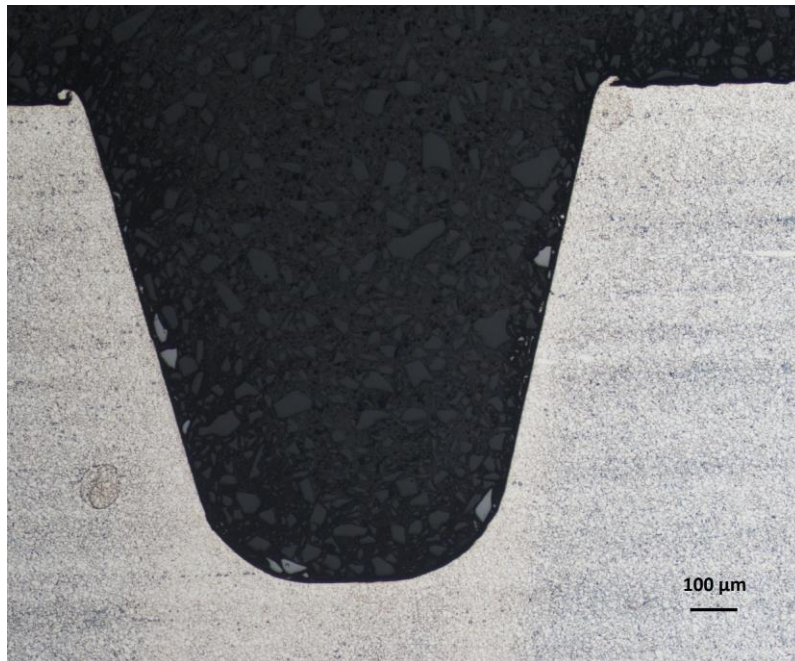
4.2.2 Wyniki

W niniejszym badaniu wzorowano się na rzeczywistych procesach produkcyjnych w związku z czym podczas toczenia próbek zastosowane zostały doświadczalnie sprawdzone narzędzia oraz parametry skrawania. Zgodnie z oczekiwaniami, analiza mikroskopowa powierzchni nie ujawniła istotnych deformacji ani mikropęknięć. Niemniej jednak, przeprowadzone badania dostarczyły szereg istotnych informacji. Na rysunku 4.10 zamieszczono obraz całego zarysu gwintu UNJ. Różnice w barwie wokół powierzchni wrębu wskazują na odmienne cechy strukturalne materiału w strefie przy powierzchni i w strefie materiału rodzimego. Ta naturalna zmienność wynika głównie z wpływu wysokiej temperatury oraz sił skrawania, które wywołują deformacje ziaren. Warto zauważyć, że obszar ten ujawnia trudne do wychwycenia szczegóły dotyczące wpływu procesu toczenia na strukturę metalograficzną, co stanowi kluczowy element analizy stanu materiału i jakości wykonanych gwintów.

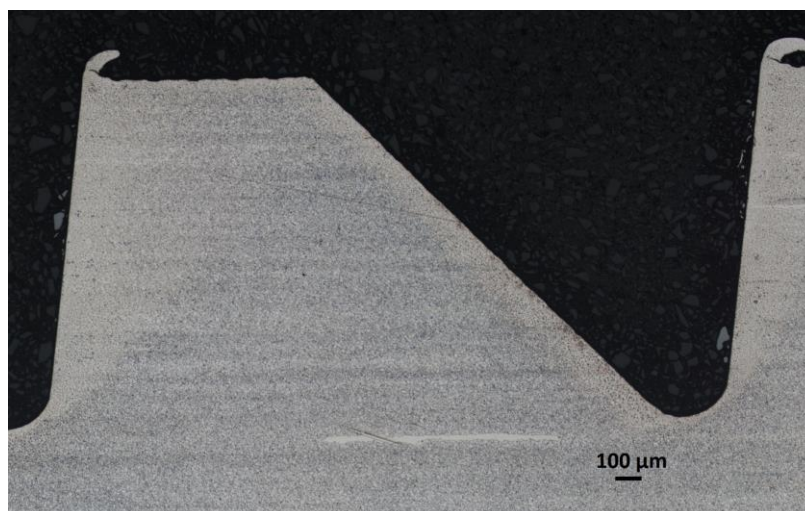


Rys. 4.10 Widok gwintu UNJ przy powiększeniu 50x.

Również w dwóch kolejnych rodzajach gwintów, tj. ACME (rys. 4.11) i BUTTRESS (rys. 4.12), można zauważyć podobną sytuację. W przypadku obu symetrycznych gwintów, zarówno trójkątnego, jak i trapezowego, największe zmiany występują w okolicach dna wrębu. Jednakże, w przypadku gwintu trapezowego niesymetrycznego, obserwuje się odmienny przebieg zmian. Bardziej znaczące mają miejsce w pobliżu powierzchni wrębu po prawej stronie. Gwint ten charakteryzuje się kątami boków 45° i 7° . Przy zastosowaniu strategii toczenia z dosuwem wgłębnym w kierunku promieniowym, obszar ten, ze względu na niewielkie naddatki w kolejnych przejściach, staje się podatny na zjawisko ślizgania się płytki skrawającej oraz generowanie dużych sił osiowych.



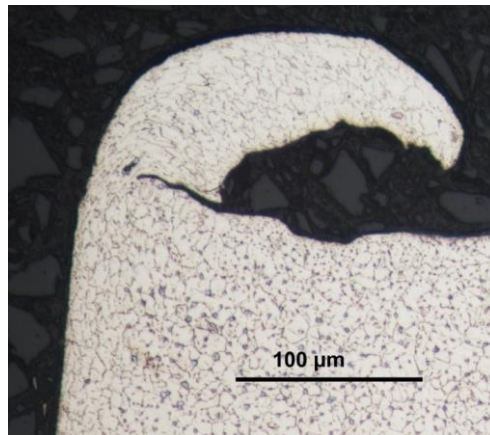
Rys. 4.11 Widok gwintu ACME przy powiększeniu 50x.



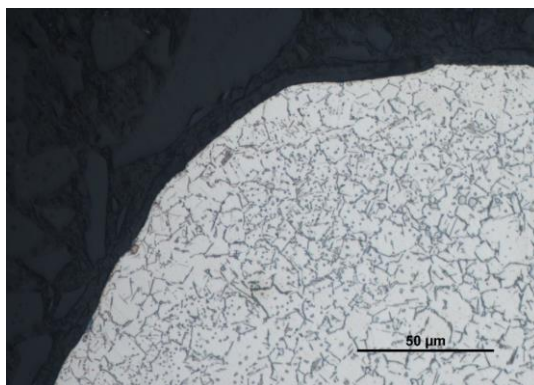
Rys. 4.12 Widok gwintu BUTTRESS przy powiększeniu 50x.

Analizując przedstawione zdjęcia, szczególną uwagę należy zwrócić na wierzchołek gwintu. W przypadku gwintów trapezowych zauważamy wyraźne występowanie wypływek materiału w obszarze przecięcia powierzchni bocznej wrębu ze średnicą wierzchołkową.

Średnica ta została wcześniej uformowana za pomocą standardowej płytki o kształcie „V”. Podczas toczenia gwintu, fragment obrabianego materiału został „wypchnięty” na zewnątrz, co jest dobrze zobrazowane na rysunku (rys. 4.13), szczególnie przy analizie orientacji ziaren metalu. Obserwowana nieciągłość dodatkowo wskazuje, że materiał ten nie jest jednorodny. Prawdopodobnie niewielka ingerencja na stanowisku ślusarskim mogłaby szybko usunąć ten nadmiar materiału. Zupełnie odmienny obraz prezentuje obszar w gwincie trójkątnym. Dzięki użyciu płytki z nałożonym promieniem, krawędź ta została zaokrąglona podczas procesu toczenia i praktycznie nie wymaga dodatkowego działania ślusarskiego (rys. 4.14). Ta informacja ma istotne znaczenie w kontekście pomiarów wykonanego gwintu. Widoczne wypłynięcie znacznie utrudnia pomiar przy użyciu sprawdzianu, dlatego po toczeniu gwintów często stosuje się różne rodzaje szczotek z materiałów ściernych, aby usunąć niepożądany nadmiar materiału. W przypadku gwintów trapezowych można także używać płytek o profilu zakończonym promieniem, ale trzeba pamiętać, że generują one znacznie większe opory skrawania niż w przypadku gwintów o kształcie trójkątnym.



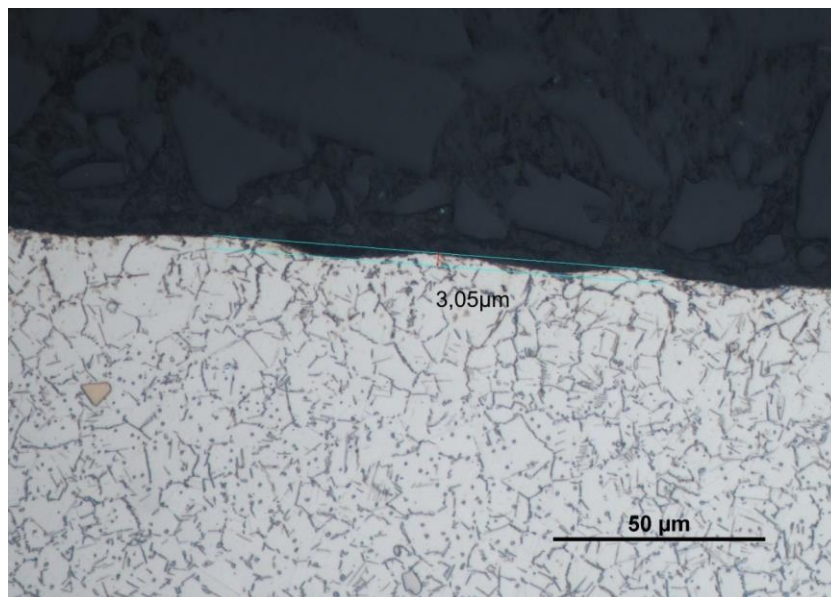
Rys. 4.13 Widok struktury metalograficznej w obszarze wierzchołka gwintu BUTTRESS (powiększenie 200x).



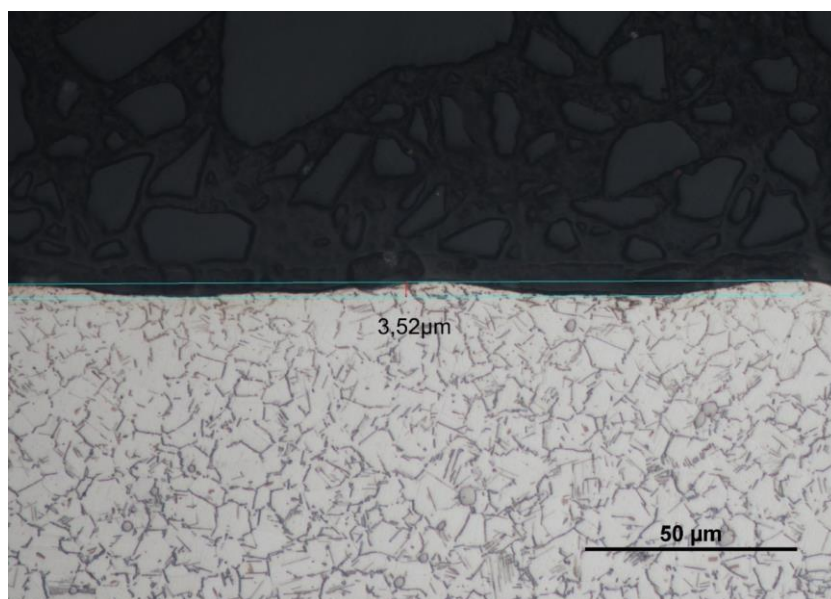
Rys. 4.14 Widok struktury metalograficznej w obszarze wierzchołka gwintu UNJ (powiększenie 500x).

Analizując powierzchnie boczne wrębu, nie stwierdzono znaczących deformacji ziaren. Zauważalne są natomiast, w niektórych obszarach niewielkie odkształcenia o wielkości około 3 μm , obserwowane pod mikroskopem. Występują one zarówno po lewej (rys. 4.15), jak i po prawej stronie gwintu o kształcie trójkątnym, a także po lewej stronie gwintu BUTTRESS (rys. 4.16). Boki te charakteryzują się większymi kątami zarysu, odpowiednio 30° dla UNJ i 45° dla BUTTRESS. Widoczne nierówności mogą wynikać z większych sił promieniowych, co skutkuje tendencją do drgań w obrabianej części. Okresowe zmiany i zmienne odległości

między poszczególnymi zagłębieniami można powiązać też z przyjętą strategią toczenia. Aby utrzymać stały przekrój warstwy skrawanej, wartość dosuwu w kierunku promieniowym zmniejszała się stopniowo w miarę zbliżania się do dna wrębu.

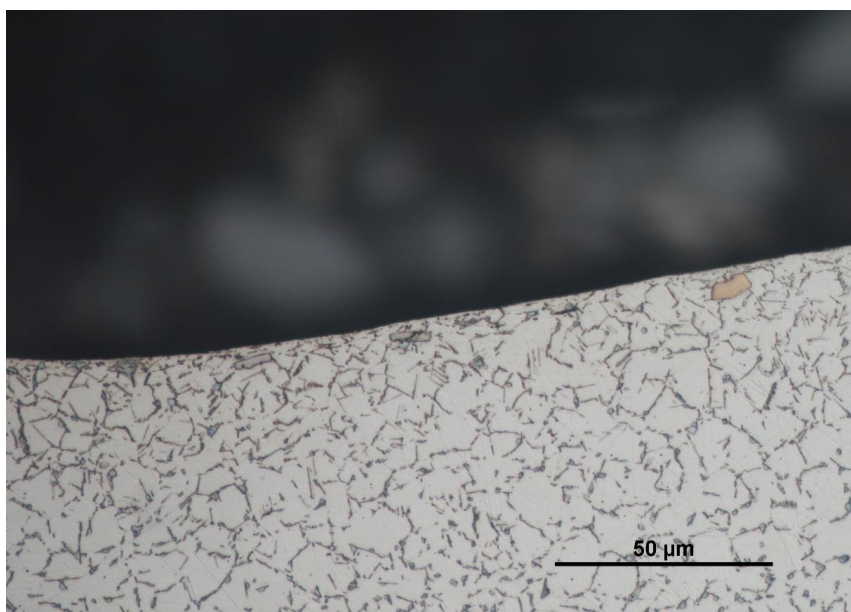


Rys. 4.15 Widok lewej strony gwintu UNJ (powiększenie 500x).



Rys. 4.16 Widok lewej strony gwintu BUTTRESS (powiększenie 500x).

Z ogólnego zdjęcia całego profilu gwintu wynikało, iż największe zmiany w strukturze ziaren wystąpiły w pobliżu dna wrębu. Analizując obraz wykonany w pobliżu promienia dna wrębu gwintu ACME (rys. 4.17) nie zauważono jednak niepokojących deformacji. Dodatkowym korzystnym aspektem jest fakt, że badanie na żadnym z gwintów nie spowodowało powstania niepożądanej białej warstwy, która zazwyczaj wiąże się z materiałem Inconel 718, jak to zostało podkreślone we wcześniejszych badaniach [151, 152].



Rys. 4.17 Widok wrębu gwintu ACME (powiększenie 500x).

4.2.3 Wnioski

Badania niszczące, chociaż związane z dużymi kosztami wynikającymi z konieczności zniszczenia wyprodukowanej części, są niezbędnym elementem kontroli jakości komponentów wytwarzanych w przemyśle lotniczym. Istnieje szereg potencjalnych wad materiałowych, które są niemożliwe do wykrycia przy obserwacji powierzchni zewnętrznej, a ryzyko ich wystąpienia może prowadzić do dramatycznych konsekwencji dla eksploatacji produkowanych części. Przedstawiono wyniki badań metalograficznych trzech rodzajów gwintów zewnętrznych wytoczonych z materiału Inconel 718. Analiza wyników pozwala na wyciągnięcie kilku wniosków.

Temperatura skrawania oraz siły działające podczas toczenia wpłynęły na zmiany w strukturze materiału rodzimego, przy czym zmiany te były największe w obszarze dna wrębu dla gwintów UNJ i ACME oraz dla gwintu BUTTRESS w obszarze boku o kącie 7° .

Na obszarach o dużych kątach zarysu występują istotne siły promieniowe, co skutkuje odkształceniami na powierzchni bocznej gwintu. Mimo pojawienia się kilku niekorzystnych cech, ogólna jakość osiągniętej powierzchni była satysfakcjonująca, bez mikropęknięć czy powstawania niechcianej białej warstwy.

Zastosowanie płytek z profilem zakończonym promieniem eliminuje konieczność przeprowadzania zabiegu ślusarskiego, a także ułatwia kontrolę jakości gwintu za pomocą sprawdzianu. Mikrofotografia przedstawiająca wierzchołek gwintu trapezowego w klarowny sposób przedstawia wypływkę materiału, która powstaje podczas toczenia gwintu. Próba kontroli gwintu sprawdzianem na obrabiarce kończy się wówczas najczęściej oderwaniem zadzioru materiału i zablokowaniem sprawdzianu. Może to doprowadzić do błędnej oceny wykonania gwintu lub też zniszczenia sprawdzianu. Jest to także cenny wniosek z punktu widzenia planowanego wdrożenia pomiarów na obrabiarce CNC, gdyż tego typu wypływki mogą znacząco wpływać na wartość otrzymanych wyników przy pomiarze optycznym jak i także ograniczać możliwości pomiaru stykowego np. sondą pomiarową. Biorąc pod uwagę jednak stan warstwy wierzchniej, badanie nie wykazało negatywnych cech, które mogłyby zakłócić wyniki pomiaru cech geometrycznych gwintów.

4.3 Badania porównawcze cech geometrycznych gwintów wybranymi metodami

4.3.1 Metodyka badań

Dokonano wstępnych badań porównawczych wybranych cech gwintów zewnętrznych. Celem działania było zweryfikowanie możliwości pomiaru średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego w sposób automatyczny. Badanie przeprowadzono dla trzech próbek z naciętymi gwintami zewnętrznymi, o wymiarach calowych. Każda z próbek miała inny zarys gwintu: trójkątny (UNJ), trapezowy symetryczny (ACME) oraz trapezowy niesymetryczny (BUTTRESS). Tolerancje wymiarowe badanych elementów zostały określone na podstawie amerykańskich norm ANSI. Wymiary nominalne przeliczone na jednostki metryczne przedstawiono w tabeli 4.3. Wyniki zawarte w tym rozdziale wraz z podsumowaniem przeglądu literatury dotyczącym metod pomiarowych gwintów zewnętrznych zostały opublikowane w [94, 153].

Tab. 4.3 Wymiary nominalne mierzonych gwintów

	2.750-16 UNJ-3A	2.875-16 ACME-3A	4.5590-12 BUTT-3A
Liczba zwojów na cal	16	16	12
Skok [mm]	1,5875	1,5875	2,11
Średnica podziałowa [mm]	68,767 ^{±0,05}	71,878 ^{±0,08}	114,64 ^{±0,07}
Średnica wałeczka pomiarowego [mm]	0,914	0,914	1,093
M_p – średnica określona poprzez wałeczki [mm]	70,134 ^{±0,05}	73,373 ^{±0,08}	116,125 ^{±0,07}
Średnica zewnętrzna [mm]	69,73 ^{±0,11}	70,92 ^{±0,08}	115,8 ^{±0,07}
Średnica wewnętrzna [mm]	67,916 ^{±0,1}	72,96 ^{±0,06}	113,276 max
Promień dna wrębu [mm]	0,263 ^{±0,024}	0,263 ^{±0,024}	0,394 ^{±0,037}
Kąty boków	30 ^{°±0°31'}	14,5 ^{°±45'59''}	3°/30°

Na każdym gwincie zmierzone zostały dwie cechy, średnica wierzchołkowa oraz średnica podziałowa. W pierwszym kroku wykonane zostały pomiary manualne. Dla średnicy zewnętrznej w przypadku gwintów UNJ oraz ACME zastosowano mikrometr cyfrowy firmy Mitutoyo o zakresie pomiarowym 50-75 mm, natomiast dla gwintu typu BUTTRESS użyto przyrządu tego samego producenta o zakresie 100-125 mm. Średnica podziałowa została zmierzona przy użyciu metody trójwałeczkowej. Wykorzystano wałeczki o średnicy $\varnothing=0,914$ mm (gwint UNJ, AMCE) oraz $\varnothing=1,093$ mm (BUTTRESS). Wymiar pośredni M_p uzyskano przy pomocy transametry, ustawiając przeliczony wymiar nominalny na podstawie płytek wzorcowych. Do badania wykorzystane zostały transametry firmy Mitutoyo 50-75 mm (gwint UNJ, ACME) oraz Steinmeyer 100-125 mm (BUTTRESS). Pomiary wykonano trzykrotnie dla każdego elementu, w miejscach rozmieszczonych na obwodzie detalu co 60°.

Optymalną średnicę wałeczków pomiarowych (stykających się z bokami wrębu idealnie na średnicy podziałowej) dla gwintów symetrycznych można wyznaczyć z wzoru (4.1) [3]:

$$d_o = \frac{P}{2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.1)$$

gdzie:

d_o – średnica optymalna wałeczków pomiarowych,

P – podziałka,

α – kąt gwintu.

Dla gwintu 2.750-16 UNJ-3A będzie to zatem:

$$d_o = \frac{1,5875}{2 \cos \left(\frac{60^\circ}{2} \right)} = 0,9165 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Dla gwintu 2.875-16 ACME-3A otrzymamy:

$$d_o = \frac{1,5875}{2 \cos \left(\frac{29^\circ}{2} \right)} = 0,8198 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Inną postać ma wzór na optymalną średnicę wałeczków dla gwintu niesymetrycznego. W tym przypadku wartość optymalnej średnicy wałeczka pomiarowego jest różna dla każdego z kątów, gdyż ze względu na dwa różne kąty styka się on z powierzchniami bocznymi wrębu na innych wysokościach. Wzór ma postać (4.4, 4.5) [3]:

$$d_{o1} = \frac{P \cos \beta}{2 \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad (4.4)$$

$$d_{o2} = \frac{P \cos \gamma}{2 \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \quad (4.5)$$

gdzie:

d_{o1}, d_{o2} – średnica optymalna wałeczków pomiarowych,

P – podziałka,

$\beta; \gamma$ – kąty boków,

$\alpha = \beta + \gamma$ – kąt gwintu.

Otrzymujemy zatem:

$$d_{o1} = \frac{2,11 \cdot \cos(30^\circ)}{2 \cos^2 \left(\frac{33^\circ}{2} \right)} = 0,994 \text{ mm} \quad (4.6)$$

$$d_{02} = \frac{2,11 \cdot \cos(3^\circ)}{2 \cos^2\left(\frac{33^\circ}{2}\right)} = 1,146 \text{ mm} \quad (4.7)$$

W praktyce wałeczki dobierane są z szeregu dostępnych średnic, biorąc pod uwagę wymiar najbliższy średnicy optymalnej.

Oczekiwaną wartość średnicy pomiarowej M_p uzyskanej za pomocą transametry możemy obliczyć z wzoru (4.8), będącym przekształceniem wzoru (2.2):

$$M_p = d_2 + d_w \left[1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] + \frac{P}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + p_1 + p_2 \quad (4.8)$$

gdzie:

d_2 – średnica podziałowa,

d_w – średnica wałeczków,

α – kąt gwintu,

P – podziałka,

p_1 – poprawka na skrzywienie wałeczków w bruzdach gwintu,

p_2 – poprawka na odkształcenie sprężyste pod wpływem nacisku pomiarowego wałeczków i gwintu w miejscach styku.

Dla gwintu 2.750-16 UNJ-3A będzie to zatem bez uwzględnienia poprawek:

$$M_p = 68,767 + 0,914 \left[1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \right] - \frac{1,5875}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{60^\circ}{2}\right) = 70,134 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Dla gwintu 2.875-16 ACME-3A natomiast:

$$M_p = 71,878 + 0,914 \left[1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{29^\circ}{2}\right)} \right] - \frac{1,5875}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{29^\circ}{2}\right) = 73,373 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Aby wyznaczyć wartości poprawek można zastosować następujące wzory (4.11, 4.12) [3]:

$$p_1 = -\frac{1}{2} \frac{P^2 d_w \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi^2 (M_p - d_w)^2 \left(1 - \frac{d_w \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{M_p - d_w} \right)} \quad (4.11)$$

$$p_2 = \sqrt[3]{Q^2} \left(\frac{c_2}{\sqrt[12]{d_w} \cdot \sqrt[4]{d_2}} + \frac{c_3}{\sqrt[5]{d_w^2} \cdot \sqrt[6]{d_2}} \right) \quad (4.12)$$

gdzie:

c_2, c_3 - współczynniki zależne od rodzaju gwintu,

dla UNJ $c_2=1,27, c_3=0,13$

dla ACME $c_2=2,94, c_3=0$

Q – nacisk pomiarowy,

Dla gwintu 2.750-16 UNJ-3A wartości poprawek wyniosą:

$p_1=-0,04 \mu\text{m}$

$p_2=1,50 \mu\text{m}$

Dla gwintu 2.875-16 ACME-3A:

$p_1=-0,08 \mu\text{m}$

$p_2=2,97 \mu\text{m}$

Dla gwintu niesymetrycznego wzór na średnicę zmierzoną przyjmuje postać (4.13) [3]:

$$M_p = d_2 + d_w \left[1 + \frac{\cos(\varepsilon)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] - P \frac{\cos\beta * \cos\gamma}{\sin\alpha} + p_1 + p_2 \quad (4.13)$$

gdzie:

d_2 – średnica podziałowa,

d_w – średnica wałeczków,

$\alpha=\beta+\gamma$ – kąt gwintu,

$\beta; \gamma$ – kąty boków,

$\varepsilon = (\beta+\gamma)/2$

P – podziałka,

p_1 – poprawka na skręcenie wałeczków w bruzdach gwintu,

p_2 – poprawka na odkształcenie sprężyste pod wpływem nacisku pomiarowego wałeczków i gwintu w miejscach styku.

Dla omawianego gwintu 4.5590-12 BUTT-3A będzie to więc:

$$M_p = 114,64 + 1,093 \left[1 + \frac{\cos\left(\frac{30^\circ - 3^\circ}{2}\right)}{\sin\left(\frac{33^\circ}{2}\right)} \right] - 2,11 \frac{\cos 30^\circ * \cos 3^\circ}{\sin 33^\circ} = 116,125 \text{ mm} \quad (4.14)$$

Do powyższych wartości dodawane są poprawki ze względu na skręcenie wałeczków spowodowane linią śrubową gwintu oraz ze względu na odkształcenia sprężyste wałeczków i boków gwintu. Oblicza się je za pomocą wzorów (4.15, 4.16) [3]:

$$p_1 = - \frac{P^2 d_w \cos^2 \beta \cos^2 \gamma \cos \varepsilon}{\pi^2 (M_p - d_w)^2 \sin \alpha \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(1 - \frac{d_w \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos \varepsilon}{M_p - d_w} \right)} \quad (4.15)$$

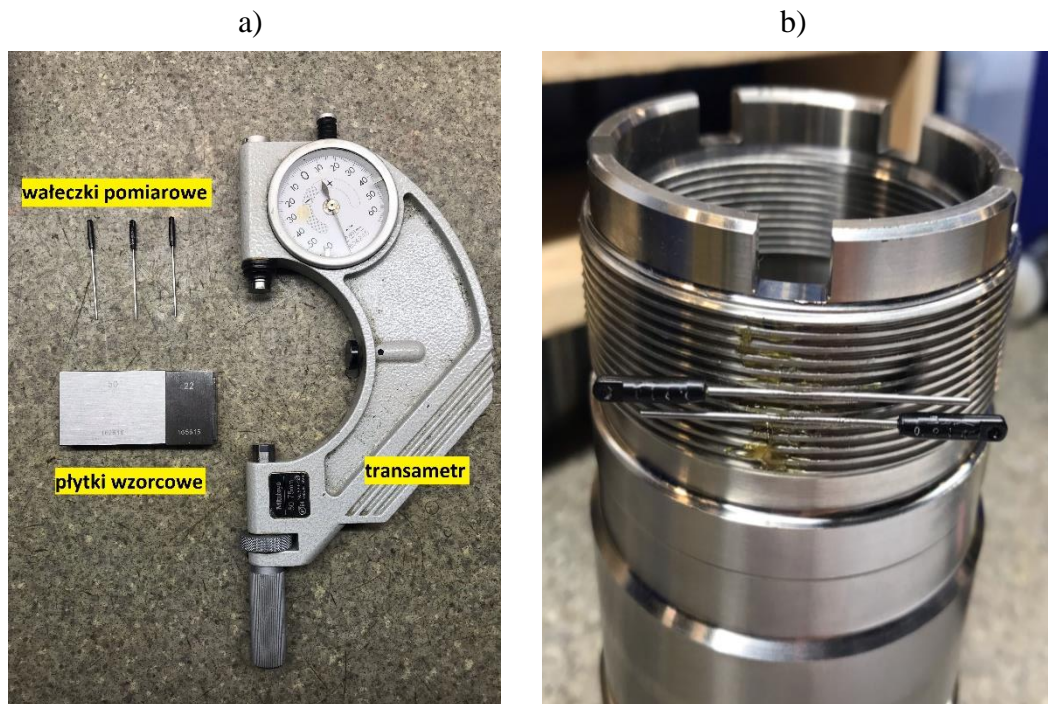
$$p_2 = \frac{0,260}{\sqrt[12]{d_w}} \cdot \frac{\sqrt[3]{Q^2}}{\sqrt[4]{d_2}} \mu m \quad (4.16)$$

Podstawiając dane do wzorów otrzymujemy:

$$p_1 = 0,0007 \mu m$$

$$p_2 = 0,23 \mu m$$

Widok zestawienia przyrządów do pomiaru średnicy podziałowej metodą trójwałeczkową dla gwintu ACME przedstawiono na obrazku (rys. 4.18).



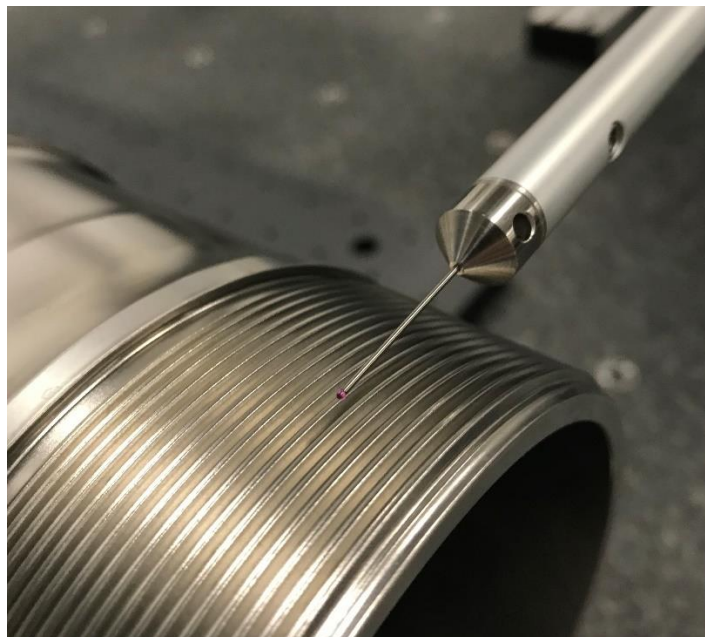
Rys. 4.18 Widok a) przyrządów pomiarowych dla gwintu ACME, b) waleczków umieszczonych w gwincie ACME.

W celach porównawczych dokonano pomiarów tych samych cech przy pomocy urządzeń automatycznych. Gwinty symetryczne zmierzono optycznie urządzeniem do pomiaru elementów obrotowo-symetrycznych firmy Jenoptik - Opticlina C1214 (rys. 4.19). Wymiary mierzono w 10 przekrojach, równomiernie rozmieszczonych na całym obwodzie. Jako wynik podano wartości średniej arytmetycznej oraz rozrzut. W przypadku gwintu trapezowego niesymetrycznego na tym urządzeniu nie można obliczyć średnicy podziałowej ze względu na silne przesłonięcie boków profilu gwintu na obrazie profilu. Z racji ograniczeń w dedykowanym oprogramowaniu, gwint niesymetryczny zmierzono inną metodą. W tym celu wykorzystano współrzędnościową maszynę pomiarową firmy Zeiss ACCURA II 12/30/10. Pomiar odbywał się z użyciem trzpienia z końcówką rubinową o średnicy $\varnothing=1$ mm (rys. 4.20). Średnicę podziałową zmierzono skanując w jednym przekroju wręb na pełnym obwodzie wałka. Wykorzystano funkcję samocentrowania końcówki dostępną w oprogramowaniu Calypso [74]. Średnica zewnętrzna została sprawdzona również przy pomocy skanowania

wierzchołka po pełnym obwodzie. W obu przypadkach wyznaczono wartości: minimalną, maksymalną, a także średnią arytmetyczną.



Rys. 4.19 Widok stanowiska Opticline C1214.



Rys. 4.20 Widok podczas pozycjonowania sondy do pomiaru gwintu BUTTRESS na CMM.

4.3.2 Wyniki

W tabeli 4.4 przedstawione zostały uzyskane wyniki pomiarów.

Tab. 4.4 Wyniki pomiarów mierzonych gwintów.

		2.750-16 UNJ-3A	2.875-16 ACME-3A	4.5590-12 BUTT-3A
Średnica zewnętrzna [mm] - mikrometr	średnia	69,753	72,957	115,793
	min.	69,752	72,955	115,784
	max.	69,753	72,961	115,805
Średnica zewnętrzna [mm] - Opticline	średnia	69,756	72,954	-
	min.	69,754	72,951	
	max.	69,757	72,959	
Średnica zewnętrzna [mm] - CMM	średnia			115,796
	min.	-	-	115,781
	max.			115,816
Średnica podziałowa [mm] - metoda trójwałczkowa	średnia	68,773	71,866	114,632
	min.	68,771	71,863	114,626
	max.	68,775	71,870	114,640
Średnica podziałowa [mm] - Opticline	średnia	68,786	71,877	-
	min.	68,783	71,873	
	max.	68,788	71,882	
Średnica podziałowa [mm] - CMM	średnia			114,647
	min.	-	-	114,631
	max.			114,655

Każda z mierzonych średnic została wykonana zgodnie z tolerancją. Porównując wyniki pomiarów średnic zewnętrznych dla trzech rodzajów gwintów zauważono, że maksymalna różnica pomiędzy metodą ręczną i automatyczną wynosi 3 μm , co potwierdza zasadność zamienności obu metod. W przypadku badań porównawczych średnic podziałowych, zarówno dla Opticline, jak i CMM, uzyskano większe różnice, sięgające maksymalnie 15 μm . Pomiar ten jest pomiarem pośrednim, obarczonym większym błędem. Co więcej, pomiar ręczny był ograniczony do trzech wyników, podczas gdy średnie wyniki uzyskane automatycznie obejmowały znacznie więcej punktów. Zauważono, że zastosowana metoda optyczna również nie zapewnia pełnej dostępności do profilu gwintu w przekroju dzielącym wał wzdłuż osi ze względu na przesłonięcie. W przypadku metody optycznej przyczyna może tkwić również w samym oprogramowaniu i algorytmie obliczania wartości średnicy podziałowej. Analizując wartości minimalne i maksymalne gwintu trapezowego niesymetrycznego wykonanego z Inconelu 718 zauważono, że średnice cechowały się odchyłką owalności sięgającą 35 μm , co jest zjawiskiem powszechnym dla tego materiału. Z pewnością wpływ na wyniki pomiarów ma czystość powierzchni, kalibracja urządzeń, a także wyznaczenie powierzchni bazowej w przypadku maszyny współrzędnościowej.

4.3.3 Wnioski

Zapewnienie jakości elementów gwintowanych jest niezwykle istotnym i złożonym zadaniem, szczególnie jeżeli znajdują one zastosowanie w odpowiedzialnych aplikacjach. Pomiary automatyczne bazujące na technice optycznej są szybsze, a także bardziej uniwersalne niż pomiary stykowe, jednak w większym stopniu ulegają one czynnikom zewnętrznym np. ciecz chłodząco-smarująca na powierzchni czy refleksy świetlne. Na podstawie uzyskanych

wyników można potwierdzić, iż możliwe jest zautomatyzowanie pomiaru wybranych cech gwintów zewnętrznych zarówno poprzez metody stykowe jak i bezstykowe. Obie testowane metody nadają się do pomiaru elementów w produkcji przemysłowej, jednak w przypadku wąskich tolerancji, wybraną metodę z pewnością należy zweryfikować. Ze względu na wiele zalet automatyzacji, wymagania nowoczesnego przemysłu produkcyjnego wpływają na to, iż pomiary, jeżeli to możliwe powinny być przeprowadzane w ten sposób.

4.4 Wnioski z badań wstępnych

Dokonano oceny stanu powierzchni wybranych gwintów poprzez pomiar topografii oraz badanie metalograficzne. Na podstawie analizy wyników przedstawiono zalecenia odnośnie toczenia gwintów zewnętrznych w celu poprawy parametrów przestrzennych topografii powierzchni. Nie odnotowano niepożądanych cech topografii oraz warstwy wierzchniej. W związku z czym, można stwierdzić, że mimo obróbki trudnoobrabialnego materiału otrzymana jakość powierzchni gwintów nie będzie wpływać negatywnie na planowane pomiary cech geometrycznych. Gwinty zmierzono tradycyjnymi metodami (mikrometr, metoda trójwałeczkowa) oraz dla porównania metodami automatycznymi (CMM, urządzenie optyczne Opticline).

W toku analizy danych oraz zapotrzebowania firmy Pratt & Whitney Kalisz uznano, że badania porównawcze będą głównie skupiać się na średnicy podziałowej, która jest kluczowa z punktu widzenia realizowanego tematu ze względu na tolerancję wykonania oraz możliwość korekcji na obrabiarce. Średnica podziałowa jest wymiarem teoretycznym, a jej pomiar jest jednym z trudniejszych w kontekście zarysu gwintu. Pozostałe wymiary, takie jak półkąty zarysu czy promień dna wrębu, są w zasadzie odwzorowaniem kształtu płytki skrawającej i wpływ na te parametry podczas toczenia jest silnie ograniczony. Skok gwintu odpowiada wartości posuwu narzędzia skrawającego, a jego błędy wynikają z nieprawidłowości w kinematyce obrabiarki. Dokonano również porównawczego pomiaru średnicy zewnętrznej, której wymiary są znacznie łatwiejsze do skontrolowania.

Porównując średnie wartości wyników uzyskanych metodami tradycyjnymi i automatycznymi, stwierdzono maksymalne różnice wymiarowe wynoszące 3 μm dla średnicy zewnętrznej oraz 15 μm dla średnicy podziałowej. Biorąc pod uwagę różnice w ilości zbieranych punktów pomiarowych oraz owalizację badanych próbek wyniki te należy uznać za satysfakcjonujące i potwierdzające możliwość zautomatyzowania pomiarów gwintów zewnętrznych.

Na podstawie badań wstępnych oraz analizy stanu wiedzy do dalszych prac ze względu na szereg zalet, przede wszystkim większą odporność na specyficzne warunki panujące wewnątrz obrabiarki oraz prostą integrację układu pomiarowego z maszyną wybrano klasyczną sondę stykową. Niemniej jednak, ze względu na szybkość działania oraz kompleksowość pomiaru kilku cech jednocześnie postanowiono także zbadać możliwości pomiarów optycznych, które zgodnie z analizą literatury są obecnie coraz bardziej popularne.

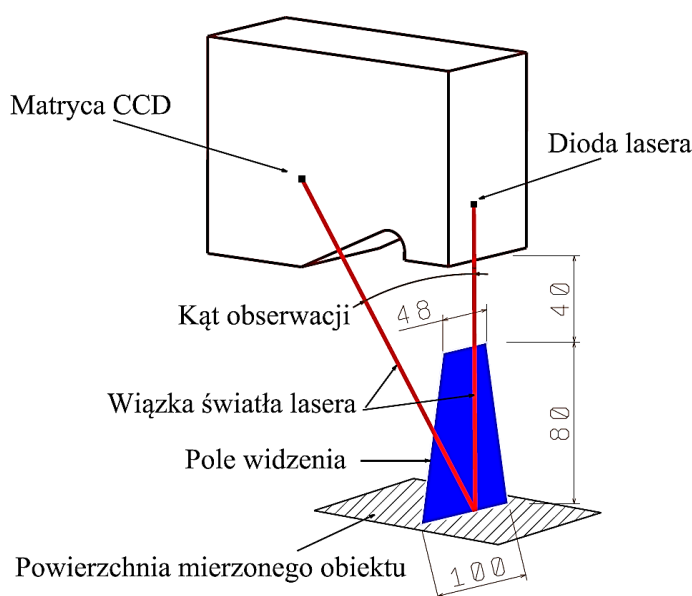
5. Badania zasadnicze

5.1 Badanie z zastosowaniem czujnika laserowego liniowego

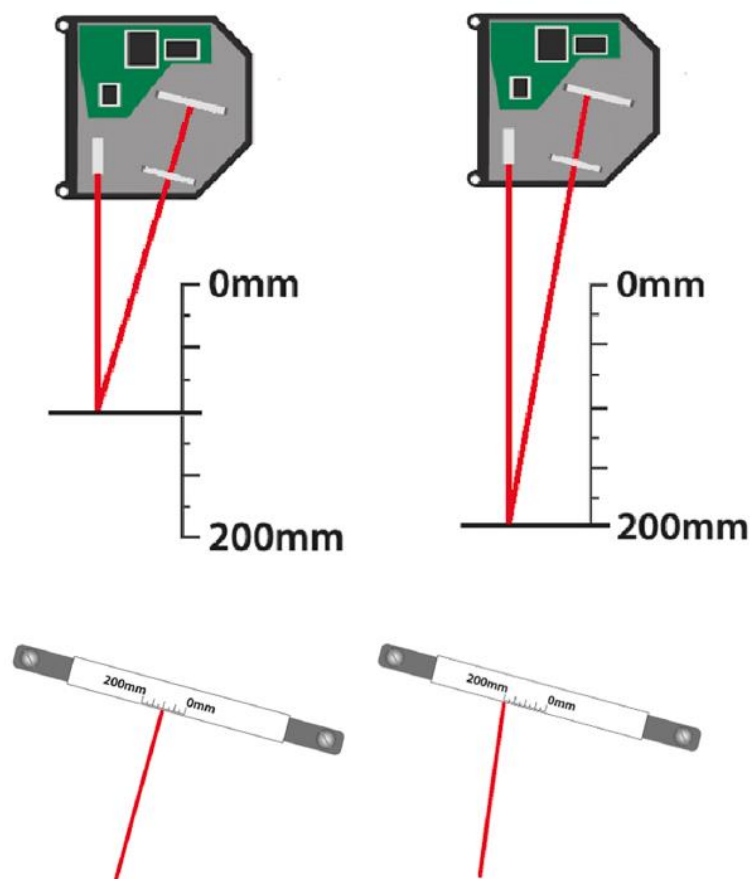
5.1.1 Metodyka badań

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, iż większość prac dotycząca automatycznego pomiaru gwintów na obrabiarkach dotyczyła pomiarów optycznych. Postanowiono zatem sprawdzić możliwości wykorzystania czujnika laserowego liniowego do pomiaru zarysu precyzyjnych gwintów zewnętrznych stosowanych w produkcji komponentów silników lotniczych [154].

Do badania wybrano czujnik optyczny Gocator 2530A-2-B-01-S produkowany przez LMI Technologies. Czujnik ten działa w oparciu o zasadę triangulacji (rys. 5.1) [143, 155]. Badany obiekt oświetlany jest wiązką laserową generowaną przez diodę. Odbite światło śledzone jest przez obiektyw kamery CCD. W zależności odległości między mierzoną powierzchnią, a czujnikiem zmienia się kąt odbicia wiązki lasera. Znając położenie nadajnika względem detektora, które jest stałe, można korzystając z zasad trygonometrii określić odległość czujnika od obiektu (rys. 5.2). Czujnik taki może być wykorzystywany do pomiaru geometrii, odchyłek kształtu lub wykrywania wad na powierzchni materiału. Przy jego pomocy jesteśmy w stanie wygenerować obraz profilu 2D, a także powierzchni 3D. Aby móc zarejestrować obraz skanowanego obiektu dla stosowanego urządzenia, musi on znajdować się pod obszarem roboczym skanowania widocznym na rysunku 5.1. Pole widzenia znajduje się w przedziale od 48 mm (bliskie pole widzenia – ang. near field of view) do 100 mm (dalekie pole widzenia – ang. far field of view). Zakres pomiarowy czujnika wynosi 80 mm. Uzyskane profile można wykorzystać do tworzenia chmur punktów 3D reprezentujących całe części poprzez przesuwanie przedmiotu pod polem widzenia czujnika wzdłuż osi Y. Urządzenie to dzięki odporności na wpływ pyłu oraz cieczy o klasie IP67 oraz wytrzymałości na wstrząsy dedykowane jest do pomiarów na liniach produkcyjnych. Wysoka częstotliwość działania czujnika (do 10 kHz) przekłada się na możliwość szybkiego skanowania elementów. Pozostałe parametry przedstawiono w tabeli 5.1.



Rys. 5.1 Podstawowa zasada działania czujnika laserowego liniowego [156].

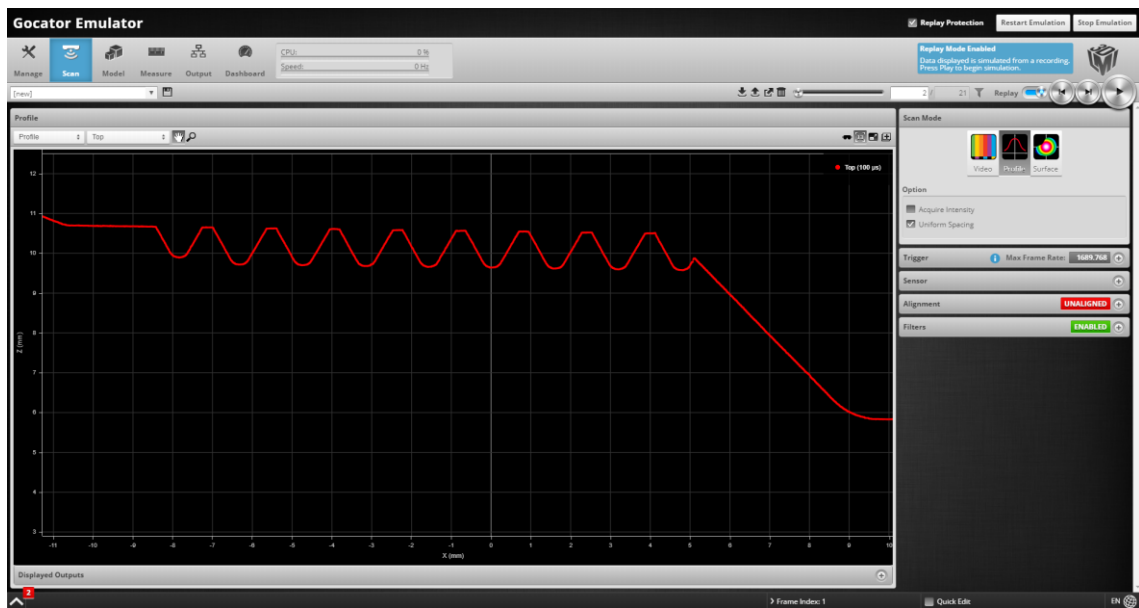


Rys. 5.2 Zasada pomiaru z wykorzystaniem triangulacji laserowej [157].

Tab. 5.1 Zestawienie parametrów czujnika Gocator 2530 [156].

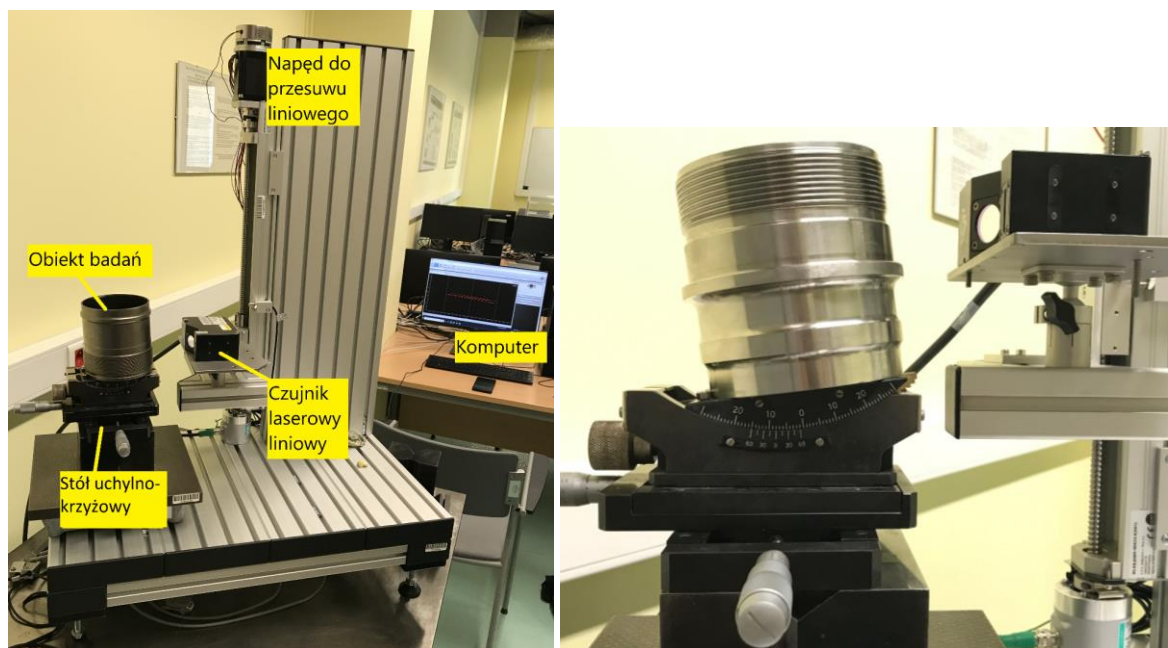
Liczba punktów	1920
Rozdzielczość X (μm)	28,0 – 54,0
Liniowość Z (\pm % zakresu pomiarowego)	0.01%
Powtarzalność Z (μm)	0.5
Odległość pomiarowa (mm)	40
Zakres pomiarowy (mm)	80
Zakres pola widzenia (mm)	48 - 100
Klasa lasera	2 (niebieski, 405 nm)
Wymiary (mm)	46x80x110
Waga (kg)	0,65
Częstotliwość skanowania	do 10 kHz
Obudowa	Uszczelniona obudowa aluminiowa, IP67

Czujniki z serii Gocator mają wbudowany graficzny interfejs użytkownika co oznacza, że nie wymagają dodatkowego oprogramowania (rys. 5.3). Dostęp do niego można uzyskać za pośrednictwem sieci Ethernet, wpisując podany adres IP do dowolnej przeglądarki internetowej. W interfejsie internetowym możliwa jest wizualizacja obrazu i konfiguracja urządzenia w czasie rzeczywistym.



Rys. 5.3 Widok interfejsu urządzenia Gocator 2530 w przeglądarce internetowej.

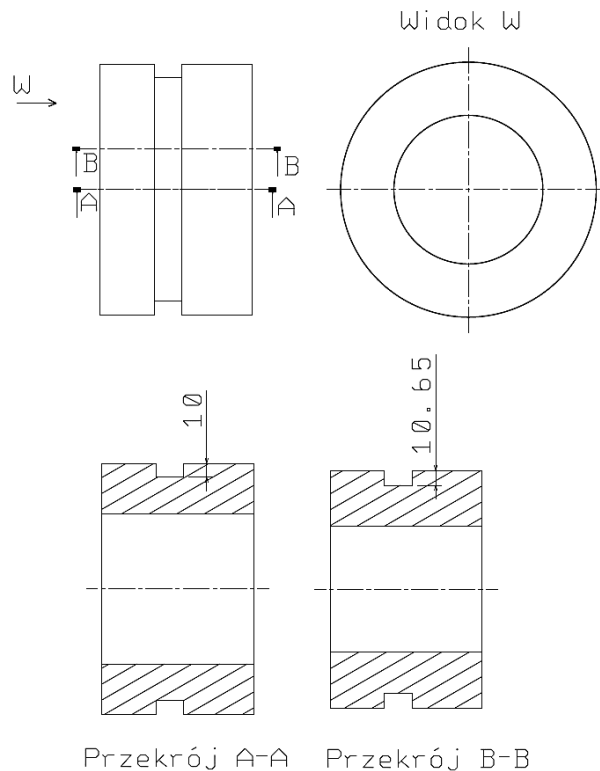
Czujnik został zamontowany na przygotowanym stanowisku badawczym umożliwiającym jego ruch liniowy. Obiekt badań umieszczono na podstawie wraz ze stołem uchylno-krzyżowym ze śrubami mikrometrycznymi o podziałce elementarnej głównej 1° oraz noniusza $15'$. Dzięki temu możliwe było pochylenie osi przedmiotu względem początkowego, równoległego do linii lasera położenia, co można zaobserwować na rys. 5.4.



Rys. 5.4 Widok stanowiska badawczego z czujnikiem laserowym liniowym.

Podczas bazowania układu zauważono, że niezwykle istotne jest aby wiązka lasera padała na mierzoną powierzchnię w przekroju przechodzącym przez oś wałka. Każde odchylenie od osi powoduje błędny pomiar ze względu na „wydłużenie” zarysu gwintu czyli tzw. błąd cosinusowy co zobrazowano na rys. 5.5. Aby zrealizować pomiar w oczekiwanym przekroju ustawiono wstępnie wałek i przesuwano go na boki rejestrując obraz zbierany przez czujnik w czasie rzeczywistym. W celu wyeliminowania błędu cosinusowego pozostawiono obiekt

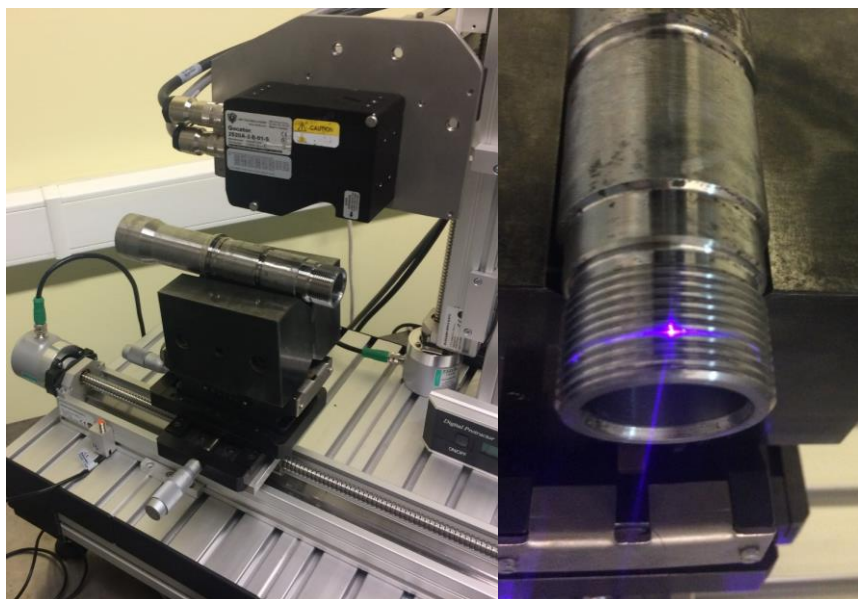
badany w położeniu, dla którego zaobserwowano najwyższe położenie linii oświetlającej zarys gwintu. Na zbudowanym stanowisku badawczym dokonano szeregu pomiarów gwintów o trzech rodzajach zarysów: trójkątnym (kąąt zarysu 60°), trapezowym symetrycznym (28°) oraz trapezowym niesymetrycznym ($45^\circ/7^\circ$). Mierzono części zarówno matowe jak i z połyskiem. Każdy z zarysów miał wręb o głębokości około 1 mm. Gwinty te są powszechnie stosowane w komponentach z przemysłu lotniczego. Badanie miało na celu określenie wpływ rodzaju powierzchni, kąta zarysu gwintu oraz kąta pochylenia lasera względem osi wałka na możliwości pomiarowe powierzchni wrębu.



Rys. 5.5 Odzworowanie błędu cosinusowego na przykładzie dwóch przekrojów wzdłuż wałka.

W celu zasymulowania środowiska panującego wewnątrz obrabiarki przeprowadzono również test pomiaru powierzchni zabrudzonej cieczą.

Podczas badań wykonano także skanowanie powierzchni. Części zawierające nacięty gwint umieszczono na pryzmie, która z kolei znajdowała się na napędzanej prowadnicy liniowej (rys. 5.6). Dokonano przesuwu części podczas, którego w trybie ciągłym rejestrowane były kolejne przekroje pomiarowe. Badanie powtórzono dla ustawienie równoległego czyli pozycji 0° , a także pochylonego wałka o $+10^\circ$ oraz -10° . W wyniku tego działania uzyskano chmurę punktów z obszaru znajdującego się w polu widzenia czujnika.



Rys. 5.6 Skanowanie gwintu wzdłuż osi wałka.

Zebrane wyniki przeanalizowano w programie ZEISS INSPECT Optical 3D firmy Zeiss. Punkty zmierzone wczytano jako profil, czyli poprzez opcję Krzywa. Profil z czujnika został wstępnie dopasowany z profilem nominalnym opracowanym w programie Catia poprzez wskazanie trzech punktów zmierzonych oraz ich odpowiedników na profilu nominalnym. Następnie dokonano dopasowania automatycznego funkcją Lokalny best-fit. Następnie wygenerowano kolorową mapę odchyłek przy pomocy opcji Odchyłka 3D na przekroju inspekcyjnym CAD, czyli profilu o wymiarach nominalnych. Oprogramowanie obliczyło prostopadłą odległość od każdego punktu przekroju nominalnego do przekroju rzeczywistego. W celu wyeliminowania punktów nieznaczących oraz niezmiierzonych wykonano kontrolę odchylenia przekroju z małą odległością wyszukiwania o wartości zależnej od dokładności uzyskanego obrazu. Oprogramowanie to umożliwia także filtrację poprzez, którą można wygładzić obliczone wartości kontroli i krzywe na wykresach.

Filtr średni:

Oprogramowanie oblicza wartość wyjściową na podstawie średniej wartości wszystkich sąsiednich wartości. Liczbę punktów pomiarowych lub etapów w każdym kierunku ustawia się za pomocą wartości liczbowych ustawienia filtra. Wszystkie wartości zaznaczonego obszaru mają jednakową wagę.

Filtr dwumianowy:

Oprogramowanie oblicza wartość wyjściową na podstawie średniej ważonej wartości wszystkich sąsiednich wartości. Względne wagi wynikają ze współczynników dwumianowych dla punktów sąsiadujących. Im dalej wartości znajdują się od wartości oryginalnej, tym mniejsza jest ich waga.

Filtr medianowy:

Oprogramowanie wyznacza medianę ze wszystkich wartości, do których odnosi się filtr przestrzenny. Korzystając z tej mediany, oprogramowanie eliminuje istniejące wartości odbiegające. Filtr medianowy określa i sortuje wszystkie sąsiadujące wartości w porządku rosnącym. Aby zastąpić wartości odbiegające, filtr wykorzystuje wartość w środku dla list nieparzystych i średnią arytmetyczną dwóch liczb w środku listy dla list parzystych. Liczbę

punktów pomiarowych lub etapów w każdym kierunku ustawia się za pomocą wartości liczbowych ustawień filtra.

Przykładowo:

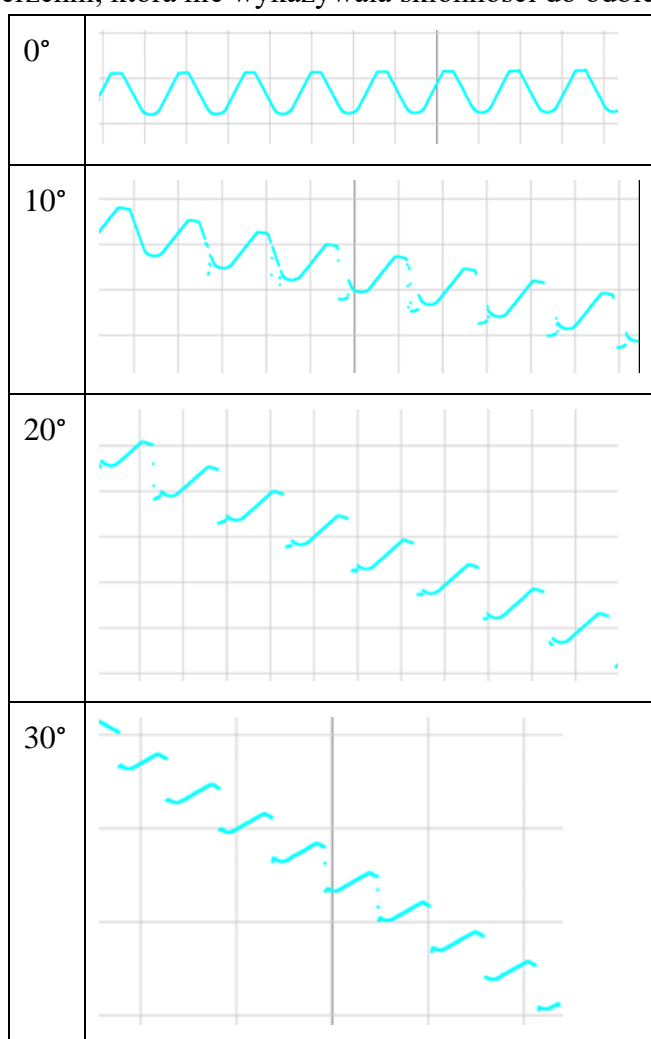
Określone wartości: 1, 2, 7, 2, 5

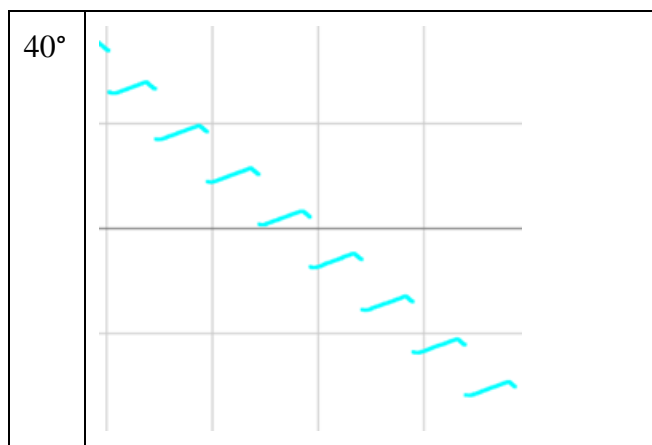
Po posortowaniu otrzymujemy listę 1, 2, 2, 5, 7. Wartość pośrodku, mediana, wynosi 2. W tym przypadku filtr zastępuje wartość odstającą 7 medianą 2.

Chmurę punktów zarejestrowaną w wyniku przesunięcia wczytano jako siatkę Mesh. Dopasowano ją do modelu powierzchniowego gwintu o wymiarach nominalnych poprzez opcję Lokalny best-fit. Wygenerowano kolorową mapę odchyłek na powierzchni rzeczywistej oraz nominalnej. W celu wyeliminowania punktów nieznaczących ustawiono wartość maksymalnej odległości wyszukiwania 0,5 mm.

5.1.2 Wyniki

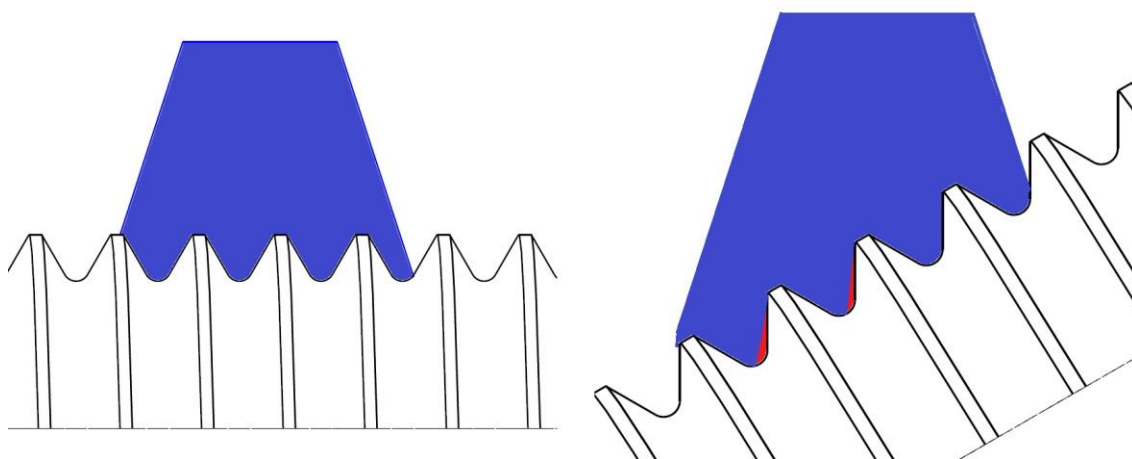
Na rysunku 5.7 zebrano obrazy profili zarejestrowanych dla pierwszego z badanych gwintów o zarysie trójkątnym UNJ z naniesioną matową powłoką. Po wstępnej analizie łatwo zauważyć, iż zarys gwintu został w dość dobrym stopniu odwzorowany. Co więcej, nie zauważono większych zakłóceń w postaci szumów czy refleksów. Spowodowane jest to oczywiście stanem powierzchni, która nie wykazywała skłonności do odbicia światła.





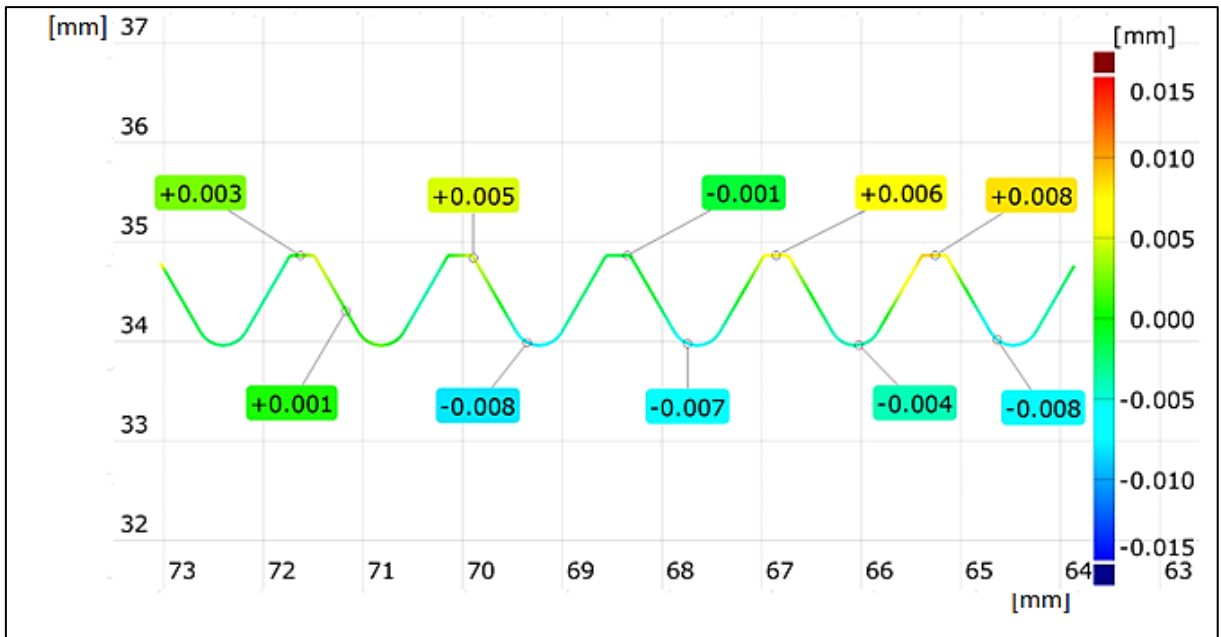
Rys. 5.7 Zestawienie obrazów uzyskanych dla gwintu UNJ, powierzchnia matowa.

Na podstawie obrazów zauważono, iż wraz z pochyleniem osi gwintu obszar widocznego zarysu maleje. Wynika to z tzw. „efektu cienia”, czyli zjawiska przesłonięcia pewnego obszaru. W zasadzie już dla kąta 20° widoczny jest tylko jeden z boków gwintu. Dla 40° nawet bok oświetlony wiązką światła lasera nie został odwzorowany w całości, gdyż został on przesłonięty sąsiadującym zwojem. Zjawisko to można wyjaśnić prostym szkicem (rys. 5.8), gdzie niedostępny obszar pola widzenia zaznaczono kolorem czerwonym.



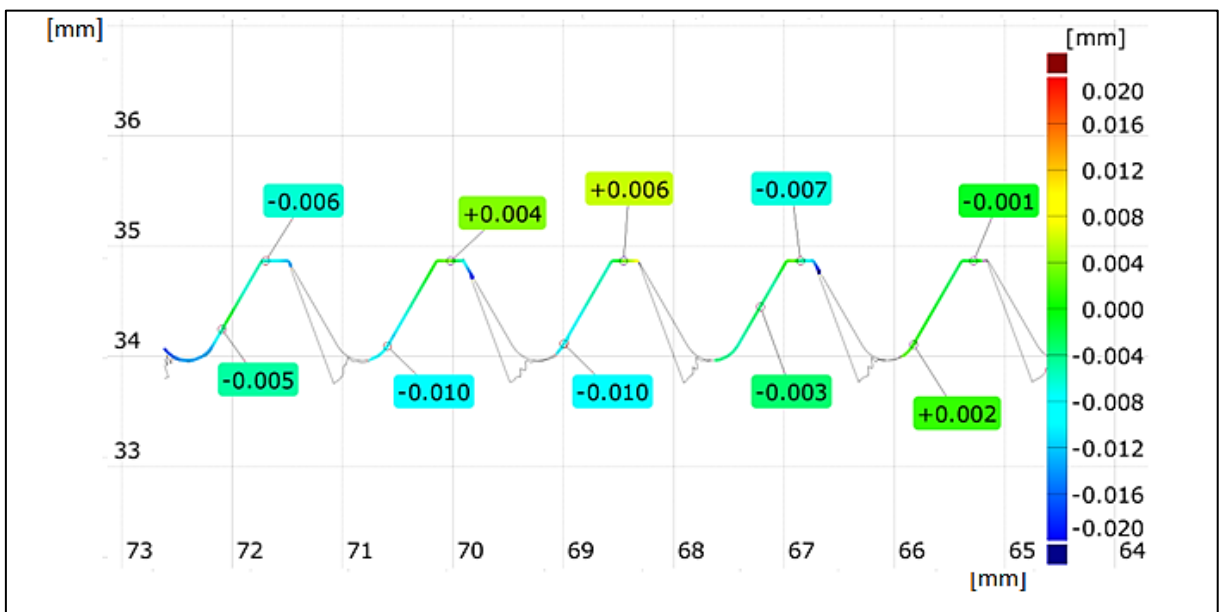
Rys. 5.8 Szkic gwintu umieszczonego w polu widzenia czujnika laserowego liniowego przedstawiający „efekt cienia”.

Na kolejnych obrazach przedstawione zostały różnice między profilem zmierzonym, a nominalnym. Jak można zauważyć na rysunku 5.9 profil zmierzony pokrywa się nominalnym w przedziale $\pm 0,01$ mm co świadczy o poprawnym pomiarze.

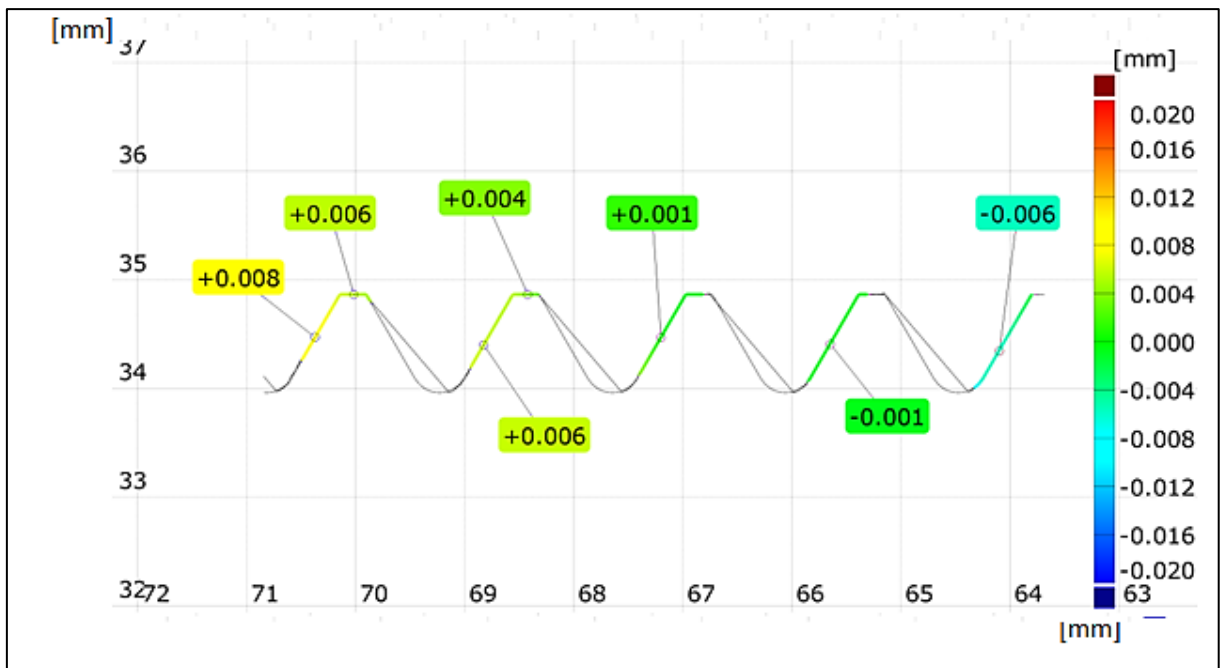


Rys. 5.9 Obraz profilu gwintu UNJ bez pochylenia.

Podobne porównanie przygotowano dla 20° (rys. 5.10) oraz 40° (rys. 5.11). W obu przypadkach zarejestrowano jedynie jeden z boków wręby oraz średnicę wierzchołkową. Dla kąta pochylenia 40° obszar pomiarowy jest mniejszy niż dla 20° . Warto podkreślić fakt, iż widoczna części została dobrze odwzorowana i również mieści się w zakresie $\pm 0,01$ mm.



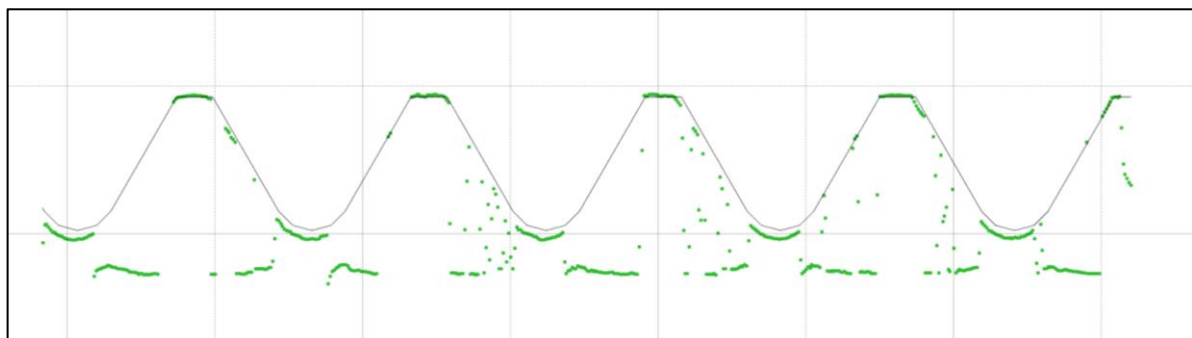
Rys. 5.10 Obraz profilu gwintu UNJ przy pochyleniu 20° .



Rys. 5.11 Obraz profilu gwintu UNJ przy pochyleniu 40°.

Należy jednak pamiętać, iż badanie pierwszego z gwintów dotyczyło powierzchni matowej. W tym przypadku użycie czujnika Gocator 2530 okazało się być zasadne, jednak mając na uwadze plany pomiaru w trakcie obróbki tokarskiej lub bezpośrednio po niej, powierzchnia obrabianej części będzie się cechowała dużym połyskiem.

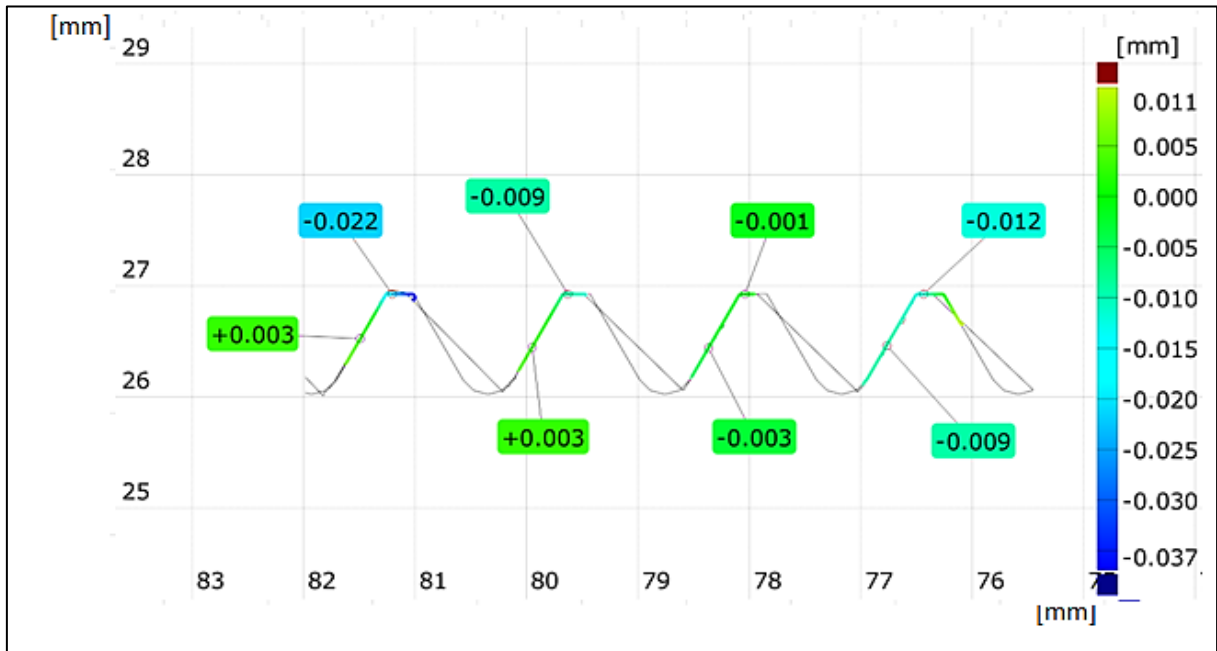
Na rys. 5.12 przedstawiono obraz zawierający rezultat pomiaru gwintu o zarysie trójkątnym, z powierzchnią błyszczącą wykonaną w procesie toczenia. Wynik ten zobrazowany w postaci chmury punktów znacznie różni się od poprzedniego. W tym przypadku widać wyraźnie, iż jedynie średnica wierzchołkowa oraz promień dna wrębu zostały zarejestrowane. Zbadany profil charakteryzuje się dużą niedokładnością spowodowaną występowaniem refleksów świetlnych. W tym przypadku nawet zastosowanie odpowiedniej filtracji wyników poprzez usunięcie szumów nie pozwoli na pomiar całego profilu, gdyż powierzchnie boczne są niemal niewidoczne.



Rys. 5.12 Obraz chmury punktów profilu UNJ bez pochylenia, powierzchnia błyszcząca.

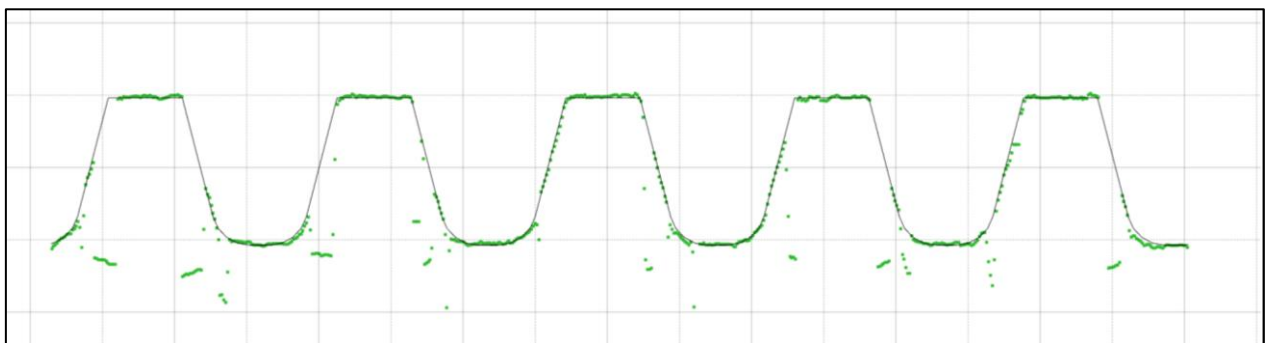
Korzystając z możliwości podstawki obrotowej, pochyłono oś badanej części względem czujnika o 40°, tak aby wiązka lasera padała na jeden z boków pod większym kątem. Rezultat tego działania przedstawiono na rysunku 5.13. Widać, że próba ta dała pozytywny efekt z punktu widzenia pomiaru boku zarysu wrębu, pokrywa się on z nominalnym wymiarem.

Niestety ze względu na konstrukcję gwintu bok przeciwny był w tym przypadku niewidoczny. Co więcej, wierzchołek przesłonił bruzdę tak, że promień dna wrębu także nie został zarejestrowany. W celu pomiaru całego profilu przy skręconym układzie konieczne należałoby zastosować przyjemniej dwa czujniki laserowe.



Rys. 5.13 Obraz profilu UNJ przy pochyleniu 40°, powierzchnia błyszcząca.

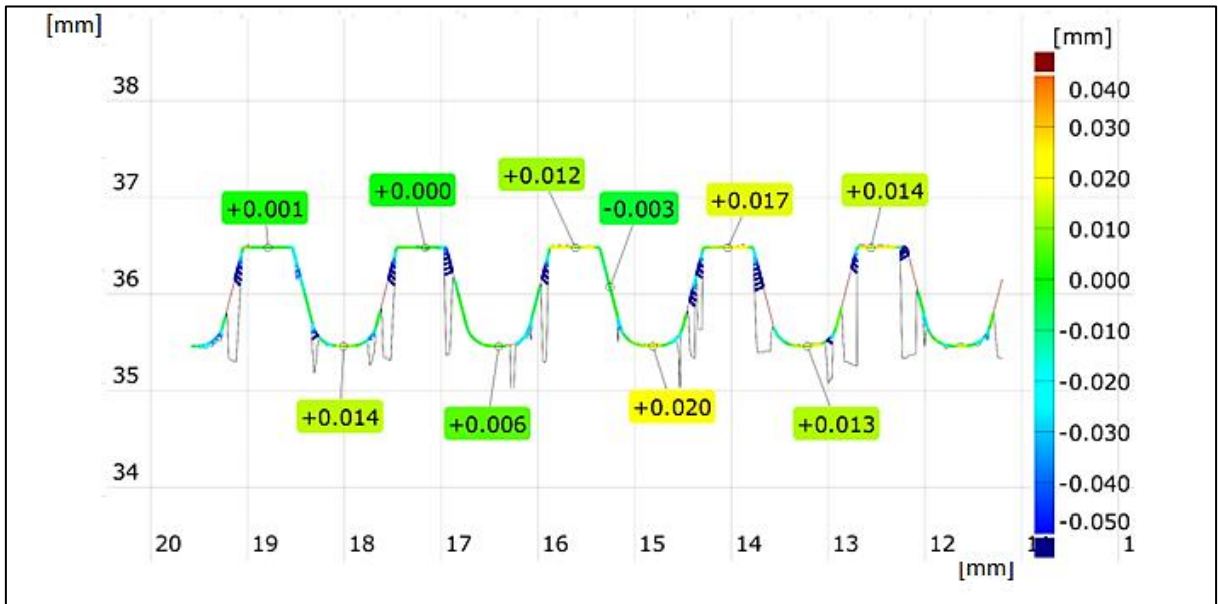
W przemyśle lotniczym, często oprócz gwintów o zarysie trójkątnym zastosowanie mają połączenia trapezowe. Porównując otrzymany obraz odbicia wiązki lasera z zarysem nominalnym gwintu trapezowego symetrycznego uzyskano nieco inne wyniki niż miało to miejsce w przypadku zarysu trójkątnego. Należy podkreślić, że w wcześniejszym profilu wręb miał kąt zarysu 60°, a teraz 29°, w związku z czym kąt padania wiązki światła lasera na obrobioną powierzchnię w tej próbie wyniósł 14,5°. Z powodu błyszczącej powierzchni podobnie jak poprzednio pojawiły się zakłócenia w postaci refleksów świetlnych. Były one widoczne szczególnie w okolicach promienia dna wrębu (rys. 5.14).



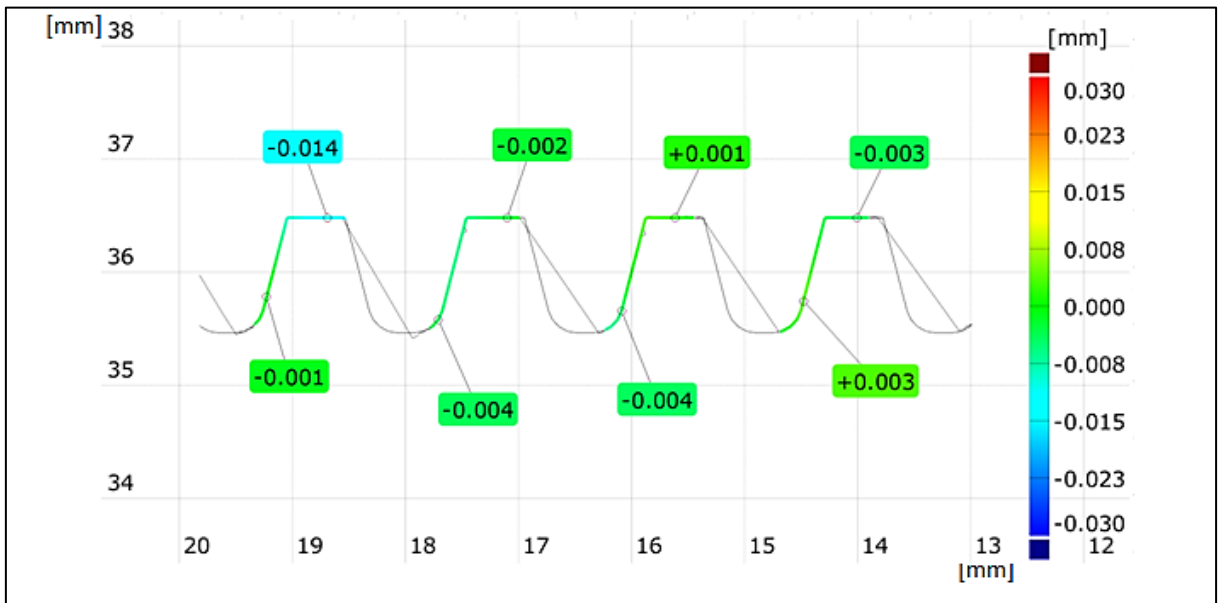
Rys. 5.14 Obraz chmury punktów dla gwintu ACME, powierzchnia błyszcząca.

Zauważono, jednak, że szumy nie są tak znaczące jak w przypadku gwintu trójkątnego i można wygenerować obraz zawierający częściowo boki profilu (rys. 5.15). Analizując kolorową mapę odchyłek widać jednak, że poprawne wyniki uzyskano jedynie na średnicy wierzchołkowej oraz średnicy wewnętrznej. Przybliżony obraz boków zarysu odbiegał

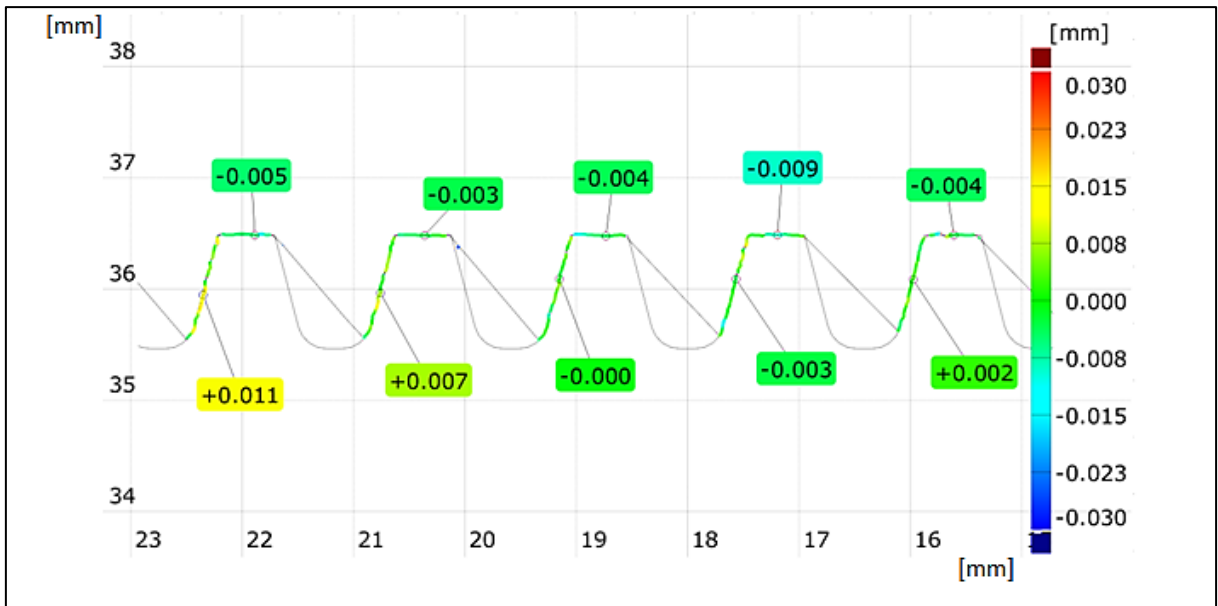
znacznie od nominalu. Dopiero pochylenie części o 30° pozwoliło na odzwierciedlenie całego boku gwintu wraz z fragmentem promienia dna wrębu oraz fragmentem średnicy wierzchołkowej, co zobrazowano na rys. 5.16. Pochylając oś wałka względem czujnika o 40°, uzyskano analogiczne rezultaty i wnioski jak w przypadku pochylenia gwintu UNJ (rys. 5.17).



Rys. 5.15 Obraz profilu ACME bez pochylenia, powierzchnia błyszcząca.

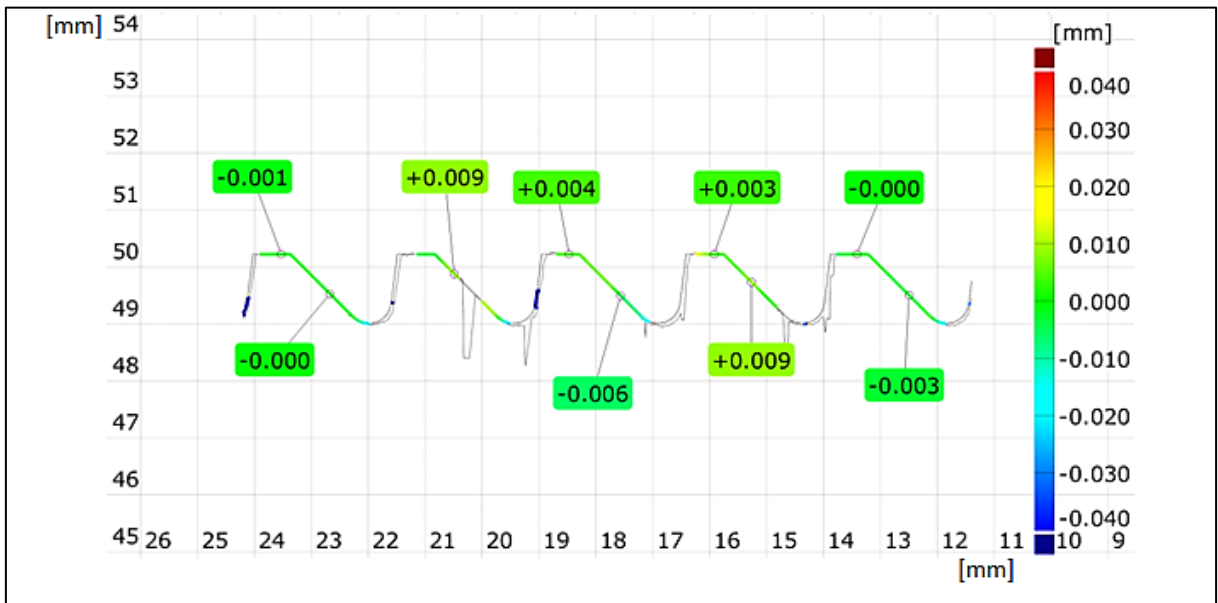


Rys. 5.16 Obraz profilu ACME przy pochyleniu 30°, powierzchnia błyszcząca.

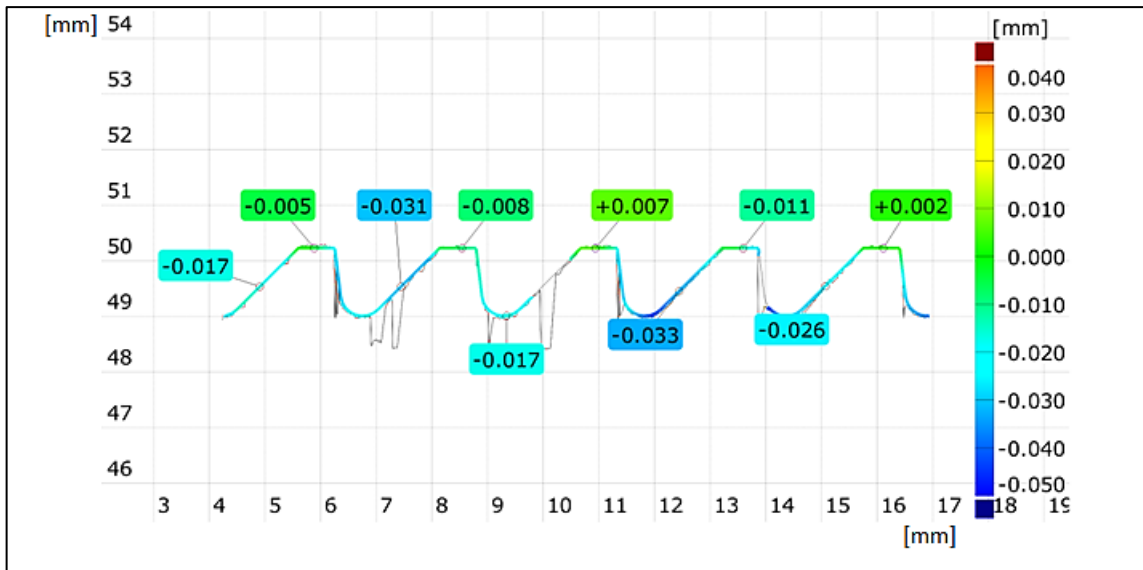


Rys. 5.17 Obraz profilu ACME przy pochyleniu 40°, powierzchnia błyszcząca.

Ostatnim z badanych profili był gwint trapezowy niesymetryczny o półkątach zarysu 45° i 7°. Wyniki pomiaru przestawiono na rys. 5.18 i 5.19. Podobnie jak poprzednio pojawiły się artefakty powodujące zniekształcenia obrazu, jednak były one mniejsze niż w dwóch poprzednich przypadkach. W związku z tym, iż kąty zarysu nie były różne w zależności od położenia gwintu względem układu pomiarowego zmieniała się także widoczność poszczególnych stron wrębu.



Rys. 5.18 Obraz profilu BUTTRESS bez pochylenia, powierzchnia błyszcząca.



Rys. 5.19 Obraz profilu BUTTRESS bez pochylenia, powierzchnia błyszcząca, odwrócony.

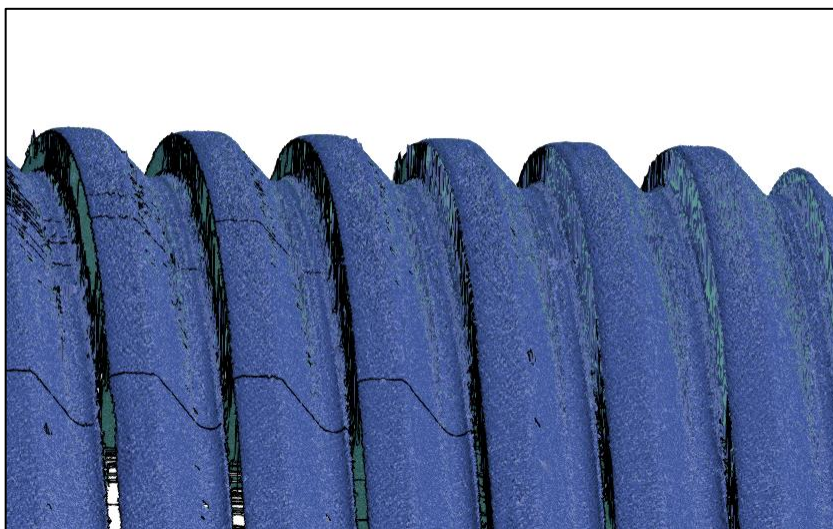
W tabeli 5.2 zebrano porównanie zmierzonych profili dla gwintu ustawionego w podstawowej pozycji oraz odwróconej.

Tab. 5.2 Zestawienie obrazów uzyskanych dla gwintu BUTTRES.

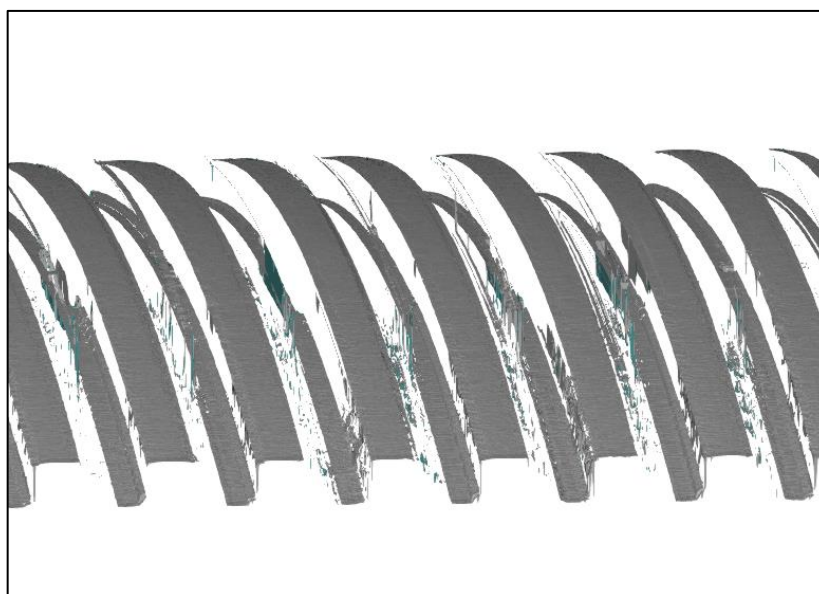
BUTTRESS	BUTTRESS - odwrócony
0°	
20°	
40°	

Widać, iż w przypadku bez pochylenia nie odnotowano znaczących różnic. Jednak wraz ze wzrostem kąta pochylenia, w zależności od ustawienia gwintu względem czujnika laserowego, wiązka światła pada na bok o większym lub mniejszym kącie wrębu.

Omówione profile można opisać jako przekrój gwintu, gdyż powstały w wyniku zarejestrowania pojedynczej linii rzutowanej na powierzchnię wałka. Korzystając z urządzenia Gocator 2530 mamy jednak możliwość dokonania skanowania, będącego zbiorem wielu profili rejestrowanych w takcie ruchu liniowego wałka względem linii lasera. Wykonano dwie próby skaningu gwintu trapezowego niesymetrycznego gdzie linia lasera raz padała prostopadle, a raz równoległe do osi wałka. Profile zbierano z rozdzielczością 0,01 mm. Zauważono, iż skanowanie poprzeczne, czyli przypadek gdy wiązka padania linii światła laserowego ustawiona jest równoległe do osi wałka daje chmurę punktów, która lepiej odwzorowuje powierzchnię gwintu (rys. 5.20). W odróżnieniu do skanowania wzdłużnego (rys. 5.21), w tej próbie otrzymano wyraźny model dna wrębu, wierzchołka oraz boku zarysu o kącie 45° . W obu przypadkach nie zarejestrowano boku o mniejszym kącie.



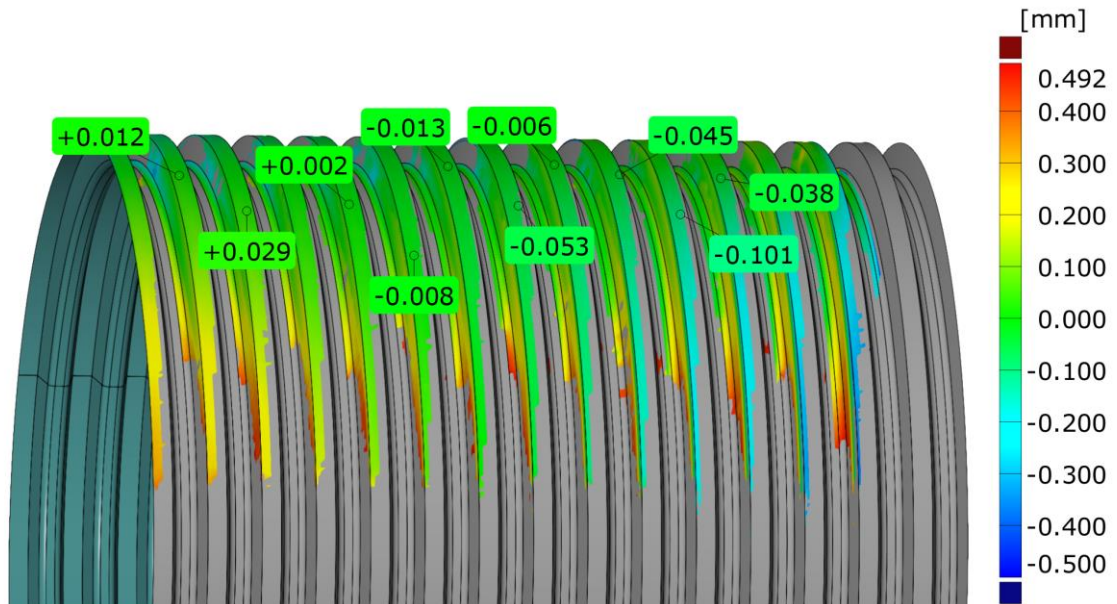
Rys. 5.20 Skan gwintu trapezowego niesymetrycznego poprzecznie do osi wałka.



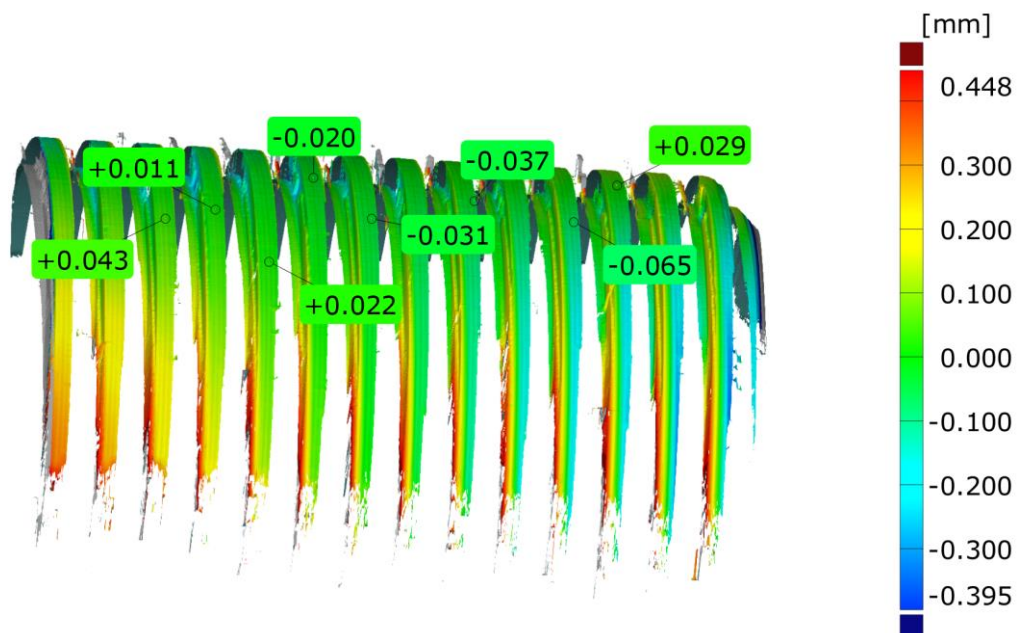
Rys. 5.21 Skan gwintu trapezowego niesymetrycznego wzdłuż osi wałka.

Niestety ze względu na liczne szумы, porównanie zmierzonej powierzchni z powierzchnią nominalną było niemożliwe ze względu na brak możliwości dopasowania.

Obraz chmury punktów zebranych z powierzchni gwintu trapezowego symetrycznego wzdłużnie do osi wałka pozwolił na porównanie jej z modelem o wymiarach nominalnych. Na rysunkach 5.22 i 5.23 pokazano rezultat porównania punktów aktualnych z modelem CAD. W pierwszym przypadku kolorową mapę odchyłek wygenerowano poprzez rzutowanie chmury punktów na model powierzchniowy gwintu. Na drugim obrazie mapa została przedstawiona na rzeczywistej chmurze punktów. W obydwóch przypadkach oś wałka była ustawiona prostopadle do linii światła lasera.



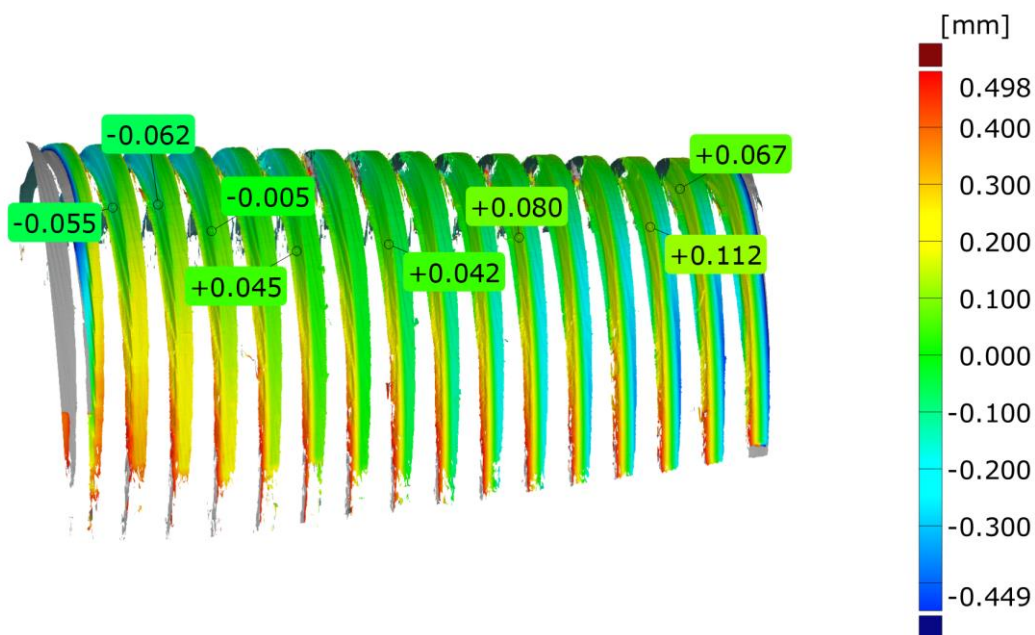
Rys. 5.22 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego (widok na CAD).



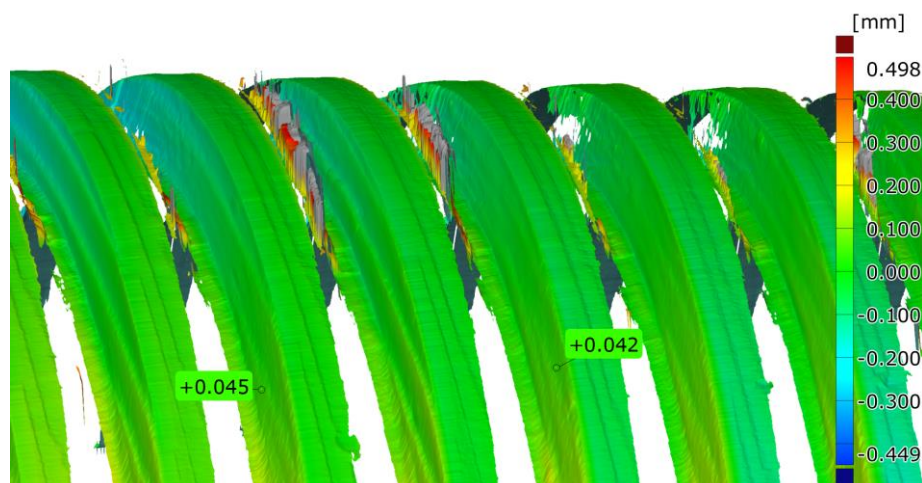
Rys. 5.23 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego (widok na punktach zmierzonych).

Porównując dane można zaobserwować, iż jedynie fragment prawej strony wrębu został odwzorowany. Co więcej, wraz z oddalaniem się od najwyższego punktu po obwodzie zmierzonej części widać, iż zwiększają się różnice pomiędzy wymiarem zadaniem, a zmierzonym. Wynika to z tzw. błędu cosinusowego wyjaśnianego na rysunku 5.5.

Zmieniając położenie kątownika wałka względem czujnika laserowego o $+10^\circ$ uzyskujemy bardziej klarowny obraz prawej strony wrębu co wynika z korzystniejszego kąta padania wiązki lasera na ten bok (rys. 5.24). Przyglądając się jednak powiększeniu obrazu (rys. 5.25) można wnioskować, że mimo wszystko występują na nim liczne zakłócenia.



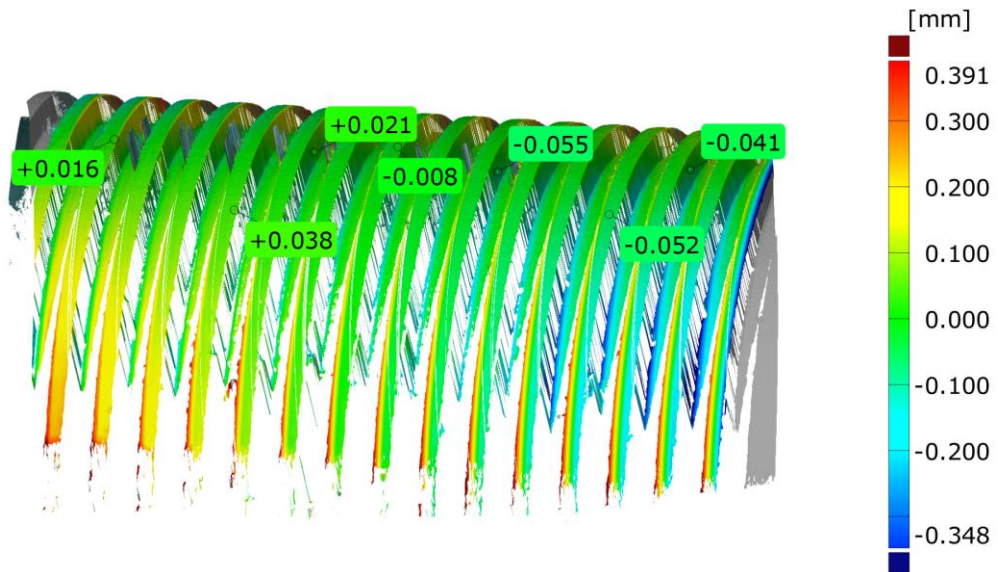
Rys. 5.24 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego pochylonego $+10^\circ$.



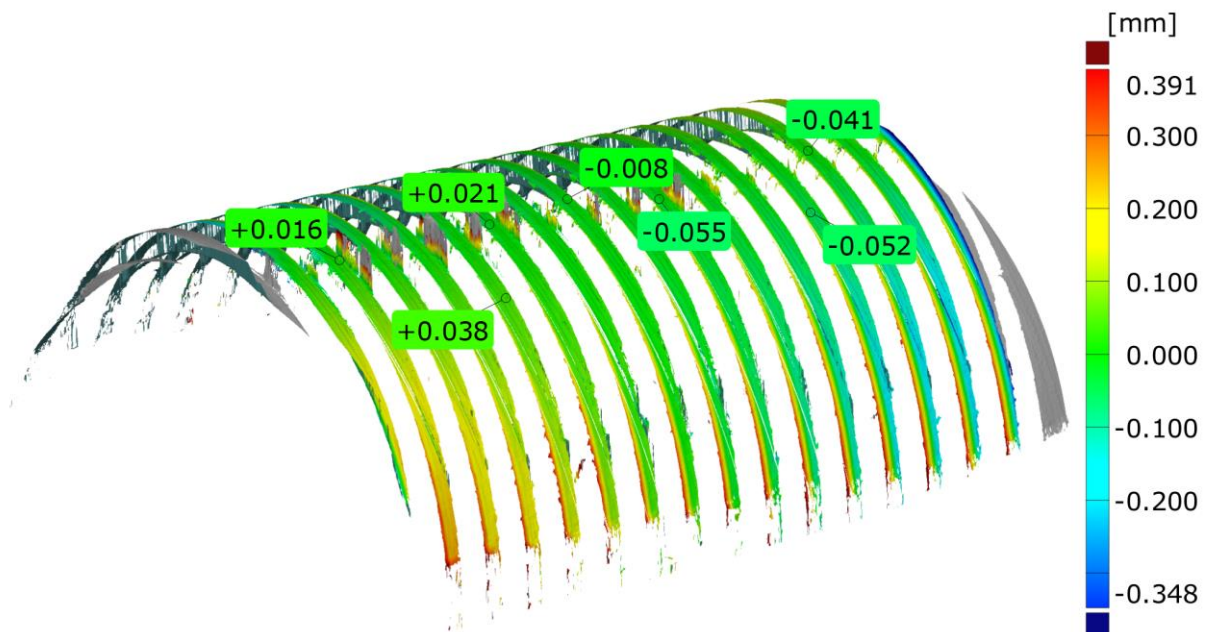
Rys. 5.25 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego pochylonego $+10^\circ$ - obraz przybliżony.

Zmieniając położenie wałka w przeciwnym kierunku czyli -10° dostrzegamy, iż na lewej stronie wrębu zaczęły pojawiać się punkty zmierzone, jednak mimo wszystko nie są one tak liczne jak na poprzednim obrazie (rys. 5.24). Wyniki tego działania pokazano na

rysunkach 5.26 i 5.27. Patrząc na prawą stronę gwintu, w tym przypadku nie zarejestrowano obrazu.



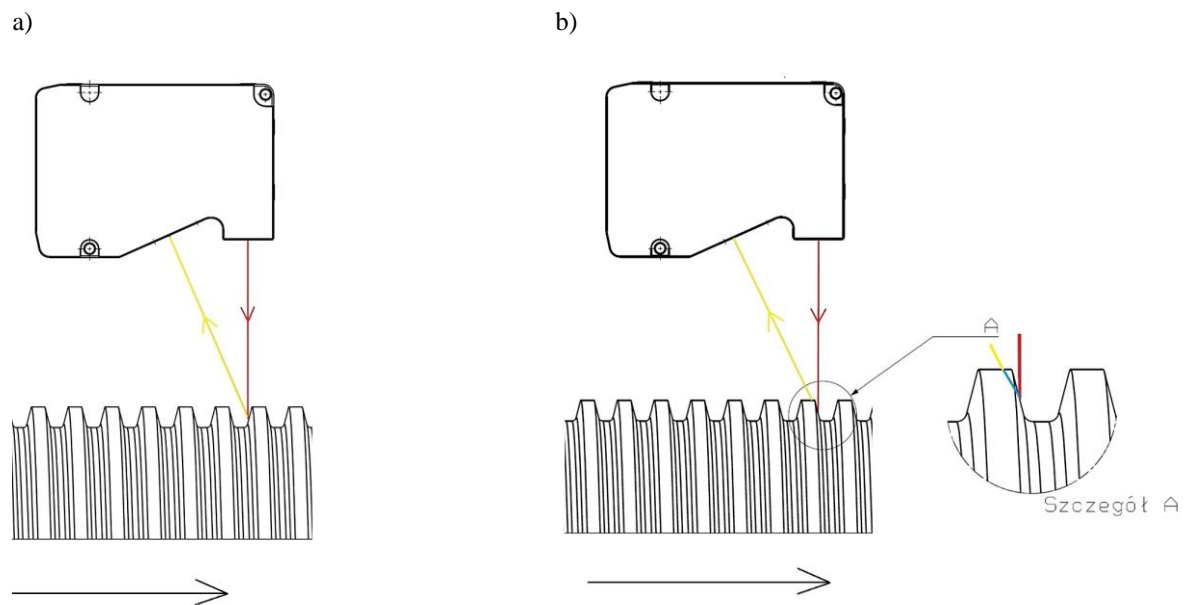
Rys. 5.26 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego pochylonego -10° (lewa strona).



Rys. 5.27 Porównanie chmury punktów z modelem nominalnym przy skanowaniu wzdłużnym gwintu trapezowego symetrycznego pochylonego -10° (prawa strona).

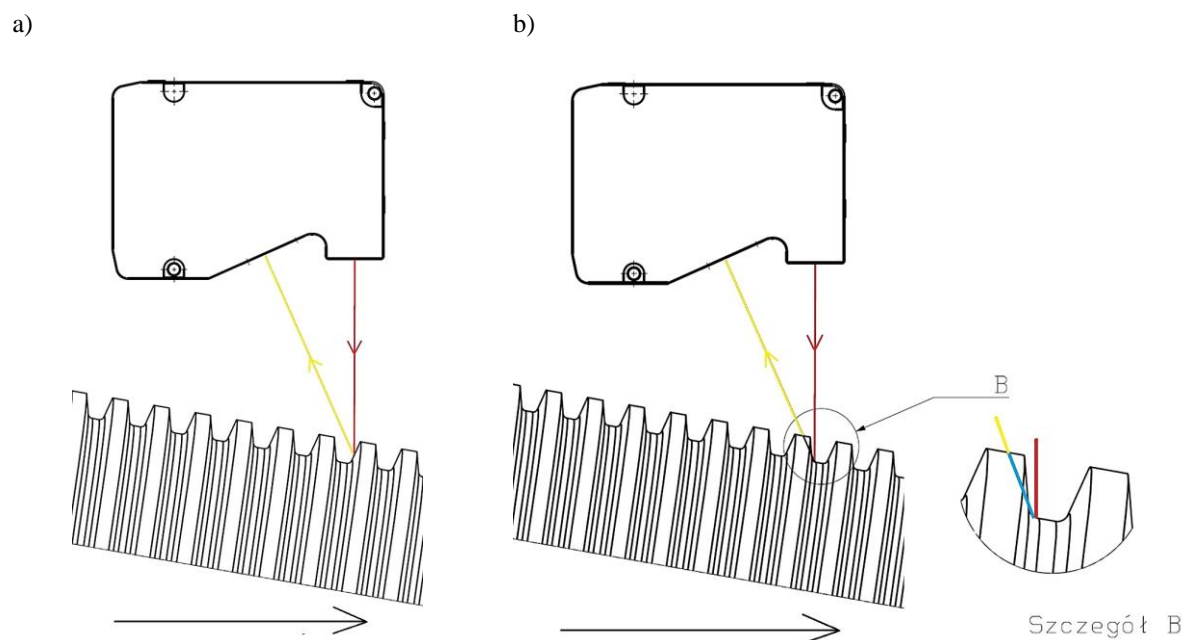
Z powyższej analizy można wywnioskować, iż kierunek umiejscowienia elementu pomiarowego względem układu ma kluczowe znaczenie i każda zmiana powoduje istotne różnice. Główny z powodów wyjaśniający sytuację przedstawiono na rysunku 5.28. Kierunek przesuwu wałka oznaczono strzałką. Wiązkę światła lasera padającą na mierzony element oznaczono kolorem czerwonym, natomiast wiązkę odbitą żółtym. Przy układzie ustawienia prostopadłego (rys. 5.28a) widać, iż światło padające na prawą stronę wrębu zostaje odbite

i zarejestrowane poprzez odbiornik. Wraz ze zbliżaniem się do lewej flanki gwintu, odbite światło lasera trafia na powierzchnię wrębu i nie jest w stanie zostać zaobserwowane przez kamerę co widać na szczególe „A” rys. 5.28b.



Rys. 5.28 Schemat pomiaru, oszczęści równoległa do układu pomiarowego.

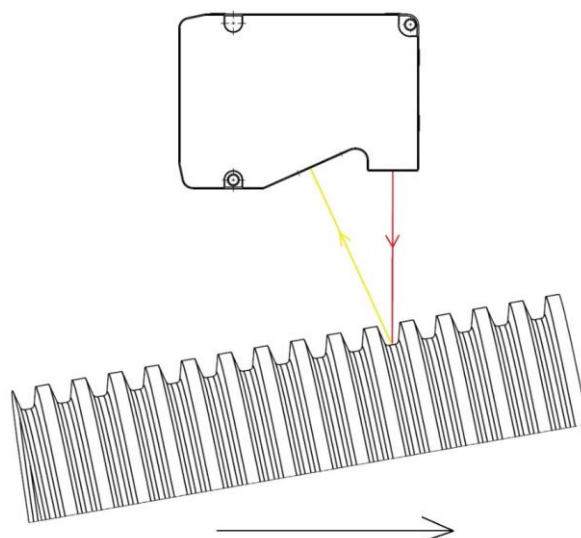
Pochylając oszwałka o kąt $+10^\circ$ uzyskujemy korzystniejszy kąt padania wiązki światła lasera na prawą stronę gwintu (rys. 5.29a), jednak po przeciwległej stronie (rys. 5.29b) sytuacja się pogarsza w stosunku to poprzedniego ustawienia.



Rys. 5.29 Schemat pomiaru, oszczęści pochylona $+10^\circ$ względem układu pomiarowego.

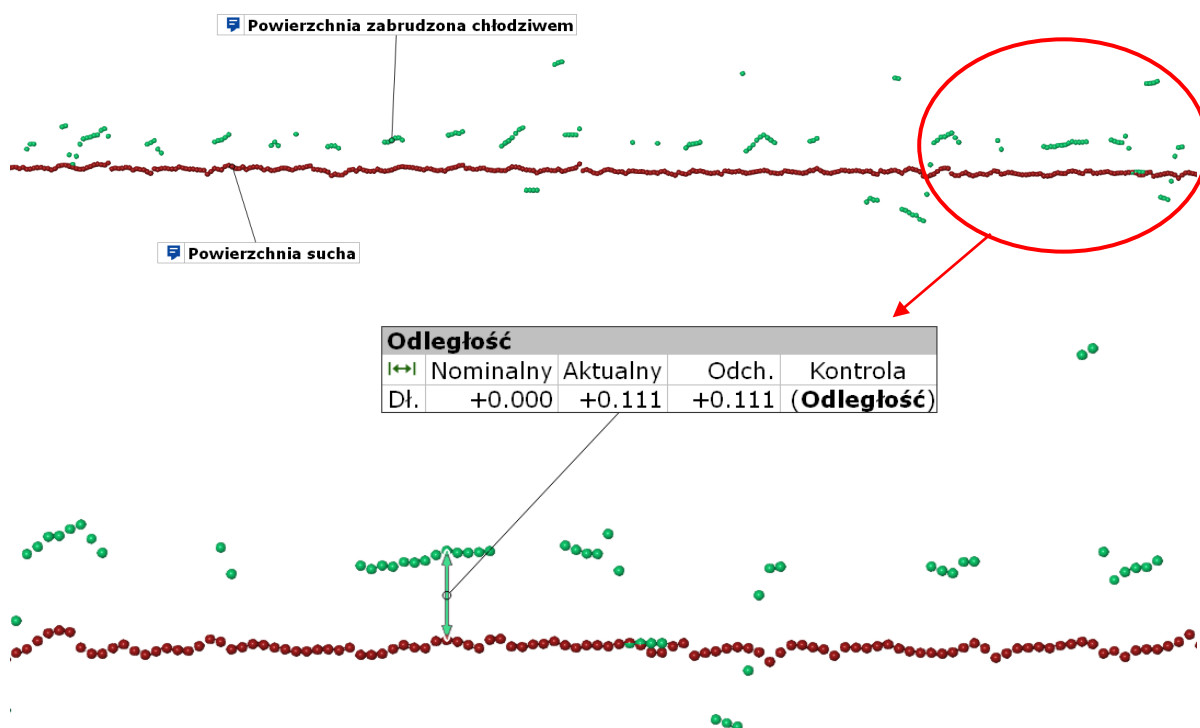
Pochylając oszwałka w przeciwnym kierunku, a więc -10° spotykamy się z ciekawym przypadkiem gdzie zarówno wiązka światła lasera jak i wiązka odbita jest niemalże równoległa

do powierzchni bocznej wrębu (rys. 5.30). W tym przypadku bazując na kolorowej mapie odchyłek korzystniejszy kąt padania wiązki miał miejsce na lewej stronie gwintu.



Rys. 5.30 Schemat pomiaru, oś części pochylona -10° względem układu pomiarowego.

Pomiary, które wykonywano odbywały się w warunkach laboratoryjnych. Aby w uproszczony sposób zasymulować warunki panujące wewnątrz obrabiarki dokonano prostego badania wpływu cieczy na prawidłowość pomiaru wykorzystywanym czujnikiem. Zmierzono suchą powierzchnię czołową wałka oraz zabrudzoną cieczą. Zestawienie rezultatów przedstawiono na rysunku 5.31.



Rys. 5.31 Porównaniu punktów zmierzonych dla powierzchni suchej oraz zabrudzonej cieczą.

Przyjmując powierzchnię suchą, jako referencyjną widzimy, iż zarejestrowane punkty tworzą linię która reprezentuje rzeczywistą powierzchnię. Kolorem zielonym przedstawiono natomiast obraz punktów zmierzonych po zabrudzeniu cieczą. Widać, iż punkty te tworzą przerywana linię. Zarejestrowano także liczne punkty odbite będące zakłóceniami obrazu. Co więcej, ciecz miała wpływ na wartość pomiaru, co spowodowało wzrost wymiaru referencyjnego, w badanym przypadku o około 0,1 mm. Próby pomiaru zarysu gwintowego dały jeszcze gorsze rezultaty, dlatego ich w pracy nie przedstawiono.

5.1.3 Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż zastosowanie czujnika laserowego liniowego do pomiaru gwintów zewnętrznych jest możliwe, jednak otrzymane wyniki są mało precyzyjne. Jedynie w przypadku powierzchni matowej obraz, który uzyskano był poprawny. Profile z powierzchni błyszczących zawierały liczne szумы będące efektem refleksów świetlnych. Można je minimalizować poprzez pochylenie mierzonego przedmiotu względem układu pomiarowego, co pozwala na zbliżenie do prostopadłości kąta padania wiązki światła lasera względem mierzonej powierzchni. Warto zauważyć, że istnieją inne metody eliminacji zakłóceń takie jak ustawienie ekspozycji, intensywności światła lasera czy też stosowanie filtracji, których tu nie badano.

Chcąc zastosować urządzenie do pomiaru gwintu w warunkach produkcyjnych wydaje się konieczne rozbudowanie układu o co najmniej drugi czujnik, a w przypadku pomiaru średnicy liczba czujników zwiększa się do czterech, co znacznie komplikuje budowę całego układu pomiarowego oraz znacząco podnosi jego koszty. W przypadku umieszczenia układu pomiarowego w obrabiarce sporym utrudnieniem byłoby precyzyjne ustawienie części względem czujnika laserowego przez co można zakładać, że korzystniejszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie możliwości skanowania. Niemniej jednak skanowanie, a przede wszystkim przetwarzanie i analiza chmury punktów wymaga dużej mocy obliczeniowej i jest zbyt czasochłonne.

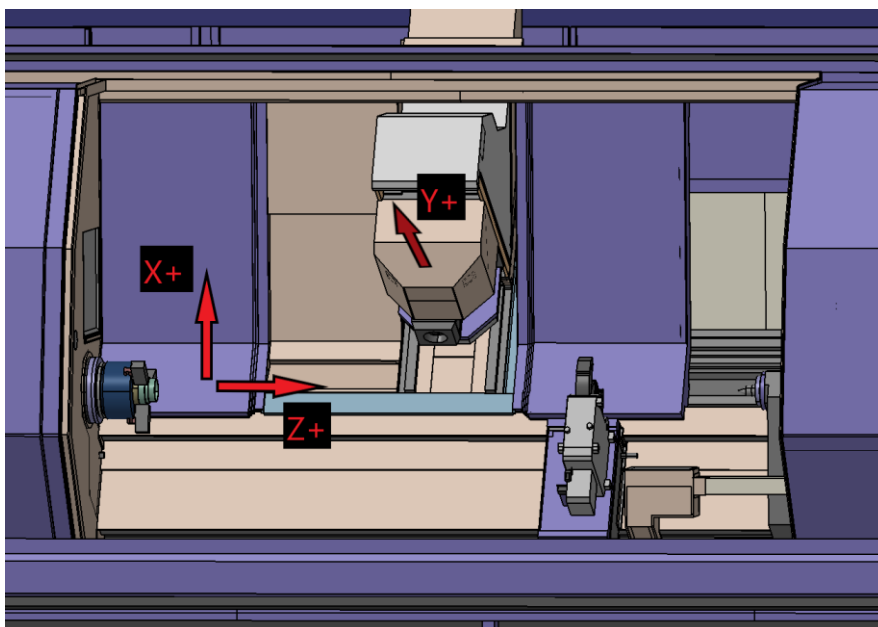
Reasumując, pomiary z zastosowaniem czujnika pracującego w oparciu o zasadę triangulacji laserowej z dużym prawdopodobieństwem znajdą rozwiązanie na linii produkcyjnej, gdzie wymagany jest szybki pomiar płaskich elementów. Biorąc jednak pod uwagę naturę gwintu, gdzie kąt padania wiązki lasera nie jest prostopadły do powierzchni, a światło odbite bywa przesłonięte przez kolejną nitkę gwintu, często nie jest możliwe zaobserwowanie całej powierzchni zarysu gwintowego. Pomimo tego, iż obecnie pomiary bezstykowe dzięki licznym zaletom zyskują spora popularność, co wykazano także w przeglądzie literatury, to jednak w przypadku szukanego rozwiązania nie wydają się być dobrym rozwiązaniem.

5.2 Badanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania obrabiarki WFL M40

5.2.1 Metodyka badań

Badania prowadzono na wielozadaniowym centrum tokarsko-frezarskim WFL M40. Obrabiarka ta jest kontrolowana za pomocą sterownika Sinumerik 840D sl. Oprócz standardowych osi przesuwnych X (oś pionowa) oraz Z (oś pozioma) maszyna ma możliwość przesuwu wzdłuż osi Y (w głąb maszyny) oraz obrót głowicy narzędziowej wokół osi Y, czyli oś B. Istnieje także możliwość programowego pozycjonowania obrotu wrzeciona – oś C,

oraz ruchów podtrzymki oraz konika. Kierunek podstawowych osi tokarskich przedstawiono na modelu maszyny na rysunku 5.23.



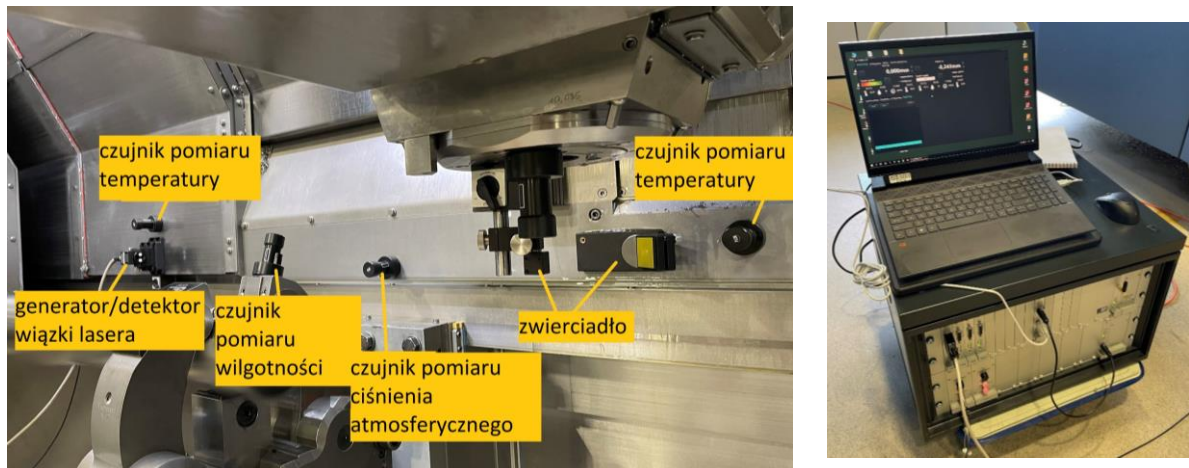
Rys. 5.32 Model przestrzeni obróbczej maszyny z zaznaczonymi osiami X, Y, Z.

Osie przesuwne maszyny pozycjonowane są za pomocą liniałów pomiarowych. Zakresy ruchu w poszczególnych osiach przedstawiono w tabeli 5.3:

Tab. 5.3 Zakresy ruchy dla maszyny WFLM40.

Oznaczenie osi	Zakres ruchu (mm / °)
X	600 (od -20 do +580)
Y	250 (od -100 do +150)
Z	3000
B	od -110 do +110

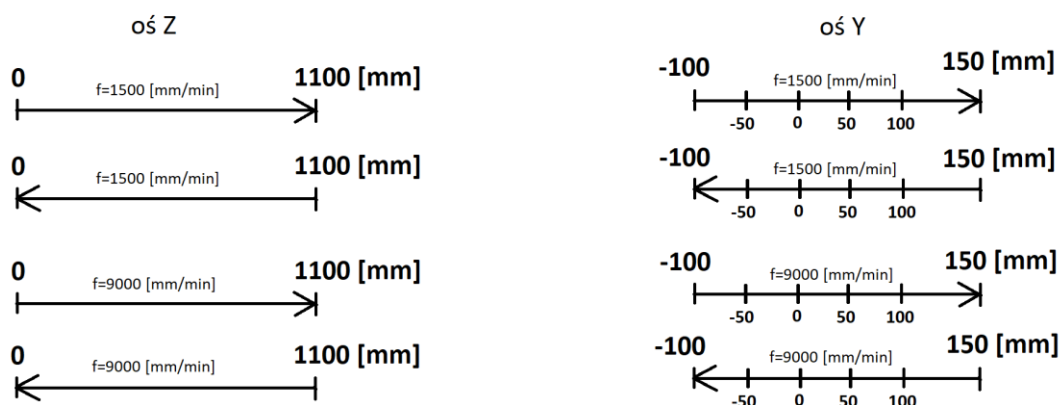
Mając na uwadze fakt, iż pozycjonowanie się sondy stykowej do pomiaru średnicy odbywa się w osi Z, a sam pomiar dokonywany jest w osi Y, postanowiono sprawdzić dokładność oraz powtarzalność pozycjonowania maszyny w tych osiach. W tym celu wykorzystano czterokanałowy interferometr laserowy LS10MC firmy Lasertex. Urządzenie posiada możliwość korekcji fazy oraz wyposażone jest w różne zestawy optyczne (zewnętrzną i wewnętrzną referencję) oraz optykę do pomiaru prostoliniowości i płaskości. Interferometr posiada rozdzielczość 100 pm oraz maksymalny błąd poniżej 0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$. Widok stanowiska badawczego do pomiaru przesunięcia głowicy w osi Y przedstawiono na rysunku 5.33.



Rys. 5.33 Widok stanowiska badawczego - interferometr laserowy.

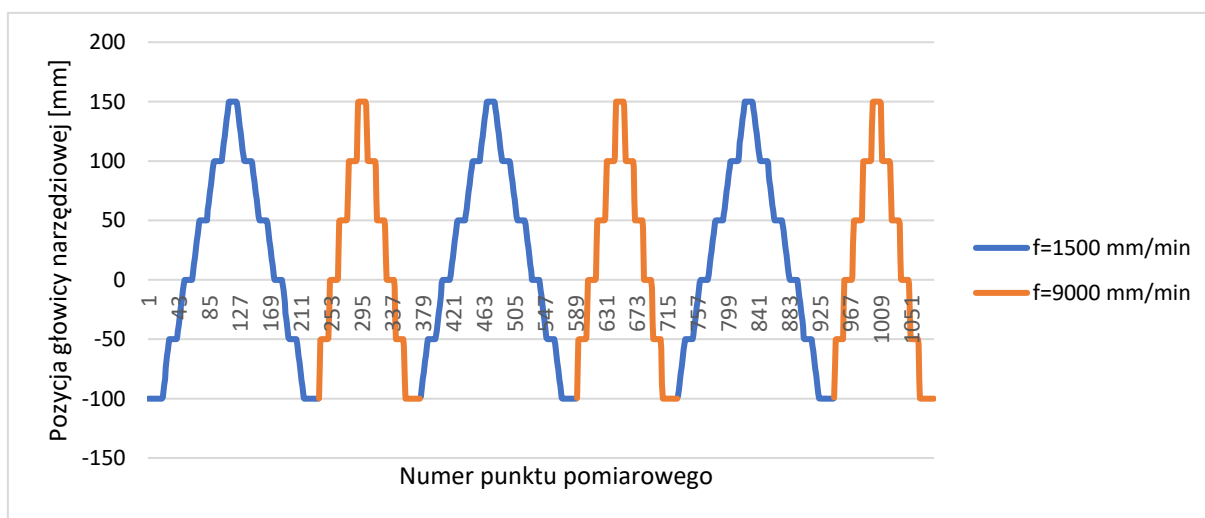
Producenci interferometrów często dostarczają procedury konfiguracji dla różnych typów pomiarów, podczas gdy międzynarodowe normy zawierają odpowiednie procedury zależne od charakterystyki testowanego urządzenia. W tym badaniu wzorowano się na normie ISO 230-2:2014 [158], która opisuje procedury pomiarowe do oceny dokładności obrabiarek sterowanych numerycznie, szczególnie dotyczące ich dokładności pozycjonowania i powtarzalności na każdej osi liniowej lub obrotowej. Wynikiem tych pomiarów mogą być jednokierunkowe lub dwukierunkowe wartości błędów pozycjonowania, powtarzalność pozycjonowania i systematyczne błędy pozycjonowania, błędy odwrócenia, średnie błędy odwrócenia, zakres średnich dwukierunkowych błędów pozycjonowania, zakres średnich dwukierunkowych błędów pozycjonowania, średnich dwukierunkowych błędów pozycjonowania itp. Pomiar przesunięcia jest najbardziej zaawansowanym typem pomiarów liniowych. Jest on również najczęściej wykorzystywany podczas pomiarów maszyn. Laserowy system pomiarowy mierzy liniowe przesunięcie, dokładność, powtarzalność i luzy maszyny poprzez porównywanie kierunku posuwu maszyny z prawdziwą wartością wskazywaną przez interferometr.

W omawianym badaniu przeprowadzono test pozycjonowania głowicy narzędziowej dla dwóch wartości posuwów $f=1500$ mm/min oraz $f=9000$ mm/min. Dokonano po 30 naprzemiennych przejazdów dla dwóch prędkości posuwu oraz dla dwóch osi Z oraz Y. W przypadku osi Z rejestrowano wartości dla pozycji 0 oraz 1100 mm, co odpowiada długości wykonywanej na tej obrabiarce części. W przypadku osi Y wykorzystano cały zakres przesunięcia od -100 do 150 mm, rejestrując wartości także w punktach pośrednich -50, 0, 50 i 100 mm. W przypadku punktów pośrednich zapisano wartości pozycji dla dwóch kierunków najazdu Y+ oraz Y-. Dla skrajnych pozycji były to najazdy jednokierunkowe. Schematy przesuwu podczas badania przedstawiono na rysunku 5.34. Urządzenie rejestrowało położenie głowicy narzędziowej z częstotliwością 5 Hz. W badanych punktach zaprogramowano postój czasowy 2 sekundy, a w celu określenia osiągniętej w tym czasie pozycji określono wartość średnią sąsiadujących punktów.



Rys. 5.34 Schemat przesuwu osi Z oraz Y podczas badania.

W celu lepszego zobrazowania eksperymentu na wykresie (rys. 5.35) przedstawiono punkty zarejestrowane wprost podczas pomiarów przesunięcia głowicy narzędziowej dla osi Y. Wykres ten przedstawia sześć pierwszych przejazdów naprzemiennie dla różnych wartości posuwu jak zostało to wcześniej opisane. Wyraźnie widoczne są miejsca, w których nastąpił postój czasowy.



Rys. 5.35 Wykres pozycjonowania głowicy narzędziowej dla sześciu pierwszych przejazdów w osi Y.

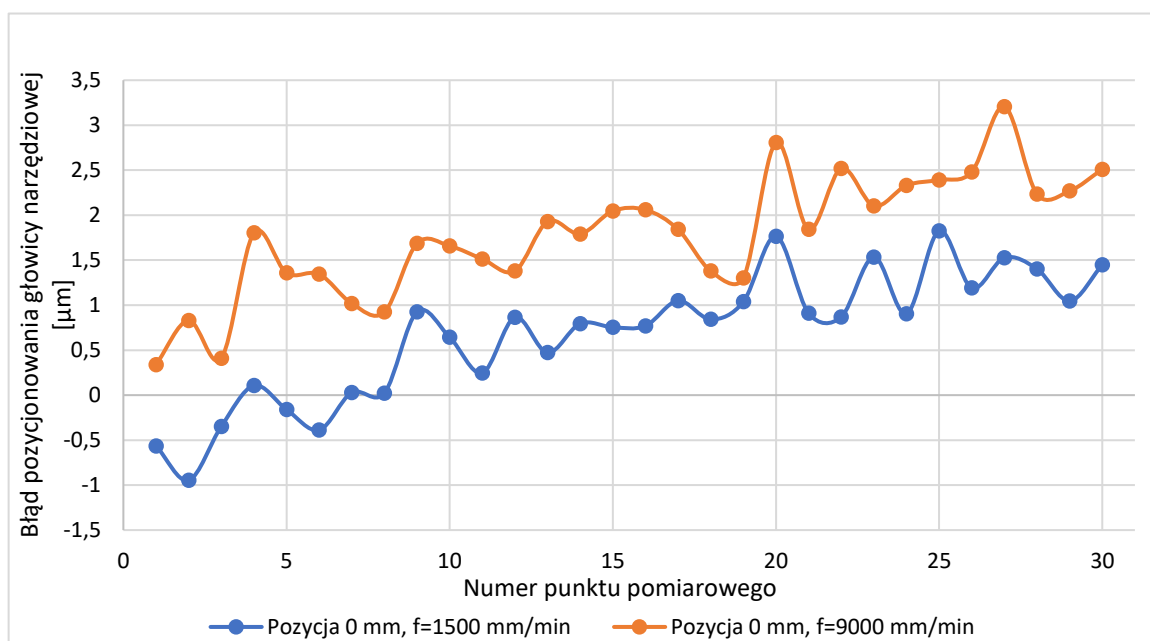
W celu zachowania stabilności termicznej urządzenia pomiarowe stabilizowano wcześniej przez kilka godzin w bezpośrednim sąsiedztwie obrabiarki. Należy również wspomnieć, iż badana obrabiarka znajduje się w klimatyzowanej hali produkcyjnej. Maszyna z racji tego, iż wykonywała wcześniej części produkcyjne była rozgrzana. Poza tym, po zmontowaniu układu pomiarowego dokonano próbnej serii przejazdów testowych. Podczas badania w głowicy narzędziowej nie znajdowało się żadne narzędzie. Umieszczone wewnątrz maszyny czujniki rejestrowały także temperaturę, ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność. W przypadku trwającego około jedną godzinę badania dotyczącego osi Z, temperatura na pierwszym czujniku wahała się w przedziale $25,1$ do $25,17^{\circ}\text{C}$ natomiast na drugim czujniku $25,52$ do $25,57^{\circ}\text{C}$. Wilgotność wynosiła $30-31\%$ natomiast ciśnienie atmosferyczne $1005,9$ do $1006,6$ hPa. Dla pomiarów osi Y temperatura zawierała się odpowiednio od $5,22$ do $25,3^{\circ}\text{C}$

oraz od 25,82 do 25,9°C. Ciśnienie atmosferyczne 1005,4 do 1005,6 hPa oraz wilgotność jak poprzednio 30-31%.

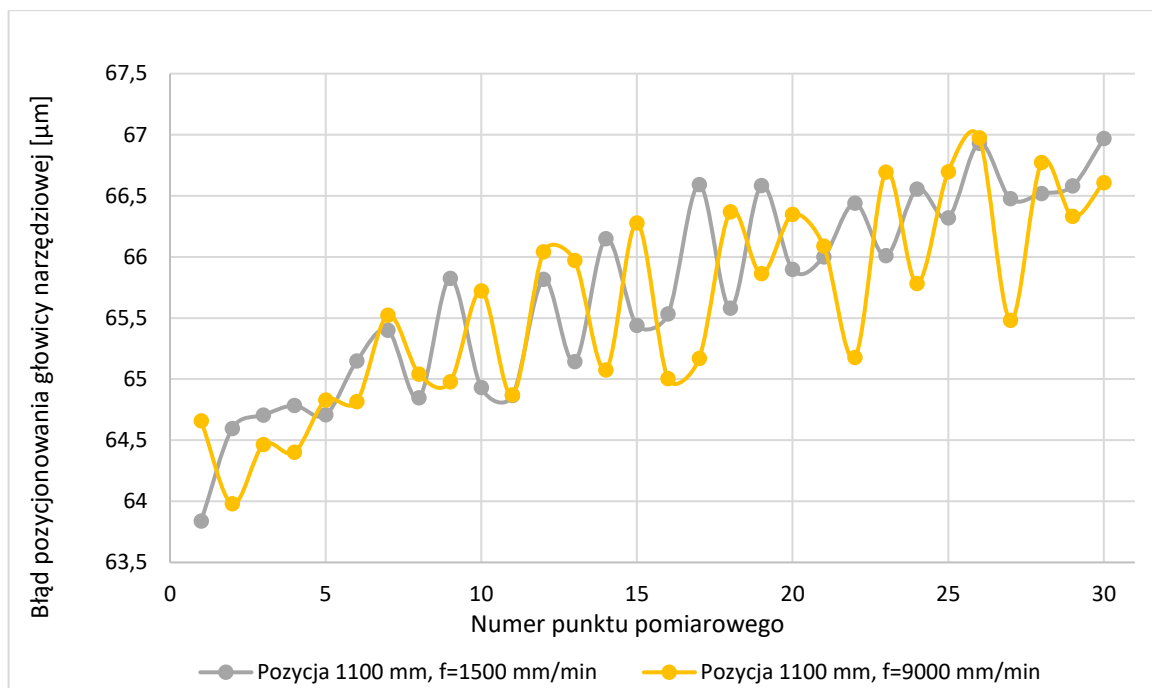
Na podstawie zebranych danych określono dokładność i powtarzalność pozycjonowania dla każdej z badanych pozycji P_i bazując na wartości średniej arytmetycznej \bar{x}_i oraz odchyleniu standardowemu s_i z serii 30 pomiarów. Jako estymator powtarzalności jednokierunkowego pozycjonowania przyjęto zgodnie z normą [158] wskaźnik $R_i=4s_i$ stosując współczynnik rozszerzenia $k=2$. Wartość luzu nawrotnego wyznaczono na podstawie zależności $B_i=\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$, gdzie strzałka oznacza kierunek najazdu. Dla wyznaczenia estymatora powtarzalności dwukierunkowej pozycjonowania zastosowano zależność $R_i=\max.[2 s_i \uparrow + 2 s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow]$. Wyniki porównano w zależności od zadanej wartości pozycji, kierunku najazdu, a także wartości posuwu.

5.2.2 Wyniki

Rysunki 5.36 i 5.37 przedstawiają kolejne wartości pozycji zarejestrowanych dla badania osi Z. Wyraźnie widać, iż wartości błędów, które wyznaczono dla pozycji 1100 mm są wyższe, a niżeli pozycji 0 mm o około 65 μm . Zauważono także, że pomimo zastosowania procedury rozgrzewania maszyny wartości błędu dla obu pozycji zmieniają się równo w czasie. Jeżeli chodzi o znaczenie wartości posuwu na dokładność pozycjonowana zaobserwowano niewielki wpływ dla pozycji 0 mm. W przypadku najazdu z szybkim posuwem otrzymano średni błąd większy o około 1 μm , w porównaniu do posuwu $f=1500$ mm/min. Dla rejestrowanej pozycji 1100 mm nie zaobserwowano wpływu zwiększenia posuwu na dokładność pozycjonowania. Wartość wskaźnika powtarzalności jednokierunkowego pozycjonowania wyniosła dla pozycji 0 mm $R_{i0}=2,78$ μm , natomiast dla pozycji 1100 mm $R_{i1100}=3,20$ μm .



Rys. 5.36 Wykres błędów pozycjonowania głowicy narzędziowej w osi Z dla pozycji 0 mm.



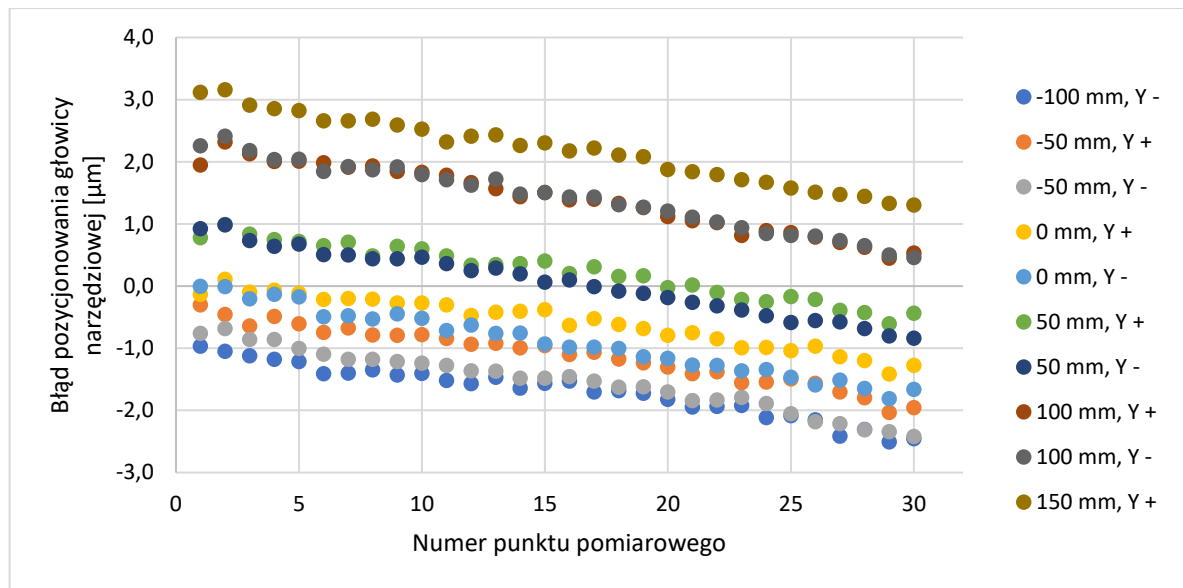
Rys. 5.37 Wykres błędów pozycjonowania głowicy narzędziowej w osi Z dla pozycji 1100 mm.

Omówione wcześniej wyniki zestawiono w tabeli 5.4.

Tab. 5.4 Wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania dla osi Z.

	$f=1500$ mm/min		$f=9000$ mm/min	
	1	2	3	4
Zadana pozycja P_i [mm]	0	1100	0	1100
Kierunek najazdu	↓	↑	↓	↑
Wartość średnia odchylenia od pozycji zadanej \bar{x}_i [μm]	0,69	65,71	1,78	65,60
Odchylenie standardowe s_i [μm]	0,70	0,80	0,66	0,80
Powtarzalność jednokierunkowa R_i [μm]	2,78	3,20	2,66	3,20

Wyniki błędów pozycjonowania dla osi Y, posuw $f=1500$ mm/min przedstawiono na wykresie (rys. 5.38). Można zaobserwować podobnie jak poprzednio, iż wraz z czasem wartości błędów zmieniają się liniowo dla każdego punktu pomiarowego.



Rys. 5.38 Wykres błędów pozycjonowania głowicy narzędziowej w osi Y dla posuwu $f=1500$ mm/min.

Omawiając te dane można przyjąć za wartość referencyjną pozycję w okolicach środka osi, czyli w tym przypadku wartość 50 mm. Wraz z oddalaniem się głowicy od wartości środkowej wzrasta wartość błędu pozycjonowania osiągając wartość nieco ponad $2 \mu\text{m}$ dla pozycji 150 mm. Nie bez znaczenia jest także kierunek najazdu na zadaną pozycję. Niemal w każdym przypadku wartości dla najazdu w kierunku dodatnim Y+ były wyższe, niż w kierunku przeciwnym Y-. Różnica ta została obliczona i umieszczona w tabeli 5.5 oraz tabeli 5.6 jako luz nawrotny. Można zauważyć, iż wartość luzu nawrotnego wzrasta wraz ze zbliżaniem się głowicy do minimalnej wartości w osi Y dla posuwu $f=1500$ mm/min. Dla posuwu szybkiego $f=9000$ mm/min ta zależność nie została potwierdzona. Nie stwierdzono istotnej zmiany wartości wskaźnika powtarzalności jednokierunkowej w zależności od posuwu. Biorąc pod uwagę zadane pozycje wartość ta minimalnie wzrosła od około $1,7 \mu\text{m}$ dla Y=-100 do nieco ponad $2,1 \mu\text{m}$ dla Y=150.

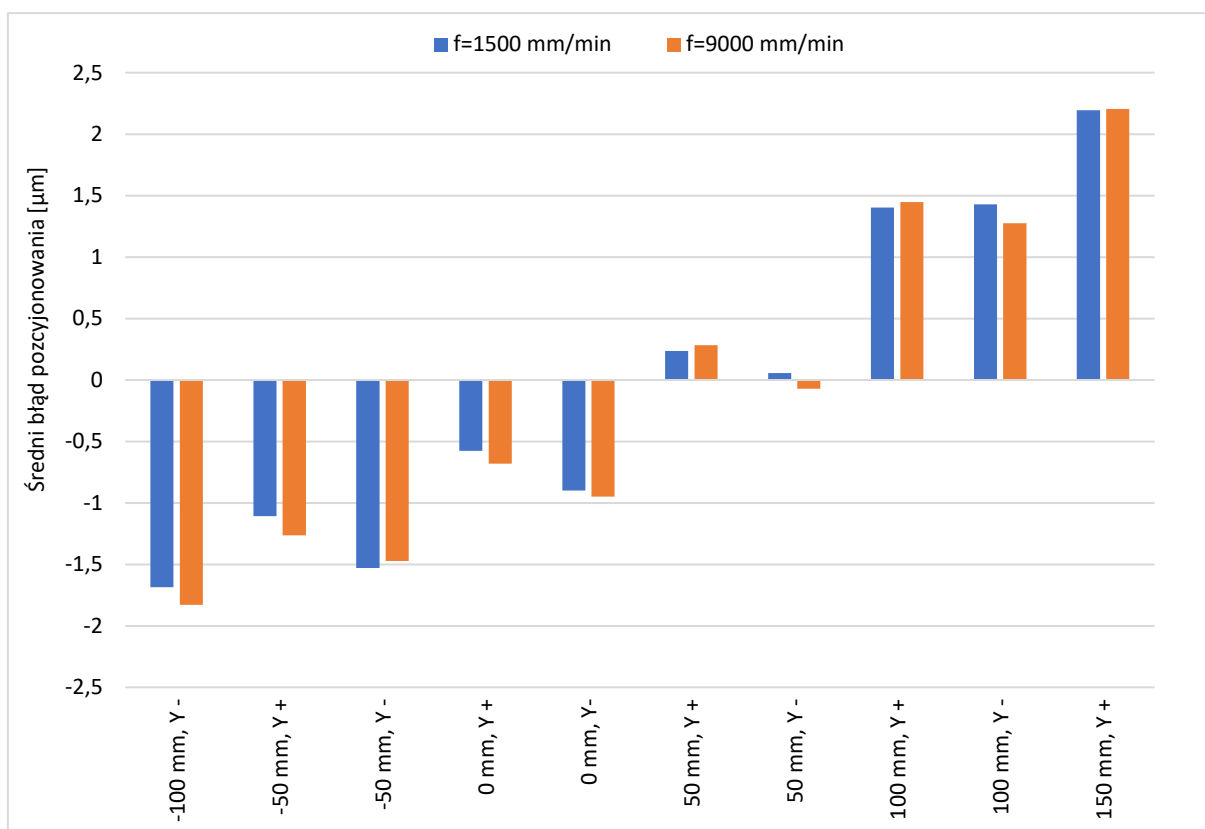
Tab. 5.5 Wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania dla osi Y, $f=1500$ mm/min.

$f=1500$ mm/min										
	1	2		3		4		5		6
Zadana pozycja P_i [mm]	-100	-50		0		50		100		150
Kierunek najazdu	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Wartość średnia odchylenia od pozycji zadanej \bar{x}_i [μm]	-1,69	-1,11	-1,53	-0,58	-0,90	0,24	0,06	1,40	1,43	2,19
Odchylenie standardowe s_i [μm]	0,42	0,45	0,48	0,40	0,52	0,43	0,52	0,53	0,54	0,54
Powtarzalność jednokierunkowa R_i [μm]	1,67	1,80	1,92	1,62	2,09	1,73	2,06	2,11	2,16	2,14
Luz nawrotny B_i [μm]	-	0,42		0,32		0,18		-0,02		-
Powtarzalność dwukierunkowa R_i [μm]	-	2,28		2,18		2,08		2,16		-

Tab. 5.6 Wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania dla osi Y, $f=9000$ mm/min.

$f=9000$ mm/min										
	1	2		3		4		5		6
Zadana pozycja P_i [mm]	-100	-50		0		50		100		150
Kierunek najazdu	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
Wartość średnia odchylenia od pozycji zadanej \bar{x}_i [μm]	-1,83	-1,26	-1,47	-0,68	-0,95	0,28	-0,07	1,45	1,28	2,20
Odchylenie standardowe s_i [μm]	0,41	0,46	0,44	0,52	0,42	0,50	0,44	0,52	0,54	0,52
Powtarzalność jednokierunkowa R_i [μm]	1,66	1,83	1,77	2,08	1,69	2,00	1,76	2,08	2,16	2,10
Luz nawrotny B_i [μm]	-	0,21		0,27		0,35		0,17		-
Powtarzalność dwukierunkowa R_i [μm]	-	2,01		2,16		2,23		2,29		-

W celu określenia wpływu prędkości posuwu na dokładność pozycjonowania, na wykresie (rys. 5.39) zestawiono średnie błędy pozycjonowania dla wszystkich pozycji w osi Y.



Rys. 5.39 Wykres średnich błędów pozycjonowania głowicy narzędziowej w osi Y w zależności od wartości posuwu.

Analizując wykres 5.39 można zauważyć, że średnie błędy pozycjonowania głowicy narzędziowej różnią się nieznacznie w zależności od wartości posuwu.

5.2.3 Wnioski

Przeprowadzony przy użyciu interferometru laserowego eksperyment pozwolił na określenie danych dotyczących dokładności oraz powtarzalności pozycjonowania obrabiarki WFL M40. Zauważono, iż wraz ze wzrostem odległości zadanej od wymiaru referencyjnego błąd pozycjonowania zwiększa się. Z tego powodu wartość błędu dla osi Z była znacznie

większa, a niżeli dla osi Y. Warto podkreślić, że długość zakresu przesuwu dla osi Z w przypadku tej maszyny jest dwunastokrotnie większa od zakresu osi Y. Poza tym, biorąc pod uwagę fakt, iż obrabiarka ta wykonuje głównie procesy tokarskie, oś Z jest wykorzystywana niemalże przy każdym ruchu głowicy. Pozycjonowanie w osi Y ma miejsce przede wszystkim podczas frezowania, które występuje tylko w jednej z pięciu operacji mechanicznych dla wytwarzanych wałów. Oś Y jest także osią pomiarową dla wyznaczania wartości średnic poprzez sondę inspekcyjną, a zatem uzyskany wynik jest szczególnie ważny w omawianym przypadku.

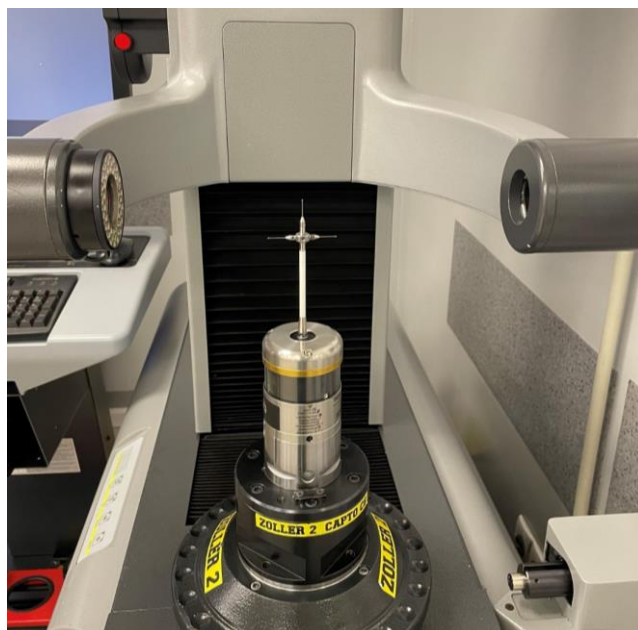
Nie zauważono istotnych zmian w otrzymanych wynikach w zależności od zadanego posuwu. Dokładność pozycjonowania zmienia się w zależności od kierunku najazdu na zadaną pozycję. Świadczy to o występowaniu luzu nawrotnego w osi Y o maksymalnej, zaobserwowanej wartości $0,42\ \mu\text{m}$. Luz ten zmienia się w zależności od pozycji głowicy. Z pewnością wartość ta ma znaczenie przy pomiarach sondą pomiarową, gdyż cykl pomiaru średnicy przeprowadzany jest dwupunktowo zbierając jeden punkt w kierunku Y-, drugi natomiast Y+. Wpływa ona bezpośrednio na wartość wskaźnika dwukierunkowej powtarzalności pozycjonowania maszyny, gdzie uzyskano nieco ponad $2\ \mu\text{m}$.

Mimo zastosowania procedury rozgrzania maszyny zaobserwowano postępującą w czasie zmianę wartości osiąganą pozycji, gdzie np. dla osi Z wartość zarejestrowana dla pozycji 0 wzrosła w ciągu trwającego prawie jedną godzinę badania o około $2\ \mu\text{m}$. Wniosek ten podkreśla znaczenie stabilizacji termicznej maszyny na jakość wytwarzanych części, która szczególnie istotna jest w procesach wytwarzania precyzyjnych elementów z przemysłu lotniczego.

5.3 Porównanie sond pomiarowych

5.3.1 Metodyka badań


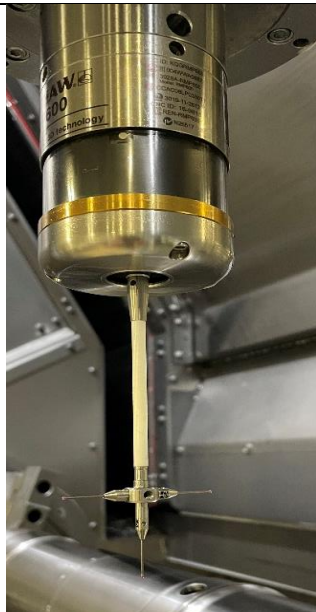
Badania porównawcze sond pomiarowych [159, 160, 161] przeprowadzono na poziomym, wielozadaniowym centrum obróbczym WFL M40, z wykorzystaniem sterowania Siemens Sinumerik 840D. Warto podkreślić, że omawiane stanowisko znajduje się w klimatyzowanej hali produkcyjnej, gdzie na codzień produkowane są komponenty typu wał, przeznaczone do zastosowań w przemyśle lotniczym. Ze względu na ograniczone możliwości testowe, związane z dostępnością maszyn, ich wyposażeniem, a także ze względu na cel badania, jakim jest wybór sondy do pomiaru gwintów zewnętrznych, przeprowadzono test porównawczy dwóch rodzajów sond stykowych firmy Renishaw o następującej konfiguracji. Pierwsza sonda zbudowana z modułu bezprzewodowej transmisji sygnału RMP40M wraz z modułem mierzącym LP2, wyposażona w trzpień o długości 50 mm i średnicy kulki 2 mm, jest sondą elektrostykową zwana też kinematyczną. Z kolei sonda RMP600 wyposażona została w trzpień o długości 75 mm, zakończony adapterem typu gwiazda, w którym zamontowane są dwie końcówki poziome oraz jedna pionowa, każda o długości 20 mm i średnicy kulki 1 mm. Układ pomiarowy tej sondy działa na bazie tensometrów. Końcówkę pionową opisano jako D1, a poziome końcówki jako D2. Bicie końcówki sondy ustawiono przy pomocy śrub regulacyjnych sprawdzając wychylenie od osi na przyrządzie ustawczo-pomiarowym Zoller Venturion 600 (rys. 5.40). Dopuszczalna wartość bicia promieniowego zalecana przez producenta powinna być mniejsza niż $5\ \mu\text{m}$.



Rys. 5.40 Pomiar geometrii sondy przy pomocy urządzenia Zoller.

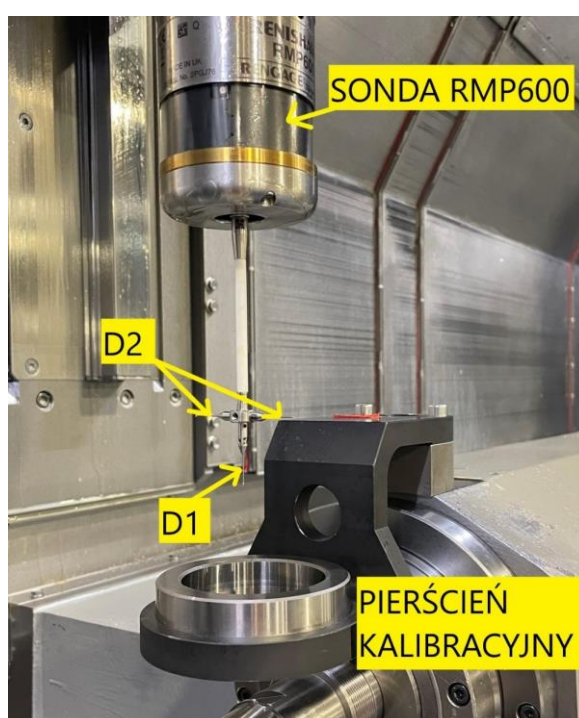
Badane sondy wraz z wybranymi parametrami przedstawiono w tabeli 5.7.

Tab. 5.7 Widok badanych sond pomiarowych wraz z parametrami.

	RMP40M + LP2	RMP600
Powtarzalność jednokierunkowa	1 $\mu\text{m } 2\sigma$	0,25 $\mu\text{m } 2\sigma$
Siła wyzwolenia XY	0,5 N	0,2 N
Widok sondy		

Powtarzalność jednokierunkowa sondy elektrostatycznej deklarowana przez producenta to 1 μm dla 2σ , natomiast sondy tensometrycznej 0,25 μm dla 2σ . Siła wyzwolenia RMP40M+LP2 w kierunku XY to 0,5 N natomiast dla RMP600 0,2 N. Oba typy sond wykorzystywały radiową transmisję sygnału. Do pomiarów użyto cykli pomiarowych opracowanych przez producenta

maszyny WFL, bazujących na standardowych cyklach Sinumerik 840D. Pomiary zostały zaprogramowane w kodzie NC i uruchomione w trybie automatycznym. Wszystkie zebrane dane punktowe zostały zapisane w tabeli zmiennych R, dostępnej w kontrolerze Sinumerik. Temperatura wewnątrz maszyny monitorowana była za pomocą rejestratora TERMIO firmy Termoprodukt o rozdzielczości 0,1°C. Końcówkę pomiarową w sondzie RMP40M+LP2 oraz RMP600 D1 skalibrowano na pierścieniu poprzez pomiar czteropunktowy, zgodnie z procedurą obowiązującą w oprogramowaniu obrabiarki. Dwie końcówki poziome RMP600 D2 skalibrowano na pierścieniu poprzez pomiar dwupunktowy (rys. 5.41). Mimo obecności czynników zakłócających, takich jak wibracje, chłodziwo, emulsja smarująca i mikrowióry, które potencjalnie mogły wpłynąć na pomiary, warto zaznaczyć, że elementy pomiarowe oraz maszyna zostały dokładnie oczyszczone, minimalizując ryzyko błędów wynikających z zanieczyszczeń, nawet w warunkach produkcyjnych.



Rys. 5.41 Widok sondy RMP600 podczas kalibracji.

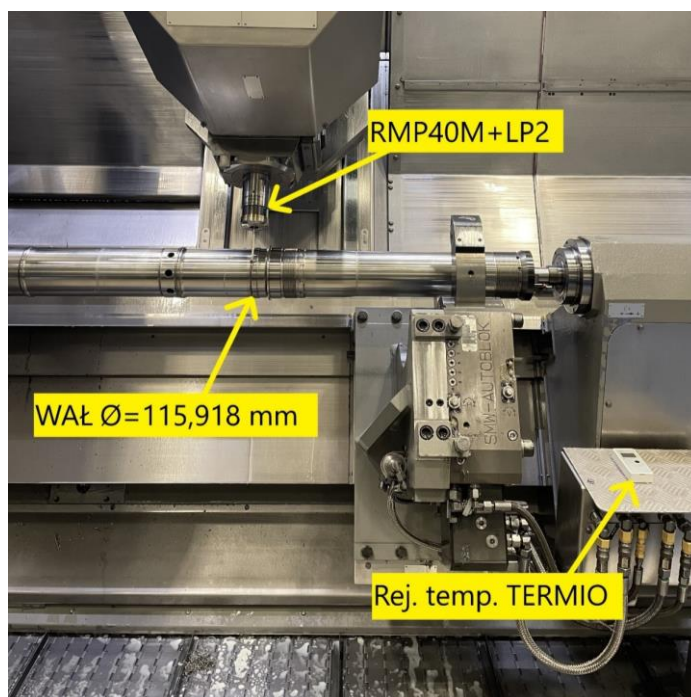
Wartość korekcji sondy ustalana jest poprzez kalibrację trzpienia pomiarowego na pierścieniu o precyzyjnie określonej średnicy wewnętrznej. Aby zapewnić dokładność i powtarzalność kalibracji, pierścień musi zostać wyczyszczony przed kalibracją i utrzymany w tej samej temperaturze co urządzenie. Używany trzpień pomiarowy musi być ponownie kalibrowany od podstaw po każdej instalacji lub wymianie końcówki pomiarowej, a także po wystąpieniu kolizji. Ważne jest, aby śruby regulacyjne sondy były zawsze dokładnie dokręcone, ponieważ narzędzie jest narażone na wibracje. Pomimo tego, że powtarzalność układu wyzwalania sygnału jest zazwyczaj bardzo wysoka podczas normalnego użytkowania, układ pomiarowy jest regularnie kalibrowany, co najmniej raz w tygodniu. Początkowo przeprowadza się dwa powtórzenia pomiarowe w celu określenia środka pierścienia. Następnie przeprowadza się serię pomiarów, aż do momentu uzyskania powtarzalności pięciu kolejnych pomiarów w zakresie 1 μm . Dane kalibracyjne dla każdej pozycji i sondy są przechowywane

w urządzeniu, a konkretne numery danych kalibracyjnych dla wybranej sondy muszą być wywoływane w zależności od pozycji pomiarowej.

Wykonano kilka serii pomiarowych przy użyciu każdej z sond. Mierzono średnice na szlifowanym pierścieniu o średnicy wewnętrznej $\varnothing=58,004$ mm oraz na szlifowanej średnicy zewnętrznej wału o wymiarze $\varnothing=115,918$ mm potwierdzonej pomiarem manualnym. W zależności od możliwości pomiarowych związanych z ograniczeniami konfiguracji sondy, obrabiarki, czy też dostępnych cykli pomiarowych wymiary wyznaczano z dwóch lub czterech punktów. Standardowe pomiary średnic zewnętrznych na częściach typu wał na omawianej obrabiarkie mierzone są w procesie produkcyjnym za pomocą dwóch punktów w kierunku osi Y.

Podczas pierwszego badania dokonano 15 naprzemiennych pomiarów sondą RMP600. Mierzono średnicę wewnętrzną pierścienia, czteropunktowo końcówką D1 i dwupunktowo D2. W kolejnym kroku przeprowadzono serię 50 pomiarów dwupunktowych tego samego pierścienia przy pomocy końcówki D1, raz w kierunku osi Y, raz w kierunku Z. Podczas pomiarów zanotowano stałą temperaturę w przedziale 23,2 do 23,5°C.

W kolejnym badaniu mierzono zewnętrzną średnicę na produkowanej części typu wał przy użyciu pomiaru dwupunktowego w kierunku osi Y (rys. 5.42). Przeprowadzono 2 serie pomiarowe bez oddawania sondy do magazynu narzędziowego oraz z oddawaniem. Porównywano sondę RMP40M+LP2 z sondą RMP600 D2. Pomiar 15 powtórzeń miał na celu przede wszystkim sprawdzenie poprawności kalibracji sondy. Zgodnie z zaleceniami producenta, powtarzalność wyników jest weryfikowana przez pięć kolejnych pomiarów. Cztery serie pomiarowe po 50 powtórzeń zostały przeprowadzone jednego dnia, gdzie temperatura zmieniała się w zakresie 23,5 do 23,7°C. Dwie kolejne serie pomiarowe przeprowadzono kolejnego dnia po całonocnym przestoju i „wychłodzeniu” maszyny. Temperatura zarejestrowana wewnątrz maszyny wynosiła od 22,8 do 23,1°C.



Rys. 5.42 Pomiar średnicy zewnętrznej wału sondą elektrostykową.

Z pewnością stabilność temperatury na hali produkcyjnej, wewnątrz maszyny i temperatury chłodziwa jest niezbędna, jednak wahania temperatury podczas testów były znikome. Biorąc pod uwagę rozszerzalność cieplną materiałów, wpływa ona na komponenty maszyny, przedmiot obrabiany i przyrządy pomiarowe. Aby zapewnić dokładne pomiary, każdy z tych elementów powinien mieć taką samą temperaturę, która powinna również odpowiadać temperaturze w placówce kontroli jakości oraz podczas wzorcowania. Temperatura powietrza jest ważna, ale same napędy również podlegają zmianom temperatury podczas ruchu, stąd potrzeba zastosowania programów rozgrzewania w celu stabilizacji termicznej napędów. Jest to szczególnie istotne w przemyśle lotniczym, gdzie podczas procesu toczenia wykonywane są elementy z tolerancją nawet $\pm 5 \mu\text{m}$.

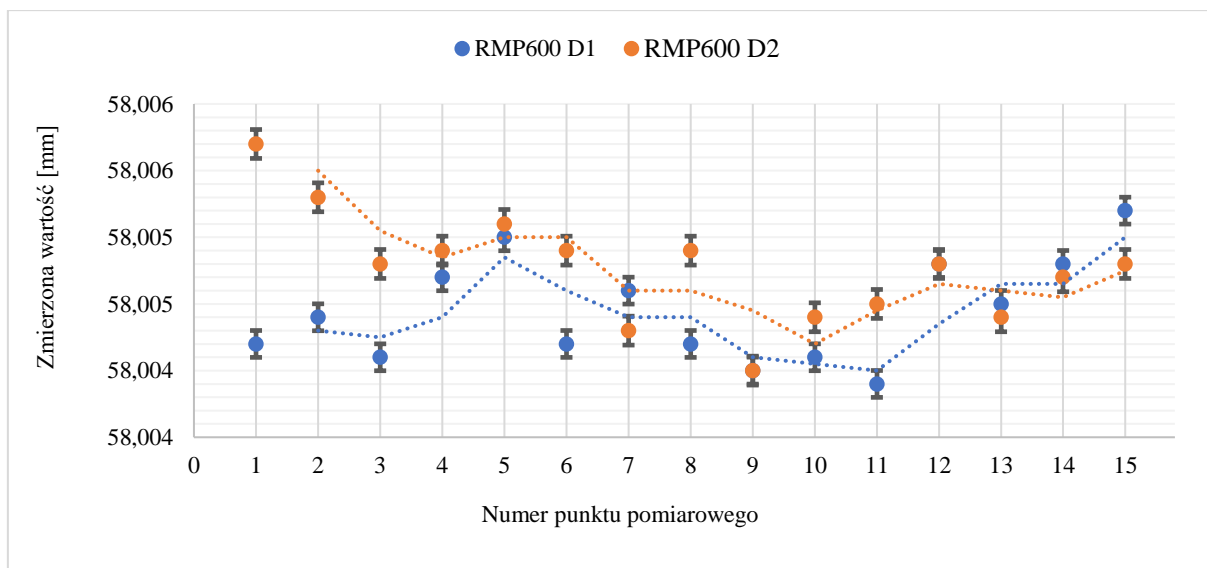
Zebrane wyniki zostały przeanalizowane przy pomocy programu Excel. Określono średnią wartość arytmetyczną, wartość minimalną (Min.), maksymalną (Max.), różnicę między skrajnymi wartościami, czyli rozrzut (Max.-Min.), odchylenie standardowe od wartości średniej σ , oraz wartość 2σ , którą można utożsamiać z rozszerzoną niepewnością pomiarową U dla zakresu ufności 95%.

5.3.2 Wyniki

Wyniki pomiarów średnicy wewnętrznej pierścienia wzorcowego $\varnothing=58,004 \text{ mm}$ sondą RMP600 przedstawiono w tabeli 5.8 oraz na wykresie (rys. 5.43). Wyniki zarówno dla pionowej końcówki pomiarowej D1 jak i końcówek poziomych oznaczonych jako D2 są zbliżone. W obu przypadkach uzyskano średnie wartości zbliżone do wymiaru nominalnego co potwierdziło poprawność skalibrowania sondy. Zauważono, że tensometryczny układ pomiarowy jest bardzo precyzyjny i niezależnie od rodzaju trzpienia pomiarowego wartość niepewności dla 2σ wyniosła $U=0,8 \mu\text{m}$. Rozrzut wyników był losowy i nie zaobserwowano liniowego trendu zmiany uzyskiwanych wartości.

Tab. 5.8 Wartości otrzymane dla pomiarów średnicy wewnętrznej pierścienia $\varnothing=58,004 \text{ mm}$.

	Min. [mm]	Średnia [mm]	Max. [mm]	Max.-Min. [mm]	σ [mm]	2σ [mm]
RMP600 D1	58,0039	58,0044	58,0052	0,0013	0,0004	0,0008
RMP600 D2	58,0040	58,0048	58,0057	0,0017	0,0004	0,0008

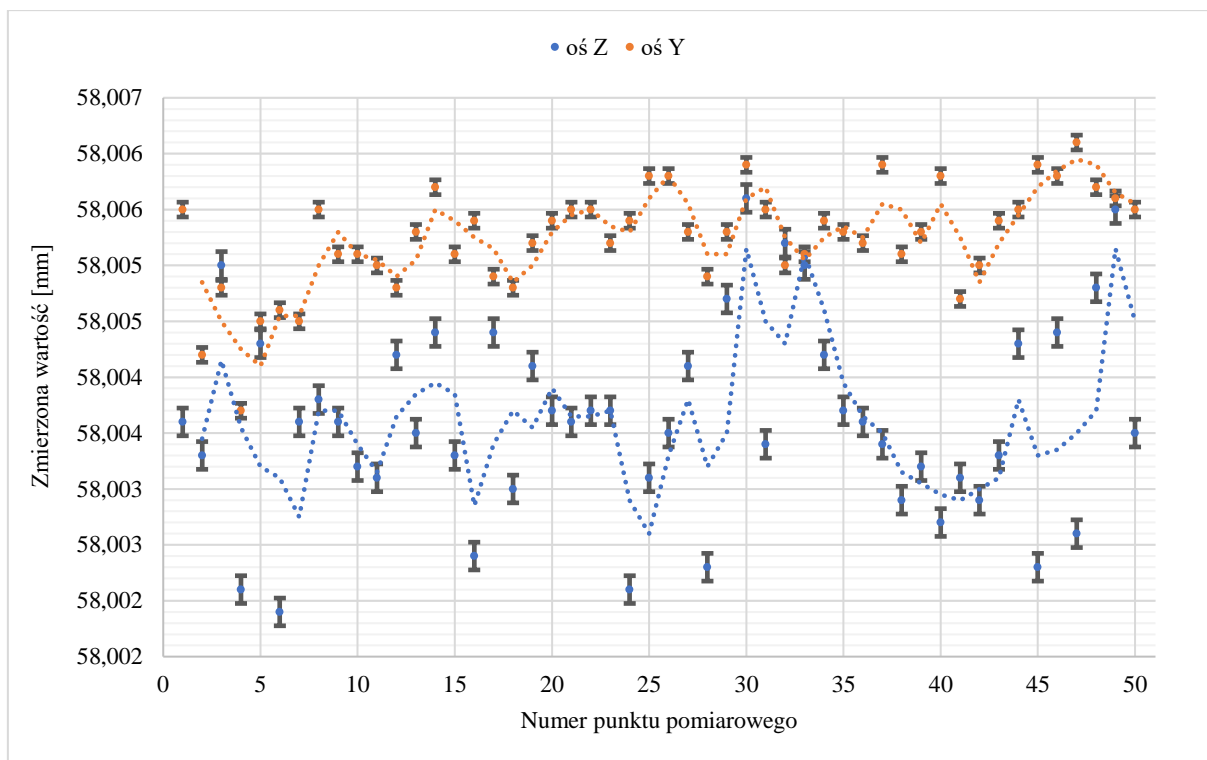


Rys. 5.43 Wyniki serii pomiarów pierścienia $\varnothing=58,004$ mm przy użyciu sondy RMP600 o końcówkach D1 i D2.

W celu sprawdzenia wpływu kierunku pomiaru na otrzymane wyniki dokonano serii 50 pomiarów dwupunktowych średnicy wewnętrznej pierścienia raz w kierunku osi Z, raz w kierunku osi Y. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 5.9 oraz na wykresie (rys. 5.44). Zaobserwowano różnice w pomiarach dla poszczególnych osi. Wartości średnie między dwiema seriami pomiarowymi różniły się o $1,7 \mu\text{m}$. Może to wynikać z błędu kształtu pierścienia, a także z samej kalibracji końcówki D1. Jak wyżej wspomniano została ona skalibrowana poprzez pomiar czteropunktowy natomiast w badaniu wyznaczano średnicę z dwóch punktów. Co istotne, o ile dla osi Y uzyskano niepewność pomiarową porównywalną z poprzednią, tak dla osi Z była ona dwukrotnie większa i wynosiła $U=1,8 \mu\text{m}$. Powodem tego może być zużycie osi Z, która ma zdecydowanie większy zakres ruchu, a także jest najbardziej obciążona podczas toczenia wzdłużnego.

Tab. 5.9 Wartości otrzymane dla pomiarów w osiach Y i Z średnicy wewnętrznej pierścienia $\varnothing=58,004$ mm.

	Min. [mm]	Średnia [mm]	Max. [mm]	Max-Min. [mm]	σ [mm]	2σ [mm]
oś Z	58,0019	58,0036	58,0056	0,0037	0,0009	0,0018
oś Y	58,0037	58,0053	58,0061	0,0024	0,0005	0,0009



Rys. 5.44 Wyniki serii pomiarów przy użyciu końcówki RMP600 D1 w osiach Y i Z średnicy wewnętrznej pierścienia $\varnothing=58,004$ mm.

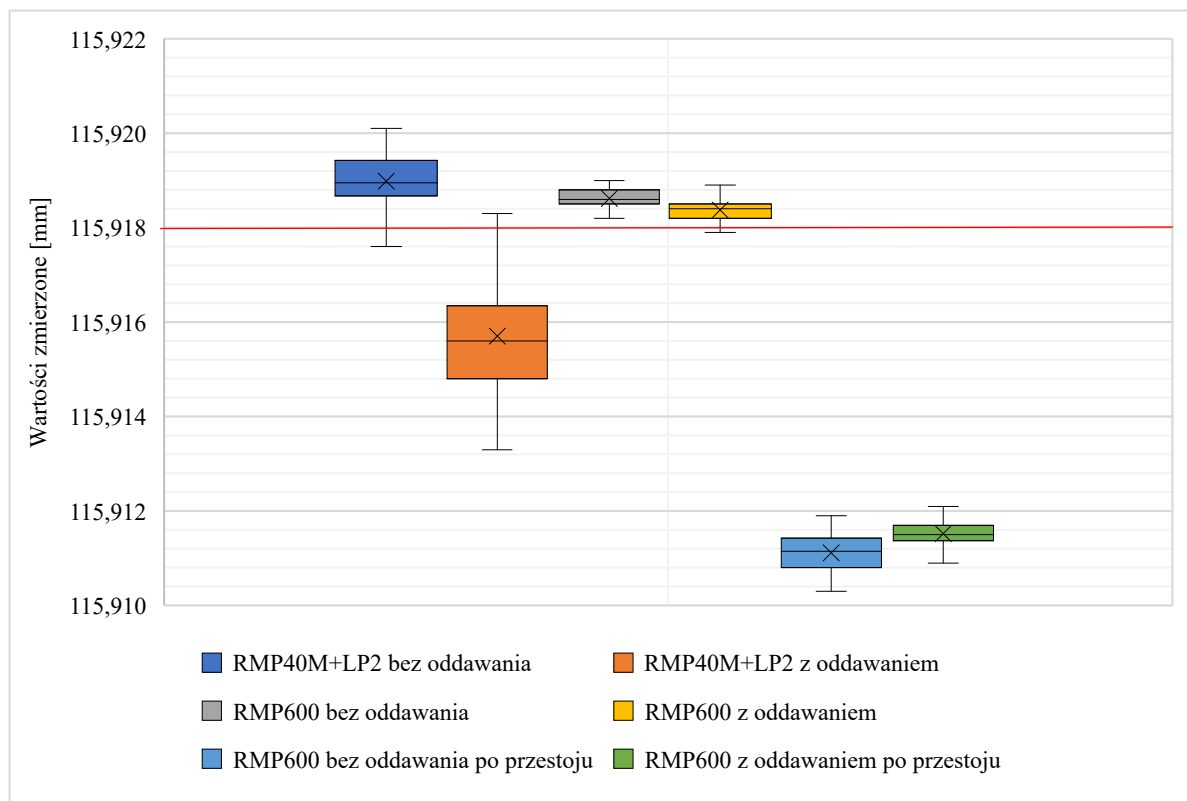
W tabeli 5.10 oraz na rysunkach 5.45 i 5.46 przedstawiono zestawienie rezultatów dla serii pomiarowych dokonanych na średnicy zewnętrznej części produkcyjnej typu wał. Porównując sondę elektrostykową z tensometryczną widać wyraźnie niższe wartości uzyskanej niepewności pomiarowej U dla RMP600. Najniższą wartość jaką udało się uzyskać wyniosła $U=0,4 \mu\text{m}$ dla przedziału ufności 95%. Co istotne, zarówno w przypadku RMP40M+LP2, jak i RMP600 zaobserwowano negatywny wpływ oddawania sondy do magazynu narzędziowego. Różnice w powtarzalności mocowania sondy w uchwycie skutkowały ponad dwukrotnie większą niepewnością dla sondy RMP40M+LP2 i półtora raza większą dla RMP600. Szczególnie wrażliwy na zakłócenia okazał się pomiar sondą elektrostykową z oddawaniem narzędzia do magazynu. W tym przypadku uzyskano wartość niepewności 2σ na poziomie $U=2,7 \mu\text{m}$. Rozbieżności zaobserwowano także w wartościach średnich otrzymanych dla serii 50 pomiarów. Jeżeli chodzi o sondę tensometryczną oddawanie narzędzia do magazynu nie spowodowało istotnych różnic, natomiast dla RMP40 średni wynik w przypadku oddawania sondy było o $3,3 \mu\text{m}$, aniżeli bez.

Tab. 5.10 Wartości otrzymane dla pomiaru średnicy zewnętrznej wału $\varnothing=115,918$ mm.

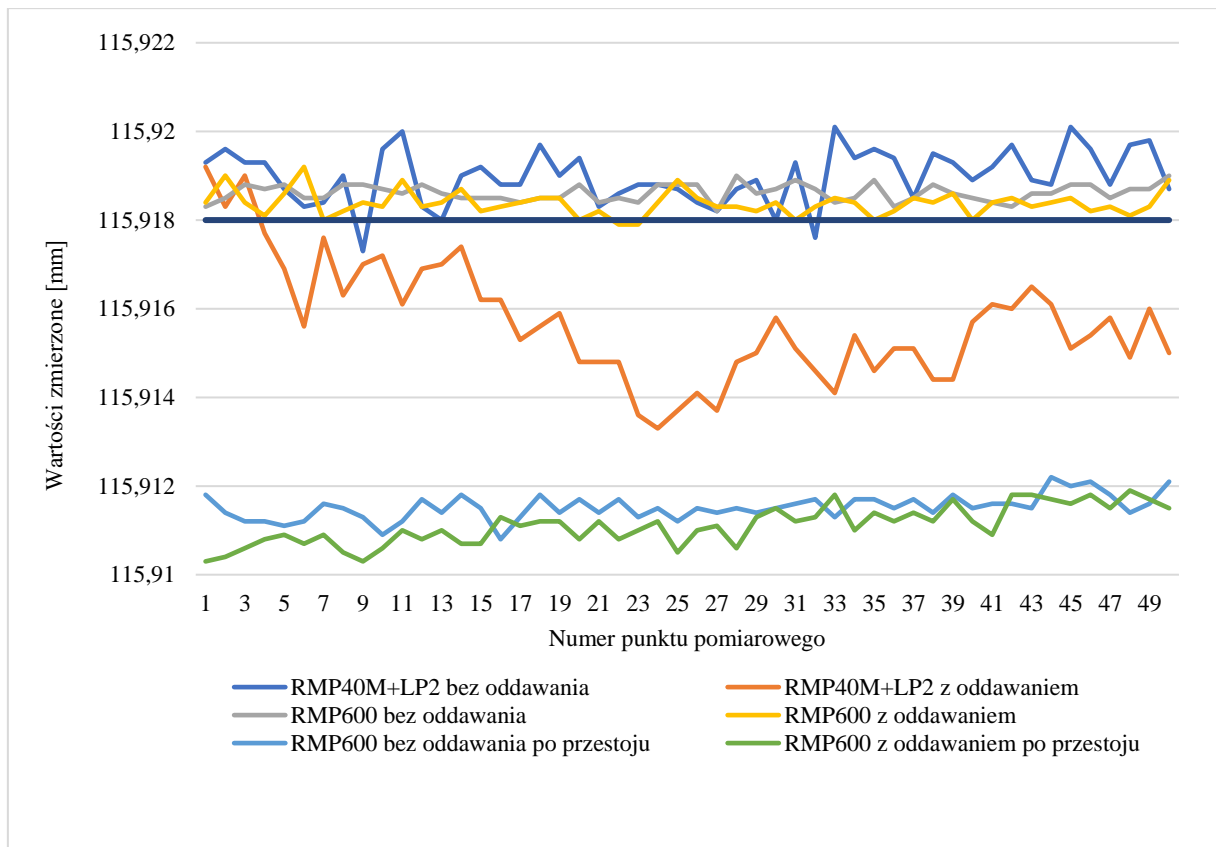
	Min. [mm]	Średnia [mm]	Max. [mm]	Max.- Min. [mm]	σ [mm]	2σ [mm]
RMP40M+LP2 bez oddawania	115,9173	115,9190	115,9201	0,0028	0,0006	0,0012
RMP40M+LP2 z oddawaniem	115,9133	115,9157	115,9192	0,0059	0,0013	0,0027
RMP600 bez oddawania	115,9182	115,9186	115,9190	0,0008	0,0002	0,0004
RMP600 z oddawaniem	115,9179	115,9184	115,9192	0,0013	0,0003	0,0006

RMP600 (po przestoju)	bez	oddawania	115,9103	115,9111	115,9119	0,0016	0,0004	0,0009
RMP600 (po przestoju)	z	oddawaniem	115,9108	115,9115	115,9122	0,0014	0,0003	0,0006

Niezwykle istotnym testem okazało się powtórzenie pomiarów sondą RMP600 na nieustabilizowanej termicznie maszynie. Kilkugodzinny przestój obrabiarki spowodował uzyskanie niższych wartości mierzonej średnicy. Różnice te wynosiły około 7 μm co ma duże znaczenie, szczególnie w przypadku produkcji precyzyjnych części dla przemysłu lotniczego. Badanie to potwierdza, iż ważne jest stosowanie procedur rozgrzewających napędy maszyny przed rozpoczęciem obróbki po dłuższym przestoju. Należy o tym także pamiętać przed samym procesem kalibracji sond pomiarowych. Wniosek ten stanowi okazję do dalszych badań, mających na celu precyzyjne określenie wpływu zmiany temperatury wybranych zespołów na uzyskane wyniki pomiarów.



Rys. 5.45 Wartości otrzymane dla pomiaru średnicy zewnętrznej wału $\varnothing=115,918$ mm.



Rys. 5.46 Wartości otrzymane dla pomiaru średnicy zewnętrznej wału $\varnothing=115,918$ mm.

5.3.3 Wnioski

W niniejszym badaniu porównano dwa rodzaje sond stykowych w warunkach produkcyjnych. Udowodniono zasadność stosowania droższej sondy tensometrycznej w produkcji precyzyjnych części. Określono wpływ takich czynników jak kierunek pomiaru, czy powrót sondy do magazynu na powtarzalność wyników. Podjęto próbę określenia standardowej niepewności pomiaru. Producenci tych sond zazwyczaj określają jednokierunkową powtarzalność (2σ) jako parametr charakteryzujący niedokładność. Jest to tylko jeden z wielu składników budżetu niepewności. Inne elementy mogą obejmować kierunek najazdu sondy do przedmiotu obrabianego, powtarzalność mocowania sondy we wrzecionie obrabiarki, stan techniczny obrabiarki, rodzaj napędu i systemu pomiaru położenia, system pomiarowy sondy oraz wybór trzpienia pomiarowego sondy. Obejmują one również sztywność całego systemu, rodzaj strategii pomiarowej, filtrację, transmisję sygnału i oczywiście czynniki zewnętrzne związane ze środowiskiem i zanieczyszczeniem. Różnica zaobserwowana w osi Z była prawdopodobnie spowodowana stanem technicznym obrabiarki, ponieważ oś ta jest najbardziej obciążona podczas toczenia, co może powodować zwiększone luzy w układzie napędowym. Jest to również z pewnością oś o najdłuższym zakresie ruchu, kilkukrotnie dłuższym niż oś Y.

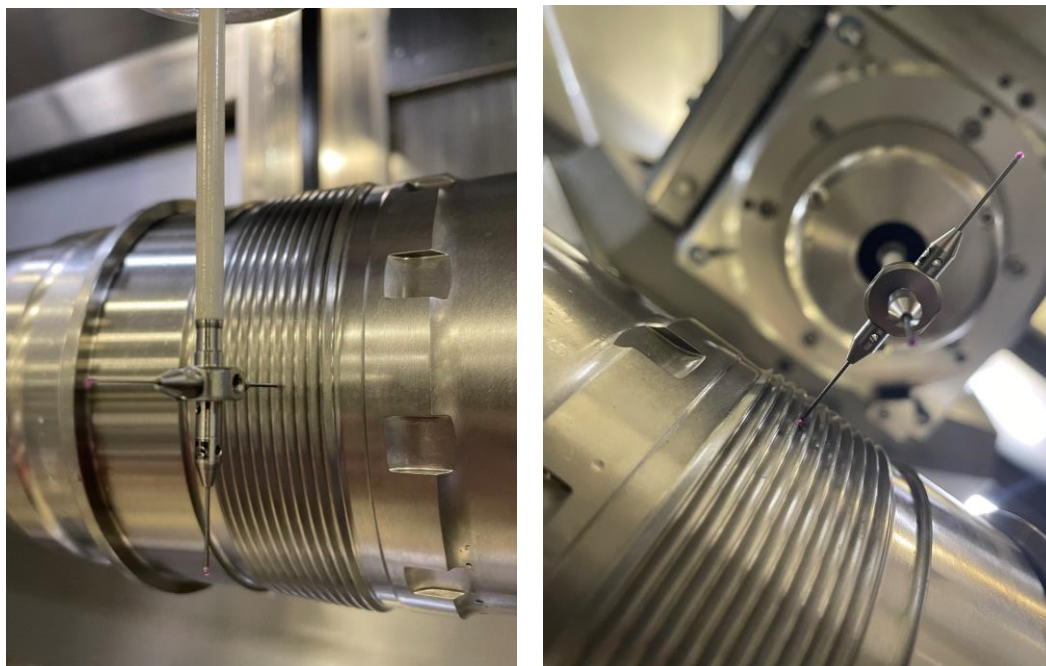
Podsumowując, można wyciągnąć następujące wnioski. Pomiary wykonane za pomocą sondy tensometrycznej charakteryzują się o około 65% niższymi wartościami standardowej niepewności pomiarowej, niż w przypadku kinematycznej sondy rezystancyjnej, pomijając wpływ powrotu sondy do magazynu narzędzi. W przypadku obu sond uzyskano zadowalające wyniki, dzięki czemu można je z powodzeniem stosować zamiennie z klasycznymi, ręcznymi

przyrządami pomiarowymi. Umieszczenie sondy w magazynku narzędziowym ma negatywny wpływ na powtarzalność pomiarów (wzrost 2σ o 125% dla RMP40M+LP2 i o 50% dla RMP600). Kierunek pomiaru wpływa na dokładność uzyskanych wyników (2σ otrzymane dwa razy wyższe dla osi Z niż osi Y). Kilkogodzinny przestój obrabiarki spowodował znaczne różnice w wynikach uzyskanych dla pomiaru tej samej cechy. Otrzymana wartość zmierzonej średnicy była niższa o 7 μm .

5.4 Pomiar średnicy podziałowej gwintu na obrabiarce CNC

5.4.1 Metodyka badań

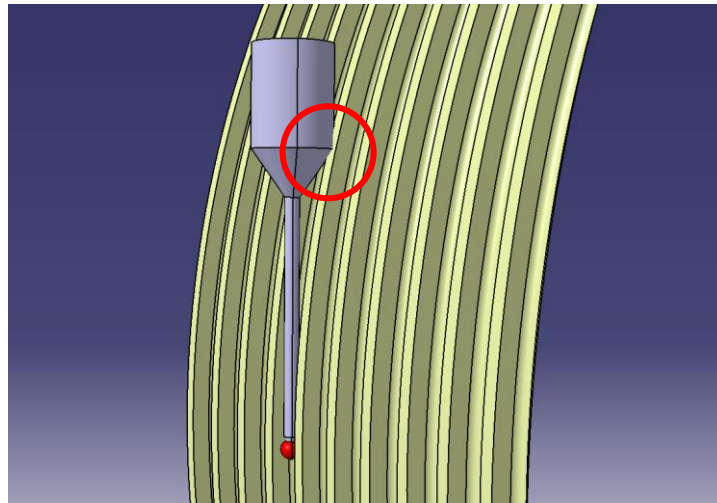
Badanie przeprowadzono na obrabiarce WFL M40. Na podstawie testów porównawczych zdecydowano się na zastosowanie sondy Renishaw RMP600 zawierającej tensometryczny układ pomiarowy. Końcówki wytypowano również od tego producenta. Początkowo aby ułatwić dostęp do wrębu gwintu zakładano użycie konfiguracji gwiazdy (przedłużacz 75 mm, gwiazdka M3 oraz końcówka (2 szt.) z kulką rubinową o średnicy $\varnothing=1$ mm). Średnice dobrano na podstawie najbliższej dostępnej handlowo średnicy kuli porównywalnej do średnicy używanych wałeczków pomiarowych. Zbyt duża średnica kulki uniemożliwiłaby pomiar wewnątrz wrębu, natomiast zmniejszenie kuli wpływa na obniżenie średnicy trzpienia, co z kolei zmniejsza sztywność układu pomiarowego. Niestety konfiguracja ta mimo pozytywnych prób (rys. 5.47) okazała się być czasochłonna w ustawieniu. Pozycjonowanie końcówek poziomych równoległe do osi Y obrabiarki powodowało zwiększenie bicia promieniowego układu, którą należało zniwelować do 5 μm . Ustawienie bicia za pomocą śrub ustawczych rozmieszczonych w korpusie sondy sprawiało, że poziome końcówki pomiarowe były odchylone względem osi Y maszyny. Działanie to należało zatem kilkakrotnie powtarzać, aż do osiągnięcia dopuszczalnego błędu ustawienia.



Rys. 5.47 Pomiar gwintu przy pomocy końcówek o konfiguracji typu T.

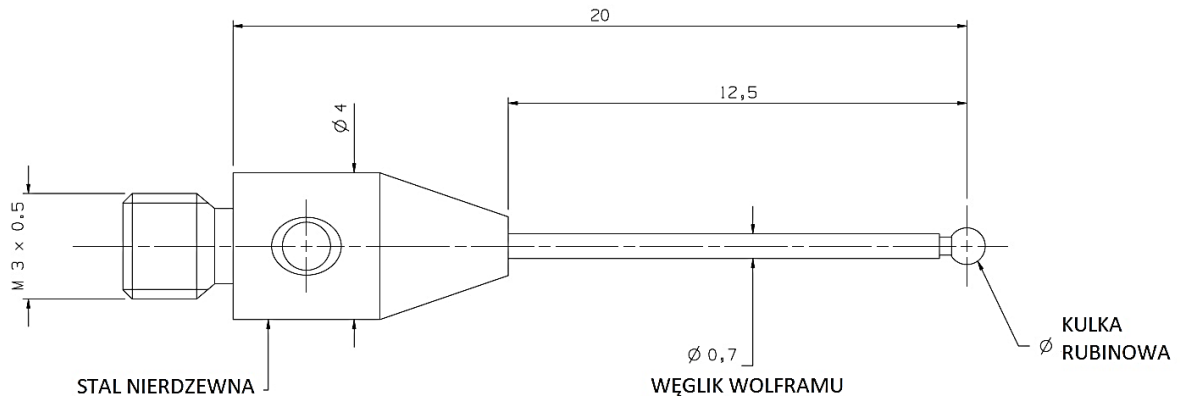
W związku z tymi utrudnieniami, postanowiono zmienić konfigurację ustawienia na jedną pionową końcówkę. W związku z tym przeprowadzono weryfikację możliwości użycia

dostępnych końcówek pomiarowych za pomocą modelu 3D w środowisku Catia. Zastosowanie zbyt krótkiej końcówki pomiarowej prowadziło do potencjalnej kolizji lub sytuacji, w której sygnał wyzwalający sondę byłby generowany w wyniku kontaktu trzpienia z powierzchnią wału (rys. 5.48).



Rys. 5.48 Okręgiem oznaczono miejsce potencjalnej kolizji przy zastosowaniu zbyt krótkiej końcówki pomiarowej.

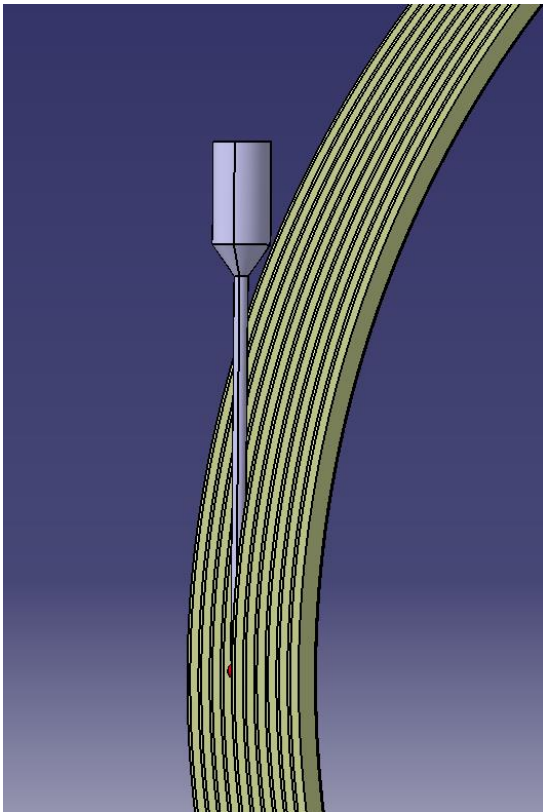
Skonfigurowano następujący zestaw o długości całkowitej 107,50 mm (przedłużacz $L=75$ mm, redukcja z gwintu M3 na M2, końcówka z kulką rubinową o średnicy $\varnothing=1$ mm - rys. 5.49).



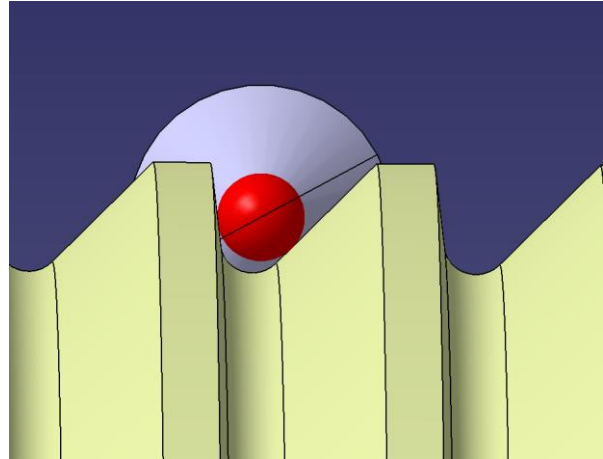
Rys. 5.49 Rysunek końcówki pomiarowej A-5000-8663 [108].

Aby zachować jak największą sztywność układu dobrano długość trzpienia pomiarowego $L=20,5$ mm, co stanowiło najkrótsze dostępne standardowo rozwiązanie zapobiegające kolizji. Sam trzpień został wykonany z węgla spiekanego, końcówka pomiarowa natomiast z rubinu. Widok modelu końcówki wraz z modelem przykładowego gwintu przestawiono na rysunku 5.50.

a)

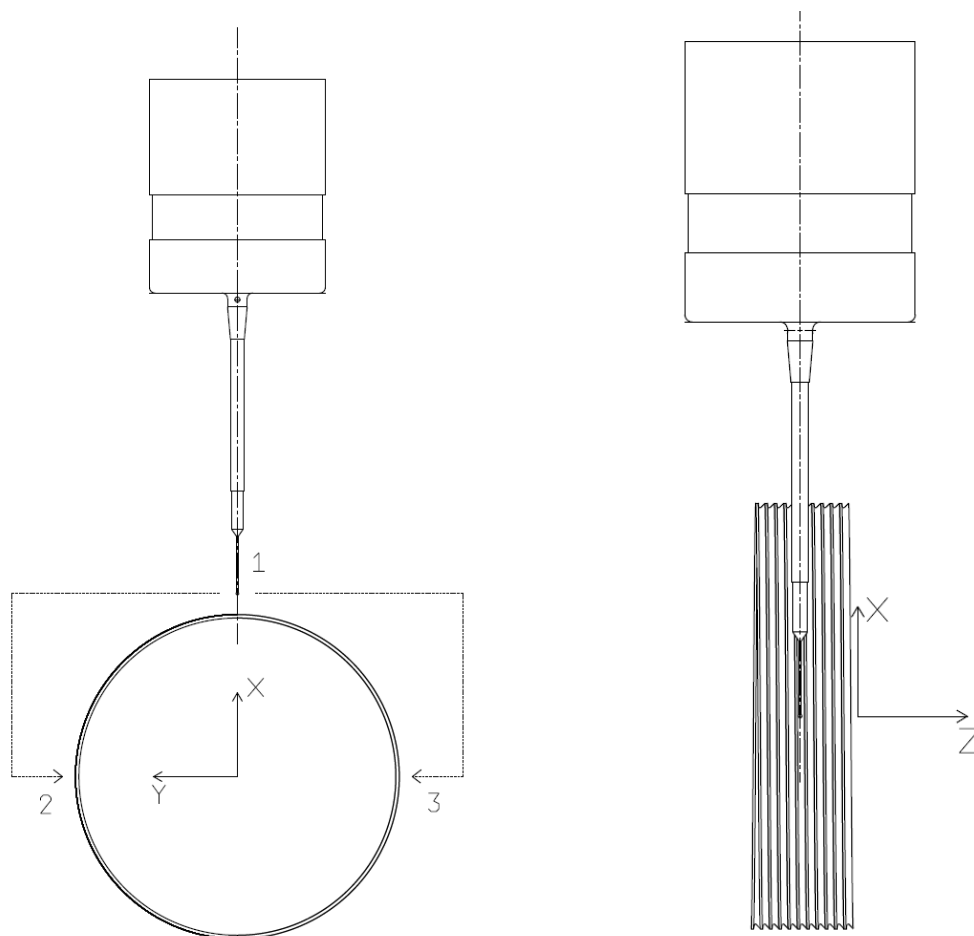


b)

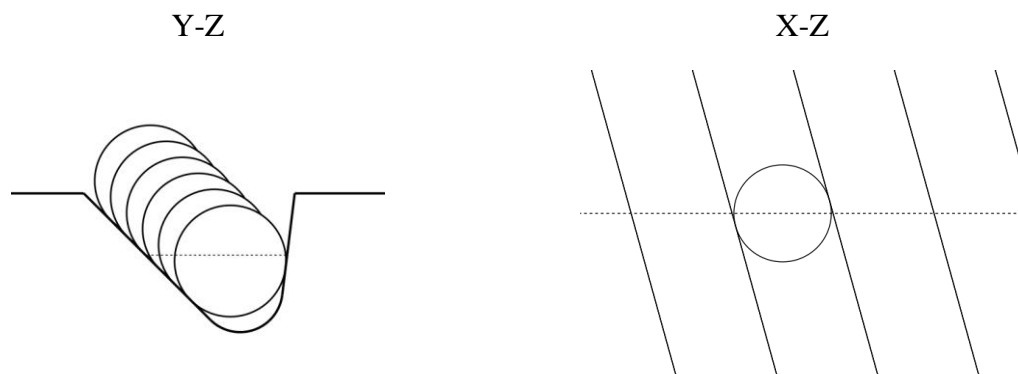


Rys. 5.50 Widok końcówki o długości $L=20,5$ mm a) z przodu, b) od dołu.

W celu przeprowadzenia pomiaru średnicy podziałowej, opracowano i zaimplementowano w postaci programu NC uniwersalny, parametryczny algorytm pomiarowy wykorzystując dostępne w środowisku Sinumerik 840D zmienne R. Program został opracowany w ten sposób, aby do jego modyfikacji w ramach różnych zakresów średnic oraz typów gwintów wystarczyło podanie kilku parametrów takich jak skok gwintu, wartość średnicy podziałowej, oczekiwana wartości z sondy pomiarowej oraz wartość w osi Z dla pierwszego punktu pomiarowego. Oś pomiarową były kierunki Y+ oraz Y-, a sam pomiar odbywał się po ustawieniu środka kulki w pozycji $X=0$. Strategia zakładała „szukanie” najniższego do zmierzania punktu we wrębie poprzez przesuwanie się w osi Z o krok 0,01 mm i poszukiwania wartości minimalnej w osi Y. Liczba ta została doświadczalnie dobrana mając na celu osiągnięcie kompromisu między czasem pomiaru, a dokładnością pomiaru. Schemat przejazdów wraz z oznaczeniem osi maszyny przedstawiono na rysunku 5.51. Pozycjonowanie sondy przed pomiarem odbywa się w punkcie 1, natomiast wartości pomiarowe zbierane są w punktach 2 i 3. Rozmieszczenie kulki pomiarowej w zarysie gwintu pokazano na szkicu (rys. 5.52). Rzeczywisty pomiar w przekroju Y-Z odbywał się po obu flankach, gdzie kolejne punkty pomiarowe były porównywane poprzez wykorzystanie funkcji porównań logicznych zmierzonych wartości. W zależności od wzrostu bądź spadku otrzymanego wymiaru kolejny pomiar odbywał się przy przesunięciu sondy w osi Z w prawo bądź lewo. Warto zauważyć, iż rzeczywisty styk kulki z powierzchnią wrębu ze względu na kąt wzniosu linii śrubowej ma miejsce poza płaszczyzną Y-Z co przedstawiono na widoku płaszczyzny X-Z (rys. 5.52).



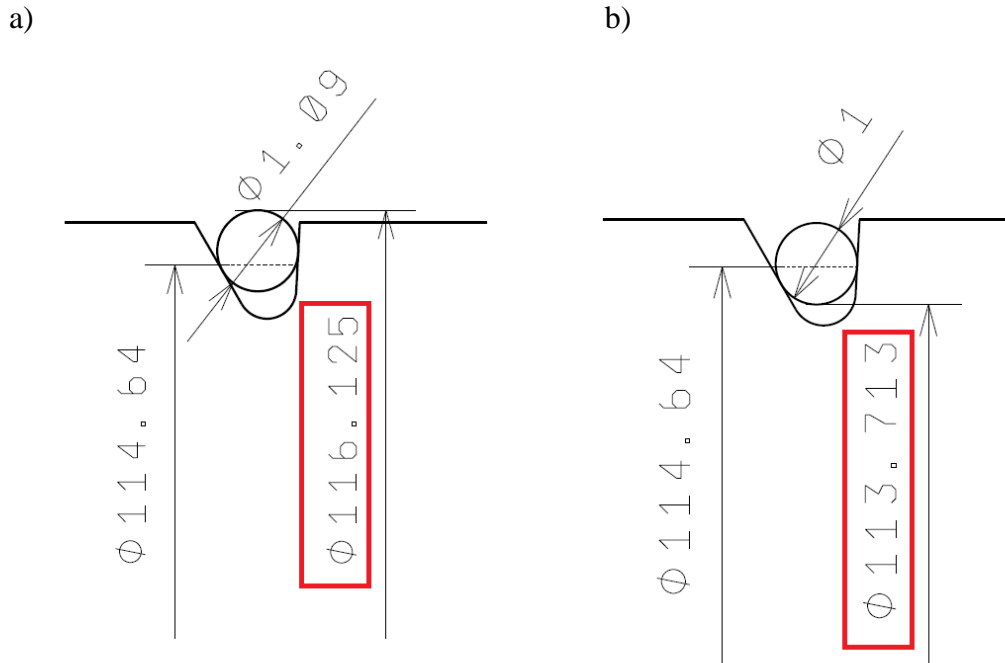
Rys. 5.51 Schemat przejazdów podczas pomiaru z oznaczeniem osi maszyny.



Rys. 5.52 Schematyczne przedstawienie kuli pomiarowej we wrębie mierzonego gwintu.

Wynik pomiaru został określony poprzez zsumowanie dwóch minimalnych wartości otrzymanych po obu stronach wału. Wzorowano się tutaj na metodzie dwu lub trójwałeczkowej będącej najdokładniejszą znaną i konwencjonalnie używaną metodą pomiarową średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego. Jest to pomiar pośredni poprzez wykorzystanie zależności zmiany wartości średnicy podziałowej wraz ze zmianą zmierzonej średnicy zewnętrznej wałeczków umieszczonych w bruzdzie gwintu. Opracowana procedura zakłada pomiar współrzędnościowy, w związku z czym brane są pod uwagę wartości w płaszczyźnie

prostopadłej do osi gwintu. W przypadku pomiaru sondą otrzymywana wartość dotyczyła wewnętrznej średnicy czyli strony kuli umieszczonej bliżej promienia wrębu (rys. 5.53).



Rys. 5.53 Przykład pomiaru pośredniego średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego a) metodą trójwałeczkową, b) sondą pomiarową.

Wartości te można także wyznaczyć za pomocą wzoru 5.1:

$$M_p = 114,64 + 1 \left[1 + \frac{\cos\left(\frac{30^\circ - 3^\circ}{2}\right)}{\sin\left(\frac{33^\circ}{2}\right)} \right] - 2,11 \frac{\cos 30^\circ \cdot \cos 3^\circ}{\sin 33^\circ} = 113,713 \text{ mm} \quad (5.1)$$

W celu potwierdzenia że opracowana procedura spełnia wymagania i zapewnia poprawny pomiar przeprowadzono proces weryfikacji. Ze względu na charakter zadania oraz dostępność obrabiarki przeprowadzono badanie w warunkach produkcyjnych. Po wstępnych, pozytywnych próbach wskazujących na dużą powtarzalność i stabilność procedury algorytm pomiarowy zaimplementowano bezpośrednio w programie obróbczym. Podczas codziennego wytwarzania wałów dotychczasowy program NC zawierał zatrzymanie w celu pomiaru średnicy podziałowej metodą trójwałeczkową poprzez wykwalifikowanego operatora. W programie NC sekwencja pomiaru ręcznego poprzedzona została pomiarem automatycznym zgodnie z opracowanym algorytmem. Operator po pomiarze manualnym notował wyniki otrzymane obiema metodami w przygotowanej do tego zadania tabeli. Wyniki te były zbierane w zależności od aktualnego planu produkcyjnego. Do analizy wytypowano cztery rodzaje gwintów zewnętrznych o zarysie trapezowym niesymetrycznym, które opisano jako GWINT1, GWINT2, GWINT3, GWINT4. Wymiary badanych gwintów przestawiono w tabeli 5.11.

Tab. 5.11 Zestawienie najważniejszych wymiarów badanych gwintów.

	GWINT1	GWINT2	GWINT3	GWINT4
Typ wg ANSI B1.9:	4,5590-12 BUTT-3A	4,1098-12 BUTT-3A	4,1150-10 BUTT-3A	3,7668-10 BUTT-3A
Liczba zwojów na cal	12	12	10	10
Skok [mm]	2,11	2,11	2,54	2,54
Średnica podziałowa [mm]	$\varnothing=114,64 \pm 0,07$	$\varnothing=103,165 \pm 0,07$	$\varnothing=103,335 \pm 0,07$	$\varnothing=94,518 \pm 0,07$
Pomiar przez trzy wałeczki [mm]	$\varnothing=116,125 \pm 0,07$	$\varnothing=104,649 \pm 0,07$	$\varnothing=104,930 \pm 0,07$	$\varnothing=96,113 \pm 0,07$
Średnica wałeczków [mm]	$\varnothing=1,093$	$\varnothing=1,093$	$\varnothing=1,222$	$\varnothing=1,222$
Pomiar sondą o końcówce $\varnothing=1$ [mm]	$\varnothing=113,713 \pm 0,07$	$\varnothing=102,238 \pm 0,07$	$\varnothing=102,230 \pm 0,07$	$\varnothing=93,413 \pm 0,07$
Średnica zewnętrzna [mm]	$\varnothing=115,8 \pm 0,07$	$\varnothing=104,318 \pm 0,07$	$\varnothing=104,445 \pm 0,07$	$\varnothing=95,606 \pm 0,07$
Średnica wrębu [mm]	$\varnothing=113,276 \text{ max}$	$\varnothing=101,709 \text{ max}$	$\varnothing=101,983 \text{ max}$	$\varnothing=93,167 \text{ max}$
Promień wrębu [mm]	$R=0,394 \pm 0,037$	$R=0,394 \pm 0,037$	$R=0,394 \pm 0,037$	$R=0,394 \pm 0,037$
Kąt boku obciążonego	3°	3°	7°	7°
Kąt boku nieobciążonego	30°	30°	45°	45°

Gwinty te różniły się zarówno wartością średnic, jak i kątami boków. Eksperyment prowadzono na sześciu obrabiarkach, które oznaczono jako WFL1, WFL2, WFL3, WFL3, WFL5, WFL6.

Zebrane wyniki poddano wstępnej analizie mającej na celu eliminację wartości ekstremalnych oraz sprawdzenie normalności rozkładu. Dane podzielono na grupy uwzględniając typ maszyny oraz typ gwintu. W pierwszym kroku usunięto błędy nadmierne wykraczające poza zakres 3σ . Po tym zabiegu otrzymało łącznie 1043 wyników, które podzielono na dwie grupy w zależności od typu gwintu oraz typu maszyny.

Według tych kryteriów liczba powtórzeń wygląda następująco:

- GWINT 1 – 260 powtórzeń
- GWINT 2 – 415 powtórzeń
- GWINT 3 – 190 powtórzeń
- GWINT 4 – 178 powtórzeń
- WFL1 – 118 powtórzeń
- WFL2 – 177 powtórzeń
- WFL3 – 151 powtórzeń
- WFL4 – 260 powtórzeń
- WFL5 – 73 powtórzeń
- WFL6 – 264 powtórzeń

Gwinty o kątach 3°/30° były wykonywane zgodnie z procesem technologicznym na obrabiarkach WFL3, WFL4, WFL6, natomiast gwinty o kątach 7°/45° na WFL1, WFL2, WFL5.

Aby określić dokładność opracowanej metody dla każdej pary pomiarowej (sonda – metoda trójwałeczkowa) wyznaczono błąd bezwzględny na podstawie zależności:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (5.2)$$

gdzie:

x – wynik otrzymany przy pomocy sondy pomiarowej,

x_0 – wynik otrzymany metodą trójwałeczkową.

Jako metodę referencyjną przyjęto pomiar manualny metodą trójwałeczkową. Jak już wcześniej wspomniano pomiar ten jest najdokładniejszym, powszechnie stosowanym sposobem pomiaru tej charakterystyki. Otrzymany w ten sposób wynik uznano zatem jako umownie prawdziwą wartość średnicy podziałowej. Wartość uzyskana przy pomocy sondy pomiarowej stanowiła więc wymiar zmierzony, którego błąd należało określić.

Dokonano analizy statystycznej otrzymanych wyników przy pomocy programu Excel. Wyznaczono podstawowe parametry statystyczne, takie jak średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe czy rozstęp, a także przeprowadzono test Shapiro-Wilka, analizę wariancji ANOVA oraz test post-hoc Tukeya HSD. Dane te miały na celu sprawdzenie powtarzalności opracowanej procedury na większej liczbie prób, a także co istotne wskazanie ewentualnych różnic dotyczących zarówno typu gwintu jak i maszyny. Obrabiarki będąc częścią tej samej linii produkcyjnej znajdowały się w tych samych, zmiennych warunkach środowiskowych. Temperatura w okresie badań wahała się w przedziale od 23 do 26°C, dzięki układowi klimatyzacji dla całej hali.

5.4.2 Wyniki

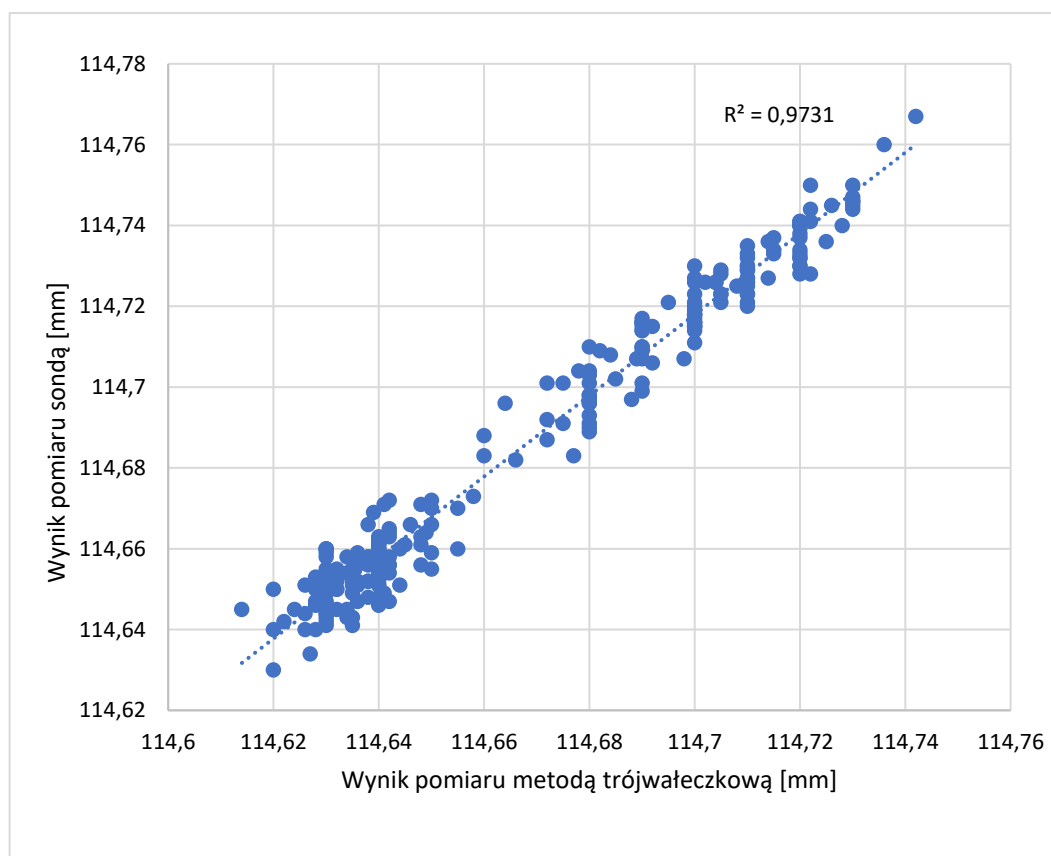
W celu oceny normalności rozkładu otrzymanych błędów bezwzględnych przeprowadzono test Shapiro-Wilka. Hipoteza zerowa dla tego testu zakłada, że nasza próba badawcza pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym. Jeśli test Shapiro-Wilka osiąga istotność statystyczną ($p < 0,05$), świadczy to o rozkładzie odbiegającym od krzywej Gaussa. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.12.

Tab. 5.12 Wyniki testu Shapiro-Wilka.

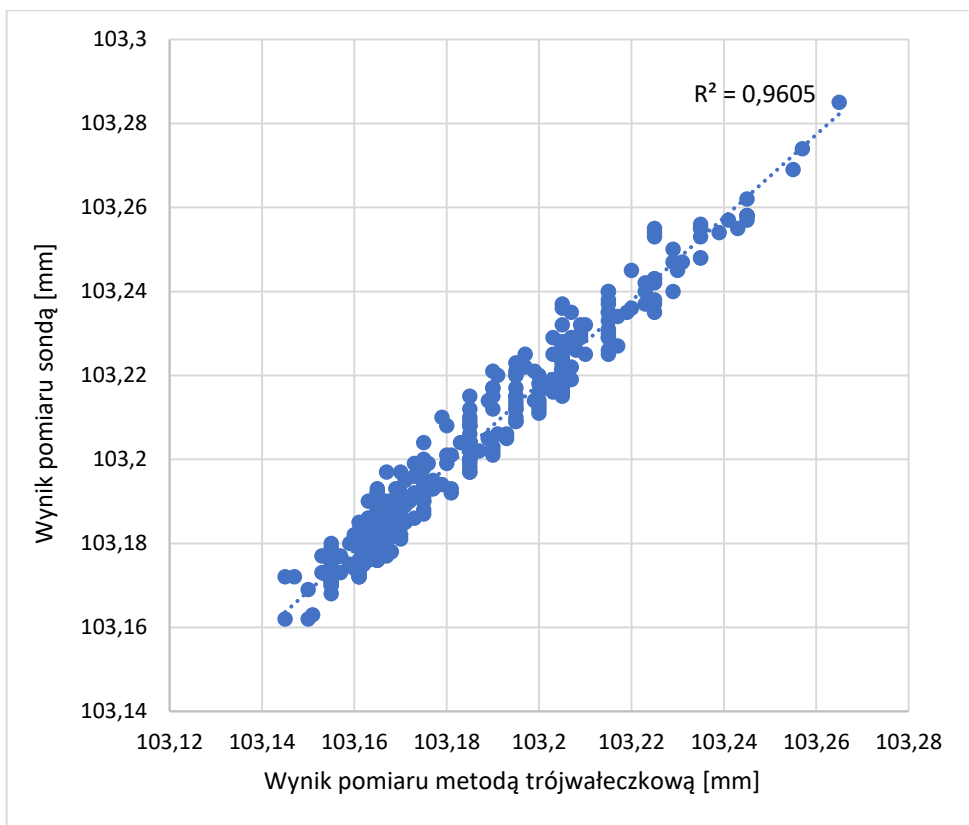
	W-stat	wartość p	α	$p > \alpha$	rozkład
GWINT1 - WFL3	0,9771	0,4498	0,05	tak	normalny
GWINT1 - WFL4	0,9844	0,2646	0,05	tak	normalny
GWINT1 - WFL6	0,9866	0,3612	0,05	tak	normalny
GWINT2 - WFL3	0,9844	0,2723	0,05	tak	normalny
GWINT2 - WFL4	0,9897	0,3115	0,05	tak	normalny
GWINT2 - WFL6	0,9910	0,4280	0,05	tak	normalny
GWINT3 - WFL1	0,9699	0,1439	0,05	tak	normalny
GWINT3 - WFL2	0,9814	0,2273	0,05	tak	normalny
GWINT3 - WFL5	0,9748	0,5040	0,05	tak	normalny
GWINT4 - WFL1	0,9658	0,1005	0,05	tak	normalny
GWINT4 - WFL2	0,9796	0,1846	0,05	tak	normalny
GWINT4 - WFL5	0,9794	0,7675	0,05	tak	normalny

Dla zakładanego poziomu istotności $\alpha=5\%$ każda badana próba spełnia warunek $p > \alpha$, w związku z czym nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Zakładamy zatem, iż zgodnie z przeprowadzonym testem Shapiro-Wilka wszystkie wartości otrzymanych błędów bezwzględnych podlegają rozkładom normalnym.

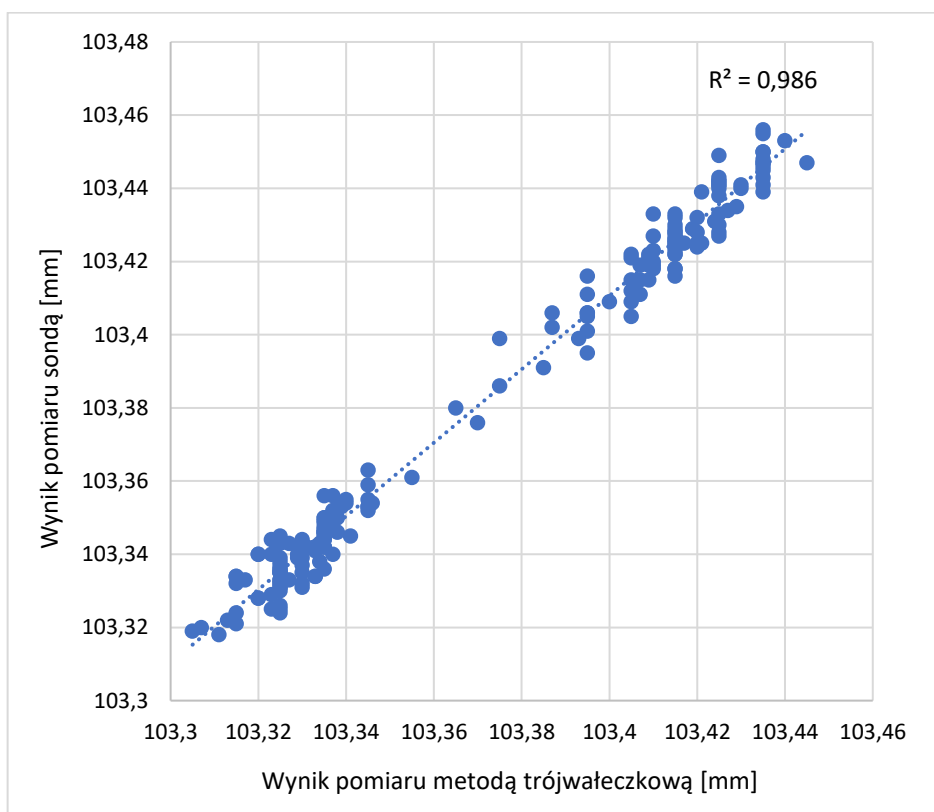
Aby potwierdzić zależność obu metod wyznaczono współczynnik determinacji R^2 . Wartość R^2 mówi nam o tym, jaki procent zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniany za pomocą zmienności zmiennej niezależnej. Wyniki zaprezentowano w postaci wykresów (rys. 5.54, 5.55, 5.56 i 5.57). Analizując dane na wykresach można zaobserwować, iż dla każdego typu gwintu zależność między wartością odniesienia, a zmierzoną jest liniowa. Relacja ta potwierdza, że istnieje korelacja między obiema metodami. Co więcej, wyznaczony współczynnik determinacji osiągnął wartość zbliżoną do 1. Najmniejszą wartość $R^2=0,9605$ otrzymano dla GWINTU2, co należy interpretować, że 96 % wyników otrzymanych za pomocą sondy pomiarowej można dopasować do wartości z metody trójwałeczkowej. W praktyce można przyjąć, iż istnieje model regresji liniowej pozwalający na przewidywanie wyników otrzymanych za pomocą sondy pomiarowej z prawdopodobieństwem niemalże 96%



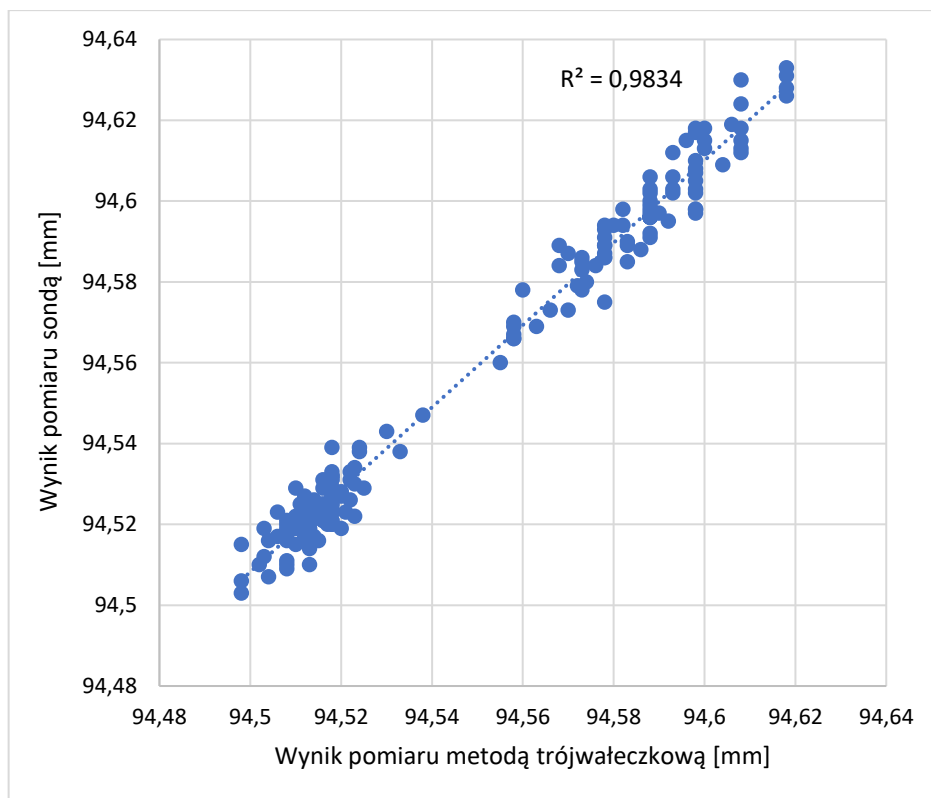
Rys. 5.54 Rezultat korelacji wyników dla metody trójwałeczkowej z wynikami dla sondy dla pomiaru średnicy podziałowej GWINTU1.



Rys. 5.55 Wynik korelacji wyników dla metody trójwałeczkowej z wynikami dla sondy dla pomiaru średnicy podziałowej GWINTU2.



Rys. 5.56 Wynik korelacji wyników dla metody trójwałeczkowej z wynikami dla sondy dla pomiaru średnicy podziałowej GWINTU3.



Rys. 5.57 Wynik korelacji wyników dla metody trójwałeczkowej z wynikami dla sondy dla pomiaru średnicy podziałowej GWINTU4.

Dzieląc badane grupy na podgrupy dla typu gwintu oraz numeru obrabiarki określono średnią arytmetyczną, medianę, odchylenie standardowe, wartość maksymalną i minimalną oraz rozstęp otrzymanych błędów. Wyniki zebrano w tabelach 5.13 i 5.14.

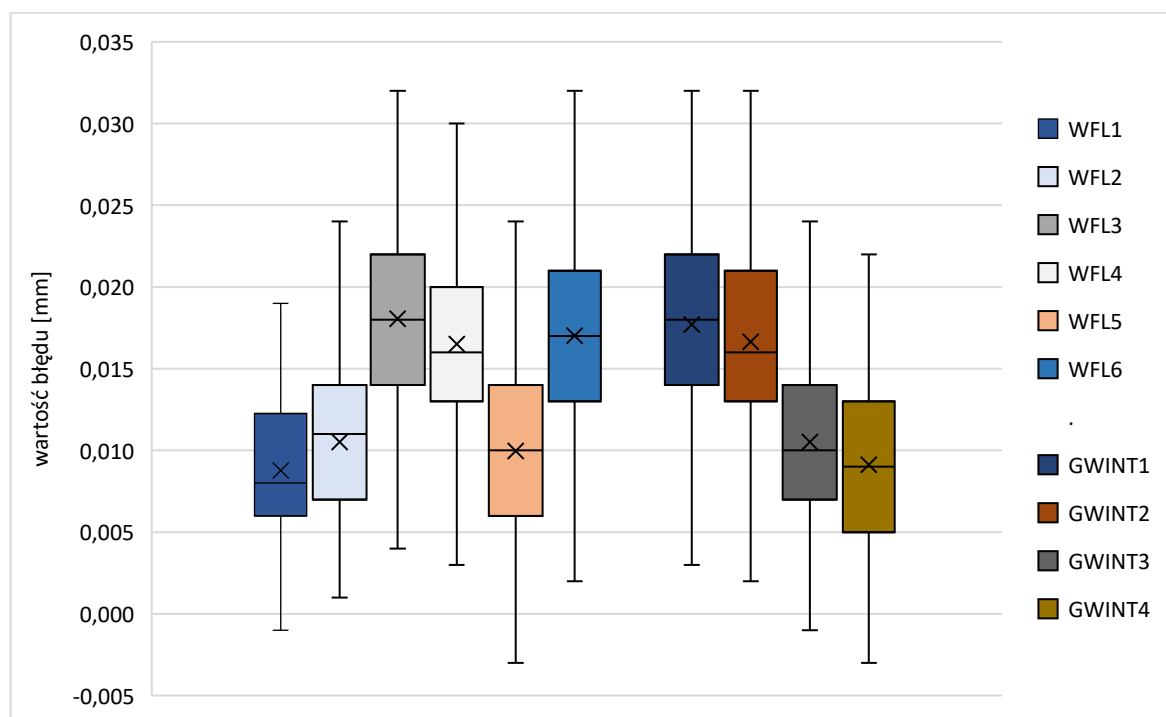
Tab. 5.13 Analiza błędów pomiarowych z podziałem na typ gwintu.

[mm]	GWINT1	GWINT2	GWINT3	GWINT4
Średnia arytmetyczna	0,018	0,017	0,011	0,009
Mediana	0,018	0,016	0,010	0,009
Odchylenie standardowe	0,006	0,006	0,005	0,005
Minimum	0,003	0,002	-0,001	-0,003
Maksimum	0,032	0,032	0,024	0,022
Rozstęp	0,029	0,030	0,025	0,025

Tab. 5.14 Analiza błędów pomiarowych z podziałem na numer obrabiarki.

[mm]	WFL1	WFL2	WFL3	WFL4	WFL5	WFL6
Średnia arytmetyczna	0,009	0,011	0,018	0,017	0,010	0,017
Mediana	0,008	0,011	0,018	0,016	0,010	0,017
Odchylenie standardowe	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006
Minimum	-0,001	0,001	0,004	0,003	-0,003	0,002
Maksimum	0,019	0,024	0,032	0,031	0,024	0,032
Rozstęp	0,020	0,023	0,028	0,028	0,027	0,030

Średnia arytmetyczna błędów ma najmniejszą wartość dla GWINTU4 i wynosi ona 0,009 mm, natomiast największą, dwukrotnie większą dla GWINTU1 0,018 mm. Wynika z tego, że wyniki z sondy pomiarowej za każdym razem są nieco wyższe od prawidłowego wskazania otrzymanego poprzez metodę trójwałeczkową. Mediana z racji symetryczności rozkładu była zbliżona do średniej arytmetycznej. Odchylenie standardowe mówiące o rozrzucie wyników dla każdej z grup wynosiło około 0,006 mm. Niska wartość świadczy o dużym skupieniu wyników wokół wartości średniej, co z kolei może potwierdzać powtarzalność testowanej procedury. Jeżeli chodzi o sam rozstęp między maksymalną, a minimalną wartością otrzymano wartości około 0,03 mm dla każdej grupy. W celach porównawczych powyższe dane przedstawiono w formie wykresu pudełkowego (rys. 5.58). Pozioma linia na słupkach oznacza medianę, natomiast znacznik „x” wartość średnią arytmetyczną.

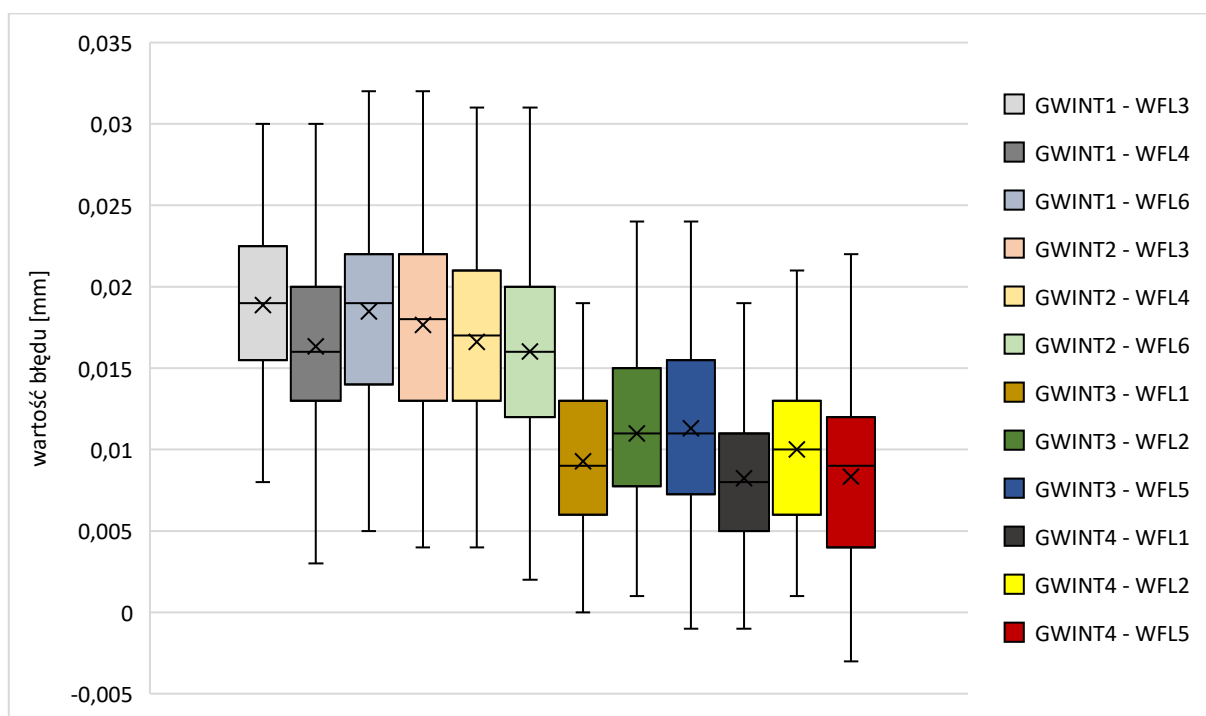


Rys. 5.58 Wykres błędów pomiarowych otrzymanych dla poszczególnych maszyn oraz typów gwintu.

Pierwsze sześć słupków od lewej (rys. 5.58) odnosi się do typu obrabiarki, natomiast pozostałe cztery do rodzaju gwintu. Wizualnie widoczne są rozbieżności między uzyskanymi wartościami. Średnie błędy dla trzech obrabiarek WFL są nieco niższe o około 0,008 mm, a niżeli dla pozostałych trzech, gdzie otrzymano około 0,017 mm. Podobne zależności uzyskano dla poszczególnych gwintów, gdzie GWINT1 i GWINT2 został zmierzony z większym błędem niż GWINT3 i GWINT4. Dane te są powiązane ponieważ na maszynach WFL1, WFL2 oraz WFL5 wykonywano i mierzono gwinty GWINT3 i GWINT4. Na obrabiarkach WFL3, WFL4 i WFL6 badano z kolei algorytm pomiarowy dla GWINT1 i GWINT2, gdzie otrzymane błędy miały większe wartości. Największy rozstęp wyników, czyli różnica między maksymalną, a minimalną wartością miał miejsce dla GWINTU2 i wyniósł 0,03 mm.

Omawiane wcześniej wyniki dotyczyły skumulowanych danych z kilku maszyn lub kilku rodzajów gwintów na poszczególnych maszynach. Dzielać dane bardziej szczegółowo, czyli

wykluczając prawdopodobieństwo wpływu zmienności maszyny lub też zależności dokładności metody pomiarowej od rodzaju gwintu otrzymujemy wykres (rys. 5.59).



Rys. 5.59 Wykres błędów pomiarowych otrzymanych dla grup gwint-maszyna.

Dane zgromadzone na wykresie świadczą o tym, iż oprócz różnic między GWINTAMI 1 i 2 oraz 3 i 4 występują także pewne odchylenia na poszczególnych maszynach. Przykładem może być słupek GWINT1 – WFL4, gdzie wartości są niższe od maszyn WFL3 i WFL6 dla tego samego gwintu. Dla gwintów GWINT3 i GWINT4 rozbieżności są nieco większe.

W celu analizy różnic pomiędzy średnimi błędów w badanych grupach postanowiono wykonać test ANOVA. Założeniami wejściowymi tego test jest występowanie rozkładu normalnego oraz jednorodność wariancji pomiędzy testowanymi populacjami. Rozkład normalny został udowodniony testem Shapiro-Wilka natomiast dodatkowo przeprowadzono test Levene'a, który wykazał, iż założenie jednorodności wariancji zostało spełnione. W tabeli 5.15 przedstawiono wyniki analizy wariancji dla gwintów GWINT1 i GWINT2 natomiast w tab. 5.16 dla gwintów GWINT3 i GWINT4. W obu przypadkach wartość otrzymanej statystyki F przekraczała wartość krytyczną, a poziom istotności był poniżej 0,05, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej i przyjęcie hipotezy alternatywnej zakładającej, że wartość średniej przynajmniej jednej z badanych grup różni się od pozostałych. W przypadku próbek dotyczących GWINT3 i GWINT4 wartość p była jednak niemalże równa zakładanemu poziomowi $\alpha=0,05$. Aby zidentyfikować grupy odstające od reszty wykonano test post-hoc Tukeya HSD. Wyniki przedstawiono w tabelach 5.17 i 5.18.

Tab. 5.15 Wyniki testu ANOVA dla próbek z grup GWINT1, GWINT2.

Analiza wariancji: jednoczynnikowa						
PODSUMOWANIE						
Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja		
GWINT1 - WFL3	49	0,9250	0,0189	0,00003		
GWINT1 - WFL4	104	1,7000	0,0163	0,00004		
GWINT1 - WFL6	107	1,9770	0,0185	0,00004		
GWINT2 - WFL3	102	1,8000	0,0176	0,00004		
GWINT2 - WFL4	156	2,5920	0,0166	0,00003		
GWINT2 - WFL6	157	2,5170	0,0160	0,00003		
ANALIZA WARIANCJI						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	0,0007	5	0,0001	3,7061	0,0026	2,2275
W obrębie grup	0,0239	669	0,0000			
Razem	0,0245	674				
gdzie:						
SS - suma kwadratów						
df - liczba stopni swobody						
MS - średni kwadrat						
F - wartość statystyki F						
Test F - wartość krytyczna statystyki F						

Tab. 5.16 Wyniki testu ANOVA dla próbek z grup GWINT3, GWINT4.

Analiza wariancji: jednoczynnikowa						
PODSUMOWANIE						
Grupy	Licznik	Suma	Średnia	Wariancja		
GWINT3 - WFL1	60	0,5570	0,0093	0,00003		
GWINT3 - WFL2	90	0,9900	0,0110	0,00003		
GWINT3 - WFL5	40	0,4520	0,0113	0,00003		
GWINT4 - WFL1	58	0,4780	0,0082	0,00002		
GWINT4 - WFL2	87	0,8710	0,0100	0,00002		
GWINT4 - WFL5	33	0,2750	0,0083	0,00004		
ANALIZA WARIANCJI						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	0,0005	5	0,0001	3,4151	0,0050	2,2389
W obrębie grup	0,0096	362	0,0000			
Razem	0,0100	367				

Porównując grupy GWINT1 i GWINT2 na poszczególnych maszynach nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy tym samym typem gwintu wykonywanym na różnych obrabiarkach. Test post-hoc wykazał natomiast, iż w dwóch przypadkach wyniki średniej odbiegają od pozostałych. Są to pary GWINT1 – WFL3 i GWINT 2 – WFL6 oraz GWINT1 – WFL6 i GWINT2 – WFL6. Jak widać próbki te dotyczą dwóch typów gwintów. Co więcej, w drugiej parze test Tukeya HSD wykazał istotny wpływ dla tej samej maszyny WFL6. Można zatem zakładać, iż wpływ maszyny na rozbieżność osiąganego wyniku jest niewielki co świadczy

z kolei o dużej stabilności układu pomiarowego oraz dobrym stanie technicznym obrabiarek oraz sond pomiarowych. Różnice zaobserwowane podczas testu ANOVA dotyczą więc algorytmu pomiarowego. Porównując jednak wartości średnie osiąganych błędów dla wykazanych par, różnice te wynoszą 0,002-0,003 mm między parami, co także nie stanowi niepokojących wartości. Należy jednak mieć na uwadze ten fakt i konieczne wydaje się indywidualne podejście do każdego typu gwintu.

Tab. 5.17 Wyniki testu Tukeya HSD dla próbek z grup GWINT1, GWINT2.

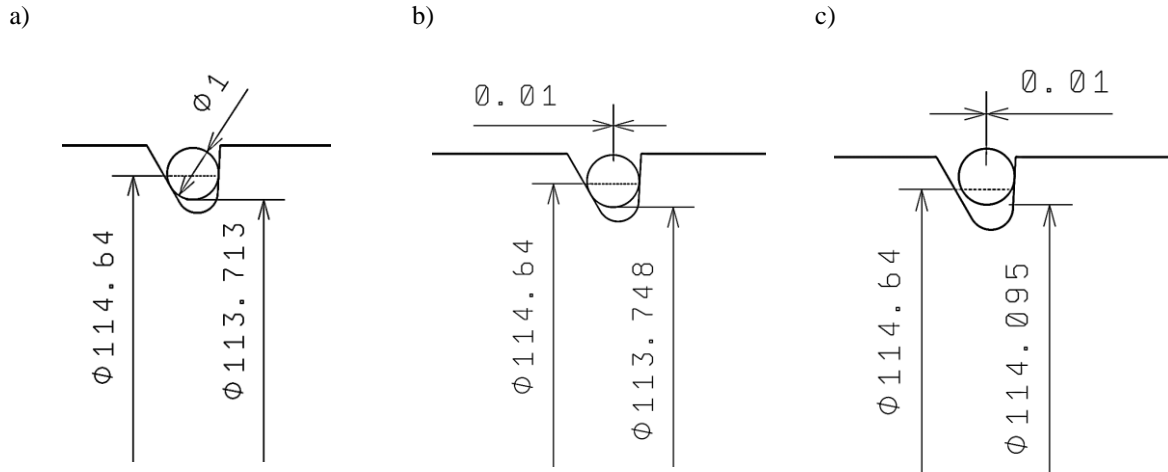
TUKEY HSD/KRAMER			poziom istotności α 0,05						
Grupy	Średnia	Liczebność	ss	df	q-crit				
GWINT1 - WFL3	0,0189	49	0,0013					ss - suma kwadratów	
GWINT1 - WFL4	0,0163	104	0,0038					df - liczba stopni swobody	
GWINT1 - WFL6	0,0185	107	0,0040					q-crit - wartość krytyczna statystyki q	
GWINT2 - WFL3	0,0176	102	0,0043						
GWINT2 - WFL4	0,0166	156	0,0052						
GWINT2 - WFL6	0,0160	157	0,0053						
		675	0,0239	669	4,03				
Q TEST									
grupa 1	grupa 2	średnia	odchylenie standardowe	statystyka q	dolna granica przedziału ufności	górną granicę przedziału ufności	wartość p	krytyczna różnica średnich	wielkość efektu (d Cohena)
GWINT1 - WFL3	GWINT1 - WFL4	0,0025	0,0007	3,4579	-0,0004	0,0055	0,1424	0,0030	0,4237
GWINT1 - WFL3	GWINT1 - WFL6	0,0004	0,0007	0,5501	-0,0025	0,0033	0,9988	0,0029	0,0671
GWINT1 - WFL3	GWINT2 - WFL3	0,0012	0,0007	1,6756	-0,0017	0,0042	0,8441	0,0030	0,2059
GWINT1 - WFL3	GWINT2 - WFL4	0,0023	0,0007	3,2696	-0,0005	0,0051	0,1906	0,0028	0,3786
GWINT1 - WFL3	GWINT2 - WFL6	0,0028	0,0007	4,1162	0,0001	0,0056	0,0431	0,0028	0,4763
GWINT1 - WFL4	GWINT1 - WFL6	0,0021	0,0006	3,6621	-0,0002	0,0045	0,1012	0,0023	0,3566
GWINT1 - WFL4	GWINT2 - WFL3	0,0013	0,0006	2,2096	-0,0011	0,0037	0,6237	0,0024	0,2177
GWINT1 - WFL4	GWINT2 - WFL4	0,0003	0,0005	0,5034	-0,0019	0,0024	0,9993	0,0022	0,0451
GWINT1 - WFL4	GWINT2 - WFL6	0,0003	0,0005	0,5884	-0,0018	0,0025	0,9984	0,0022	0,0526
GWINT1 - WFL6	GWINT2 - WFL3	0,0008	0,0006	1,4189	-0,0015	0,0032	0,9168	0,0024	0,1388
GWINT1 - WFL6	GWINT2 - WFL4	0,0019	0,0005	3,5097	-0,0003	0,0040	0,1310	0,0021	0,3115
GWINT1 - WFL6	GWINT2 - WFL6	0,0024	0,0005	4,6160	0,0003	0,0046	0,0146	0,0021	0,4092
GWINT2 - WFL3	GWINT2 - WFL4	0,0010	0,0005	1,9177	-0,0011	0,0032	0,7533	0,0022	0,1727
GWINT2 - WFL3	GWINT2 - WFL6	0,0016	0,0005	3,0062	-0,0006	0,0038	0,2752	0,0022	0,2703
GWINT2 - WFL4	GWINT2 - WFL6	0,0006	0,0005	1,2218	-0,0013	0,0025	0,9549	0,0019	0,0977

Badając próbki dotyczące GWINT3 i GWINT4, mimo iż wartość p była niemalże równa granicy poziomu istotności, także tutaj test post-hoc wskazał dwie pary odbiegające od pozostałych. Są to grupy GWINT3 – WFL2 i GWINT4 – WFL1 oraz GWINT3 – WFL5 i GWINT4 – WFL1. Podobnie jak poprzednio rozbieżności te wynikały z rodzaju gwintu, a wartości średnie badanych grup różniły się o 0,003 mm.

Tab. 5.18 Wyniki testu Tukeya HSD dla próbek z grup GWINT3, GWINT4.

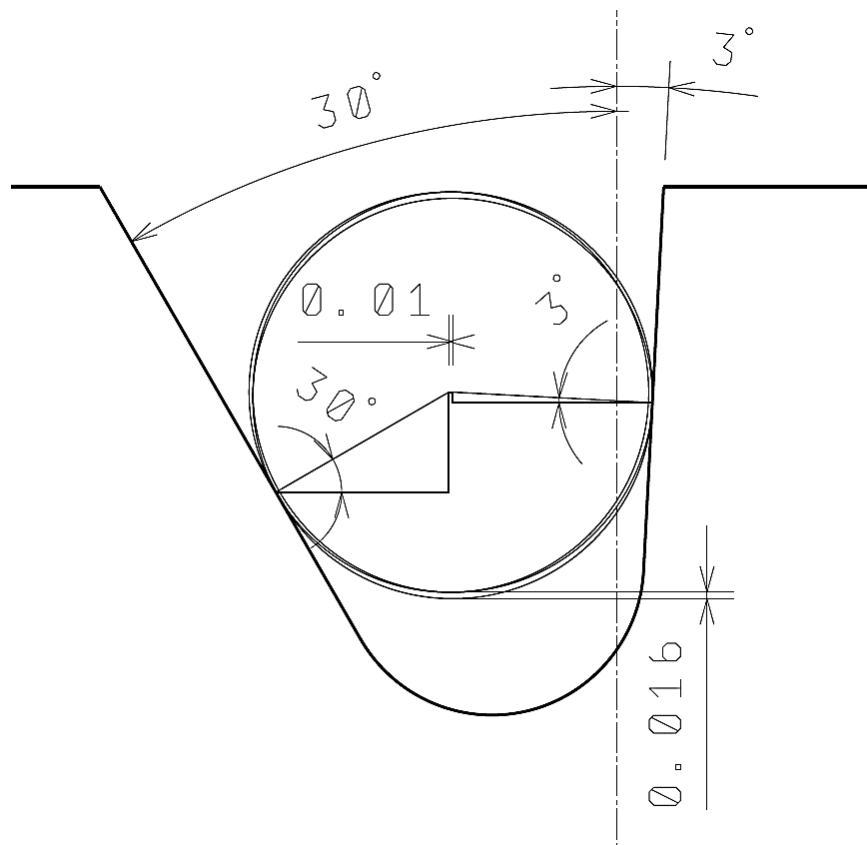
TUKEY HSD/KRAMER		poziom istotności α 0,05							
Grupy	Średnia	Liczebność	ss	df	q-crit				
GWINT3 - WFL1	0,0093	60	0,0015						
GWINT3 - WFL2	0,0110	90	0,0023						
GWINT3 - WFL5	0,0113	40	0,0013						
GWINT4 - WFL1	0,0082	58	0,0012						
GWINT4 - WFL2	0,0100	87	0,0020						
GWINT4 - WFL5	0,0083	33	0,0012						
		368	0,0096	362	4,0519				
Q TEST									
grupa 1	grupa 2	średnia	odch. standardowe e	statystyka q	dolna granica przedziału ufności	górną granicę przedziału ufności	wartość p	krytyczna różnica średnich	wielkość efektu (d Cohena)
GWINT3 - WFL1	GWINT3 - WFL2	0,0017	0,0006	2,8355	-0,0007	0,0042	0,3415	0,0025	0,3342
GWINT3 - WFL1	GWINT3 - WFL5	0,0020	0,0007	2,7197	-0,0010	0,0050	0,3896	0,0030	0,3926
GWINT3 - WFL1	GWINT4 - WFL1	0,0010	0,0007	1,5577	-0,0017	0,0038	0,8806	0,0027	0,2028
GWINT3 - WFL1	GWINT4 - WFL2	0,0007	0,0006	1,1945	-0,0017	0,0032	0,9589	0,0025	0,1417
GWINT3 - WFL1	GWINT4 - WFL5	0,0009	0,0008	1,2067	-0,0022	0,0041	0,9571	0,0032	0,1849
GWINT3 - WFL2	GWINT3 - WFL5	0,0003	0,0007	0,4346	-0,0025	0,0031	0,9996	0,0028	0,0584
GWINT3 - WFL2	GWINT4 - WFL1	0,0028	0,0006	4,5101	0,0003	0,0052	0,0192	0,0025	0,5370
GWINT3 - WFL2	GWINT4 - WFL2	0,0010	0,0005	1,8099	-0,0012	0,0032	0,7960	0,0022	0,1924
GWINT3 - WFL2	GWINT4 - WFL5	0,0027	0,0007	3,6073	-0,0003	0,0057	0,1125	0,0030	0,5191
GWINT3 - WFL5	GWINT4 - WFL1	0,0031	0,0007	4,0968	0,0000	0,0061	0,0458	0,0030	0,5954
GWINT3 - WFL5	GWINT4 - WFL2	0,0013	0,0007	1,8568	-0,0015	0,0041	0,7778	0,0028	0,2508
GWINT3 - WFL5	GWINT4 - WFL5	0,0030	0,0009	3,4728	-0,0005	0,0064	0,1404	0,0035	0,5775
GWINT4 - WFL1	GWINT4 - WFL2	0,0018	0,0006	2,8746	-0,0007	0,0043	0,3259	0,0025	0,3446
GWINT4 - WFL1	GWINT4 - WFL5	0,0001	0,0008	0,1161	-0,0031	0,0033	1,0000	0,0032	0,0179
GWINT4 - WFL2	GWINT4 - WFL5	0,0017	0,0007	2,2597	-0,0013	0,0047	0,6005	0,0030	0,3267

Podjęto próbę wyjaśnienia zaistniałych rozbieżności, a przede wszystkim określenia przyczyny powstania znaczących i powtarzalnych różnic w wymiarach uzyskanych dwoma metodami, które można określić błędami systematycznymi. Z pewnością największe różnice odnotowano między pomiarem średnicy podziałowej gwintów różniących się kątami $3^\circ/30^\circ$ a $7^\circ/45^\circ$. Można stwierdzić, że kąt boków gwintu ma duży wpływ na osiąganą wartość pomiarową. Pomijając czynniki zewnętrzne oraz środowiskowe oraz mając poprawnie skalibrowaną sondę i powtarzalnie pozycjonującą obrabiarkę przyczyny należy szukać w algorytmie pomiarowym. Sama metodyka pomiaru oraz zastosowanie logicznych porównań zmierzonych punktów mające na celu znalezienie najniższego punktu w osi Y są poprawne, gdyż nie zaobserwowano istotnych różnic przy poszczególnych próbach na danej maszynie. Zmienną, która może znacząco wpływać na otrzymywane wartości jest zatem wartość pozycjonowania w osi Z do kolejnych pomiarów. Zmierzony punkt, którego wartość brana jest pod uwagę do wyznaczenia wartości korekcji narzędzia skrawającego jest więc zależny od wartości przesunięcia sondy w osi Z. Jako przykład można przytoczyć szkice dotyczące GWINTU1 znajdujące się rysunku 5.60. Z lewej strony (rys. 5.60a) przedstawiono idealną sytuację w której końcówka sondy styka się dwupunktowo z bokami wrębu. Teoretyczny wynik z sondy pomiarowej dla poprawnie wykonanej średnicy podziałowej wynosi wówczas $\varnothing=113,713$ mm. Przesuwając sondę w stronę boku o kącie nachylenia 30° o wartość 0,01 mm wynik jaki otrzymamy to $\varnothing=113,748$ mm (rys. 5.60b), natomiast w prawo, na bok o kącie 3° będzie to aż $\varnothing=114,095$ mm (rys. 5.60c). W pierwszym przypadku wartość będzie większa o +0,035 mm, natomiast w drugim +0,382 mm.



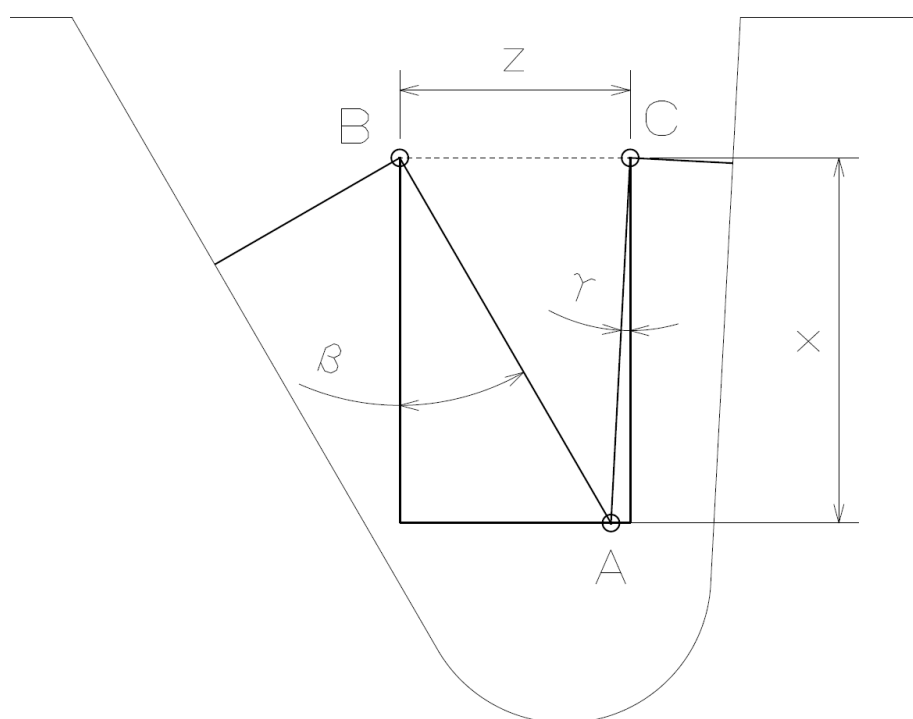
Rys. 5.60 Przykład wpływu przesunięcia sondy na uzyskane wyniki podczas pomiaru wrębu GWINTU1.

Zgodnie z opracowanym algorytmem, wartość większa o prawie 0,4 mm będzie z pewnością wykryta poprzez warunki porównań logicznych, niemniej jednak rzeczywisty błąd wynikający z dokładności pozycjonowania należy wyznaczyć nieco inaczej. Istnieje bowiem możliwość osiągnięcia najniższego punktu pomiarowego na flance o kącie 3° . Aby wyznaczyć przedział, w którym nastąpi zebranie punktu branego do obliczeń średnicy wykonano szkic (rys. 5.61).



Rys. 5.61 Szkic pomocniczy do wyznaczenia błędu pomiarowego wynikającego z kroku pozycjonowania sondy o 0,01 mm.

W celu znalezienia rzeczywistego przedziału, w którym finalny punkt pomiarowy zostanie zebrany wrysowano dwa okręgi o średnicy kuli pomiarowej. Ustawiono styczność każdego z nich do jednego z dwóch boków wrębu. Odległość między środkami okręgów zdefiniowano jako wartość pozycjonowania, czyli 0,01 mm. Co ważne, środki okręgów ustawiono na jednej wysokości, czyli inaczej mówiąc ustawiono takie położenie każdego z nich, aby wynik zarejestrowany przez sterownik po styku z materiałem był jednakowy. W takim przypadku wartość pomiarowa przy skrajnej sytuacji byłaby o 0,016 mm większa od wartości w stanie idealnym, czyli styku dwupunktowy. Biorąc po uwagę pomiar średnicy wynik ten będzie dwa razy większy czyli około 0,032 mm. Wartość ta jest w zasadzie taka sama jak maksymalny błąd zarejestrowany dla GWINTU1 i GWINT2, czyli zarysów o kątach $3^\circ/30^\circ$. Dla dowolnych kątów możemy określić matematyczna zależność maksymalnego błędu wynikającego z rozdzielczości pozycjonowania w osi Z. Wartości umieszczono na szkicu (rys. 5.62).



Rys. 5.62 Szkic pomocniczy do wyznaczenia ogólnego błędu wynikającego z dokładności pozycjonowania „z”.

W celu lepszej czytelności rysunek przedstawiono w uproszczonej formie, bez zachowania skali rzeczywistych odległości. Punkt A określa symbolicznie środek okręgu w położeniu idealnym, czyli jednoczesnym kontakcie kuli pomiarowej z obiema flankami gwintu, natomiast B i C to środki okręgów w skrajnych położeniach zależnych od odległości pozycjonowania „z”. Kąty β i γ to kąty zarysu gwintowego. Zakładając że odcinek „z” dzielimy na dwa, czyli „a” i „b” otrzymujemy zależności:

$$z = a + b \quad (5.3)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a}{x} \quad (5.4)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{b}{x} \quad (5.5)$$

$$z = a + b = x \operatorname{tg} \beta + x \operatorname{tg} \gamma = x(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma) \quad (5.6)$$

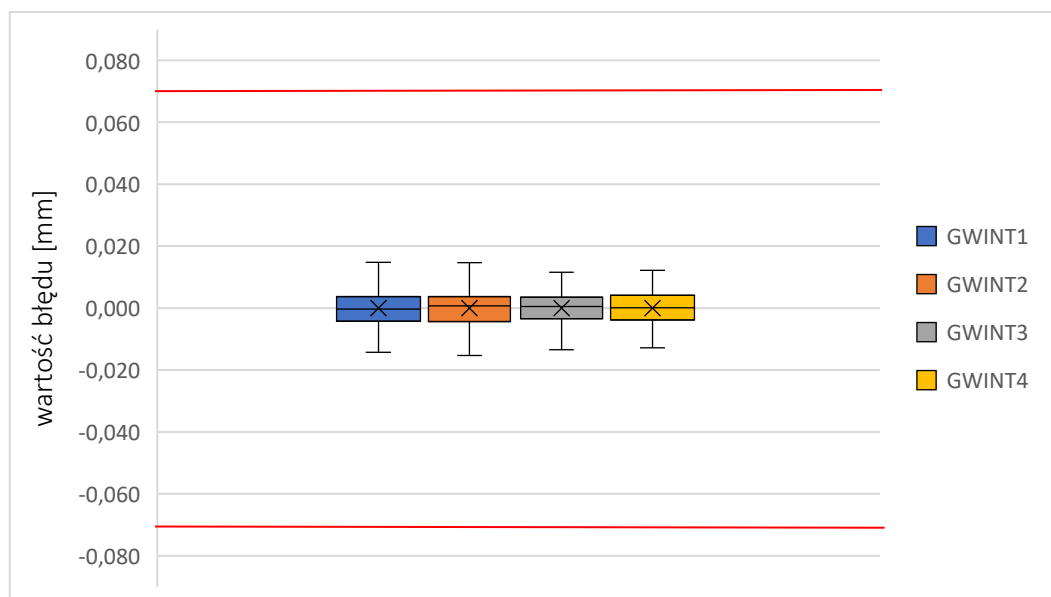
Biorąc pod uwagę badane gwinty otrzymujemy zatem:

$$x = \frac{z}{(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma)} = \frac{0,01}{\operatorname{tg} 30^\circ + \operatorname{tg} 3^\circ} \approx 0,016 \text{ mm} \quad (5.7)$$

$$x = \frac{0,01}{\operatorname{tg} 45^\circ + \operatorname{tg} 7^\circ} \approx 0,009 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Są to wartości maksymalnego błędu liczone dla promienia, więc dla średnicy należy przemnożyć je dwukrotnie otrzymując 0,032 i 0,018 co potwierdza rozbieżność otrzymanych wyników dla dwóch rodzajów kątów zarysu.

Z przeprowadzonego badania wynika, iż otrzymane różnice w wynikach są powtarzalne i w pewnym sensie systematyczne. Aby je zminimalizować, można zmniejszyć skok pozycjonowania w osi Z, gdyż jak przedstawiono we wcześniejsze analizie czynnik ten ma kluczowe znaczenie w tym aspekcie. Niemniej jednak zmniejszenie kroku do wartości np. 0,005 mm przyczyni się do wydłużenia procesu próbkowania. W omawianym zadaniu, jakim jest pomiar gwintu na obrabiarce należy przyjąć kompromis między dokładnością, a czasem pomiaru, ponieważ nie jest to pomiar końcowy, który potwierdza ostatecznie zgodność wykonanej części. Zgodnie z wymaganiami przemysłu lotniczego każdy gwint przechodzi finalną kontrolę poprzez sprawdzian działania, gdzie ewentualne niezgodne gwinty są identyfikowane. Obrabiarki sterowane numerycznie, mimo coraz to większych możliwości automatyzacji obróbki nie są certyfikowanymi maszynami pomiarowymi. Pomiar ten jest zatem pomiarem pomocniczym do automatycznej korekcji narzędzia skrawającego oraz wstępnej kontroli, która ma zdiagnozować konieczność wykonania ewentualnej poprawki na maszynie, gdyż po zdjęciu wału z maszyny jest to niemalże niemożliwe. Zdiagnozowany błąd systematyczny można zniwelować wprowadzając matematyczną korektę do programu NC. Korygując wartość pomiaru o wartość średniego błędu bezwzględnego otrzymamy wykres (rys. 5.63).



Rys. 5.63 Błąd pomiaru po wprowadzeniu poprawki.

Rozstęp błędów oscylowałyby wówczas w przedziale około $\pm 0,015$ mm. Zakładając tolerancję wykonania $\pm 0,07$ (czerwona linia na rys. 5.63) otrzymana dokładność to około 20% przedziału tolerancji, co z punktu widzenia realizowanego zadania oraz pomiaru w trudnych warunkach produkcyjnych jest satysfakcjonującym wynikiem. Należy jednak wskazać, iż korekcje noża tokarskiego wprowadzane przez operatorów podczas toczenia tego typów gwintów są zazwyczaj z doświadczenia większe o około 0,015 mm od wskazania otrzymanego za pomocą metody trójwałeczkowej. Związane jest to ze sztywnością układu oraz odkształceniami materiału Inconel, a także zużyciem płytki skrawającej. W związku z tym konieczność wprowadzenie poprawki wydaje się zbędna, gdyż w celu obliczenia automatycznej korekcji do otrzymanego wyniku należałoby ponownie dodać 0,015 mm.

5.4.3 Wnioski

Na podstawie przeprowadzonego badania dla ponad 1000 elementów pomiarowych udowodniono, że możliwy jest powtarzalny pomiar średnicy podziałowej gwintu trapezowego niesymetrycznego bezpośrednio na obrabiarce CNC. Porównano wyniki zebrane przy pomocy innowacyjnej procedury wykorzystującej tensometryczną, stykową sondę pomiarową z wynikami otrzymanymi metodą traktowaną jako referencyjną, czyli pomiar metodą trójwałeczkową.

Aby potwierdzić zależność między metodami pomiarowymi, obliczono współczynnik determinacji R^2 , który wskazuje, jaki procent zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniany przez zmienność zmiennej niezależnej. Wyniki pokazały, że zależność między wartościami odniesienia, a zmierzonymi jest liniowa dla każdego typu gwintu, co sugeruje silną korelację między obiema metodami pomiarowymi.

Średnie błędy były najniższe dla GWINTU4 (0,009 mm) i największe dla GWINTU1 (0,018 mm), co sugeruje, że wyniki z sondy pomiarowej są nieco wyższe od tych uzyskanych metodą trójwałeczkową. Odchylenie standardowe wyniosło około 0,006 mm, co świadczy o dużej powtarzalności wyników. Rozstęp wyników wynosił około 0,03 mm dla wszystkich badanych grup. Dane przedstawiono na wykresach pudełkowych, które ukazały różnice między wynikami uzyskanymi na różnych maszynach i dla różnych typów gwintów. Zauważono, że większy wpływ na błąd pomiarowy ma rodzaj mierzonego gwintu niż zmiana obrabiarki.

Przeprowadzono także test ANOVA, aby zbadać różnice między średnimi błędów w różnych grupach. Wyniki testu pozwoliły na odrzucenie hipotezy zerowej, co oznacza, że średnie błędów dla niektórych grup istotnie się różniły. W celu identyfikacji tych grup wykonano test post-hoc Tukeya HSD, który wskazał na nieznaczące różnice w błędach pomiarowych wynikające głównie z różnic w algorytmie pomiarowym, a nie z maszyn. Największe różnice zaobserwowano przy pomiarach gwintów o różnych kątach, co sugeruje, że kąt boków gwintu wpływa na wyniki pomiarowe.

Podjęto próbę wyjaśnienia zaobserwowanych rozbieżności, zwłaszcza systematycznych błędów wynikających z algorytmu pomiarowego, które można zredukować poprzez korekcję matematyczną w programie NC. Ostatecznie, choć obrabiarki CNC nie są certyfikowanymi maszynami pomiarowymi, to badania potwierdziły ich użyteczność jako narzędzi pomocniczych do wstępnej kontroli jakości.

5.5 Szacowanie niepewności pomiarowej

Wynik pomiaru, który otrzymujemy w rzeczywistości nie jest idealnym odwzorowaniem mierzonej charakterystyki, a jedynie pewnego rodzaju estymatą wartości mierzonej. Wartość zmierzona powinna być zatem rozpatrywana równocześnie z jego niepewnością pomiarową. Parametr ten określa przedział wokół wartości średniej, w którym może (na założonym poziomie istotności) znaleźć się wartość oczekiwana. Pozwala on na ocenę jakości wyniku i jego wiarygodności. Wyznaczenie niepewności pomiaru realizowanego sondą przedmiotową jest zagadnieniem złożonym. Producenci sond obrabiarkowych, jako parametr charakteryzujący niedokładność podają zazwyczaj powtarzalność jednokierunkową 2σ . Jest to tylko jeden z wielu składników budżetu niepewności o czym pisano w rozdziale 2.4.3. Sama sonda jest w zasadzie urządzeniem generującym sygnał wyzwolenia, a wartości zmierzone zależą od układów pomiarowych położenia osi przesuwnych obrabiarki. Szacując niepewność pomiarową trudno bazować zatem jedynie na deklarowanej przez producenta jednokierunkowej powtarzalności sondy dla 2σ .

Maszyna CNC działa na zasadzie trójwymiarowego urządzenia pomiarowego, wykorzystując systemy pomiarowe osi posuwu (szklane linały i rotacyjne systemy pomiarowe) do mierzenia długości i średnicy. Jasne jest, że użycie obrabiarki jako maszyny pomiarowej w trudnych warunkach otoczenia rodzi pewne problemy związane z dokładnością i stabilnością pomiarów. Badane obrabiarki dla wszystkich osi X, Y, Z wyposażone są w bezpośrednie, liniowe linały szklane o rozdzielczości poniżej $0,5 \mu\text{m}$. Oś obrotowa (C i B) posiadają rotacyjne systemy pomiarowe z rozdzielczością kątową poniżej $1/1000^\circ$. Pozycje osi są rejestrowane, a zmierzone odchylenia są elektronicznie kompensowane. Wstępnie naprężone prowadnice toczne zapewniają wysoką powtarzalność pozycjonowania. Oś posuwu obrabiarki są kompensowane po pierwszym teście ciągłym za pomocą pomiarów laserowych, gdzie gwarantowany średni rozrzut pozycjonowania wg normy DIN 3441 wynosi poniżej $3 \mu\text{m}$ dla osi z szklanym linałem i poniżej $5 \mu\text{m}$ dla osi z rotacyjnym systemem pomiarowym [162].

Wpływy termiczne mogą być znaczące, zwłaszcza przy obróbce dużych elementów. Istotne jest, aby proces obróbki przebiegał w stabilnych i przewidywalnych warunkach termicznych. Temperatury łoża maszyny, chłodziwa, detali, uchwytu narzędzia oraz przyrządu kalibracyjnego trzpienia pomiarowego powinny być zbliżone do temperatury otoczenia w hali produkcyjnej. Czasami może być konieczne schłodzenie chłodziwa do temperatury otoczenia. Części powinny być umieszczone blisko maszyny przed obróbką, aby osiągnęły temperaturę otoczenia. Sama obróbka powinna generować minimalne ilości ciepła, a w razie potrzeby, ciepło powinno być odprowadzane przez intensywne płukanie chłodziwem. Silnik i łożysko wrzeciona frezarskiego otoczone są płaszczem wodnym i stabilizowane termicznie przez osobny system chłodzenia, co minimalizuje ilość ciepła dostarczanego do korpusu maszyny. Linały stosowane w maszynie mają współczynnik rozszerzalności cieplnej zbliżony do stali i żeliwa szarego.

Według dokumentu [163] niepewność wyniku pomiaru ogólnie składa się z szeregu składowych, które można zgrupować w dwie kategorie, zgodnie ze sposobem oszacowania ich wartości liczbowych:

A - takie, które zostały wyznaczone metodami statystycznymi;

B - takie, które zostały wyznaczone innymi metodami.

Niepewność standardowa to niepewność wyniku pomiaru wyrażona w formie odchylenia standardowego. Niepewność złożona to niepewność wyniku pomiaru, który jest obliczany na podstawie kilku innych zmiennych. Oblicza się ją, biorąc pierwiastek kwadratowy z sumy

wyrazów będących wariancjami lub kowariancjami tych zmiennych, z uwzględnieniem wag wynikających z tego, jak bardzo wynik pomiaru zależy od zmian tych zmiennych.

Niepewność rozszerzona to wielkość, która definiuje przedział wokół wyniku pomiaru, w którym spodziewamy się znaleźć większość wartości, które mogą być przypisane mierzonemu parametrowi (mierzandowi). Aby obliczyć niepewność rozszerzoną, stosuje się współczynnik rozszerzenia, czyli liczbowy mnożnik używany do powiększenia niepewności standardowej złożonej. Współczynnik rozszerzenia k dobiera się w zależności od założonego poziomu ufności. Dla pomiarów technicznych przyjmuje się 95% poziomu ufności, a współczynnik rozszerzenia $k=2$ przy założeniu, że składowe budżetu niepewności podlegają rozkładowi normalnemu [164].

W celu oszacowania niepewności pomiaru proponowanej metody niepewność rozszerzona U została wyznaczona z zależności:

$$U = k \cdot u_c \quad (5.9)$$

gdzie:

u_c – niepewność standardowa złożona,

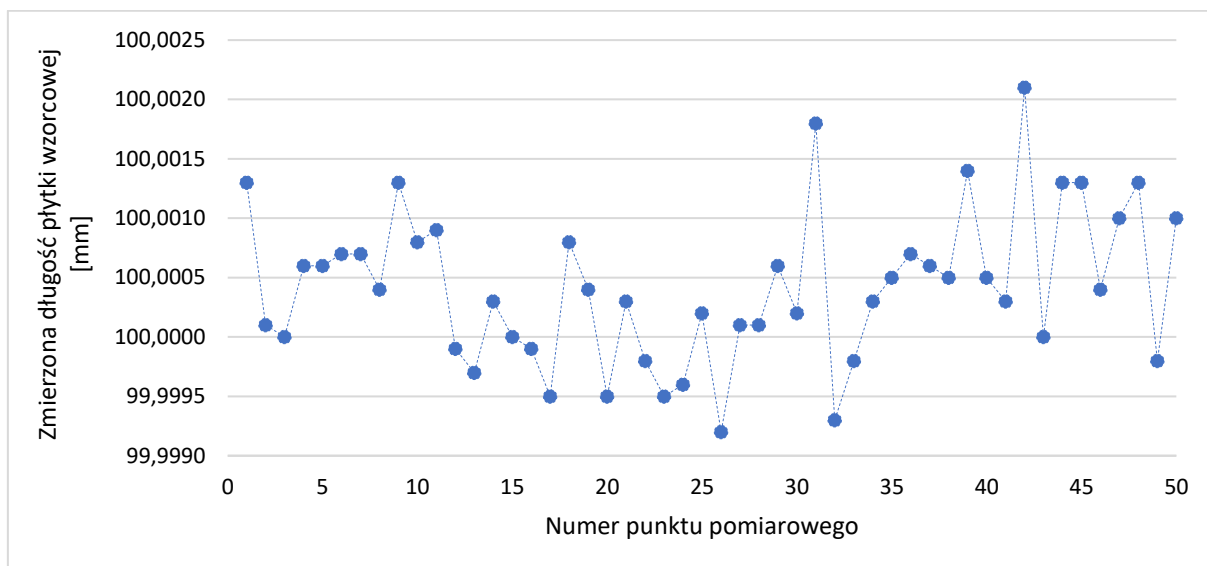
k – współczynnik rozszerzenia, przyjęto wartość 2.

Z powodu wielu czynników wpływających na wynik pomiaru budżet niepewności ograniczono do najbardziej krytycznych składników. W celu zbadania wpływu układu pomiarowego wykonano test przy użyciu płytki wzorcowej klasy I o długości $L=100$ mm. Długość ta jest bliska średnicy podziałowej mierzonych gwintów. Dokonano serii 50 pomiarów dwupunktowych wzorca przy pomocy sondy pomiarowej w kierunku osi Y. Płytkę tą znajdowała się przez dłuższy czas w otoczeniu maszyny, a sama obrabiarka była ustabilizowana termicznie bezpośrednio po wykonaniu części produkcyjnej. Płytę we wrzecionie zamocowano przy pomocy podstawki magnetycznej oraz wypoziomowano przy pomocy czujnika zegarowego (rys. 5.64).



Rys. 5.64 Widok podczas pomiaru płytki wzorcowej $L=100$ mm.

Wyniki pomiaru długości płytki wzorcowej przedstawiono na wykresie (rys. 5.65). Analizując trend zmiany wartości zmierzonej wraz z kolejnymi powtórzeniami nie zauważono stałego wzrostu bądź spadku wartości w związku z czym można przyjąć, iż rozkład wyników jest losowy, co wraz z uzyskanymi wynikami potwierdza stabilności układu pomiarowego.



Rys. 5.65 Wykres serii wyników 50 powtórzeń pomiaru płytki wzorcowej $L=100$ mm.

Uzyskane wartości poddano analizie statystycznej. Wartości wyznaczonych parametrów umieszczono w tabeli 5.19.

Tab. 5.19 Wartości uzyskane przy serii 50 powtórzeń pomiaru płytki wzorcowej $L=100$ mm.

	Wartość [mm]
Średnia	100,0004
Odchyl. Std.	0,0006
Min.	99,9992
Max.	100,0021
Rozstęp	0,0029

Obliczając niepewność pomiarową badanego stanowiska dla płytki wzorcowej posłużono się zależnością [129]:

$$u_{cp} = \sqrt{u_{Ap}^2 + u_L^2 + u_R^2} \quad (5.10)$$

gdzie:

- u_{cp} – złożona niepewność standardowa dla płytki wzorcowej,
- u_{Ap} – niepewność standardowa obliczona metodą A dla płytki wzorcowej,
- u_L – niepewność długości wzorca,
- u_R – niepewność wynikająca z rozdzielczości układu pomiarowego.

Niepewność standardową oszacowano metodą A. Założono, że u_{Ap} jest równe wartości odchylenia standardowego serii 50 powtórzeń, czyli $u_{Ap}=0,6$ μm .

Niepewność długości wzorca została oszacowana metodą typu B, zakładając prostokątny rozkład prawdopodobieństwa.

$$u_L = \frac{t_e}{\sqrt{3}} = \frac{0,6}{\sqrt{3}} \approx 0,4 \mu m \quad (5.11)$$

gdzie :

t_e - odchyłka graniczna względem długości nominalnej płytki.

Dla płytki klasy I o długości $L=100$ mm wartość $t_e=\pm 0,6\mu m$.

Niepewność wynikająca z rozdzielczości układu pomiarowego została również oszacowana metodą typu B, zakładając trójkątny rozkład prawdopodobieństwa.

$$u_R = \frac{0,05}{\sqrt{6}} \approx 0,2 \mu m \quad (5.12)$$

Niepewność złożoną układu pomiarowego można oszacować zatem jako:

$$u_{cp} = \sqrt{u_{Ap}^2 + u_L^2 + u_R^2} \approx 0,8 \mu m \quad (5.13)$$

Obliczona wartość niepewności pomiarowej odnosi się w uproszczony sposób do urządzenia pomiarowego jakim jest obrabiarka WFL M40 wraz z sondą stykową RMP600.

Budżet niepewności badanej procedury pomiarowej średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego powinien uwzględnić samą geometrię końcówki pomiarowej, a także mierzonego gwintu.

Szacując niepewność pomiarową badanego układu, z racji podobieństwa do pomiaru metodą trójwałeczkową, można zastosować wzór dedykowany dla tej metody [3]:

$$u_c = \sqrt{u^2(M_p) + u^2(d_w) + u^2(P) + u^2(\beta) + u^2(\gamma) + u^2(p_1) + u^2(p_2)} \quad (5.14)$$

gdzie składniki budżetu niepewności pomiarowej odnoszą się do:

1. Układu pomiarowego (wyznaczona poprzez pomiar płytki wzorcowej):

$$u(M_p) = u_{cp} = 0,748 \mu m \quad (5.15)$$

2. Średnicy wałeczków pomiarowych (kuli pomiarowej):

$$u(d_w) = \left(1 + \frac{\cos \varepsilon}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (5.16)$$

3. Skoku gwintu:

$$u(P) = \frac{\cos \beta \cos \gamma}{\sin \alpha} \quad (5.17)$$

4. Półkąatów zarysu:

$$u(\beta) = \frac{0,1454}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cos \beta (d_w - d_{o1}) \quad (5.18)$$

$$u(\gamma) = \frac{0,1454}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cos \gamma (d_w - d_{o2}) \quad (5.19)$$

5. Poprawki na skręcenie wałeczków:

$$u(p_1) \quad (5.20)$$

6. Poprawki na nacisk pomiarowy:

$$u(p_2) \quad (5.21)$$

Obliczenia nie uwzględniają niepewności temperaturowej.

Podstawiając dane do powyższych wzorów otrzymujemy wyniki zgodnie z tabelą 5.20.

Tab. 5.20. Składniku budżetu niepewności pomiarowej dla czterech typów gwintów.

μm	GWINT1	GWINT2	GWINT3	GWINT4
$u(M_p)$	0,748	0,748	0,748	0,748
$u(d_w)$	4,424	4,424	3,157	3,157
$u(P)$	1,588	1,588	0,891	0,891
$u(\beta)$	0,010	0,010	-0,060	-0,060
$u(\gamma)$	0,011	0,011	-0,084	-0,084
$u(p_1)$	0,001	0,001	-0,016	-0,019
$u(p_2)$	0,019	0,019	0,019	0,020
u_c	4,759	4,759	3,365	3,365
$U=k \cdot u_c=2 u_c$	9,518	9,518	6,729	6,729

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, korzystając z wyników otrzymanych dla płytki wzorcowej oraz wzoru na niepewność pomiarową metody trójwałeczkowej otrzymano wartości rozszerzonej niepewności pomiarowej dla GWINTU 1 i 2 $U=9,5 \mu\text{m}$ oraz dla GWINTU 3 i 4 $U=6,7 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę wartości pola tolerancji mierzonej średnicy podziałowej równej $140 \mu\text{m}$, wynik ten jest satysfakcjonujący. Mając na uwadze warunki przemysłowe w jakich została zastosowana opracowana metoda można stwierdzić, iż w wartość niepewności pomiarowej spełnia wysokie wymagania przemysłu lotniczego.

5.6 Wnioski z badań zasadniczych

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć kilka kluczowych wniosków.

Użycie czujnika laserowego liniowego do pomiaru gwintów zewnętrznych jest możliwe, ale ma swoje ograniczenia. Precyzyjne wyniki można uzyskać głównie przy powierzchniach matowych. Powierzchnie błyszczące generują szumy z powodu refleksów świetlnych, które można częściowo eliminować poprzez pochylenie obiektu względem układu pomiarowego. Jednakże w produkcji wymagałoby to bardziej złożonego układu pomiarowego, co zwiększa koszty i złożoność.

Zauważono wzrost błędu pozycjonowania wraz z odległością od wymiaru referencyjnego, zwłaszcza w osi Z. Oś Z jest bardziej obciążona i wykazuje większe luzy, co wpływa na dokładność pomiarów. Dodatkowo, zaobserwowano wpływ stabilizacji termicznej maszyny na jakość pomiarów, co jest szczególnie istotne przy produkcji precyzyjnych części.

Droższa sonda tensometryczna wykazała się znacznie większą precyzją, niż kinematyczna sonda rezystancyjna, co czyni ją bardziej odpowiednią do pomiarów

precyzyjnych części. Różne czynniki, takie jak kierunek pomiaru i powrót sondy do magazynu, wpływają na wyniki, a największe odchylenia zaobserwowano w osi Z.

Wyniki z tensometrycznej sondy pomiarowej były porównywalne oraz skorelowane liniowo z metodą trójwałeczkową. Choć wyniki pomiarowe z sondy były nieco wyższe, wykazały dużą powtarzalność. Badania potwierdziły, że CNC mogą być wykorzystywane jako pomocnicze narzędzia do kontroli jakości, mimo że nie są certyfikowanymi maszynami pomiarowymi.

Podsumowując, zastosowanie tensometrycznej sondy pomiarowej wraz z obrabiarką CNC pozwala na poprawny pomiar średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego w warunkach produkcyjnych.

6. Podsumowanie i kierunek dalszych badań

Celem pracy było opracowanie metody automatycznego pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarce CNC, co miało umożliwić zautomatyzowaną kontrolę jakości oraz korekcję nastaw narzędzi, zgodnie z ideą „closed door manufacturing”. Przeprowadzona analiza literatury wykazała, że choć manualne metody pomiaru nadal dominują w przemyśle, to rozwijane są również technologie automatyczne, zwłaszcza optyczne i oparte na sondach stykowych. W badaniach wstępnych potwierdzono, że jakość powierzchni trudnoskrawalnych materiałów nie wpływa negatywnie na pomiary geometryczne, a różnice między metodami tradycyjnymi a automatycznymi były niewielkie. Metody optyczne pozwalają na pomiar wielu cech jednocześnie przez co cechują się dużą szybkością. Wybór sond stykowych do dalszych badań uzasadniono ich odpornością na warunki panujące wewnątrz obrabiarki oraz łatwą integracją z systemem CNC.

Badania zasadnicze wykazały, że pomiar czujnikiem laserowym liniowym, choć możliwy, jest ograniczony do powierzchni matowych, a błyszczące powodują rejestrowanie licznych zakłóceń. Sondy tensometryczne okazały się znacznie bardziej precyzyjne od kinematycznych, co czyni je odpowiednim rozwiązaniem dla precyzyjnych pomiarów na CNC. Wyniki dowiodły, że automatyzacja pomiarów gwintów na obrabiarkach CNC jest możliwa i może znacząco poprawić efektywność produkcji oraz jakość końcowych produktów.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można wydzielić następujące wnioski:

Wnioski poznawcze:

1. Na podstawie przeglądu stanu wiedzy nie znaleziono gotowego rozwiązania problemu badawczego zarówno w literaturze jak i wśród wiodących producentów obrabiarek oraz sond inspekcyjnych np. Renishaw.
2. Czynniki takie jak zmienna temperatura, zanieczyszczenia stanowią istotny wpływ na wyniki pomiarów w przestrzeni tokarki CNC. Równie ważna jest stabilizacja termiczna samej obrabiarki przed przystąpieniem do obróbki oraz pomiarów.
3. Pomiary optyczne, mimo szeregu zalet takich jak szybkość pomiaru oraz uniwersalność nie znajdują zastosowania w pomiarze gwintów na obrabiarce CNC.
4. Dokładność zaproponowanej metody pomiarowej średnicy podziałowej gwintu zewnętrznego o zarysie trapezowym niesymetrycznym zależy od wartości kąta wrębu. Niższa wartość kąta skutkuje zmniejszeniem dokładności pomiarowej.
5. Wartość niepewności pomiarowej zaproponowanej metody wynosi niespełna 0,01 mm.

Wnioski użytkowe:

1. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej z zastosowaniem sondy tensometrycznej są skorelowane liniowo z wynikami uzyskanymi metodą trójwałeczkową.
2. Zaproponowana metodyka pomiarowa spełnia wymagania jakościowe przemysłu lotniczego, co potwierdzono na ponad 1000 elementach produkcyjnych.
3. Wdrożenie pomiaru do praktyki produkcyjnej pozwala na ograniczenie błędów wynikających z tzw. „czynnika ludzkiego” oraz na zwiększenie efektywności wykorzystania obrabiarki CNC.

W ramach dalszych badań proponuje się:

1. Rozszerzenie badań na inne rodzaje gwintów i obrabiarki. Przeprowadzenie badań nad automatyzacją pomiarów innych typów gwintów, w szczególności gwintów o mniejszych zakresach średnic, gdzie wymagana byłaby kula pomiarowa o średnicy mniejszej niż 1 mm. Przeprowadzenie badań na innych obrabiarkach niż WFL M40.
2. Badania nad stabilnością termiczną. Pogłębienie badań nad wpływem temperatury na dokładność pomiarów w obrabiarkach CNC.
3. Badania nad zastosowaniem optycznych metod pomiarowych. Wskazanie możliwości poprawy dokładności pomiarów laserowych na powierzchniach błyszczących poprzez zastosowanie algorytmów filtracji szumów oraz technik eliminacji refleksów świetlnych

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie nowoczesnej metody pomiaru gwintów zewnętrznych bezpośrednio na tokarce CNC, co miało w konsekwencji pozwolić automatyczną korekcję nastaw narzędzi w trakcie procesu obróbki, a tym samym przyczynić się do poprawy jakości produkowanych części. Przeprowadzona analiza literatury wykazała, że obecnie stosowane metody pomiarowe, zwłaszcza manualne, są nieefektywne w kontekście nowoczesnych linii produkcyjnych, wymagających minimalnej ingerencji operatora oraz dużej precyzji. W szczególności w branży lotniczej, gdzie gwinty trapezowe niesymetryczne muszą spełniać wyjątkowo wysokie wymagania jakościowe, automatyzacja pomiarów może znacznie usprawnić proces produkcji.

W ramach badań wstępnych przeanalizowano różne metody pomiarowe, takie jak techniki optyczne oraz sondy stykowe, w celu określenia ich przydatności do pomiaru gwintów na tokarce CNC. Badania zasadnicze wykazały, że sondy tensometryczne charakteryzują się wysoką precyzją i powtarzalnością pomiarów nawet w trudnych warunkach panujących wewnątrz obrabiarek. Pomimo że metody laserowe mają ograniczenia przy powierzchniach błyszczących, możliwe jest ich wykorzystanie przy odpowiedniej konfiguracji. Stabilizacja termiczna maszyn okazała się kluczowa dla zapewnienia stabilności i dokładności pomiarów, co jest istotne w produkcji elementów z materiałów trudnoobrabialnych, takich jak Inconel 718.

Opracowana metoda pozwala na zintegrowanie pomiarów bezpośrednio w procesie obróbki, co znacząco skraca czas produkcji poprzez eliminowanie przestojów obrabiarki oraz eliminuje konieczność transportu elementów na stanowiska pomiarowe. Dzięki temu możliwa jest bieżąca kontrola jakości i automatyczne korekty procesu, co wpisuje się w nowoczesną koncepcję Przemysłu 4.0 i „closed door manufacturing”, zapewniając jednocześnie wyższą jakość oraz efektywność produkcji. Weryfikacja opracowanego rozwiązania wykazała silną korelację liniową z wynikami otrzymywanymi za pomocą metody trójwałeczkowej, a wartość błędów pomiaru zależą w dużej mierze od wielkości kąta zarysu gwintowego. Wartość niepewności pomiarowej zaproponowanej metody wynosi niespełna 0,01 mm.

Abstract

The aim of this study was to develop a modern method for measuring external threads directly on a CNC lathe, enabling the automatic correction of tool settings during the machining process. This, in turn, would contribute to improving the quality of the produced parts. A review of the literature revealed that current measurement methods, particularly manual ones, are inefficient in the context of modern production lines, which require minimal operator intervention and high precision. This is especially true in the aerospace industry, where asymmetrical trapezoidal threads must meet exceptionally high-quality standards. Automating the measurement process can significantly streamline production in such contexts.

In preliminary research, various measurement methods, including optical techniques and contact probes, were analyzed to assess their suitability for thread measurement on a CNC lathe. The core investigations demonstrated that strain gauge probes offer high precision and repeatability, even under challenging conditions inside machine tools. Although laser methods face limitations when applied to reflective surfaces, they can be utilized with proper configuration. Thermal stabilization of machines proved critical for ensuring the stability and accuracy of measurements, particularly important when machining components from hard-to-machine materials such as Inconel 718.

The developed method integrates measurements directly into the machining process, significantly reducing production time by eliminating machine downtime and the need to transport parts to measurement stations. This allows for In-process quality control and automatic process adjustments, aligning with the modern concept of Industry 4.0 and “closed-door manufacturing,” while simultaneously ensuring higher production quality and efficiency. Validation of the proposed solution demonstrated a strong linear correlation with results obtained using the three-wire method, with measurement errors largely dependent on the thread angle. The measurement uncertainty of the proposed method is less than 0.01 mm.

Bibliografia

1. Q.-b. Tong, B.-z. Han, D.-l. Wang, J.-q. Wang, and Z.-l. Ding, „A novel laser-based system for measuring internal thread parameters”, *Journal of Russian Laser Research*, vol. 35, nr. 3, s. 307-316, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10946-014-9429-0>.
2. E. Hong, H. Zhang, R. Katz, and J. S. Agapiou, „Non-contact inspection of internal threads of machined parts”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 62, s. 221–229, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3793-5>.
3. J. Malinowski, W. Jakubiec, i W. Płowucha, *Pomiary gwintów w budowie maszyn*, wyd. 2, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2010. ISBN: 978-83-204-3626-6.
4. K. Szewczyk, *Połączenia gwintowe*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1991. ISBN: 83-01-083220.
5. M. L. Grilli i in., „Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Last Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications”, *Materials*, vol. 14, 1656, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14071656>.
6. Q. Yin, Z. Liu i B. Wang, „Machinability improvement of Inconel 718 through mechanochemical and heat transfer effects of coated surface-active thermal conductive mediums”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 876, 160186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160186>.
7. Z. Peng, X. Zhang i D. Zhang, „Performance evaluation of high-speed ultrasonic vibration cutting for improving machinability of Inconel 718 with coated carbide tools”, *Tribology International*, vol. 155, 106766, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106766>.
8. W. H. Pereira and S. Delijaicov, „Surface integrity of INCONEL 718 turned under cryogenic conditions at high cutting speeds”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 104, s. 2163–2177, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03946-1>.
9. N. Khanna, C. Agrawal, M. Dogra i C. I. Pruncu, „Evaluation of tool wear, energy consumption and surface roughness during turning of Inconel 718 using sustainable machining technique”, *J Mater Res Technol*, vol. 9, nr 3, s. 5794–5804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.104>.
10. K. Smak, P. Szablewski, S. Legutko, B. Krawczyk i E. Miko, „Investigation of the Influence of Anti-Wear Coatings on the Surface Quality and Dimensional Accuracy during Finish Turning of the Inconel 718 Alloy”, *Materials*, vol. 16, nr 2, 715, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16020715>.
11. K. M. Fong, X. Wang, S. Kamaruddin i M.-Z. Ismadi, „Investigation on universal tool wear measurement technique using image-based cross-correlation analysis”, *Measurement*, vol. 169, 108489, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108489>.
12. P. Czajka, P. Garbacz, J. Mężyk, T. Giesko i A. Mazurkiewicz, „The optomechatronics system for automatic quality inspection of machined workpieces”, *Journal of Machine Construction and Maintenance*, nr. 4, s. 77-86, 2018. ISSN: 1232-9312.
13. „Geometria gwintu”, <https://artykulytechniczne.pl/blog/geometria-gwintu/>, dostęp: 7.08.2021.
14. Z. Partyka, „Refleksje ogólne na tle historii gwintów”, *Normalizacja*, nr. 8, 1988.
15. J. Malinowski, Z. Partyka i M. Wojtyła, „Rola pojęć średnic podziałowych elementarnej i wirtualnej w gwintach walcowych”, *Przegląd Mechaniczny*, nr 9, s. 27-31, 2007.
16. Sandvik Coromant, <https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl>, dostęp: 07.01.2023.
17. S. Zhang, S. Fan, Q. Wang, S. Zhao i Q. Zju, „Deformation characteristics of self-infeed rolling process for thread shaft”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, s. 2941-2951, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03677-3>.
18. J. P. Domblesky i F. Feng, „A parametric study of process parameters in external thread rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 121, nr 2-3, s. 341–349, 2002. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)01223-7](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)01223-7).

19. Ş. Tâlu i in., „Experimental investigations of threads surface integrity manufactured by cutting insert and with internal thread rolling head”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.06.007>.
20. S. Okoński, R. Moszumański i A. Tabor, „Jakość gwintów wewnętrznych walcowanych i nagniatanych głowicami rolkowymi”, *Problemy Eksploatacji*, nr 4, s. 163-175, 2010.
21. „Katalog artykułów firmy ASMET”, <https://katalog.asmet.com.pl/>, dostęp: 23.07.2024.
22. M. Günay, „Investigation of the Effects on Screw Thread of Infeed Angle during External Threading”, *Gazi University Journal of Science*, vol. 24, nr 1, s. 153-160, 2011.
23. *Instrukcja programowania, SINUMERIK 840D sl - NC programming*, 10/2020.
24. Sandvik Coromant, *Podręcznik Szkoleniowy „Obróbka Metali Skrawaniem”*, 2017.
25. S. Koleva, M. Enchev i T. Szecsi, „Compensation of the deviations caused by mechanical deformations during machining of threads”, *Procedia Manufacturing*, vol. 13, s. 480-486, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.066>.
26. S. Khani, M. R. Razfar, S. Shahabi Haghighi i M. Farahnakian, „Optimization of microtextured tools parameters in thread turning process of aluminum 7075 aerospace alloy”, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 35, nr 12, s. 1330-1338, 2020. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1772485>.
27. M. Nalbant, M. Günay i Y. Yildiz, „Modelling of the Effect of Different Infeed Angles and Cutting Areas on the Cutting Forces in External Threading”, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, vol. 32, s. 153-161, 2008.
28. Z. Song and W. Wang, „On Processing Methods and Skills of Trapezoidal Thread by Means of CNC Lathe”, *Advances in Intelligent Systems Research*, vol. 159, s. 375-377, 2018. <https://doi.org/10.2991/mmsa-18.2018.83>.
29. Eltech, „Nowa generacja gwintowników CoroTap T200/T300 Sandvik Coromant”, <https://www.eltech.com.pl/nawosci-produktowe/nowa-generacja-gwintownikow-corotap-t200-t300-sandvik-coromant/>, dostęp: 7.01.2023.
30. M. Dana, M. Zetek i V. Schorník, „Tapping Tool Life when Machining Inconel 718”, w: *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*, 2016. <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.099>.
31. I. Marinescu, D. Axinte, C. Herbert, J. McGourlay i P. J. Withers, „Assessment of thread-cutting strategies to enable damage-tolerant surfaces on an advanced Ni-based aerospace superalloy”, *Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, nr 1, 2010. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM2045>.
32. R. Polvorosa, L. L. de Lacalle, A. J. S. Egea i in., „Cutting edge control by monitoring the tapping torque of new and resharpened tapping tools in Inconel 718”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, s. 3799-3808, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04914-5>.
33. GARANT, „Poradnik obróbki skrawaniem”, www.garant-tools.com, dostęp: 07.01.2023.
34. Z. Hu, C. Qin, Z. Shi, Y. Tang, X. Zhang i Y. Zou, „An effective thread milling force prediction model considering instantaneous cutting thickness based on the cylindrical thread milling simplified to side milling process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, nr 5-6, s. 1275-1283, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05919-1>.
35. A. Shchurov, E. V. Nemitova, A. V. Shchurova i D. V. Ardashev, „Metric Buttress Thread Milling and Turning on CNC Machines”, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 15, nr 2, s. 5146-5160, 2018. <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.1.0398>.
36. V. I. Leun and E. V. Nikolaeva, „Direct measurement of the mean thread diameter of cutting and monitoring tools in thread grinding”, *Russian Engineering Research*, vol. 35, nr 2, s. 156-157, 2015.
37. W. Wang and X. Feng, „Analysis of Grinding Force and Elastic Deformation in Thread Grinding Process”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/827831>.
38. B. Pytlak, „Toczenie gwintu w stanie zahartowanym”, *Mechanik*, vol. 10, 2016. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.10.417>.

39. „Metody wykonywania gwintów”, https://mechanika-obrobka.pl/gwinty_metody_wykonywania_gwintow/, dostęp: 07.01.2023.
40. ASME, *Unified Inch Screw Threads (UN, UNR Thread Forms)*, B1.1-2003 (R2018).
41. ASME, *ACME Screw Threads*, B1.5-1997 (R2009).
42. ANSI, *Buttress Inch Screw Threads*, B1.9-1973 (R2017).
43. P. Szablewski, K. Smak i B. Krawczyk, „Analysis of the Impact of Wiper Geometry Insert on Surface Roughness and Chips in Machining Materials Used in the Aviation Industry”, *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, nr 1, s. 203-212, 2022. <https://doi.org/10.12913/22998624/143475>.
44. B. Krawczyk, P. Szablewski, S. Legutko, K. Smak i B. Gapiński, „Anomalies in the Geometric Surface Structure of Shaped Elements Composed of Inconel 718 Alloy”, *Materials*, vol. 14, nr 24, 7524, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14247524>.
45. Y. He, Z. Zhou, P. Zou, X. Gao i K. F. Ehmann, „Study of ultrasonic vibration–assisted thread turning of Inconel 718 superalloy”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, nr 10, 2019. <https://doi.org/10.1177/1687814019883772>.
46. L. Cano Salinas, K. Moussaoui, A. Hejjaji, M. Salem, A. Hor i R. Zitoune, „Influence of abrasive water jet parameters on the surface integrity of Inconel 718”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, s. 997-1009, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06888-9>.
47. „Inconel 718 Alloy”, <https://www.americanelements.com/inconel-718-alloy>, dostęp: 08.08.2021.
48. M. Rahman, W. K. H. Seah i T. T. Teo, „The machinability of Inconel 718”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, s. 199–204, 1997.
49. Z. Peng, X. Zhang, Y. Zhang i in., „Wear resistance enhancement of Inconel 718 via high-speed ultrasonic vibration cutting and associated surface integrity evaluation under high-pressure coolant supply”, *Wear*, vol. 530–531, 205027, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205027>.
50. *Airplane Flying Handbook*, U.S. Federal Aviation Administration, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 2004.
51. P. Szablewski, S. Legutko, A. Mróz, D. Garbiec, R. Czajka, K. Smak i B. Krawczyk, „Surface Topography Description after Turning Inconel 718 with a Conventional, Wiper and Special Insert Made by the SPS Technique”, *Materials*, vol. 16, nr 3, 949, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16030949>.
52. J. Zhou, V. Bushlya, P. Avdovic i J. E. Stahl, „Study of surface quality in high speed turning of Inconel 718 with uncoated and coated CBN tools”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, s. 141–151, 2012.
53. Q. L. An, G. G. Guo, X. H. Zheng, M. Chen, G. Liu i Y. S. Zhang, „Experimental Study on Cutting Characteristics for Buttress Thread Turning of 13%Cr Stainless Steel”, *Key Engineering Materials*, vol. 443, s. 262–267, 2010.
54. B. Jiang, J. Zhao, M. Zheng, T. He i B. Sun, „Transient cutting force model in turning large-pitch external thread”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, s. 1–16, 2017.
55. P. Erbao and Z. Guotong, „Image Processing Technology Research of On-line Thread Processing”, *Energy Procedia*, vol. 17, s. 1408–1415, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.260>.
56. C. Hill, „CMMs vs. Thread Gages”, *Quality Magazine*, 07.2016.
57. S. Kosarevsky i V. Latypov, „Detection of Screw Threads in Computer Tomography 3D Density Fields”, *Measurement Science Review*, vol. 13, nr 6, 2013. <https://doi.org/10.2478/msr-2013-0043>.
60. P. Suliga, „A feature analysis of a laser triangulation stand used to acquire a 3D screw thread image”, w: *Proceedings of the 17th International Carpathian Control Conference*, 2016, s. 702–705.
61. J. Malinowski i W. Płowucha, „Poprawki w pomiarach średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych pierścieniowych”, *PAK*, vol. 5, 2000.

62. EURAMET, „Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing”, *EURAMET cg-10*, Version 2.1, 12.2012.
63. A. Przyklenk, S. Schädel i M. Stein, „Verification of a calibration method for 3D screw thread metrology”, *Measurement Science and Technology*, vol. 32, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abead2>.
64. P. Poliński, G. Budzik i M. Pytel, „Metodyka kontroli gwintowych sprawdzianów pierścieniowych”, *Stal*, vol. 7-8, 2022.
65. T. Primožic Merkač and B. Acko, „Comprising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results”, *Measurement*, vol. 43, s. 421–425, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.12.012>.
66. J. Kloypayan and W. Pimpakan, „The Pitch Diameter of Pipe Taper Thread Measurement and Uncertainty Three-Wire Probe”, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 8, nr 2, s. 353–357, 2014. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1090894>.
67. C. Sheng, Z. Dongbiao i L. Yonghua, „A new compensation method for measurement of thread pitch diameter by profile scanning”, *Measurement Science Review*, vol. 14, nr 6, s. 323–330, 2014.
68. S. Kosarevsky, „Alignment problem while measuring thread pitch of large thread gauges on the profile-measuring machines”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 48, s. 267–272, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2279-1>.
69. F. Peti i P. Serban, „Coordinate Measuring Machine Probes Effect during Inner Thread Position Measurement”, *Proceedings*, vol. 63, p. 55, 2020. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063055>.
70. S. Schädel, A. Wedmann i M. Stein, „Advanced screw thread metrology using an areal measuring strategy and a holistic evaluation method”, *Measurement Science and Technology*, vol. 30, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab1501>.
71. Q. Zhou, Q. Zhang i Y. Yin, „Error compensation analysis of the probe-radius of the online measurement device for joint internal thread”, w: *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Hefei, China, 2016, s. 1350–1354. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603794>.
72. S. Carmignato and L. De Chiffre, „A new method for thread calibration on coordinate measuring machines”, *CIRP Annals*, vol. 52, nr 1, s. 447–450, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60622-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60622-2).
73. A. Shchurov, „Calculation of the virtual pitch thread diameter using the cloud of points from CMM”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 53, s. 241–245, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2815-z>.
74. A. Yüksel *et al.*, „Comparison of internal and external threads pitch diameter measurement by using conventional methods and CMM’s”, w: *19th International Congress of Metrology*, 2019. <https://doi.org/10.1051/metrology/201909001>.
75. A. Vitecek, A. Sioma, P. Suliga i J. Kowal, „Automatization of screw thread profile measurement using a 3D vision system”, *Journal of Machine Construction and Maintenance*, vol. 3, s. 15–22, 2018.
76. R. Farana, A. Sioma, P. Suliga i J. Kowal, „A method of screw thread measurement using a 3D vision system”, *Journal of Machine Construction and Maintenance*, vol. 2, s. 7–14, 2018.
77. B. Yao, Z. Cai, J. Lu, X. Ma i B. Chen, „Novel laser triangulation measurement method for screw rotor profile under multi-factor constraints”, *Measurement*, vol. 152, p. 107317, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107317>.
78. C.-F. Lin, S.-F. Lin, C.-H. Hwang, *et al.*, „Real-Time Image-Based Defect Inspection System of Internal Thread for Nut”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, nr 8, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2872310>.
79. D. D. Lavrinov i A. I. Khorkin, „Laser Triangulation 2D Scanner Signal Processing for Premium Thread Pitch Measurement”, in *ICIEAM 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076110>.
80. Q. B. Tong i in., „The Research of Screw Thread Parameter Measurement Based on Position Sensitive Detector and Laser”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 48, 105, 2006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/48/1/105>.

81. C.-F. Lin, C.-H. Hwang, H. R. Fang, C.-Y. Chen i J.-R. Sze, „Real-time pitch diameter measurement of internal thread for nut using laser triangulation”, w: *Proc. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2017.
82. Z. Dong, X. Sun, W. Liu i H. Yang, „Measurement of Free-Form Curved Surfaces using Laser Triangulation”, *Sensors*, vol. 18, 3527, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18103527>.
83. E. S. Gadelmawla, „Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads”, *Measurement*, vol. 100, s. 36–49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.034>.
84. E. E. Gadelmawla, „Development of computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads”, *Journal of Engineering Sciences*, May 2011. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2011.127666>.
85. E. S. Gadelmawla, „A novel system for automatic measurement and inspection of parallel screw threads”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, May 2004. <https://doi.org/10.1177/095440540421800508>.
86. F. J. He, R. J. Zhang, Z. J. Du i X. M. Cui, „Non-contact Measurement of Damaged External Tapered Thread Based on Linear Array CCD”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 48, s. 676–680, 2006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/48/1/127>.
87. J. H. Chen, J. J. Zhang, R. J. Gao i in., „Research on Modified Algorithms of Cylindrical External Thread Profile Based on Machine Vision”, *Measurement Science Review*, vol. 20, nr 1, s. 15–21, 2020. <https://doi.org/10.2478/msr-2020-0003>.
88. F. Li, „Thread image processing technology research based on combination of edge detection and sub-pixel positioning”, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, vol. 7, nr 3, s. 1275–1279, 2015.
89. Z. Feng, F. You i J. He, „Research on application of corner detection in thread vision measurement”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1812, p. 012020, 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1812/1/012020>.
90. M. Jing and J. Du, „Flank angle measurement based on improved Sobel operator”, *Manufacturing Letters*, vol. 25, s. 44–49, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.07.003>.
91. J. Min, „Measurement method of screw thread geometric error based on machine vision,” *Measurement and Control*, vol. 51, nr 7-8, s. 304–310, 2018. <https://doi.org/10.1177/0020294018786751>.
92. M. Chen, „Compensation of thread profile distortion in image measuring screw thread,” *Measurement*, vol. 129, s. 582–588, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.041>.
93. C. Robertson i R. Fisher, „Shape recovery and analysis of large screw thread,” w: *Proc. 3rd Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM01)*, Montreal, Canada, Jun. 2001, s. 300-305. <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924462>.
94. B. Krawczyk, K. Smak, P. Szablewski i B. Gapiński, „Review of measurement methods to evaluate the geometry of different types of external threads,” w: *Advances in Manufacturing III*, M. Diering, M. Wiczorowski, M. Harugade, and A. Pereira, Eds. Cham: Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03925-6_9.
95. Y. C. Lee i S. S. Yeh, „Using machine vision to develop an on-machine thread measurement system for computer numerical control lathe machines,” in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proc. of the Int. MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 03. 2019, s. 13-15.
96. Y. C. Lee, Y. C. Wu i S. S. Yeh, „Development of an on-machine external thread measurement system for CNC lathes using eye-in-hand machine vision with morphology technology,” *Engineering Letters*, vol. 29, nr 3, 2021.
97. Z. Dong, X. Sun, C. Chen i M. Sun, „A fast and on-machine measuring system using the laser displacement sensor for the contour parameters of the drill pipe thread,” *Sensors*, vol. 18, 1192, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041192>.
98. Z. Yang, M. Chen i P. Wang, „Effect of oil adhesion on the measurement of screw thread with machine vision,” *Measurement and Control*, vol. 53, nr 5-6, s. 922–933, 2020. <https://doi.org/10.1177/0020294020903477>.
99. H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld i M. Hoffmann, „Industry 4.0,” *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, nr 4, s.239–242, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.

100. K. Zhou, T. Liu, i L. Zhou, „Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges”, *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/fskd.2015.7382284>.
101. A. Hamrol, J. Gawlik, i J. Sładek, „Mechanical Engineering in Industry 4.0”, *Management and Production Engineering Review*, vol. 10, nr 3, s. 19–28, 2019. <https://doi.org/10.24425/mper.2019.129595>.
102. Y. Takaya, „In-Process and On-Machine Measurement of Machining Accuracy for Process and Product Quality Management: A Review”, *International Journal of Automation Technology*, vol. 8, s. 4–19, 2013. <https://doi.org/10.20965/ijat.2014.p0004>.
103. V. D. Majstorovic, N. Durakbasa, Y. Takaya, i S. Stojadinovic, „Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model”, w: *Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue. IMEKOTC14 2019*, V. Majstorovic i N. Durakbasa, Red., Cham, Szwajcaria: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18177-2_1.
104. A. Gąska, J. Sładek, i P. Gąska, „Challenges for Uncertainty Determination in Dimensional Metrology Put by Industry 4.0 Revolution”, w *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, L. Wang, V. Majstorovic, D. Mourtzis, E. Carpanzano, G. Moroni, i L. Galantucci, Red., Cham, Szwajcaria: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46212-3_6.
105. A. Gąska i J. Sładek, „In-line and in-process metrology systems: perspectives and challenges”, w *International Scientific-Technical Conference Manufacturing 22*, Poznań, Polska, 16–19.05.2022.
106. M. Wieczorowski i J. Trojanowska, „Towards Metrology 4.0 In Dimensional Measurements”, *Journal of Machine Engineering*, vol. 23, s. 100–113, 2023. <https://doi.org/10.36897/jme/161717>.
107. J. Horst, T. Hedberg, i A. B. Feeney, „On-machine measurement use cases and information for machining operations”, *Natl. Inst. Stand. Technol. Adv. Man. Ser.*, vol. 400–401, s. 1–69, 2019. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.400-1>.
108. Renishaw, <https://www.renishaw.pl/> dostęp: 15.07.2024.
109. M. Wieczorowski, T. Eichner, I. Lindner, i A. Pereira, „A Concept of in-Process Measurement System for Spline Forming”, *Management and Production Engineering Review*, vol. 6, 2015. <https://doi.org/10.1515/mper-2015-0019>.
110. C.-H. Kuo i P.-C. Chen, „On-Machine Measurement and Error Compensation for 6061 Aluminum Alloy Hexagonal Punch Using a Turn-Milling Machine”, *Machines*, vol. 9, nr 180, 2021. <https://doi.org/10.3390/machines9090180>.
111. Ł. Marchewka i M. Grudziński, „An Approach to an Intelligent Scanning of the Machine Tool Workspace”, *Journal of Machine Engineering*, vol. 21, nr 2, s. 60–74, 2021. <https://doi.org/10.36897/jme/136414>.
112. D. Li, B. Wang, Z. Tong, i in., „On-machine surface measurement and applications for ultra-precision machining: a state-of-the-art review”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, s. 831–847, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03977-8>.
113. K. M. Fong, X. Wang, S. Kamaruddin, i M.-Z. Ismadi, „Investigation on universal tool wear measurement technique using image-based cross-correlation analysis”, *Measurement*, vol. 169, art. nr 108489, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108489>.
114. Blum-Novotest, <https://www.blum-novotest.com/>. dostęp: 14.04.2024.
115. J. Kaczmarek, S. Lange, R. Święcik, i A. Żurawski, „Diagnostyka błędów stołu obrotowego pionowego centrum frezarskiego CNC z wykorzystaniem sondy przedmiotowej”, *Mechanik*, nr 10, 2016. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.10.422>.
116. A. Woźniak i K. Męczyńska, „Measurement hysteresis of touch-trigger probes for CNC machine tools”, *Measurement*, vol. 156, s. 107568, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107568>.
117. „Metrol-Europe”, <https://metrol-europe.com/>, dostęp: 24.07.2024.
118. „Marposs”, dostęp: <https://www.marposs.com/>, dostęp: 24.07.2024.

119. M. Del Guerra i R. T. Coelho, „Development of a low cost Touch Trigger Probe for CNC Lathes”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 179, nr 1–3, s. 117-123, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.093>.
120. S. Koleva, M. Enchev, i T. Szecsi, „Automatic Dimension Measurement on CNC Lathes Using the Cutting Tool”, *Procedia CIRP*, vol. 33, s. 568-575, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.080>.
121. G. Bomba, A. Ornat, P. Gierlak, i M. Muszynska, „On-Machine Measurements for Aircraft Gearbox Machining Process Assisted by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System”, *Applied Sciences*, vol. 12, nr 4780, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12094780>.
122. G. Szyszka i J. Sep, „Comparative Performance Evaluation of Multiconfiguration Touch-Trigger Probes for Closed-Loop Machining of Large Jet Engine Cases”, *Materials*, vol. 15, nr 1461, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15041461>.
123. M. Jankowski, A. Woźniak, i J. R. R. Mayer, „On-machine and In-laboratory Investigation of Errors of Probes for CNC Machine Tools”, w *Advances in Engineering Research and Application*, Springer, Cham, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_56.
124. M. Jankowski i A. Woźniak, „Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools”, *Measurement*, vol. 77, s. 317-326, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.023>.
125. M. Jankowski, A. Woźniak, i M. Byszewski, „Machine tool probes testing using a moving inner hemispherical master artefact”, *Precision Engineering*, vol. 38, nr 2, s. 421-427, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.12.009>.
126. S. Sepahi-Boroujeni, R. Mayer, F. Khameneifar, i A. Woźniak, „A full-covariance uncertainty assessment in on-machine probing”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 167, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103768>.
127. E. Jacniacka i L. Semotiuk, „Odkształcenia cieplne a niedokładność pomiaru sondą przedmiotową”, *PAK*, vol. 57, nr 9, s. 985-988, 2011.
128. E. Jacniacka i L. Semotiuk, „Powtarzalność mocowania jako składnik budżetu niepewności pomiaru sondą przedmiotową na obrabiarkach CNC”, *Mechanik*, nr 5–6, s. 406-409, 2012.
129. E. Jacniacka, L. Semotiuk, i M. Babkiewicz, „Wyznaczenie dwuwymiarowej niedokładności pomiaru wewnątrzobrabiarkowego system pomiarowego z zastosowaniem sondy OMP60”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, vol. 16, nr 10, s. 68-73, 2012.
130. M. Holub, R. Jankovych, O. Andrs, i Z. Kolibal, „Capability Assessment of CNC Machining Centres as Measuring Devices”, *Measurement*, vol. 118, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.007>.
131. J. Józwick i M. Byszewski, „Badanie dokładności pozycjonowania osi obrotowych wieloosiowych obrabiarek CNC oraz błędów wolumetrycznych”, *Mechanik*, nr 3, s. 144-149, 2015. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.3.128>.
132. E. Miko i M. Skrzyaniarz, „Analiza dokładności pozycjonowania w osiach liniowych centrum frezarskiego Hermle B300”, *PAK*, vol. 60, nr 3, 2014.
133. J. Honczarenko i J. Kwaśniewicz, „Nowe systemy pomiarowe do sprawdzania dokładności obrabiarek CNC”, *Mechanik*, nr 12, s. 1012-1016, 2008.
134. A. Woźniak i M. Dobosz, „Influence of measured objects parameters on CMM touch trigger probe accuracy of probing”, *Precision Engineering*, vol. 29, nr 3, s. 290-297, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.11.009>.
135. U. Mutilba, E. Gomez-Acedo, G. Kortaberria, A. Olarra, i J. A. Yagüe-Fabra, „Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review”, *Sensors*, vol. 17, nr 7, 1605, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17071605>.
136. A. Woźniak i R. Mayer, „Discontinuity check of scanning in coordinate metrology”, *Measurement*, vol. 59, s. 284-289, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.050>.
137. M. Jankowski, A. Woźniak, „Testing of the delay time of wireless communication of cnc machine tools` probes and controller”, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 25, PAN, s. 377-386, 2018. <https://doi.org/10.24425/119559>.

138. A. Woźniak, M. Byszewski, i M. Jankowski, „3D characteristics of triggering force of CNC machine tool probe”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1065, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/14/142014>.
139. B. Achelker, N. Srinivasa Rao, R. Rajendra, i A. Krishaniah, „Performance Evaluation of Machine Tool Probe for In-process Inspection of 2D and 3D Geometries”, *Procedia Technology*, vol. 14, s. 244-251, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.032>.
140. Y. Liu, W. Zhao, R. Sun, i X. Yue, „Optimal path planning for automated dimensional inspection of free-form surfaces”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, s. 84-92, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.008>.
141. B. Krawczyk, P. Szablewski, M. Mendak, B. Gapiński, K. Smak, S. Legutko, i M. Wieczorowski, „Surface Topography Description of Threads Made with Turning on Inconel 718 Shafts”, *Materials*, vol. 16, nr 1, 80, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16010080>.
142. B. Krawczyk, P. Szablewski, M. Mendak, B. Gapiński, K. Smak, i S. Legutko, „Analiza topografii gwintów toczonych w materiale Inconel 718”, *XV Szkoła Obróbki Skrawaniem*, 07-09.09.2022.
143. K. Grochalski, M. Wieczorowski, J. H'Roura, I G. Le Goic, "The optical aspect of errors in measurements of surface asperities, using the optical profilometry method," *Front. Mech. Eng.*, vol. 6, 12, 2020. <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00012>.
144. *ISO 25178-2:2021; Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, Geneva, Switzerland: ISO, 2021.
145. P. Pawlus, R. Reizer i M. Wieczorowski, „Functional importance of surface texture parameters,” *Materials*, vol. 14, 5326, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14185326>.
146. G. M. Królczyk, J. B. Królczyk, R. W. Maruda, S. Legutko i M. Tomaszewski, „Metrological changes in surface morphology of high-strength steels in manufacturing processes,” *Measurement*, vol. 88, s. 176–185, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.055>.
147. R. D. S. Ruzzi, R. L. de Paiva, L. R. R. da Silva, A. M. Abrão, L. C. Brandão I R. B. da Silva, „Comprehensive study on Inconel 718 surface topography after grinding,” *Tribol. Int.*, vol. 158, 106919, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106919>.
148. G. Królczyk, W. Kacalak i M. Wieczorowski, „3D parametric and nonparametric description of surface topography in manufacturing processes,” *Materials*, vol. 14, 1987, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081987>.
149. B. Krawczyk, P. Szablewski, B. Gapiński i M. Wieczorowski, „Assessment of threads used in the aviation industry based on the microstructure analysis,” , *Manufacturing 24 – 14-16.05.2024*, Poznań.
150. B. Krawczyk, P. Szablewski, B. Gapiński i M. Wieczorowski, „Assessment of threads used in the aviation industry based on the microstructure analysis,” w: *Advances in Manufacturing IV*, M. Diering, M. Wieczorowski, and M. Harugade, Eds. Cham: Springer, 202 https://doi.org/10.1007/978-3-031-56467-3_4.
151. V. Bushlya, J. M. Zhou, F. Lenrick, P. Avdovic, i J.-E. Ståhl, „Characterization of white layer generated when turning aged Inconel 718”, *Procedia Engineering*, vol. 19, s. 60-66, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.080>.
152. A. Kruk, A. M. Wusatowska-Sarnek, M. Zietara, i in., „Characterization on white etching layer formed during ceramic milling of Inconel 718”, *Metals and Materials International*, vol. 24, s. 1036-1045, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0056-0>.
153. B. Krawczyk, K. Smak, P. Szablewski i B. Gapiński, „Review of measurement methods to evaluate the geometry of different types of external threads”, *Manufacturing 22*, 16-19.05.2022, Poznań.
154. B. Krawczyk, B. Gapiński, P. Szablewski, N. Swojak, M. Wieczorowski i K. Smak, „Badanie możliwości zastosowania czujnika laserowego liniowego do pomiaru gwintów zewnętrznych”, *New Trends in Metrology 2022*, 17-19.10.2022, Lublin.
155. Y. Zhao, T. Supri, S. Yang, i Y. Qin, „A new static method of calibration for low-cost laser triangulation systems”, *Measurement*, vol. 156, 107613, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107613>.
156. LMI Technologies, <https://lmi3d.com/>, dostęp: 10.06.2024.

157. N. Swojak, M. Wieczorowski, i M. Jakubowicz, „Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors”, *Measurement*, vol. 176, 109190, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109190>.
158. ISO 230-2:2014, *Test code for machine tools — Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014.
159. B. Krawczyk, P. Szablewski, B. Gapiński, M. Wieczorowski, i R. Khan, „On-Machine Measurement as a Factor Affecting the Sustainability of the Machining Process”, *Sustainability*, vol. 16, nr 5, 2024, 2093. <https://doi.org/10.3390/su16052093>.
160. B. Krawczyk, P. Szablewski, B. Gapiński, „Badanie powtarzalności stykowych sond pomiarowych w warunkach produkcyjnych”, w: *Kierunki rozwoju narzędzi i technologii dla Przemysłu 4.0*, W. Kacalak, D. Lipiński, F. Szafraniec, Eds., Koszalin, Polska: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2023, s. 99-104.
161. B. Krawczyk, P. Szablewski i B. Gapiński, „Badanie powtarzalności stykowych sond pomiarowych w warunkach produkcyjnych”, *Konstelacja Szkół Naukowych w Inżynierii Mechanicznej*, 16-18.10.2023, Dźwirzyno.
162. *Instrukcja programowania WFL M40*, wersja V4.8, 07/2022.
163. *Ewaluacja danych pomiarowych. Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru. JCGM 100:2008 (GUM:1995)*.
164. *Dokument EA-4/02. Wyrażanie niepewności przy wzorcowaniu*, Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999.