



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Przemysław Marcin Poliński

**Podwyższenie odporności na zużycie sprawdzianów gwintowych stosowanych
w przemyśle lotniczym**

Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Pytel

Rzeszów, 2023 r.

*Składam serdeczne podziękowania
Promotorowi, prof. dr hab. inż. Grzegorzowi Budzikowi
Promotorowi pomocniczemu, dr inż. Maciejowi Pytlowi
za duże zaangażowanie, profesjonalizm,
wsparcie i pomoc naukową podczas pisania niniejszej rozprawy.*

*Dziękuję również wszystkim osobom, z którymi współpracowałam w czasie
realizacji niniejszej rozprawy za wsparcie i cenne wskazówki.*

Spis treści

1. WPROWADZENIE	9
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	14
2.1. Gwinty stalowe	14
2.1.1. Gwinty stalowe przystosowane do wkręcania wkładek helicoil	16
2.2. Sprawdziany gwintowe stalowe trzpieniowe	16
2.3. Kontrola połączeń gwintowych stosowanych w przemyśle lotniczym	18
2.3.1. Wzorcowanie sprawdzianów gwintowych	20
2.3.2. Zużycie sprawdzianów gwintowych	21
2.4. Charakterystyka wybranych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym	24
2.4.1. Stopy aluminium.....	24
2.4.2. Stopy tytanu	27
2.4.3. Stal nierdzewna	29
2.5. Charakterystyka materiałów stosowanych do produkcji sprawdzianów gwintowych	30
2.5.1. Stal narzędziowo-stopowa do pracy na zimno.....	30
2.5.2. Stal szybko tnąca	31
2.5.3. Węglík spiekany.....	33
2.6. Charakterystyka powłok przeciwzużyciowych	36
2.6.1. Powłoki ochronne wytwarzane metodami PVD i CVD	36
2.6.2. Mechanizmy degradacji powłok przeciwzużyciowych	40
3. CEL I TEZY PRACY	42
4. METODYKA BADAŃ	44
4.1. Plan badań.....	44
4.2. Przedmiot badań	45
4.3. Charakterystyka materiałów sprawdzianów gwintowych użytych do badań	46
4.3.1. Stal narzędziowa do pracy na zimno O1	46
4.3.2. Stal szybko tnąca molibdenowa HSS M-1	48
4.3.3. Węglík spiekany C-2, 10% Co.....	50
4.4. Powłoki przeciwzużyciowe zastosowane do powlekania sprawdzianów gwintowych	51
4.5. Pomiary parametrów geometrycznych	53
4.5.1. Pomiary średnicy podziałowej z wyznaczeniem niepewności pomiaru	53
4.5.2. Pomiary chropowatości.....	60
4.6. Badania morfologii powierzchni i mikrostruktury sprawdzianów gwintowych	62
4.6.1. Obserwacje powierzchni sprawdzianów gwintowych.....	62
4.5.3. Obserwacje mikroskopowe na przekrojach sprawdzianów i kolektorów	63
4.7. Badania odporności na zużycie	67

4.7.1.	Testy eksploatacyjne	67
4.7.2.	Badanie przyczepności powłoki do podłoża metodą testu na zarysowanie	75
4.8.	Badania właściwości mechanicznych	78
4.8.1.	Pomiary twardości materiałów	78
5.	WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	80
5.7.	Wyniki pomiarów średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych	80
5.7.1.	Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych modułu autopilota samolotu Boeing 737	80
5.7.2.	Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787.....	96
5.7.3.	Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350	111
5.8.	Wyniki pomiarów chropowatości warstwy wierzchniej sprawdzianów	124
5.9.	Wyniki badań przyczepności powłoki do podłoża.....	133
5.10.	Wyniki pomiaru twardości materiałów	153
5.11.	Wyniki obserwacji za pomocą mikroskopii elektronowej SEM-EDS i świetlnej	154
5.11.1.	Wyniki obserwacji sprawdzianów niepowlekanych	154
5.11.2.	Wyniki badań sprawdzianów powlekanych	175
5.12.	Regeneracja sprawdzianów gwintowych	202
5.13.	Analiza opłacalności wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych.....	202
6.	WNIOSKI KOŃCOWE	204
7.	LITERATURA	206
	Streszczenie.....	212
	Abstract.....	213

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

HRC– twardość [Rockwell]

HV – twardość [Vickers]

M – długość pomiarowa mierzona prostopadle do osi gwintu

D – średnica zewnętrzna nominalna gwintu wewnętrznego

d – średnica zewnętrzna nominalna gwintu zewnętrznego (średnica znamionowa)

D_1 – średnica wewnętrzna nominalna gwintu wewnętrznego

d_1 – średnica wewnętrzna nominalna gwintu zewnętrznego

D_2 – średnica podziałowa nominalna gwintu wewnętrznego

d_2 – średnica podziałowa nominalna gwintu zewnętrznego

H – wysokość trójkąta podstawowego

P – podziałka gwintu

α – kąt zarysu gwintu

α_e – współczynnik rozszerzalności cieplnej długościomierza

θ_e – odstępstwo temperatury długościomierza od temperatury odniesienia

α_m – współczynnik rozszerzalności cieplnej sprawdzianu

θ_m – odstępstwo temperatury sprawdzianu od temperatury odniesienia

d_{w1}, d_{w2}, d_{w3} – średnice zaobserwowane wałeczków

p_1 – poprawka na skręcenie wałeczków w bruzdach gwintu

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

Rz – najwyższa wysokość profilu chropowatości

Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu

LC_1, LC_2, LC_{n+1} – wartość obciążenia krytycznego w próbie odporności na zarysowanie „scratch test”

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW ANGLOJĘZYCZNYCH

PVD – fizyczne osadzanie z fazy gazowej (ang. *Physical Vapour Deposition*)

Arc PVD – metoda odparowania łukiem elektrycznym (ang. *Arc Evaporation*)

CVD – chemiczne osadzanie z fazy gazowej (ang. *Chemical Vapour Deposition*)

PACVD – Chemiczne osadzanie z fazy gazowej ze wspomaganie plazmowym (ang. *Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*)

TiN – powłoka z azotku tytanu (ang. *Titanium Nitride Coating*)

DLC – powłoka diamentopodobna (ang. *Diamond Like Coating*)

CC – węgiel spiekany (ang. *Cemented Carbide*)

WC – węgiel wolframu (ang. *Tungsten Carbide*)

SEM – skaningowa mikroskopia elektronowa (ang. *Scanning Electron Microscopy*)

SE – tryb elektronów wtórnych (ang. *Secondary Electrons Mode*)

BSE – tryb elektronów wstecznie rozproszonych (ang. *Backscattered Electrons Mode*)

EDS – spektroskopia dyspersji energii (ang. *Electron-Dispersive Spectroscopy*)

HSS – stal szybkoobrotowa (ang. *High-Speed Steel*)

MPE – błąd graniczny dopuszczalny (ang. *Maximum Permissible Error*)

FBW – elektroniczny system sterowania statkiem powietrznym (ang. *fly-by-wire*)

MML – granica maksimum materiału (ang. *Maximum Material Limit*)

1. WPROWADZENIE

Sprawdziany gwintowe są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych narzędzi pomiarowych stosowanych w przemyśle – mają szczególne znaczenie przy weryfikacji otworów gwintowanych części wymagających precyzji, takich jak elementy statków powietrznych. Połączenia gwintowe, będące jedną z podstawowych metod łączenia elementów lotniczych odgrywają kluczową rolę w trwałości i niezawodności gotowych zespołów części, wpływając bezpośrednio na bezpieczeństwo lotu.

Jednym z kluczowych elementów samolotu jest podstawowy system sterowania lotem (ang. *primary flight control*), (rys. 1.2). Rozmieszczenie poszczególnych elementów systemu (m.in. siłowników elektrohydraulicznych) i ich ilość przedstawiono na przykładzie samolotu Boeing 787 na rys. 1.2. Odpowiada on za kontrolę trajektorii lotu tj. kontroluje trzy obrotowe ruchy samolotu: lotki, czyli stery obrotu (ang. *aileron*s) odpowiadają za przechylenie (ang. *roll*), ster kierunku (ang. *rudder*) – odpowiada za pochylenie (ang. *pitch*) i ster wysokości (ang. *elevator*) – odpowiada za odchylenie. W skład podstawowego systemu sterowaniem wchodzi siłowniki hydrauliczne (rys. 1.1) [1] pozwalające zmieniać trajektorie statku powietrznego w odpowiedzi na komendy pilota podawane przez komputery sterujące systemem fly-by-wire (FBW). [2]



Rys. 1.1. Siłowniki elektrohydrauliczne firmy Moog, dedykowane do samolotu Boeing 787, m.in. ster obrotu, ster kierunku, ster wysokości, OB spoiler [3]

Yasa Poland Sp. z o.o. jest producentem korpusów (kolektorów) siłowników elektrohydraulicznych dla przemysłu lotniczego. Przykładem jest kolektor hydrauliczny lotki skrzydła samolotu Boeing 787 Dreamliner, będący podstawowym elementem (korpusem) siłownika elektrohydraulicznego steru obrotu oraz kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737, będący podstawowym elementem siłownika elektrohydraulicznego modułu autopilota. Umieszczenie siłownika lotki skrzydła w samolocie Boeing 787 oraz siłownika modułu autopilota w samolocie Boeing 737 zostało przedstawione na rys. 1.3. i 1.4

BOEING 787 PRIMARY FLIGHT CONTROLS



Complete Primary Flight Control Actuation System



Rys. 1.2. Podstawowy system sterowania lotem – Boeing 787 Dreamliner [3]

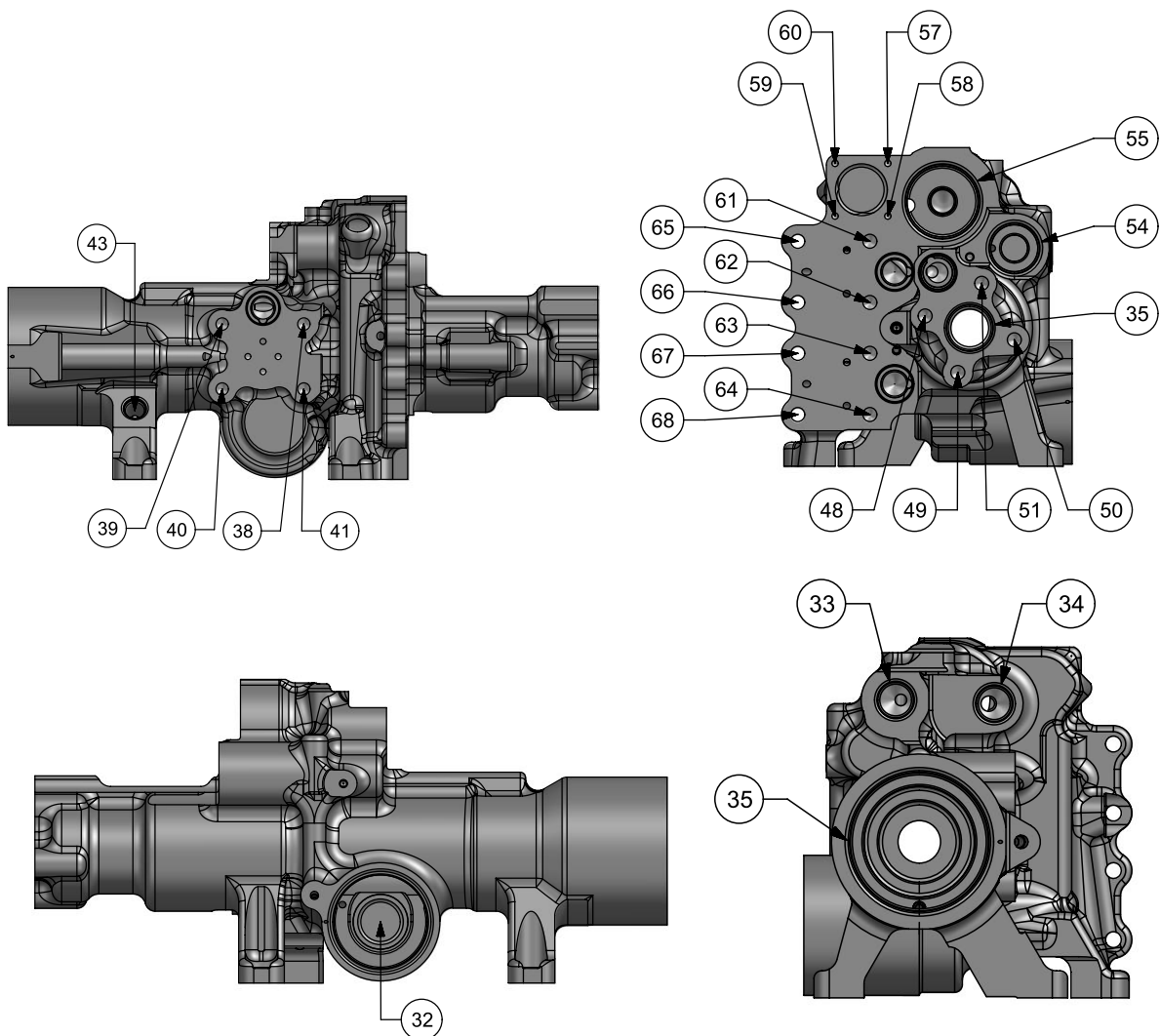


Rys. 1.3. Siłownik elektrohydrauliczny lotki skrzydła samolotu Boeing 787 Dreamliner [4]



Rys. 1.4. Siłownik elektrohydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737 [5]

Kolektory hydrauliczne (korpusy) wykonane są najczęściej ze stopów tytanu, stali lub stopów aluminium – produkowane w procesie obróbki skrawaniem. Cechą charakterystyczną kolektorów jest duża różnorodność rozmiarów i duża ilość otworów gwintowanych – są one niezbędne do montażu poszczególnych elementów siłownika tj. zawory, złącza elektryczne itd. za pomocą połączeń śrubowych. Przykładem korpusu z dużą ilością otworów gwintowanych jest kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737 (rys. 1.5.), posiada on 28 otworów gwintowanych (tabela 1.1.). W samolocie Boeing 737 znajdują się cztery tego typu siłowniki (rys. 1.4.).



Rys. 1.5. Kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737 z przedstawieniem umiejscowienia otworów gwintowych [źródło własne]

Tabela 1.1. Zestawienie otworów gwintowych kolektora hydraulicznego modułu autopilota samolotu Boeing 737 [źródło własne]

Numer otworu	Typ gwintu
38 - 41	.250-28 UNF-3B STI
43	.4375-20 UNJF-3B
61- 68	.250-28 UNF-3B STI
57 - 60	.112-40 UNC-3B
55	1.4375-16 UNJ-3B
54	1.000-16 UNJF-3B
35	.750-16 UNJF-3B
48 - 50	.250-28 UNF-3B STI
32	2.000-16 UNJ-3B
33 - 34	.5625-18 UNJF-3B
35	2.375-16 UNJ-3B

Część połączeń gwintowych zaprojektowana jest do przenoszenia zwiększonych obciążeń np. otwory gwintowane .250-28 UNF-3B STI z zamontowanymi wkładkami helicoil i wkręconymi śrubami mocującymi zawór elektromagnetyczny. Każda ze śrub tworząca połączenie gwintowe w tym obszarze przenosi obciążenie maksymalną siłą osiową 8429 N przy ciśnieniu w układzie hydraulicznym 52 bar i przy założeniu, że maksymalne obciążenie wstępne wynosiło 6227 N. Przenoszenie wysokich obciążeń przez otwory gwintowane powoduje, że jakość otworów gwintowanych ma kluczowe znaczenie dla funkcjonalności części. W celu zapewnienia wymaganej jakości otworów gwintowanych niezbędne jest stosowanie sprawdzianów gwintowych trzpieniowych spełniających restrykcyjne normy branżowe do ich kontroli. Ilość otworów gwintowanych w elementach statków powietrznych, a w szczególności elementach hydraulicznych tj. kolektory oraz oczekiwania co do ich niezawodności upoważnia do sformułowania stwierdzenia, że temat zużycia sprawdzianów gwintowych i wydłużenia ich żywotności jest bardzo ważnym zagadnieniem, którego rozwiązanie przyniesie korzyści ekologiczne, finansowe i zapewniające większą niezawodność sprawdzianów, przy jednoczesnej poprawie jakości i bezpieczeństwa produkowanych elementów lotniczych.

Głównym problemem w stosowaniu sprawdzianów gwintowych w przemyśle lotniczym jest ich zużycie w trakcie inspekcji części lotniczych, szczególnie wykonanych z materiałów o dużej twardości tj. tytan, stal nierdzewna. W celu zapewnienia zgodności sprawdzianów gwintowych wymagane jest wykonywanie ich okresowej weryfikacji poprzez wzorcowanie, polegające na sprawdzeniu właściwości metrologicznych i potwierdzeniu ich zgodności z normami odniesienia na świadectwie wzorcowania. Ograniczenie ich zużycia ma znaczenie w obniżeniu kosztów kontroli jakości części poprzez rzadsze ich wzorcowanie i wymianę, a także w aspekcie środowiskowym poprzez zmniejszenie odpadu w postaci zużytych sprawdzianów gwintowych oraz odpadów poprodukcyjnych. Wydłużenie żywotności sprawdzianów gwintowych zwiększa ich niezawodność poprzez zmniejszenie ryzyka sprawdzania części lotniczych sprawdzianem niespełniającym norm jakościowym ze względu na zużycie przekraczające tolerancje określone w normach odniesienia.

Najnowsze rozwiązania z zakresu inżynierii materiałowej pozwalają na wydłużanie żywotności narzędzi pomiarowych, poprzez stosowanie powłok przeciwzużyciowych lub zastąpienie materiału sprawdzianu materiałem o mniejszej ścieralności. Ilość opublikowanych badań w literaturze krajowej i zagranicznej dotyczących wydłużania żywotności sprawdzianów gwintowych jest niewielka, dostępne informacje pochodzą w większości od producentów i stanowią informacje marketingowe bez poparcia badaniami naukowymi. Realizowane prace badawcze były prowadzone w ramach doktoratu wdrożeniowego, głównym założeniem rozprawy doktorskiej było opracowanie koncepcji, metodyki i wdrożenia do produkcji sprawdzianów gwintowych z powłokami ochronnymi wytworzonymi metodami Arc-PVD lub PACVD o zwiększonej odporności na zużycie, a także wybór wariantu w układzie materiał – powłoka –przeciwpróbka o największej trwałości na podstawie przeprowadzonych badań własnych. Zużycie sprawdzianów następuje poprzez ścieranie warstwy wierzchniej, dlatego prace badawcze omówione w niniejszej rozprawie doktorskiej koncentrowały się na zagadnieniach inżynierii powierzchni.

W branży lotniczej powszechnie stosowane są normy amerykańskie (m.in. ASME, ASTM, ASM, SAE i zakładowe firmy Boeing, Parker), które przywoływane są na większości rysunków wykonawczych elementów lotniczych. Dlatego też w rozprawie doktorskiej przedstawiono charakterystykę materiałów stosowanych na sprawdziany zgodnie z amerykańskimi normami branżowymi, w części badawczej również tam gdzie to było niezbędne użyto norm amerykańskich jako norm odniesienia.

2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

2.1. Gwinty calowe

Połączenia gwintowe należą do jednych z najczęściej stosowanych w budowie maszyn – są jednocześnie odpowiedzialne za: szczelność układów, wytrzymałość konstrukcji, dokładność montażu [6]. Największy – ok. 70% udział – mają gwinty w elementach mocujących. Szacuje się, że udział gwintów w podstawowych rodzajach części maszyn jest następujący:

- gwinty wewnętrzne: elementy mocujące - 30%, wały - 9%, korpusy, tarcze, cylindry i trzpienie po 8%,
- gwinty zewnętrzne: elementy mocujące - 40%, wały, cylindry, trzpienie – średnio po ok 4%.

W rysunkach konstrukcyjnych części lotniczych najczęściej stosowane są amerykańskie gwinty calowe, posiadają one kąt zarysu gwintu 60° lub 55° i wymiar podziałki podany w liczbie zwojów na długości jednego cala [7].

Parametry gwintów calowych są znormalizowane i przedstawione w normie ASME B1.1 dla gwintów typu UN, UNC, UNF, UNEF, UNS, UNR, UNRC, UNRF, UNREF i w normach ASME B1.1, ASME B1.15 dla gwintów z promieniem zaokrąglenia dna zarysu bruzdy gwintu typu UNJ, UNJC, UNJF, UNJEF, UNJS dla zastosowań niezwiązanych z przemysłem lotniczym. Dla potrzeb przemysłu lotniczego została opracowana norma SAE-AS8879 [8] określająca parametry gwintów typu UNJ, UNJC, UNJF, UNJEF, UNJS.

Otwory gwintowane i sprawdziany gwintowe trzpieniowe występujące w ramach badań własnych niniejszej rozprawy doktorskiej posiadały oznaczenie UNF, poniżej przedstawiono krótką charakterystykę tego oznaczenia:

UNF – gwint calowy, zunifikowany, z drobnozwojnym szeregiem podziałki.

Gwinty o tym oznaczeniu mają zwiększoną wytrzymałość na rozciąganie niż porównywalne z szeregu zwykłego i są stosowane gdy R_m gwintu wewnętrznego połączonego z zewnętrznym jest równa lub przewyższa wytrzymałość na rozciąganie członu z gwintem zewnętrznym [7].

W tabeli 2.1. przedstawiono objaśnienie poszczególnych oznaczeń na podstawie gwintu ½-20 UNF-3A wg. ASME B1.1. [9].

Tabela 2.1. Nomenklatura gwintów calowych wg. ASME B1.1 [9]

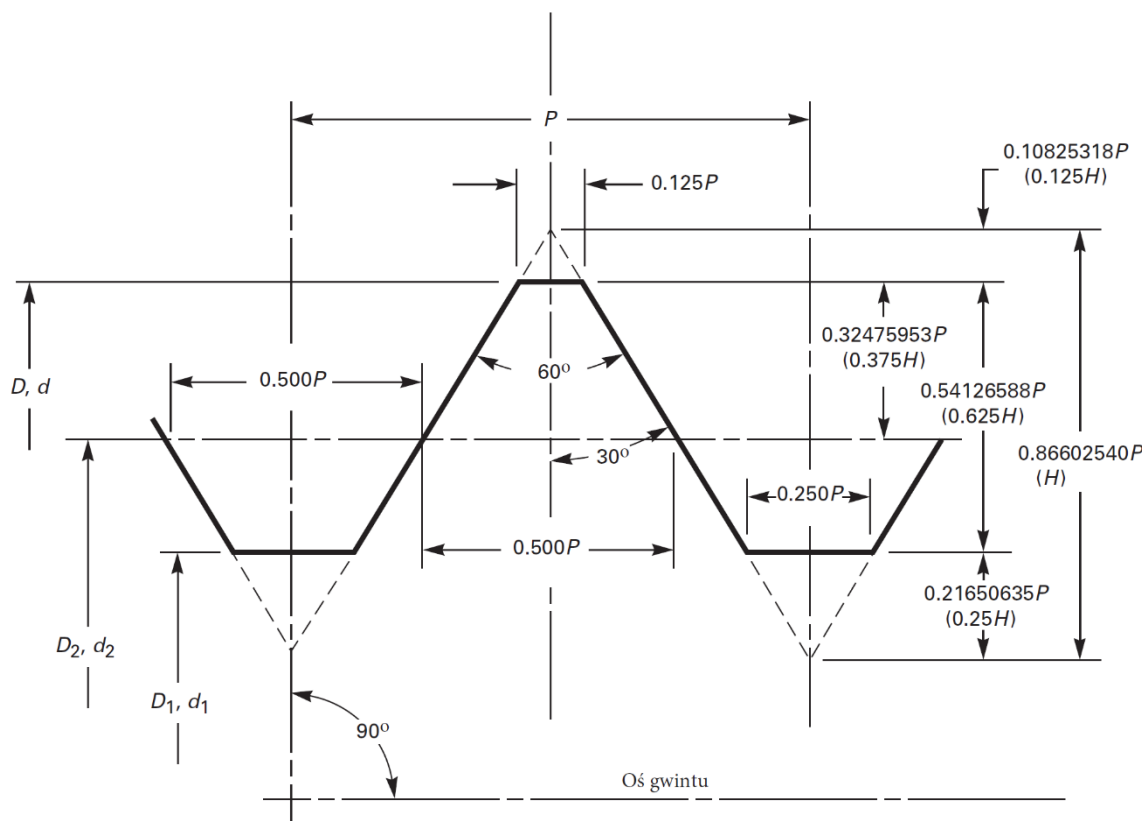
Wymiar nominalny - średnica zewnętrzna					
Liczba zwojów na długości 1 cala (TPI)					
Typ gwintu np. UN,UNC,UNF,UNEF,UNJ itd.					
Oznaczenie pola tolerancji **					
Metoda weryfikacji gwintu wg ASME B1.3M					
½	- 20	UNF	- 3A	(21)	(21, 22 lub 23)

A = Gwint zewnętrzny, B = Gwint wewnętrzny

**1A, 2A, lub 3A dla gwintów zewnętrznych, (1B, 2B lub 3B dla gwintów wewnętrznych) lub SPL dla gwintów specjalnych. Dotyczy gwintów typu UN,UNC,UNF,UNEF, UNS, UNR, UNRC, UNRF, UNREF.

3A dla gwintów zewnętrznych, 3B dla gwintów wewnętrznych. Dotyczy gwintów typu UNJ, UNJC, UNJF, UNEF, UNJS [7, 9, 10].

Budowa gwintów całowych szczegółowo opisana jest w normie ASME B1.1 [9], na rys. 2.1. przedstawiono zarys nominalny gwintu całowego walcowego UN (UNF) i UNR.



Rys. 2.1. Zarys nominalny gwintu walcowego całowego UN (UNF) i UNR [7, 9]

Legenda:

D – średnica zewnętrzna nominalna gwintu wewnętrznego,

d – średnica zewnętrzna nominalna gwintu zewnętrznego (średnica znamionowa),

D_1 – średnica wewnętrzna nominalna gwintu wewnętrznego,

d_1 – średnica wewnętrzna nominalna gwintu zewnętrznego,

D_2 – średnica podziałowa nominalna gwintu wewnętrznego,

d_2 – średnica podziałowa nominalna gwintu zewnętrznego,

H – wysokość trójkąta podstawowego,

P – podziałka.

Szczegółowe opisy budowy gwintów w tym gwintów UNJ są przedstawione w normie ASME B1.1. [9].

2.1.1. Gwinty calowe przystosowane do wkręcania wkładek helicoil

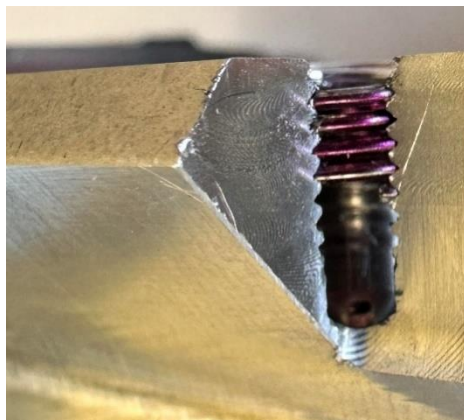
Pierwsze wkładki helicoil zostały wynalezione w latach trzydziestych XX wieku i znalazły zastosowanie w elementach konstrukcyjnych samolotów alianckich w trakcie II wojny światowej.

Gwinty wzmacnia się poprzez instalację wkładek helicoil w przypadku stosowania materiałów o niskiej wytrzymałości na deformację i ścieranie (np. stopów aluminium i magnezu) jako elementy konstrukcyjne samolotów.

Gwint z wkręconą wkładką gwintową helicoil ma większą odporność na ścieranie, wytrzymałość i jest odporny na zużycie nawet w przypadku częstego użytkowania. Wkładki blokują wkręcane śruby, skutecznie zapobiegając poluzowaniu się śruby pod wpływem wibracji lub uderzenia i zapewniają trwalszy montaż. Pozwalają na częsty demontaż i ponowny montaż śrub bez uszkodzenia gwintu. Wkładki helicoil mają zastosowanie m.in. w przemyśle lotniczym i samochodowym.

Zgodność otworu gwintowanego jest weryfikowana poprzez sprawdzanie za pomocą sprawdzianów PRZECHODNICH (ang. *GO*), NIEPRZECHODNICH (ang. *NO GO*) i gładkich cylindrycznych - stosowana zgodnie z systemem 21 ASME B1.3. [11] Gwinty powinny być zgodne z ASME B1.1 [9] klasa tolerancji 3B lub klasa 2B.

Dokładność gotowego gwintu, gdy wkładka jest zainstalowana, zależy od dokładności otworu gwintowanego przygotowanego do wkręcania wkładki helicoil. Przed montażem wkładki konieczna jest weryfikacja gwintu sprawdzianem gwintowym. Jeśli gwint przejdzie pozytywnie weryfikację, to gwint z zainstalowaną wkładką będzie spełniać założone przez producenta wymagania (przy założeniu, że wkładka jest zgodna z wymaganiami normy ASME B18.29.) [12, 13, 14, 15].



Rys. 2.2. Widok przekroju otworu gwintowanego z wkręconą wkładką helicoil [źródło własne]

Wymagania techniczne sprawdzianów gwintowych trzpieniowych używanych do weryfikacji otworów gwintowych przeznaczonych do wkręcania wkładek helicoil opisane są w normach: ASME B18.29.1 [13], FED-STD-H28A [16], ASME B1.2 [17], AS59158 [18]. Zgodnie z wymaganiem normy ASME B1.2 [17], paragraf 3.5., sprawdziany gwintowe używane do bezpośredniej weryfikacji produktów, jeżeli nie określono inaczej, powinny zostać wykonane w klasie X tolerancji.

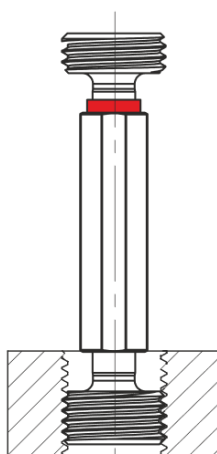
2.2. Sprawdziany gwintowe calowe trzpieniowe

Do sprawdzania gwintów wewnętrznych stosuje się sprawdziany gwintowe trzpieniowe PRZECHODNIE (ang. *GO*) i NIEPRZECHODNIE (ang. *NO GO*).

Metodyka stosowania stalowych sprawdzianów gwintowych trzpieniowych w kontroli gwintów opisana jest w normach ASME B1.2 [17]; FED-STD-H28A /6A [19], jednak wymienione normy nie odnoszą się do problematyki zużycia sprawdzianów i wydłużenia ich żywotności [6]. Powyższe normy definiują funkcję sprawdzianów PRZECHODNICH i NIEPRZECHODNICH w następujący sposób:

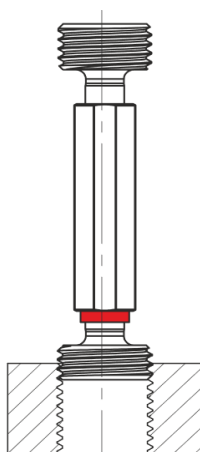
Sprawdzianem gwintowym trzpieniowym PRZECHODNIM sprawdza się wirtualny wymiar gwintu wewnętrznego MML (ang. *Maximum Material Limit*) poprzez sprawdzenie wymiaru dolnego średnicy podziałowej.

Sprawdzian PRZECHODNI powinien przy ręcznym wkręcaniu bez nadmiernego wysiłku wkręcać się na całą długość gwintu określoną na rysunku detalu. Gwint nie spełnia wymagań, gdy wkręcenie sprawdzianu jest niemożliwe lub w sytuacji gdy sprawdzian wkręca się na mniejszą głębokość niż jest wymagana.



Rys. 2.3. Sprawdzanie elementu stroną przechodnia sprawdzianu gwintowego [20]

Sprawdzianem gwintowym trzpieniowym NIEPRZECHODNIM sprawdza się, czy średnica podziałowa gwintu przekracza górny wymiar graniczny. Sprawdzian NIEPRZECHODNI stalowy przy ręcznym wkręcaniu bez nadmiernego wysiłku może wkręcać się w gwint nie więcej niż 3 obroty zgodnie z normą ASME B1.2 [17]. Jeżeli sprawdzian wkręca się więcej niż 3 obroty w otwór gwintowany powoduje, że część powinna zostać uznana za niezgodną i odrzucona [17, 21].



Rys. 2.4. Sprawdzanie elementu stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu gwintowego [20]

Kontrola otworów gwintowych powinna przebiegać z użyciem oleju maszynowego w celu uniknięcia zatarcia sprawdzianu w gwincie [10].

Sprawdziany gwintowe calowe są wykonywane przez amerykańskich producentów zgodnie z wytycznymi norm ASME B47.1 [22] i ASME B1.2 [17].

2.3. Kontrola połączeń gwintowych stosowanych w przemyśle lotniczym

W firmie Yasa Poland zajmującej się produkcją korpusów siłowników hydraulicznych (kolektorów) dla przemysłu lotniczego, części lotnicze podlegają 100% kontroli pod kątem zgodności kluczowych charakterystyk. Jedną z kluczowych charakterystyk podlegających sprawdzeniu jest zgodność otworów gwintowanych z wymaganiami norm. Kontrola 100 % części przeprowadzana jest przez operatora po operacji frezarskiej lub tokarskiej. Przed wysyłką części do klienta lub do firm podwykonawczych zajmujących się obróbką powierzchniową gwinty są weryfikowane ponownie wrywkowo przez inspektora kontroli jakości w ramach kontroli końcowej.

Kontrola gwintów wewnętrznych odbywa się przy pomocy opracowanych planów kontroli, jej zakres został opracowany na podstawie wymagań poziomu 21 wg. normy ASME B1.3. [11]. Kontrola gwintów przeprowadzana jest przy pomocy maszyny pomiarowej CMM (pomiar średnicy wewnętrznej), stanowiska do pomiaru konturów (pomiar promienia na dnie gwintu) i za pomocą sprawdzianu gwintowego przy użyciu strony PRZECHODNIEJ i strony NIEPRZECHODNIEJ (weryfikacja zgodności średnicy podziałowej).

W tabeli 2.2. przedstawiono fragment zakładowego planu kontroli kolektorów hydraulicznych hamulca do samolotu Airbus A350 – instrukcja kontroli IN.K_32 [23]. Fragmenty dotyczące kontroli otworów gwintowanych zostały zaznaczone na niebiesko. Wyżej wymienione korpusy zostały użyte w testach eksploatacyjnych niniejszej rozprawy doktorskiej w charakterze przeciwpróbek. We fragmencie planu kontroli częstotliwość weryfikacji otworów gwintowych została scharakteryzowana następujący sposób [IN.K_32] [23]:

Operator przeprowadza pomiary na 100% wyprodukowanych części:

- pierwszy i ostatni wykonany gwint z danej grupy otworów lub pojedynczy gwint jeżeli nie występuje w parze podlega sprawdzeniu stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu,
- 100% otworów gwintowanych podlega sprawdzeniu stroną NIEPRZECHODNIĄ sprawdzianu.

Inspektor kontroli jakości przeprowadza pomiary na pierwszej sztuce ze zlecenia produkcyjnego:

- część lotnicza podlega sprawdzeniu programami CMM dedykowanymi do danego etapu obróbki maszynowej zawierającymi pomiar otworów gwintowych,
- w przypadku, gdy rysunek wymaga wykonanie promienia na dnie gwintu innego niż standardowy wynikający z wymagania normy, jego pomiar jest wykonywany na stanowisku konturu.

Inspektor kontroli końcowej kontroluje części lotnicze wrywkowo korzystając z tabeli AQL zgodnie z wytycznymi instrukcji kontroli IN.K 6 [24]:

- pierwszy i ostatni wykonany gwint z danej grupy otworów lub pojedynczy gwint jeżeli nie występuje w parze podlega sprawdzeniu stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu,
- 100% otworów gwintowanych w częściach wytypowanych do kontroli wrywkowej podlega sprawdzeniu stroną NIEPRZECHODNIĄ sprawdzianu,
- 100% otworów gwintowanych w częściach wytypowanych do kontroli wrywkowej podlega sprawdzeniu na obecność rys, obić, korozji, plam, gratu, śladów po zadrganiu narzędzia, FOD.

Tabela 2.2. Fragment planu kontroli kolektorów hydraulicznych hamulca do samolotu Airbus A350 [23]

	ZDARZENIE	ZAKRES KONTROLI	KONTROLA PRZEPROWADZONA WG	ILOŚĆ SZTUK	CZĘSTOTLIWOŚĆ
FREZOWANIE OPERACJA 1, 2 i 3	ZLECENIE SERYJNE	OTWORY GWINTOWE: <u>Strona PRZECHODNIA:</u> pierwszy i ostatni gwint w danej grupie otworów na funkcjonalność i głębokość. <u>Strona NIEPRZECHODNIA (NO GO):</u> 100% otworów.	Załącznik nr 1 do IN.K_32 Karta kontrolna KK_32	zgodnie z kartą kontrolna KK_32	KAŻDE ZLECENIE
		OTWORY GŁADKIE: średnice o tolerancji .002" (0,0508mm) lub mniejszej.			
		Rysy, obicia, korozja, plamy, ślady po zadrganiu narzędzia, FOD*	Rysunek CB00814 rew. M o, Uwagi jakościowe (QCN) oraz IN_KW_1	100%	
	ZLECENIE SERYJNE	Rysy, obicia, korozja, plamy, ślady po zadrganiu narzędzia, FOD*.	Rysunek CB00814 rew. M, Uwagi jakościowe (QCN) oraz IN_KW_1	15SZT	PIERWSZA SZTUKA Z KAŻDEGO ZLECENIA
		Wszystkie pozycje otworów, bazy, średnice i inne kluczowe cechy.	CB00814 rev.M_ODLEW_OP.1_v.2 CB00814 rev.M_ODLEW_OP.2_v.1 CB00814 rev.M_SETUP1_v.1 CB00814 rev.M_SETUP2_v.1		
	AWARIA, PRZEBROJENIE ORAZ CO 30 SZTUKA W PRODUKCJI SERYJNEJ (tj. numery 30, 60, 90,120 itd.)	OTWORY GWINTOWE: <u>Strona PRZECHODNIA:</u> pierwszy i ostatni gwint w danej grupie otworów na funkcjonalność i głębokość. <u>Strona NIEPRZECHODNIA (NO GO):</u> 100% otworów.	Załącznik nr 1 do IN.K_32 Karta kontrolna KK_32	15SZT	PIERWSZA SZTUKA PO WYSTĄPIENIU ZDARZENIA
		Głębokości otworów, kąty nachylenia otworów, fazek i inne.	Rysunek CB00814 rew. M		
		OTWORY GŁADKIE: średnice o tolerancji .002" (0,0508mm) lub mniejszej.	Załącznik nr 1 do IN.K_32 Karta kontrolna KK_32.1		
		Wszystkie pozycje otworów, bazy, średnice, gwinty i inne kluczowe cechy.	CB00814 rev.M_ODLEW_OP.1_v.2 CB00814 rev.M_ODLEW_OP.2_v.1 CB00814 rev.M_SETUP1_v.1 CB00814 rev.M_SETUP2_v.1		
	WYMIANA NARZĘDZIA KOREKTA PROGRAMU KOREKTA W TABELI NARZĘDZI	Zakres kontroli ograniczony do obszaru związanego ze zmianą.	Rysunek CB00814 rew. M Załącznik nr 1 do IN.K_32	15SZT	PO WYSTĄPIENIU ZDARZENIA
KONTROLA KOŃCOWA	ZLECENIE SERYJNE	Rysy, obicia, korozja, plamy, grat, ślady po zadrganiu narzędzia, FOD*.	Rysunek CB00814 rew. M , Uwagi jakościowe (QCN) oraz IN_KW_1	WG. TABELI AQL z IN.K_6 Kontrola dostaw	KAŻDE ZLECENIE
		OTWORY GWINTOWE: <u>Strona PRZECHODNIA:</u> pierwszy i ostatni gwint w danej grupie otworów na funkcjonalność i głębokość. <u>Strona NIEPRZECHODNIA (NO GO):</u> 100% otworów	Załącznik nr 1 do IN.K_32 Karty kontrolne KK_32.0		
		OTWORY GŁADKIE: średnice o tolerancji .002" (0,0508mm) lub większej			

2.3.1. Wzorcowanie sprawdzianów gwintowych

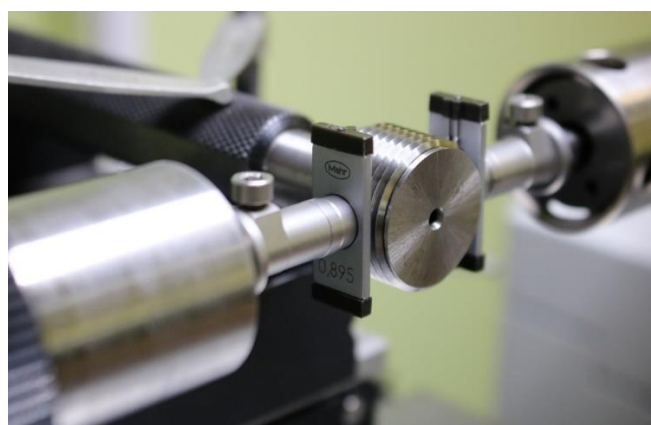
W celu zapewnienia wiarygodnych i powtarzalnych pomiarów, sprawdziany gwintowe trzpieniowe powinny być wzorcowane okresowo ze względu na ich zużycie ściernie i erozyjne w kontakcie ze sprawdzanymi gwintami wewnętrznymi (tab. 2.3.). Szczególnie podatne za zużycie są strony PRZECHODNIE sprawdzianów – następuje ono poprzez zmniejszanie się średnicy podziałowej sprawdzianu będącego w użyciu [25].

Wytyczne dotyczące zalecanego zakresu wzorcowania dla sprawdzianów gwintowych trzpieniowych całowych stosowanych do sprawdzania części (*ang. Working Plug Gauges*) i wykonanych wg normy amerykańskiej ASME B1.2 [17] określa norma branżowa IFI-301 [26] opracowana przez „Industrial Fasteners Institute”. Podana norma nie określa jednak metodyki wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych.

Tabela 2.3. Zestawienie zalecanych zakresów wzorcowania sprawdzianów gwintowych trzpieniowych [26]

Typ kalibracji	Średnica wewnętrzna		Średnica podziałowa		Kąt gwintu	Skok
	Lokalizacja	Klasa tolerancji	Lokalizacja	Klasa tolerancji	β	
Wstępna	Początek i koniec	X	6 pomiarów: początek, środek i koniec, obrót 90 stopni początek, środek i koniec	X	X	X
Okresowa	Nie dotyczy	Nie dotyczy	3 pomiary: początek, środek i koniec	X	Nie dotyczy	Nie dotyczy

Najbardziej dokładną metodą wzorcowania sprawdzianów gwintowych trzpieniowych stosowaną w przemyśle w laboratoriach wzorcujących jest metoda trójwałeczkowa przy użyciu długościomierza poziomego (rys. 2.5.).



Rys. 2.5. Pomiar sprawdzianu gwintowego trzpieniowego metodą trójwałeczkową [źródło własne]

Wzorcowanie sprawdzianów trzpieniowych walcowych całowych przeprowadza się wg. wymagań normy ASME B1.2 [17], IFI-301 [26] i wewnętrznlaboratoryjnej procedury wzorcowania opracowanej przez każde z laboratoriów indywidualnie.

Waleczki używane do pomiaru średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych za pomocą metody trójwaleczkowej powinny cechować się dużą precyzją wykonania, tzn. odchyłki związane z okrągłością i odchyłki średnicy od wartości nominalnej nie powinny przekraczać $0,5 \mu\text{m}$. Wymagania odnośnie waleczków pomiarowych i ich najlepsze dopasowanie względem mierzonej średnicy podziałowej jest opisane w normie ASME B89.1.17. [27].

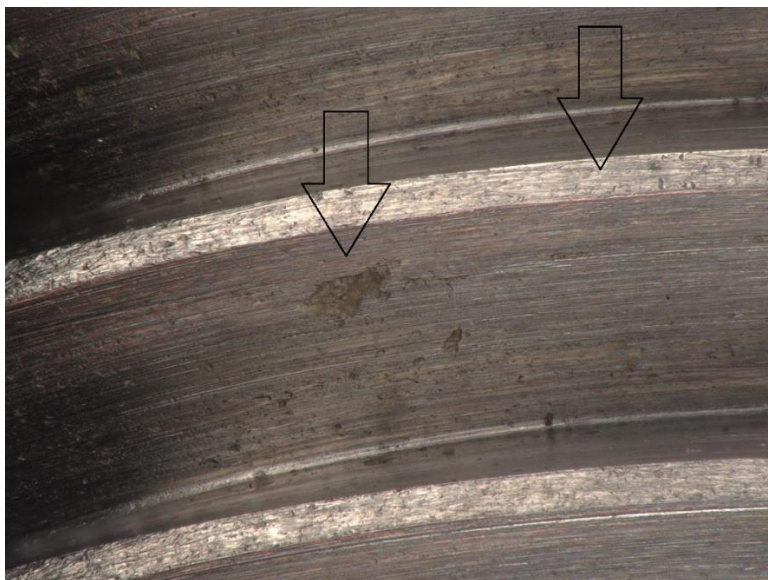
Wzorcowanie sprawdzianów gwintowych jest przeprowadzane z określoną niepewnością pomiaru, jest to kluczowy czynnik przy ocenie zgodności pomiaru ze względu na małą tolerancję średnicy podziałowej. Norma ASME B1.25 [28] określa przykładowe składniki, które powinny być wzięte pod uwagę przy opracowaniu budżetu niepewności wzorowania sprawdzianów gwintowych.

Każde z laboratoriów wzorcujących posiada wyliczoną najmniejszą niepewność pomiaru (zdolność pomiarowa CMC), jaką laboratorium wzorcujące jest w stanie osiągnąć w trakcie rutynowo przeprowadzanego wzorcowania, będąca zazwyczaj niepewnością rozszerzoną przy poziomie ufności 95% i współczynniku $k=2$. Zdolności pomiarowe dla każdego laboratorium akredytowanego na wykonywanie pomiarów zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025 [29] są prezentowane na stronie Polskiego Centrum Akredytacji. Przykładowo laboratorium wzorcujące LABOTRONIC Laboratoria Wzorcujące deklaruje niepewność pomiarową $3,3 \mu\text{m}$ dla sprawdzianów gwintowych trzpieniowych walcowych wzorcowanych w zakresie 1-100 mm [30].

2.3.2. Zużycie sprawdzianów gwintowych

Sprawdziany gwintowe ulegają zużyciu w trakcie stosowania ich do sprawdzania otworów gwintowych w różnych elementach konstrukcyjnych.

Zużycie sprawdzianów najczęściej występuje na boku zarysu gwintów i na wierzchołkach gwintu. Zużycie ma charakter zużycia ściernego i erozyjnego (rys. 2.5.).



Rys. 2.6. Zużycie ściernego i erozyjne na powierzchni sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno [źródło własne]

Nawet niewielkie zużycie, może mieć znaczący wpływ na średnicę podziałową sprawdzianu. Zużycie na każdym kącie zarysu boku gwintu jest mnożone prawie 4-krotnie, aby określić całkowity wpływ zużycia na średnicę podziałową, $1,27 \mu\text{m}$ ($50 \mu\text{in}$) zużycia zarysu boku gwintu wpływa na zmierzony rozmiar średnicy podziałowej o $5,08 \mu\text{m}$ ($200 \mu\text{in}$), co niejednokrotnie jest całkowitą tolerancją średnicy podziałowej dla wielu sprawdzianów [10].

Praktyka przemysłowa pokazuje, że zużycie strony PRZECHODNIEJ i NIEPRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego trzpieniowego zachodzi nierównomiernie względem siebie (tabela 2.4.)

Strona PRZECHODNIA sprawdzianu gwintowego trzpieniowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno, o średnicy podziałowej do 30 mm używana do sprawdzania części wykonanych ze stali, tytanu w warunkach przemysłowych zwykle zużywa się w przeciągu 6 miesięcy i po stwierdzeniu przekroczenia tolerancji średnicy podziałowej sprawdzian musi zostać wyłączony z eksploatacji. W przypadku strony NIEPRZECHODNIEJ zużycie następuje zwykle w obszarze 1-2 zwoju gwintu i jest to zużycie przebiegające w sposób wolny i wyłączenie z eksploatacji w wyniku przekroczenia tolerancji średnicy podziałowej następuje zwykle po kilku latach.

Tabela 2.4. Zestawienie pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ i NIEPRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego używanego w warunkach przemysłowych obrazujące nierównomierne zużycie strony PRZECHODNIEJ względem strony NIEPRZECHODNIEJ tego samego sprawdzianu

Strona PRZECHODNIA

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / Kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9305			-8,8
2	1 / 0°	6,9339			-5,3
3	1 / 0°	6,9336			-5,7
3	2 / 90°	6,9334			-5,8
2	2 / 90°	6,9304			-8,8
1	2 / 90°	6,9293			-10,0

Strona NIEPRZECHODNIA

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / Kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9947			
2	1 / 0°	6,9948			
2	2 / 90°	6,9948			
1	2 / 90°	6,9937			

Zużycie strony PRZECHODNIEJ w warunkach przemysłowych następuje w sposób równomierny lub nierównomierny. Sposób zużycia powiązany jest z głębokością otworów gwintowych podlegającym sprawdzeniu, rzeczywistym wymiarem średnicy podziałowej wykonanego otworu, błędami kształtu otworu gwintowanego i otworu itp.

Tabela 2.5. Zestawienie pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ pokazujące nierównomierne zużycie sprawdzianu, największe zużycie nastąpiło w obszarze 1-2 zwoju










Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / Kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9381			-1,2
2	1 / 0°	6,9402			
3	1 / 0°	6,9411			
3	2 / 90°	6,9412			
2	2 / 90°	6,9391			-0,2
1	2 / 90°	6,9380			-1,3

Tabela 2.6. Zestawienie pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ pokazujące równomierne zużycie sprawdzianu, zużycie sprawdzianu przebiega w obrębie wszystkich zwojów w zbliżony sposób

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / Kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9402			
2	1 / 0°	6,9412			
3	1 / 0°	6,9415			
3	2 / 90°	6,9418			
2	2 / 90°	6,9418			
1	2 / 90°	6,9406			

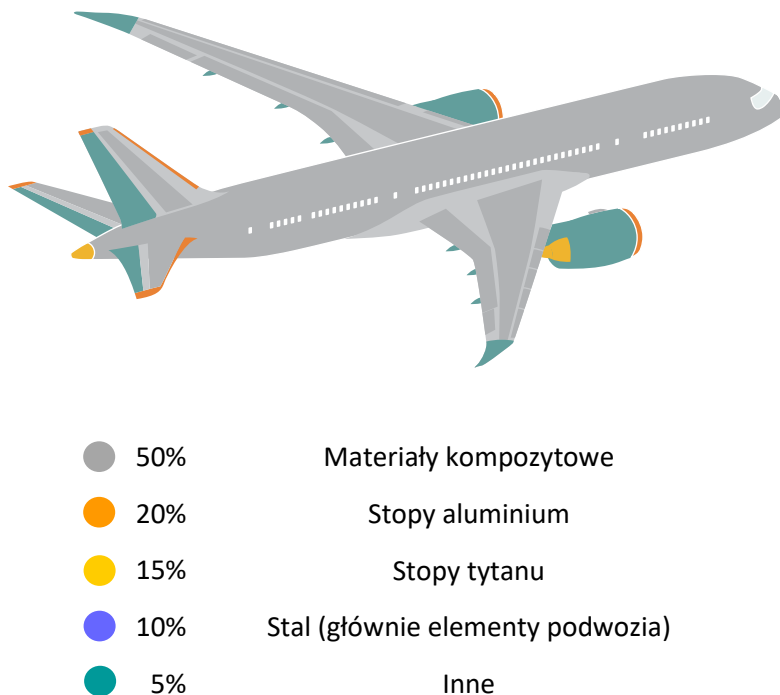
Przy wyborze metody zapewniającej wydłużenie żywotności sprawdzianu należy uwzględnić następujące kryteria:

- odporność na zużycie,
- wartość współczynnika tarcia,
- czynniki techniczno-ekonomiczne [31].

2.4. Charakterystyka wybranych materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym

W przemyśle lotniczym obserwowany jest stały rozwój technologii materiałowych – wprowadzane są nowe materiały oraz udoskonalane są technologie produkcji materiałów już stosowanych.

Głównymi materiałami stosowanymi do produkcji komercyjnych statków powietrznych są stopy aluminium i tytanu, stal, nadstopy niklu, materiały kompozytowe, a także inne grupy materiałów. Poniżej zaprezentowano strukturę rodzajów materiałów używanych w produkcji samolotu Boeing 787.



Rys. 2.7. Udział poszczególnych rodzajów materiałów stosowanych do budowy samolotu Boeing 787 [32]

Pomimo, że udział stopów tytanu i aluminium zmniejsza się wraz z wprowadzaniem nowych modeli samolotów, to nadal stanowią one główną grupę materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym.

W rozdziałach 2.4.1. – 2.4.3. przedstawiono charakterystykę materiałów, z których zostały wykonane przeciwpróbki (części lotnicze) użyte do testów eksploatacyjnych.

2.4.1. Stopy aluminium

Stopy aluminium należą do jednych z najpowszechniej stosowanych materiałów konstrukcyjnych, pomimo rozwoju i zwiększenia udziału materiałów kompozytowych, stanowią one wciąż duży udział w materiałach stosowanych w przemyśle lotniczym.

Stopy aluminium dzieli się na:

- stopy odlewnicze,
- stopy do przeróbki plastycznej,
- stopy wytwarzane technikami metalurgii proszków.

W praktyce przemysłowej, często te same stopy stosuje się jako odlewnicze lub przerobione plastycznie, nieobrabiane lub obrabiane cieplnie [33, 34, 35].

Poniżej opracowano charakterystykę i klasyfikację stopów aluminium przeznaczonych do przeróbki plastycznej. Zgodnie z normą PN-EN 573-1 [36] stopy do przeróbki plastycznej grupuje się według głównego dodatku stopowego, jak przedstawiono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Serie stopów aluminium do obróbki plastycznej [36, 33]

Seria	Opis
1xxx (grupa 1000)	aluminium niestopowe, $\geq 99,0$ % wag. Al
2xxx (grupa stopów 2000)	główny składnik stopowy: miedź Cu
3xxx (grupa stopów 3000)	główny składnik stopowy: mangan Mn
4xxx (grupa stopów 4000)	główny składnik stopowy: krzem Si
5xxx (grupa stopów 5000)	główny składnik stopowy: magnez Mg
6xxx (grupa stopów 6000)	główny składnik stopowy: magnez Mg i krzem Si
7xxx (grupa stopów 7000)	główny składnik stopowy: cynk Zn
8xxx (grupa stopów 8000)	główny składnik stopowy: inne pierwiastki
9xxx (grupa stopów 9000)	grupa nieużywana

Pierwsza cyfra oznacza główny dodatek stopowy, następna wskazuje na wersję stopu, a pozostałe oznaczają numer stopu w danej grupie [33, 36].

Dodatki stopowe wprowadza się do aluminium w celu uzyskania stopu o określonych właściwościach technologicznych i eksploatacyjnych. Pierwiastki występujące w stopie aluminium można podzielić na następujące grupy: główne dodatki stopowe, mikrododatki stopowe oraz zanieczyszczenia. Przyjmuje się, że stopy aluminium do przeróbki plastycznej zawierają zwykle do około 6% mas. dodatków stopowych – najczęściej są to miedź, magnez, mangan, rzadziej cynk, tytan, nikiel, chrom i krzem. [33,37]

Spośród wymienionych serii stopów aluminium przeznaczonych do procesów przeróbki plastycznej najczęściej obróbce cieplnej poddaje się stopy z serii 2xxx, 6xxx i 7xxx. Norma PN-EN 1706 [38] przedstawia oznaczenia rodzajów procesów obróbki cieplnej oraz różnych ich wariantów za pomocą przyjętych symboli literowych i cyfrowych, tak jak przedstawiono poniżej w tabeli.

Tabela 2.8. Oznaczenie obróbki cieplnej stopów aluminium według PN-EN 1706 [33, 38]

Oznaczenie	Opis
F	wytworzony
O	wyżarzony
T1	schłodzony z podwyższonej temperatury i naturalnie starzony
T4	przesycony i naturalnie starzony w razie potrzeby
T5	schłodzony z podwyższonej temperatury i sztucznie starzony
T6	przesycony i sztucznie starzony
T64	przesycony i sztucznie starzony w temperaturze dla stanu podstarzonego
T7	przesycony i sztucznie starzony (stabilizowany)

W badaniach własnych prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej jako przeciwpróbki dla sprawdzianów gwintowych zastosowano części lotnicze wykonane ze stopu aluminium 7075 (seria 7xxx) w postaci elementów obrobionych maszynowo z odkuwek matrycowych (kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737).

Odkuwki matrycowe ze stopów aluminium wykonywane są z reguły ze stopów do przeróbki plastycznej, stosuje się je do produkcji części wymagających dużej odporności na obciążenia udarowe i oscylacyjne. Charakteryzują się wysoką dokładnością wymiarową (+0,89 mm w przypadku odkuwek kolektora hydraulicznego autopilot 737 [źródło własne] oraz jednorodną – pozbawioną nieciągłości i wtrąceń mikrostrukturą. Odkuwki aluminiowe cechuje wyraźny układ linii płynięcia – kierunek przebiegu włókien, wpływając korzystnie na ich właściwości wytrzymałościowe.

Na właściwości odkuwki wpływa wiele czynników, takich jak rodzaj i właściwości początkowe materiału do procesu kucia, jego podatność na odkształcenie, geometrii, także parametrów kucia, budowy matrycy, np. Bardzo ważnym czynnikiem oddziałującym na kształtowanie mikrostruktury i właściwości złożonej geometrycznie odkuwki aluminiowej, jest jej kształt wstępny – uzyskanie tzw. Idealnej przedkuwki. Wypełnienie wykroju matrycy możliwie najbardziej równomiernym płynięciem można osiągnąć bądź za pomocą zastosowania matrycy wstępnej lub innego, wstępnego procesu kształtowania przedkuwki. Występuje to zwłaszcza, gdy wytwarza się odkuwki o złożonych kształtach w większych seriach na jednej, zautomatyzowanej linii produkcyjnej lub kiedy istnieje konieczność obniżenia kosztów w odniesieniu do wydajności, co wymusza oszczędność materiału [37].

Stopy serii 7xxx, nazywane duralami cynkowymi, są czteroskładnikowymi stopami Al i Zn zawierającymi dla poprawy właściwości wytrzymałościowych dodatkowo Mg i Cu. Pierwiastki te zwiększają znacznie wytrzymałość mechaniczną i wpływają znacząco na mechanizm utwardzania wydzieleniowego. Wieloskładnikowe stopy serii 7xxx wykazują najwyższe właściwości wytrzymałościowe ze wszystkich stopów aluminium, przykładem jest stop 7075, który jest jednym z najbardziej wytrzymałych stopów aluminium [39, 40, 41]. W stanie utwardzonym wydzieleniowo ich wytrzymałość na rozciąganie R_m osiąga ok. 700 Mpa, a granica plastyczności $R_{p0,2}$ – ok. 600 Mpa, przy wydłużeniu względnym $A = 2-5\%$. Ograniczenie ich stosowania jest związane z małą odpornością na działanie podwyższonej temperatury oraz korozję, w szczególności naprężeniową [39, 40]. Szczególnie podatność tych stopów na zjawisko korozji naprężeniowej jest cechą, która ogranicza ich zastosowanie i była przyczyną różnych wypadków lotniczych w przeszłości [42]. Stopy aluminium z tej serii wytwarza się w postaci blach, prętów, odkuwek i kształtowników, które zgodnie z późniejszym zastosowaniem poddawane są kształtowaniu w procesach przeróbki plastycznej lub cieplno-plastycznej. Niektóre stopy aluminium z cynkiem można też stosować jako odlewnicze. Do podstawowych procesów obróbki cieplnej durali cynkowych należy wyżarzanie rekrytalizujące realizowane najczęściej w zakresie temperatury $390\div 430^\circ\text{C}$ oraz procesy utwardzania wydzieleniowego – składające się z etapu przesycania w zakresie temperatury $465\div 480^\circ\text{C}$ oraz starzenia w temperaturze ok. $120\div 150^\circ\text{C}$ przez 24h. [39, 40].

Stopy aluminium serii 7xxx znajdują szerokie zastosowanie w produkcji części lotniczych – wytwarza się z nich między innymi elementy konstrukcyjne części nośnych tj. pokrycia skrzydeł, dźwigary skrzydeł i żebra skrzydeł, a także elementy różnych układów i systemów np. obudowy, kolektory hydrauliczne [42, 43].

2.4.2. Stopy tytanu

Czysty technicznie tytan i stopy tytanu do zastosowań przemysłowych są szeroko stosowane w samolotach jako materiał o relatywnie niskiej masie (gęstość 60% stali), wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, w tym wytrzymałości właściwej i odporności na pełzanie oraz doskonałej odporności na korozję [44].

Stopy tytanu można podzielić na poszczególne grupy względem rodzaju osnowy (morfologii składników fazowych mikrostruktury stopów w stanie normalizowanym):

- stopy jednofazowe α ,
- stopy jednofazowe β ,
- stopy dwufazowe $\alpha + \beta$.

Dodatkowo wyróżnia się również dwie grupy przejściowe stopów:

- stopy pseudo- α ,
- stopy pseudo- β [45].

Norma amerykańska ASTM B265 przedstawia podział tytanu i jego stopów na gatunki. Czysty tytan dzieli się na cztery gatunki (ang. *Grade*): Grade 1 (gatunek 1), Grade 2 (gatunek 2), Grade 3 (gatunek 3), Grade 4 (gatunek 4) o różnym stopniu czystości. Gatunki te zawierają ok. 0,1-0,5% Fe oraz domieszki: C, H, O i N. Im większa jest liczba przy symbolu danego gatunku tytanu, tym więcej ma on zanieczyszczeń oraz charakteryzuje się większą wytrzymałością ($R_m = 240-550$ Mpa) i mniejszą plastycznością ($A=24-15\%$, $Z=30-25\%$). Właściwości wytrzymałościowe tytanu można kształtować w szerokim zakresie poprzez wprowadzanie do roztworu tytanu różnych pierwiastków stopowych. Oprócz czterech gatunków czystego technicznie tytanu niestopowego, w normie ASTM B265 [46] sklasyfikowano 34 pozostałe gatunki tytanu stopowego zawierające różne pierwiastki stopowe o różnym ich stężeniu, np. zastosowanie znalazł także domieszkowany tytan z nieznaczną zawartością pierwiastków szlachetnych – platyny i rutenu – oznaczonych jako gatunek 7, 11, 16, 26, 27 [37, 46, 47].

Pierwiastki stopowe dodawane do stopów tytanu dzieli się na:

- stabilizujące fazę α ,
- neutralne,
- stabilizujące fazę β .

Poprzez wprowadzanie pierwiastków stopowych można kształtować temperaturę przemian fazowych, a także skład fazowy mikrostruktury stopów tytanu. W tabeli 2.9. przedstawiono najważniejsze pierwiastki stopowe oraz ich rolę w kształtowaniu właściwości stopów tytanu [48, 49].

Tabela 2.9. Wpływ głównych pierwiastków stopowych na właściwości stopów tytanu

Dodatek stopowy	Zawartość, % mas.	Wpływ na mikrostrukturę – skład fazowy
Aluminium	2-7	stabilizujący fazę α
Cyna	2-6	stabilizujący fazę α
Wanad	2-20	stabilizujący fazę β
Molibden	2-20	stabilizujący fazę β
Chrom	2-12	stabilizujący fazę β
Miedź	2-6	stabilizujący fazę β
Cyrkon	2-8	umocnienie kryształów fazy α i fazy β
Krzem	0,2-1	zwiększenie odporności na pękanie w próbie pełzania

Wysokie powinowactwo chemiczne tytanu do tlenu powoduje, że tytan nawet w temperaturze pokojowej pokrywa się szczelną warstwą tlenków (TiO_2), która działa antykorozyjnie, w temperaturze powyżej $500^\circ C$ zaczyna się intensywnie utleniać, absorbując tlen, azot i wodór, które zwiększają twardość i wytrzymałość metalu, a obniżają własności plastyczne [48, 50]. Szczególnie niebezpiecznym zjawiskiem w tytanie i jego stopach jest kruchość wodorowa, powstaje ona podczas pochłaniania wodoru z atmosfery, szczególnie w wysokich zakresach temperatury [48]. Procesy topienia, odlewania z tego powodu muszą być prowadzone w atmosferze gazów obojętnych lub próżni [37]. Tytan i jego stopy nie są odporne na działanie kwasu siarkowego, fluorowodorowego, solnego (na gorąco) oraz stężonego azotowego, dodatkowo reagują z gorącymi zasadami [40].

W badaniach własnych prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zastosowano przeciwpróbki (części lotnicze) wykonane ze stopu tytanu Ti-6Al-4V – należącego do grupy wysokowytrzymałych stopów $\alpha + \beta$ w postaci elementów obrobionych maszynowo z odkuwek.

Stopy tytanu $\alpha + \beta$ charakteryzują się wytrzymałością dwukrotnie wyższą niż dla czystego tytanu, dodatkowo można uzyskać ich wysoką wytrzymałość poprzez obróbkę cieplną. Kucie, walcowanie i tłoczenie stopów tytanu $\alpha + \beta$ przebiega łatwiej niż dla stopu α lub β . Ich wadą jest zwiększona kruchość w przypadku nieprawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplnej i zachowywanie dostatecznej wytrzymałości tylko do temperatury $430^\circ C$ [33].

Właściwie przeprowadzenie procesu kucia, w dużym stopniu zależy od zadanych parametrów obróbki cieplnej a przede wszystkim od temperatury przemiany fazowej β . Istnieją dwa główne podejścia do kucia stopów tytanu:

- kucie głównie poniżej temperatury przemiany fazowej β ,
- kucie głównie powyżej temperatury przemiany fazowej β .

Stopy tytanu $\alpha + \beta$, znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym do produkcji konstrukcji kadłuba i elementów tj. śruby, szyny siedzenia, łopatki w silnikach, obudowy wentylatorów w części wlotowej [44].

Najważniejszym stopem w grupie stopów $\alpha + \beta$ jest stop Ti-6Al-4V, jest on lekkim materiałem konstrukcyjnym, którego parametry wytrzymałości i udarności umiejscawiają go pomiędzy wysokowytrzymałymi stopami aluminium, a stalami specjalnymi.

2.4.3. Stal nierdzewna

Stal nierdzewna jest stosowana do produkcji elementów lotniczych, kiedy istotna jest jednocześnie wysoka wytrzymałość i odporność na korozję [51].

Stale nierdzewne charakteryzują się wysoką odpornością korozyjną, która związana jest z procesem pasywacji, tj. zdolnością do samoczynnego utworzenia się na powierzchni szczelnej warstwy tlenkowej bogatej w chrom, która stanowi barierę zabezpieczającą przed czynnikami korozyjnymi, w tym utlenianiem [52, 53, 54].

Właściwości stali nierdzewnych, w tym ich odporność na korozję, a także zastosowanie zależą od rodzaju osnowy – wyróżnia się pięć podstawowych grup ze względu na skład fazowy, są to stale:

- austenityczne,
- ferrytyczne,
- ferrytyczno-austenityczne (typu duplex),
- martenzytyczne,
- umacniane wydzieleniowo [55].

W badaniach własnych prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zastosowano przeciwpróbki (części lotnicze) wykonane ze stali nierdzewnej 15-5 PH – należącej do grupy stali martenzytycznych umacnianych wydzieleniowo w procesach technologicznych przesycania i starzenia. Elementy zostały obrobione maszynowo z półfabrykatów uzyskanych poprzez pocięcie walcowanego pręta o przekroju prostokątnym (płaskownika).

Stale nierdzewne utwardzane wydzieleniowo PHSS (ang. *Precipitation Hardening Stainless Steel*) to grupa stopów odpornych na korozję, które osiągają wysoką wytrzymałość na skutek prowadzenia procesów technologicznych obróbki cieplnej (przesycania i starzenia) powodujących utwardzenie wydzieleniowe [52].

Do stali tych wprowadzany jest chrom, w ilości > 12% mas., a także inne pierwiastki stopowe, takie jak wolfram, molibden i wanad. Wprowadzenie tych pierwiastków sprzyja tworzeniu się twardych węglików stopowych, dzięki obecności których uzyskuje się wzrost właściwości wytrzymałościowych stali [56]. W stalach z gatunku PHSS, wyróżnia się trzy rodzaje składu fazowego osnowy, są to stale:

- martenzytyczne,
- półaustenityczne,
- austenityczne,
- duplex [55, 57].

Obróbka cieplna stali umocnionej wydzieleniowo, składa się z dwóch etapów technologicznych: procesów przesycania i starzenia. Proces przesycania prowadzi się w zakresie temperatury od ok. 800 do ok. 1050°C w celu rozpuszczenia wszystkich faz w osnowie austenitu, następnie przeprowadza się chłodzenie w wodzie lub w powietrzu. Kolejnym etapem obróbki cieplnej jest starzenie w zakresie temperatury pomiędzy 350 i 620°C z chłodzeniem w wodzie dla uzyskania drobnodispersyjnych wydzielań cząstek faz umacniających w przesyconym roztworze stałym [53, 58].

Stale umacniane wydzieleniowo w osnowie martenzytycznej charakteryzują się umiarkowaną odpornością na korozję, wysoką wytrzymałością na rozciąganie i twardością [57, 59, 60]. Zakres temperatury eksploatacji stali PHSS jest ograniczony temperaturą starzenia i wynosi około 350°C dla stali o osnowie martenzytycznej [53].

Przykładem stali PHSS stosowanej w przemyśle jest stal 15-5 PH – zawierająca dodatek miedzi (ok. 3% mas. Cu), który wpływa na utworzenie się w osnowie martenzytu listwowego wydzielen bogatych w miedź powodujących dodatkowo efekt wtórnego utwardzenia stali podczas początkowego etapu starzenia. Jak podają autorzy w źródłach literaturowych – mikrostruktura, w tym rodzaj składników fazowych i ich morfologia w stali 15-5 PH w stanie po pełnej obróbce cieplnej jest bardzo złożona i zależy od wielu czynników, w tym najistotniej od warunków poszczególnych etapów procesów obróbki cieplnej. Osnowę stanowi martenzyt listwowy o różnej budowie, obserwuje się również obecność austenitu szczątkowego i austenitu odwrotnego, wydzielen faz bogatych w miedź, a także obecności innych wydzielen, takich jak węgliki.

Umacniane wydzieleniowo stale nierdzewne są często stosowane w przemyśle lotniczym, np. jako elementy podwozia, cylindry hydrauliczne, elementy slotów i systemu hamowania [56, 59, 61].

2.5. Charakterystyka materiałów stosowanych do produkcji sprawdzianów gwintowych

Standardowym materiałem do produkcji sprawdzianów gwintowych jest stal do pracy na zimno: O1, O2, O6, oraz stal stopowa: AISI 8620, AISI 52100 [16]. Najczęściej stosowanym gatunkiem stali z grupy stali do pracy na zimno jest gatunek O1, jest on stosowany przez czołowych zagranicznych producentów sprawdzianów gwintowych tj. Thread Check Inc. [10], Mercury Tool & Gauge Ltd. [62] Swanson Tool Manufacturing Inc. [63] i krajowych tj. Fabryka Narzędzi FANAR S.A [20]. Dodatkowo niektórzy producenci wprowadzili do swojej oferty sprawdziany o podwyższonej odporności na zużycie – wykonane z węglika wolframu (Thread Check Inc.) i stali szybko tnącej – HSS (Swanson Tool Manufacturing Inc.).

W przemyśle lotniczym materiały stosowane do produkcji sprawdzianów gwintowych produkowane są zgodnie z amerykańskimi normami przemysłowymi, w związku z tym w poniższych punktach przedstawiono ich charakterystykę w odniesieniu do tych norm.

2.5.1. Stal narzędziowo-stopowa do pracy na zimno

Stale narzędziowe to najstarsza grupa materiałów narzędziowych opracowanych do specjalnego zastosowania, pierwsza stal narzędziowa została opracowana przez R. Mushet około 1868 roku w Anglii [58, 64].

Zgodnie z amerykańską normą ASTM A681 [65] stal narzędziową do pracy na zimno dzieli się na 3 grupy stali o literach identyfikacyjnych A, D, O. Każdy z rodzajów stali do pracy na zimno dzieli się na poszczególne typy.

Stale narzędziowe do pracy na zimno o oznaczeniu A – Typy A2 do A10 obejmują szeroki zakres stężenia węgla i dodatków stopowych, wszystkie one mają wysoką hartowność i mogą być hartowane na powietrzu. Niskowęglowe typy A8 i A9 mają mniejszą odporność na ścieranie, ale charakteryzują się większą wytrzymałością na obciążenia dynamiczne niż inne stale w tej grupie. Typ A7, o wysokiej zawartości węgla i wanadu, charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ścierne, przy jednocześnie mniejszej wytrzymałości na obciążenia dynamiczne.

Stale narzędziowe do pracy na zimno, oznaczenie D – Typy D2 do D7 charakteryzują się wysoką zawartością węgla i chromu oraz wykazują dużą odporność na ścieranie. Typy stali zawierające molibden mogą być utwardzane na powietrzu i zapewniają wysoki stopień stabilności wymiarowej podczas obróbki cieplnej.

Stale narzędziowe do pracy na zimno, oznaczenie O — Typy O1 do O7 są typami niskostopowymi przeznaczonymi do hartowania w oleju – elementy o przekrojach powyżej 50 mm charakteryzują się utwardzoną na skutek zahartowania warstwą wierzchnią oraz bardziej miękkim i ciągliwym rdzeniem [65].

Pierwiastki stopowe w stali występują najczęściej w następujących postaciach: rozpuszczone w ferrycie lub austenicie, tworzące węgliki lub azotki, również fazy międzymetaliczne oraz występujące w stanie wolnym, jako tzw. Fazy obce. Głównymi pierwiastkami stopowymi w stali są mangan, chrom, krzem, molibden, nikiel, wolfram, wanad, niob, tytan i miedź [66].

Pierwiastki węglilotwórcze w niektórych gatunkach stali mogą powodować efekt twardości wtórnej, występujący w podwyższonej temperaturze, np. związany z wydzieleniem węglików stopowych typu M_4C_3 , M_2C , $M_{23}C_6$, M_6C podczas procesu wysokiego odpuszczania – może występować zjawisko tzw. Kruchości na gorąco.

Podstawową wadą chromowych stali narzędziowych są różnego rodzaju segregacje i niejednorodności np. pasmowe rozmieszczenie węglików w osnowie. Przyczyna tego zjawiska jest zwiększona zawartość węgla w stali, który w postaci węglików utrudnia jej ujednorodnienie po skrzepnięciu oraz dużą skłonność chromu do tworzenia z węglem trwałych węglików [67].

Stale narzędziowe do pracy na zimno stosowane są przede wszystkim do produkcji narzędzi skrawających stosowanych w obróbce stali o niskich parametrach skrawania oraz do produkcji narzędzi do prac naprawczych, sprawdzianów, ponieważ ich koszt jest niższy niż narzędzi ze stali szybko tnącej (HSS), ze względu na mniejszą zawartość pierwiastków stopowych.

Stale narzędziowe podaje się hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu w celu uzyskania dużej twardości i odporności na ścieranie [33, 40].

Ze względu na niską twardość na gorąco, która ogranicza prędkości skrawania, z jakimi mogą być stosowane, stale do pracy na zimno są rzadko używane do obróbki metali na obrabiarkach. Ich obszar zastosowania obejmuje głównie narzędzia ręczne, takie jak pilniki, sprawdziany, rozwiertaki lub brzeszczoty do obróbki drewna [69].

2.5.2. Stal szybko tnąca

W czasie wystawy światowej w Paryżu, w 1900 roku F.W. Taylor przedstawił nową grupę materiałów narzędziowych, które zawierają do ok. 30% mas. dodatków stopowych, co pozwoliło na podwyższenie zakresu dopuszczalnej temperatury pracy narzędzi do 600°C oraz kilkukrotne zwiększanie prędkości i wydajności skrawania. Z tego względu nazwano je stalami szybko tnącymi (ang. *High-Speed Steels – HSS*) [64].

Zgodnie z normą ASTM A600 [68] stal szybko tnąca HSS dzieli się na siedem typów stali szybko tnącej wolframowej oznaczonej jako T1, T2, np., siedem typów stali szybko tnącej molibdenowej M1, M2, np. i dwie pośrednie stale oznaczone jako M50 i M52.

Typy T1, T2, T4, T5, T6, T8 i T15 charakteryzują się kontrolowaną wysoką zawartością wolframu wraz z innymi pierwiastkami stopowymi.

Typy M1, M2, M3, M4, M6, M7, M10, M30, M33, M34, M36, M41, M42, M43, M44, M46, M47, M48 i M62 charakteryzują się kontrolowaną wysoką zawartością molibdenu wraz z innymi pierwiastkami stopowymi.

Typy M2, M3 i M10 są dodatkowo klasyfikowane ze względu na zawartość węgla. Typ M3 jest również klasyfikowany ze względu na zawartość wanadu.

Typy M50 i M52 są uważane za oszczędnościowe stale szybko tnące ze względu na ich niższą całkowitą zawartość dodatków stopowych w porównaniu do typów standardowych. Te uboższe w pierwiastki stopowe gatunki stali, przeznaczone są zwykle do mniej intensywnych warunków pracy.

Wybór stali szybko tnącej zależy od oczekiwanych właściwości mechanicznych, konstrukcji i warunków eksploatacji [67, 68].

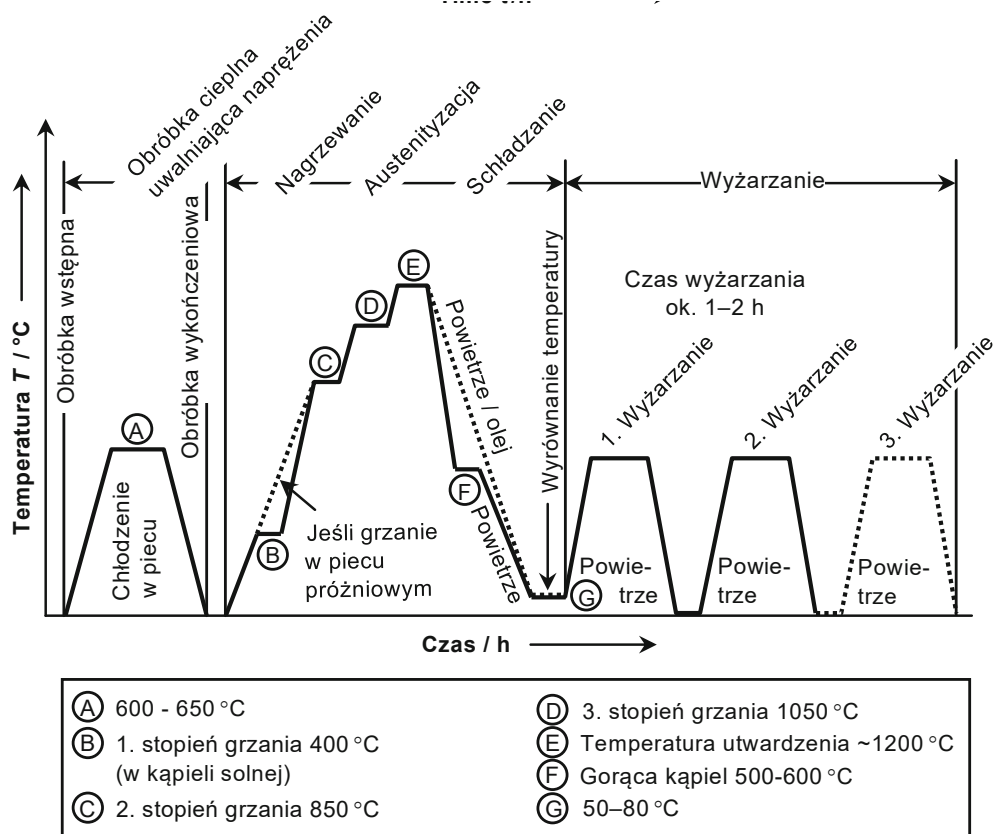
Stale molibdenowe mają zwykle większą niż wolframowe odporność na ścieranie i wytrzymałość, mniej odkształcają się w czasie obróbki cieplnej, są także tańsze.

Pierwiastki stopowe wprowadzane są do stali szybko tnącej w celu kształtowania następujących właściwości:

- Węgiel: jego zawartość musi być wystarczająca do utworzenia węglików wolframu, wanadu i molibdenu. Kształtuje martenzyt, wpływa na hartowność i spawalność stali,
- Wolfram: sprzyja tworzeniu się węglików, zwiększa twardość na gorąco, także zachowanie twardości i odporności na zużycie,
- Molibden: odpowiada za tworzenie się węglików, wpływa na wzrost utwardzenia i wytrzymałości, zwiększa odporność na oddziaływanie podwyższonej temperatury, zastępuje wolfram,
- Chrom: poprawia hartowność, w stalach szybko tnących dodawany w ilości ok. 4-5% mas., jest również pierwiastkiem węglikotwórczym,
- Wanad: dodawany jest w ilości do ok. 1% mas. Jego główną rolą jest poprawienie wtórnego utwardzenia i przeciwdziałanie rozrostowi ziaren. Węgiel wanadu jest bardzo drobny i stanowi najtwardszy składnik fazowy w stali szybko tnącej, odgrywa dużą rolę w odporności na zużycie, zwłaszcza przy obróbce materiałów o silnych właściwościach ściernych,
- Kobałt: zwiększa odporność na wysoką temperaturę.

Istotnym wskaźnikiem decydującym o odporności stali na zużycie jest rozmiar i rozkład węglików w mikrostrukturze [67].

Ze względu na słabą przewodność cieplną stale szybko tnące muszą być nagrzewane do hartowania bardzo powoli, aby uniknąć naprężeń cieplnych i pęknięć. Nagrzewanie odbywa się więc na ogół w trzech etapach poprzez stopniowe podgrzewanie do 400, 850 i 1050°C (rys. 2.7.). Po osiągnięciu temperatury austenitowania – ok. 1150-1250°C – stal jest wygrzewana w tej temperaturze, co umożliwia rozpuszczenie takiej ilości węglików w austenicie, aby został on nasycony pierwiastkami stopowymi i węglem dla zwiększenia hartowności, a jednocześnie pozostawienie części węglików nierozpuszczonych, które zahamują rozrost ziaren austenitu. Chłodzenie przeprowadzane jest w oleju lub w powietrzu z ewentualną przerwą w kąpeli solnej (ok. 550°C) lub oleju (80-200°C), a dalsze w powietrzu do 80°C. Mikrostrukturę stali po hartowaniu stanowi martenzyt z austenitem szczątkowym (ok. 30%) i nierozpuszczone podczas austenitowania węgliki. Po wyrównaniu temperatury wykonuje się co najmniej dwukrotne odpuszczanie w temperaturze 550-600°C przez 2h z chłodzeniem w powietrzu, co ma na celu przemianę austenitu szczątkowego i zmniejszenie wrażliwości stali na kruchość w podwyższonej temperaturze [64, 69].



Rys. 2.8. Przykładowy przebieg obróbki ciepłej stali szybko tnącej [64]

Podczas pierwszego odpuszczania stali szybko tnącej następuje wtórne utwardzenie, twardość stali szybko tnącej rośnie po przekroczeniu temperatury odpuszczania 550°C – wynika to z tworzenia wewnątrz martenzytu drobnodispersyjnych cząstek faz węglkowych, zawierających W, V, i Mo rozpuszczonych w żelazie w czasie wcześniejszej wysokotemperaturowej obróbki ciepłej, podczas chłodzenia zachodzi przemiana części austenitu szczątkowego w fazę martenzytyczną. Drugie odpuszczenie ma na celu dalsze obniżenie udziału austenitu szczątkowego.

Do najważniejszych właściwości wyróżniających stal szybko tnącą należą duża twardość, wysoka granica plastyczności i związana z tym odporność na odkształcenia trwałe, odporność na pękanie, odporność na ścieranie, szlifowalność, a także w przypadku narzędzi pracujących w wysokich temperaturach odpuszczalność.

Stal szybko tnącą produkuje się metodą konwencjonalną, a także metodami metalurgii proszków. Stal szybko tnąca wyprodukowana za pomocą metalurgii proszków charakteryzuje się lepszymi parametrami technologicznymi niż stal wyprodukowana metodą konwencjonalną ze względu na drobnoziarnistą strukturę wolną od segregacji węglików [64].

2.5.3. Węglik spiekany

Węgliki spiekane zostały zaprezentowane po raz pierwszy na targach Lipskich w 1927 roku pod nazwą Widia.

Węgliki spiekane (CC- ang. *Cemented Carbides*) są materiałem kompozytowym, składającym się z twardych węglików metali trudnotopliwych (wolfram, tytan, tantal, niob) rozmieszczonych w miękkim spoiwie fazy metalicznej o dużej zawartości kobaltu lub/i niklu. Twarde ziarna węglika wolframu (WC), węglika tytanu (TiC), węglika tantalu (TaC) i węglika niobu (NbC) w zależności od gatunku charakteryzują się różną morfologią i rozmiarem w zakresie od około 1-10 mikrometrów, zajmują około 60-95% objętości

względnej węglików spiekanych, wpływając na twardość i odporność na zużycie. Natomiast kryształy fazy metalicznej spajają ziarna razem, decydując o wytrzymałości materiału [64, 69].

Najczęściej stosowanym spoiwem w węglkach spiekanych jest kobalt, stosuje się również nikiel, gdy wymagana jest odporności na korozję, w tym działanie kwasów. Jak wskazują dane literaturowe kobalt jest najlepszym spoiwem węglików spiekanych opartych na węgliku wolframu (WC), wynika to z rozpuszczalności węgliku wolframu w kobalcie i dobrej zwilżalności kryształów WC w kobalcie przez stopioną fazę wiążącą WC-Co. Kobalt jako spoiwo wspomaga spiekanie i pozwala uzyskać produkt o bardzo wysokiej wytrzymałości i ciągliwości [64, 70].

Węglik spiekane dzieli się na trzy podstawowe grupy:

- WC-Co – składające się głównie z węglika wolframu w spoiwie kobaltowym,
- WC-(Ti, Ta, Nb)C-Co – zawierające dodatkowo węgliki tytanu, tantalum i niobu,
- TiC/TiN-Co, Ni – w których zamiast węglika wolframu występuje węgiel i azotek tytanu a spoiwo jest kobaltowo-niklowe.

Z trzech wymienionych grup węgliki spiekane WC-Co stosuje się do produkcji specjalnych sprawdzianów gwintowych [10].

Węglik WC-Co

Składają się one z węglika wolframu (faza α) i spoiwa kobaltowego (faza β), czasem także z niewielkiej ilości węglików tantalum i niobu (do 5% udziału objętości względnej – V_V) [64].

Zgodnie z normą PN-EN ISO 4499-2 [71] węgliki WC-Co klasyfikuje się również ze względu na rozmiar ziaren, który wraz z zwartością fazy kobaltowej wpływa na właściwości eksploatacyjne (rys. 2.8.).

<0,2 μm – nanoziarniste,

0,2-0,5 μm – ultradrobnoziarniste,

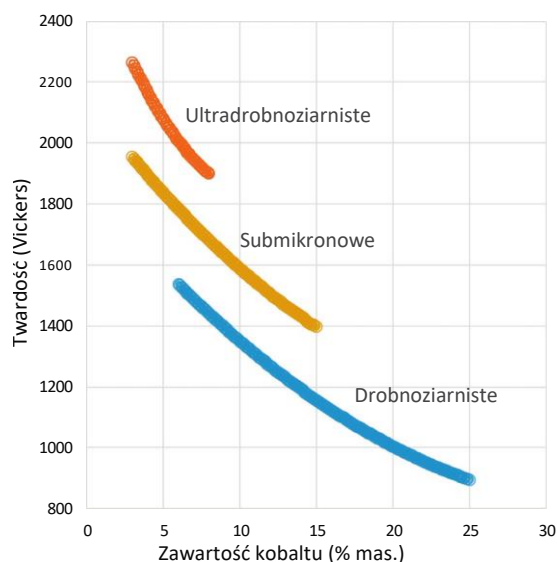
0,5-0,8 μm – submikronowe,

0,8-1,3 μm – drobnoziarniste,

1,3-2,5 μm – średniogruboziarniste,

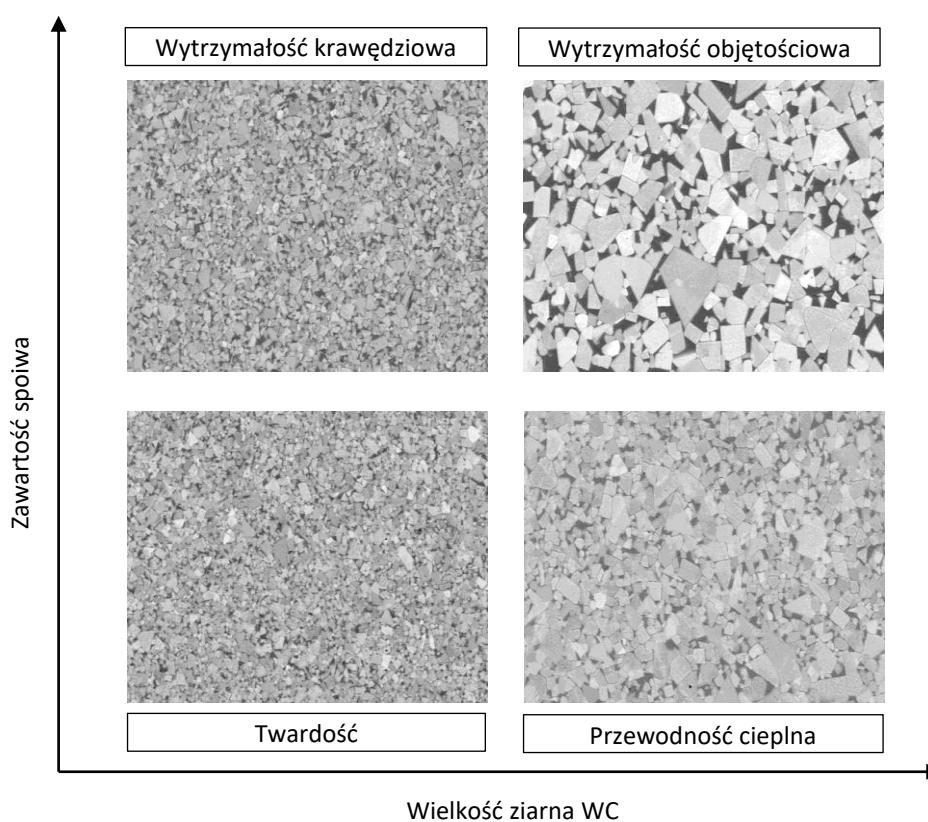
2,5-6,0 μm – gruboziarniste,

>6,0 μm – ekstragruboziarniste.



Rys. 2.9. Zależność przedstawiająca wpływ rozmiaru ziaren i zawartości kobaltu na zmianę twardości węglików spiekanych.

Dostosowując zawartość spoiwa i wielkość ziarna fazy węglkowej WC, można kształtować wymagane właściwości mechaniczne; tj. wytrzymałość objętościową/krawędziową, twardość i przewodność cieplną (rys. 2.9.). Właściwości te mogą się różnić w zależności od zastosowania – warunków i rodzaju obrabianych materiałów; stali stopowych, nierdzewnych i austenitycznych; żeliwa lub kompozytów.



Rys. 2.10. Wpływ zawartości fazy spajającej (kobaltowej) oraz parametrów mikrostruktury (rozmiarów ziaren) na właściwości cieplne i mechaniczne węgla spiekane WC-Co [72]

Jak wskazują autorzy publikacji – najważniejsze właściwości węglików spiekanych można przedstawić w zależności od zawartości fazy Co i/lub średniej wielkości ziarna WC – stwierdza się istotny wpływ zmiany twardości, a także ciągliwości w funkcji zmiennej średniej średnicy ziarna WC i zawartości Co [72, 73].

2.6. Charakterystyka powłok przeciwzużyciowych

Powłoki wytwarzane metodami CVD i PVD znajdują szerokie zastosowanie w pokrywaniu narzędzi skrawających. Najpopularniejszymi powłokami stosowanymi w przemyśle do zwiększenia żywotności narzędzi są powłoki z azotku tytanu (TiN), węglazotku tytanu (TiCN), azotku chromu (CrN) – wytwarzane metodą PVD oraz diamentowe i diamentopodobne (DLC) – wytwarzane metodami CVD [74]. W literaturze polskiej i zagranicznej jest niewielka ilość informacji dotyczących pokrywania narzędzi pomiarowych, w tym sprawdzianów gwintowych, w celu zwiększenia ich trwałości. Informacje dotyczące zwiększenia żywotności sprawdzianów gwintowych pokrytych powłokami przeciwzużyciowymi pochodzą w większości od producentów i stanowią informacje marketingowe nie zawierające wyników badań naukowych. Najpopularniejszą powłoką przeciwzużyciową stosowaną przez producentów sprawdzianów jest azotek tytanu (TiN), jest on stosowany do zwiększania żywotności sprawdzianów przez wiodących producentów tj. Fabryka Narzędzi FANAR S.A [20], Swanson Tool Manufacturing Inc. [63], The Original Gauge Company Limited. [75], itd.

W publikacjach naukowych i w ofertach marketingowych firm oferujących sprawdziany gwintowe nie występują wzmianki o stosowaniu powłoki diamentopodobnej DLC do pokrywania sprawdzianów gwintowych w celu wydłużenia ich żywotności. Jednak ze względu na zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu i ze względu na jej właściwości – powłoka DLC stanowi potencjał do zastosowanie jej do pokrywania narzędzi pomiarowych.

2.6.1. Powłoki ochronne wytwarzane metodami PVD i CVD

Obecnie, spośród różnych metod nanoszenia cienkich powłok na osnowie metalicznej, ceramicznej lub ceramiczno-metalicznej – zwiększających odporność na zużycie narzędzi wykonanych ze stali narzędziowych i węglików spiekanych lub innych materiałów – stosuje się głównie dwie metody, w których wytwarzanie powłoki zachodzi wskutek procesów osadzania z fazy gazowej: metody chemicznego osadzania z fazy gazowej CVD (ang. *Chemical Vapor Deposition*) oraz metody fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD (ang. *Physical Vapor Deposition*). Procesy osadzania fizycznego z fazy gazowej PVD wymagają wysokiej próżni, w której atomy tworzące powłokę przemieszczają się na znaczne odległości bez zderzeń. Natomiast podczas osadzania procesów chemicznego z fazy gazowej CVD zostaje wytworzona powłoka z produktów reakcji chemicznych, zachodzących wskutek przeprowadzenia tych produktów, zwanych również prekursorami, do fazy gazowej [76, 77]

Osadzanie fizyczne z fazy gazowej (PVD)

W procesach realizowanych metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) tworzenie powłoki na podłożu zachodzi przez nanoszenie fizyczne atomów, jonów lub cząstek. Wytwarzanie powłok może zachodzić za pomocą różnych zjawisk fizycznych, w tym np.:

- odparowania łukiem elektrycznym – Arc Evaporation (Arc-PVD),
- rozpylania magnetronowego – Magnetron Sputtering (MS),
- odparowania wiązką elektronów – Electron Beam Evaporation (EB-PVD).

W praktyce przemysłowej, do pokrywania narzędzi powłokami przeciwzużyciowymi metodą PVD najczęściej stosowana jest metoda odparowania źródła osadzanego materiału (ang. *target*), za pomocą

łuku elektrycznego (Arc-PVD). W metodzie odparowania łukiem elektrycznym stosowane jest rozpylanie i osadzanie materiału w plazmie osiągnięte przy pomocy łuku elektrycznego. W komorze roboczej, w warunkach obniżonego ciśnienia ($10^{-5} - 10$ Pa), wytwarzany jest łuk elektryczny, który stosowany jest do odparowania materiału tarczy, który jest katodą. Prąd łuku elektrycznego, o dużej gęstości prądowej (ok. $10^6 - 10^8$ A/cm²) powoduje przegrzanie materiału katody, jego odparowanie i jonizację. Kondensacja materiału pochodzącego z katody na powierzchni materiału podłoża powoduje tworzenie powłoki.

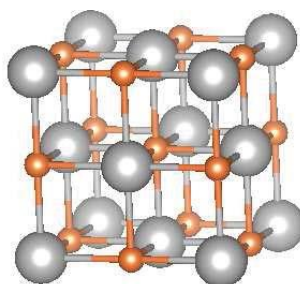
Powłoki przeciwzuzyciowe otrzymane za pomocą osadzania fizycznego z fazy gazowej są bardzo twarde (około 2000 HV), dodatkowo zazwyczaj mają grubość około kilku mikrometrów, co pozwala zachować geometrię pokrywanych narzędzi bez ingerencji zmianą parametrów struktury geometrycznej warstwy wierzchniej oraz ich wymiarów i kształtów [76, 77, 78, 79].

Relatywnie niska wartość temperatury w procesie nanoszenia (zimne podłoże lub nagrzane do temperatury ok. 200 – 500°C) pozwala na pokrywanie większości narzędzi ze stali szybko tnących i stali do pracy na gorąco [77, 78]. Połączenie powłoki jest adhezyjne lub rzadziej adhezyjno-dyfuzyjne, dlatego w największym stopniu przyczepność powłoki do podłoża, zależy od stanu struktury geometrycznej i czystości warstwy wierzchniej podłoża.

W badaniach własnych realizowanych w ramach niniejszej pracy założono wytworzenie powłoki przeciwzuzyciowej z azotku tytanu (TiN) przy użyciu metody Arc-PVD, w celu wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych.

Powłoki z azotku tytanu (TiN) (ang. *titanium nitride*) – są jednymi z najczęściej stosowanych rodzajów powłok, w różnych gałęziach przemysłu, do ochrony przeciwzuzyciowej i zwiększenia trwałości narzędzi skrawających, ze względu na ich wysoką twardość, wytrzymałość, niską wartość współczynnika tarcia, a także odporność na zacieranie (ang. *galling*). Dodatkowo złoty kolor powoduje, że powłoki te mają zastosowanie również jako dekoracyjne oraz są również miernikiem/markerem stopnia zużycia dla narzędzi skrawających [76, 78].

Struktura krystaliczna azotku tytanu ma strukturę zbliżoną do chlorku sodu (rys. 2.12) [80,81], duże, szare kule reprezentują atomy tytanu a małe pomarańczowe reprezentują atomy azotu.



Rys. 2.11. Struktura krystaliczna azotku tytanu TiN, w typie NaCl (B1) [81]

Osadzanie chemiczne z fazy gazowej (CVD)

W metodzie chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) osadzanie powłok odbywa się w wyniku cieplnej aktywacji procesu reakcji chemicznej gazowych prekursorów z nagrzanym podłożem. Wytwarzanie warstw jest kontynuacją procesów obróbki cieplno-chemicznej w atmosferze gazowej, szczególnie metalizowania dyfuzyjnego. Istnieje wiele różnych rodzajów procesów wytwarzania powłok metodą CVD. Spośród nich najczęściej stosowane są procesy typu: zimny reaktor/zimne podłoże (ang. *cold wall*) oraz gorący reaktor/gorące podłoże (ang. *hot wall*), a także procesy realizowane pod obniżonym ciśnieniem (ang. *LPCVD – low pressure chemical vapour deposition*). W procesach typu „cold wall” energia

aktywacji realizowana jest przy użyciu plazmy lub wiązki lasera. W procesach typu „hot wall” najczęściej pokrywane elementy nagrzewane są wraz z całą objętością retorty poprzez grzanie oporowe w piecu dzwonowym (ang. *hat furnace* lub *bell furnace*). Podczas procesu reaktywne substraty w stanie gazowym (prekursory), zazwyczaj z gazem nośnym, opływają podłoże i tworzenie się powłoki następuje w wyniku rozkładu mieszaniny gazów reaktywnych na obrabianej powierzchni oraz wbudowania w warstwę uwalnianych atomów metalu lub związku chemicznego.

W procesie osadzania chemicznego z fazy gazowej CVD wyróżnia się trzy etapy:

- wytwarzanie związku chemicznego nanoszonego pierwiastka o dużej lotności,
- transport gazu tworzącego związek do miejsca osadzania bez jego rozpadu,
- reakcję chemiczną niezbędną do wytworzenia powłoki na powierzchni wyrobu [76, 82].

W procesie PACVD, w odróżnieniu od procesu PVD wspomaganego plazmą, wszystkie składniki reagujące podczas ich wprowadzania do komory próżniowej są w stanie pary lub gazu i mogą być częściowo zjonizowane. Do zwiększenia kinetyki reakcji w procesie PACVD stosowana jest plazma prądu stałego lub o częstotliwości radiowej RF (od 50 kHz do 50 MHz) albo mikrofalowej (zakres częstotliwości GHz). Wspomaganie plazmą procesu CVD umożliwia, nawet w niskiej temperaturze, skrócenie czasu wytwarzania powłoki do kilku godzin. Proces wspomagany plazmą o częstotliwości radiowej jest stosowany do wytwarzania powłok tlenkowych, węglowych, azotkowych i fosforkowych.

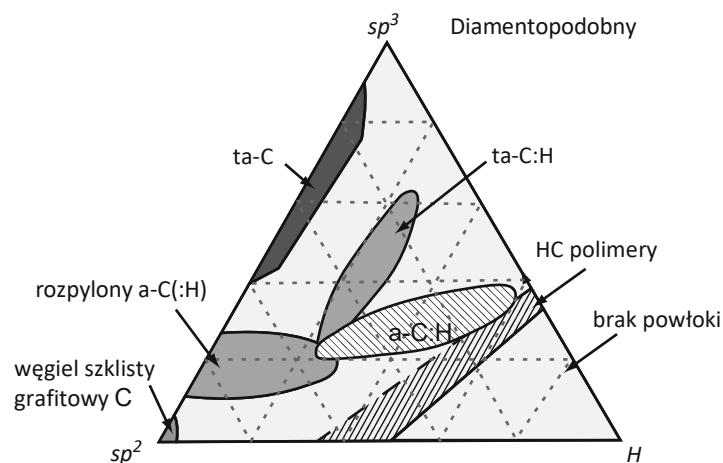
W części badawczej niniejszej rozprawy doktorskiej zastosowano powłokę diamentopodobną wytworzoną metoda PACVD w celu wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych.

Powłoki diamentopodobne DLC (ang. *diamond like coating*) są metastabilną formą amorficznego węgla zawierającego znaczną ilość wiązań sp^3 [78]. Są one najczęściej wytwarzane w procesie CVD wspomaganego plazmą o częstotliwości mikrofalowej lub radiowej [76]. Powłoki DLC zbudowane są z mieszaniny faz krystalicznej i amorficznej [83]. Węgiel w powłokach DLC może występować w trzech hybrydyzacjach sp^3 , sp^2 i sp^1 [78; 84]. Ważnym czynnikiem, od którego zależą właściwości powłok, jest stosunek wiązań typu sp^3 do wiązań sp^2 . Hybrydyzacja sp^2 odpowiada za dobrą przewodność elektryczną oraz niski współczynnik tarcia, natomiast hybrydyzacja sp^3 determinuje wysoką twardość, obojętność chemiczną oraz dużą odporność na zużycie.

Powłoki DLC można klasyfikować pod względem odmiany występowania węgla, zawartości wiązań sp^3 oraz zawartości wodoru jako:

- ta-C – tetraedryczny amorficzny węgiel, posiada maksymalną zawartość wiązań sp^3 oraz brak obecności wodoru – jest to najbardziej stabilna i najtwardsza spośród powłok DLC,
- ta-C:H – posiada około 70% wiązań sp^3 oraz zawartość wodoru 25-35%
- a-C – posiada 30% wiązań sp^3 oraz brak obecności wodoru, można je modyfikować metalami (powłoki a-C:Me),
- a-C:H – posiada 20-40% wodoru, można modyfikować metalami, takimi jak: W, Ti, Nb, Cr np. (powłoki a-C:H:Me) jak i niemetalami (powłoki a-C:H:X) – np. H, Si, F, N, O.

Na rys. 2.11. przedstawiono typy węgla amorficznego w zależności od koncentracji wodoru oraz udziału wiązań kowalencyjnych [31].

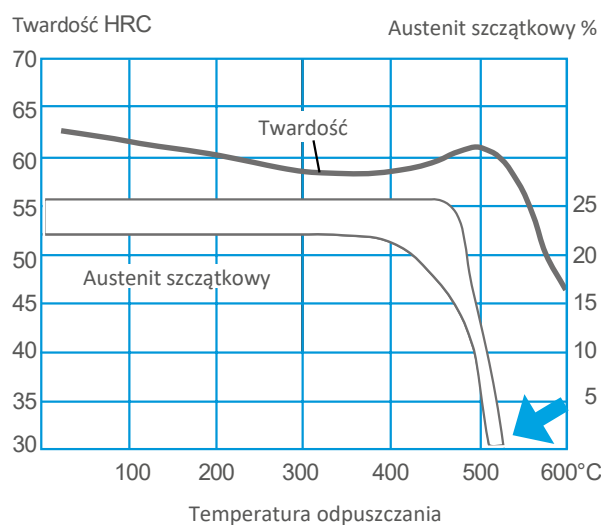


Rys. 2.12. Typy amorficznego węgla w zależności od zawartości wiązań sp^2 i sp^3 oraz wodoru [84]

Powłoki DLC domieszkuje się pierwiastkami, takimi jak: azot, siarka, wolfram, tytan i srebro, co pozwala na kształtowanie różnych właściwości powłoki, np. domieszkowanie krzemem poprawia właściwości mechaniczne oraz stabilność cieplną [31, 76, 84]. Oprócz domieszkowania powłok stosuje się również proces nakładania podpowłok, zwiększających przyczepność właściwej powłoki do podłoża – jako podpowłokę nakłada się cienką warstwę chromu, a następnie na niej osadza się właściwą powłokę DLC, która jednocześnie może być domieszkowana Cu, Ni lub Ag [85].

Ze względu na korzystne właściwości powłok diamentopodobnych typu DLC, takich jak duża twardość, niski współczynnik tarcia, obojętność chemiczna, odporność na ścieranie powłoki DLC, względem wymagań eksploatacyjnych, powłoki DLC znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu [31, 76, 86].

Według jednego z wiodących producentów stali narzędziowej – Uddeholm, kluczowe jest właściwe przygotowanie powierzchni narzędzia przeznaczonego do pokrywania i warunki przeprowadzenia obróbki cieplnej materiału narzędzia. Szczególnie ważne jest wykonanie procesu odpuszczania stali narzędziowej w temperaturze wyższej niż temperatura procesu wytwarzania powłoki tj. zazwyczaj powyżej 450°C , a także dla zapewnienia względnie niskiego udziału – objętości względnej austenitu szczątkowego (rys. 2.12.).



Rys. 2.13. Zależność wpływu temperatury odpuszczania na udziału objętości względnej austenitu szczątkowego i twardość stali narzędziowej D2

Częstym problemem występującym w przypadku stali narzędziowej np. typ D2 jest ryzyko zwiększenia objętości materiału podłoża pod wpływem oddziaływania temperatury procesu nakładania powłoki. Proces odpuszczania stali narzędziowej typu D2 najczęściej prowadzona jest w zakresie temperatury około 500-510°C dla uzyskania wysokiej twardości – co powoduje że austenit szcążkowy pozostaje w mikrostrukturze stali i przekształca się w martenzyt podczas procesu powlekania lub podczas wtórnego nagrzania w trakcie użytkowania narzędzia. Skutkiem tego jest wzrost objętości narzędzia, co przyczynia się do przekroczenia tolerancji wymiarowych. Na rys. 2.12. zaznaczono niebieską strzałką orientacyjny zakres minimalnej, wymaganej temperatury odpuszczania stali narzędziowej typ D2 w celu uniknięcia zjawiska zwiększania objętości materiału podłoża podczas procesu wytwarzania powłoki [87].

Jedną z najważniejszych właściwości powłok jest ich przyczepność do podłoża – wpływa na nią wiele czynników, takich jak rodzaj podłoża i jego stan struktury geometrycznej, rodzaj procesu i metoda wytwarzania powłoki, grubość powłoki, ilość i rodzaj warstw z których składa się powłoka, a także rodzaj i właściwości nakładanej podpowłoki. Na trwałość powłoki wpływają również czynniki eksploatacyjne, wartość i rodzaj obciążeń, środowisko pracy [88].

2.6.2. Mechanizmy degradacji powłok przeciwzużyciowych

Właściwości powłoki i podłoża oraz różnice w ich właściwościach, a także interakcja pomiędzy powłoką i podłożem determinują rodzaj mechanizmów niszczenia powłoki. Podstawowymi parametrami wpływającymi na tarcie w mikrostryku w układzie narzędzie-przeciwpróbka są: twardość powłoki i podłoża, grubość powłoki, chropowatość i produkty zużycia w strefie mikrostryku (rys. 2.13)

WĘZŁ TARCIA				
TWARDOŚĆ POWŁOKI				
GRUBOŚĆ POWŁOKI	gruba	cienka	gruba	cienka
GŁADKA POWIERZCHNIA PRZECIWPÓŁKI				
CHROPOWATA POWIERZCHNIA PRZECIWPÓŁKI				
PRODUKTY ZUŻYCIA				

Rys. 2.14. Mechanizmy degradacji powłok przeciwozrybiowych [85]

[Friction and wear of coated surfaces — scales, modelling and simulation of tribomechanisms]

Przyczepność (adhezja) powłoki jest jedną z właściwości eksploatacyjnych powłoki, jednymi z kluczowych czynników mających wpływ na przyczepność powłoki są: chropowatość powierzchni, mikrostruktura materiału i obciążenia zewnętrzne [77]. Podstawową metodą oceny adhezji powłoki przeciwozrybiowej do podłoża jest scratch test. Przeprowadza się go zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 20502 [89] i ocenia charakter uszkodzeń wg atlasu.

Analizę stanu zagadnienia przeprowadzono w oparciu o polskie i zagraniczne publikacje naukowe, a także analizę rynku na podstawie ofert producentów sprawdzianów gwintowych.

W ramach przeglądu literatury przedstawiono charakterystykę materiałów, z których zostały wykonane części lotnicze użyte w testach eksploatacyjnych, charakterystykę materiałów, z których wykonano sprawdziany gwintowe i powłoki przeciwozrybiowe. Opisano gwinty całowe i sprawdziany do gwintów całowych w odniesieniu do obowiązujących norm amerykańskich. Dodatkowo przedstawiono stan wiedzy dotyczący zwiększania żywotności narzędzi, np. narzędzi pomiarowych poprzez stosowanie powłok przeciwozrybiowych i materiałów o większej wytrzymałości na ścieranie.

3. CEL I TEZY PRACY

Zużycie eksploatacyjne narzędzi, sprawdzianów i urządzeń pomiarowych jest procesem stale towarzyszącym produkcji, a tematyka związana z wydłużeniem okresu ich użytkowania stanowi aktualny problem badawczy obejmujący zagadnienia zapewnienia wysokiej jakości wyrobów, w tym ich ochrony przed zużyciem, poprawy żywotności przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów produkcji. Przegląd i analiza danych literaturowych przedstawiona w poprzednim rozdziale wskazuje na niewielką liczbę dostępnych publikacji dotyczących zagadnień w obszarze problematyki eksploatacji, zużycia i ochrony przed nadmiernym zużyciem sprawdzianów gwintowych, a także metod zwiększania ich trwałości. Stwierdzono przy tym, że w literaturze polskiej i światowej zauważalna jest znikoma liczba publikacji z zakresu eksploatacji i zużycia sprawdzianów gwintowych (również z powłokami) w warunkach produkcyjnych, do których można zaliczyć:

- analizę wpływu właściwości materiału z jakiego są wykonane sprawdziany na ich zużycie,
- wpływu rodzaju i właściwości powłoki ochronnej (przeciwzużyciowej) naniesionej na sprawdzian gwintowy na jego zużycie,
- wpływ właściwości materiału przeciwpróbki (kolektora hydraulicznego) na zużycie sprawdzianu.

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie metodyki doboru materiałów sprawdzianów gwintowych i powłok przeciwzużyciowych wydłużających czas eksploatacji jednocześnie zwieszającej czasookres wzorcowania sprawdzianów gwintowych trzpieniowych używanych w przemyśle lotniczym, do kontroli elementów konstrukcyjnych samolotów: korpusów, kolektorów, obudów.

Na podstawie analizowanej problematyki i zdefiniowanego celu rozprawy doktorskiej przyjęto hipotezy badawcze, że opracowanie metodyki i dobór materiałów do wytworzenia sprawdzianów gwintowych i rodzaju powłok ochronnych o właściwościach przeciwzużyciowych pozwoli na:

- wydłużenie żywotności sprawdzianów gwintowych do min. 12 miesięcy,
- zminimalizowanie zjawiska zacierania się sprawdzianów gwintowych w trakcie kontroli jakości elementów konstrukcyjnych samolotów wykonanych z aluminium,
- wydłużenie czasookresu wzorcowania do min. 6 miesięcy dla sprawdzianów używanych do sprawdzania elementów lotniczych wykonanych ze stali i stopów tytanu,
- opracowanie rozwiązania pozwalającego na regenerację zużytych sprawdzianów.

Zastosowanie materiałów o zwiększonej odporności na ścieranie, wykonanych z węgla spiekanego i stali szybko tnącej – w porównaniu do innych niż standardowy materiał wykorzystywany do produkcji sprawdzianów gwintowych jakim jest stal narzędziowa do pracy na zimno – umożliwi określenie wpływu rodzaju materiału, z którego wykonano sprawdziany gwintowe na ich żywotność. Jednocześnie opracowana koncepcja pokrycia sprawdzianów gwintowych powłokami przeciwzużyciowymi będzie podstawą do oceny wpływu rodzaju powłoki oraz materiału podłoża na trwałość w warunkach eksploatacyjnych, umożliwi określenie stopnia ich odporności na zużycie ścierne. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wykonana będzie ocena obejmująca wybór najlepszego wariantu / rodzaju materiału podłoża i powłoki pracujących w kontakcie z danym rodzajem materiału przeciwpróbki.

Analiza procesu inspekcji elementów konstrukcyjnych samolotów przy użyciu sprawdzianów gwintowych trzpieniowych wykazała następujące problemy wymagające rozwiązania w ramach prac naukowych i wdrożeniowych:

- utrata tolerancji wymiarowej sprawdzianów gwintowych wynikająca z nadmiernego ich zużycia, które następuje w ciągu 3-4 miesięcy pracy ciągłej podczas weryfikacji otworów gwintowych w elementach konstrukcyjnych samolotów – wykonanych ze stali lub stopów tytanu,
- zacieranie się sprawdzianów gwintowych (tworzenie narostów na powierzchni) w trakcie sprawdzania elementów konstrukcyjnych samolotów – wykonanych ze stopów aluminium,
- konieczność weryfikacji własności metrologicznych sprawdzianów gwintowych poprzez przeprowadzanie wzorcowania co 3 miesiące w przypadku sprawdzianów stosowanych do inspekcji elementów konstrukcyjnych samolotów wykonanych ze stali i stopów tytanu,

W celu rozwiązania zdefiniowanych problemów technologicznych i naukowych przyjęto w ramach doktoratu wdrożeniowego następujący zakres prac:

- analizę stanu wiedzy zawierającą przegląd materiałów najczęściej używanych w przemyśle lotniczym do produkcji elementów konstrukcyjnych, sprawdzianów gwintowych stosowanych do kontroli elementów lotniczych, powłok ochronnych (przeciwzużyciowych) typu PVD i CVD stosowanych do zwiększania żywotności narzędzi przy zachowaniu ich własności metrologicznych,
- przeprowadzenie badań morfologii powierzchni i mikrostruktury, mechanicznych, odporności na zużycie i pomiarów wielkości geometrycznych,
- analizę i ocenę rezultatów badań,
- opracowanie optymalnego rozwiązania w zakresie wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych trzpieniowych poprzez zastosowanie różnych materiałów do produkcji sprawdzianów i powłok Arc-PVD i PACVD – wybór najlepszego wariantu/rodzaju powłoki oraz rodzaju podłoża z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego.

4. METODYKA BADAŃ

W metodyce założono badania z zakresu:

- badań mikroskopowych i makroskopowych, w tym ocena mikrostruktury, składu chemicznego, pomiar grubości wytworzonych powłok przeciwzużyciowych, ocena morfologii powierzchni sprawdzianów gwintowych trzpieniowych nowych i po zakończonych testach eksploatacyjnych,
- badań właściwości mechanicznych poprzez pomiary twardości,
- badań zużycia eksploatacyjnego (tribologicznych) poprzez testy eksploatacyjne sprawdzianów z pokryciem powłokami przeciwzużyciowymi i bez pokrycia w układzie przeciwpróbka – sprawdzian gwintowy w warunkach przemysłowych, próby przyczepności powłok do podłoża sprawdzianów i ich odporności na zarysowanie w próbie zarysowania „scratch test”,
- pomiarów wielkości geometrycznych poprzez pomiar średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych przed i w trakcie testów eksploatacyjnych.

4.1. Plan badań

W celu realizacji założeń opracowano plan badań, który został przedstawiony w dwóch formach, z klasyfikacją względem wykonanych badań i pomiarów na rodzaje w tabeli 4.1. i w tabeli 4.2. oraz względem podziału na badania i pomiary wykonane dla sprawdzianów z pokryciem powłoką przeciwzużyciową i bez pokrycia.

Tabela 4.1. Zestawienie wykonanych rodzajów badań i pomiarów z podziałem na typy

Pomiary parametrów geometrycznych	Pomiary średnicy podziałowej
	Pomiary chropowatości
Badania morfologii powierzchni i mikrostruktury sprawdzianów gwintowych	Obserwacje powierzchni sprawdzianów
	Obserwacje mikroskopowe na przekrojach sprawdzianów i kolektorów
Badania odporności na zużycie	Testy eksploatacyjne
	Badanie przyczepności powłoki do podłoża metodą testu na zarysowanie
Badanie właściwości mechanicznych	Pomiary twardości materiałów

Tabela 4.2. Zestawienie wykonanych rodzajów badań i pomiarów z podziałem na sprawdziany gwintowe z powłoką powłoką przeciwzuzyciową i bez pokrycia

<p>Sprawdziany gwintowe .250-28 UNF-3B STI - wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno, - wykonane ze stali szybko tnącej HSS, - wykonane z węgla spiekane.</p>	<p>Sprawdziany gwintowe .250-28 UNF-3B STI - wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryte powłoką DLC, - wykonane ze stali szybko tnącej HSS pokryte powłoką TiN.</p>
Pomiary średnicy podziałowej	
Pomiary chropowatości	
Obserwacje powierzchni sprawdzianów	
Obserwacje mikroskopowe na przekrojach sprawdzianów	
Testy eksploatacyjne	
Pomiary twardości materiałów	Badanie przyczepności powłoki do podłoża metodą testu na zarysowanie

4.2. Przedmiot badań

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że jednym z najczęściej stosowanych sprawdzianów gwintowych trzpieniowych w przemyśle lotniczym jest .250-28 UNF-3B STI (rys. 4.1.) – sprawdzian ten jest również jednym z często stosowanych sprawdzianów w Yasa Poland Sp. z o.o., dlatego stanowi on reprezentatywną próbkę do badań. Sprawdziany gwintowe trzpieniowe .250-28 UNF-3B STI wykonywane są wg norm ASME B1.2 [17], A-A-59158 [90], ASME B18.29.1 [13] i stosowane do sprawdzania otworów gwintowanych całowych przeznaczonych do wkręcania wkładki Helicoil. W badaniach własnych użyto sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno O1 (standardowego materiału do produkcji sprawdzianów) i nowych rozwiązań w postaci sprawdzianów wykonanych ze stali szybko tnącej M-1, węgla spiekane C-2, stali do pracy na zimno z powłoką DLC i stali szybko tnącej z powłoką TiN. Przedmiotowe sprawdziany przedstawione zostały na rysunku 4.2., a rodzaje materiałów z których zostały wykonane zostały przedstawione w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Zestawienie materiałów, z których zostały wykonane sprawdziany gwintowe użyte w badaniach

Rodzaj materiału	Oznaczenie materiału	Producent
Stal narzędziowa do pracy na zimno	O1 wg ASTM A681	Thread Check Inc.
Stal szybko tnąca molibdenowa HSS	M-1 HSS wg ASTM A600	Swanson Tool Manufacturing, Inc.
Węgiel spiekany	C-2, Co 10%, drobnoziarnisty	Thread Check Inc.



Rys. 4.1. Zdjęcie przykładowego sprawdzianu gwintowego trzpieniowego .250-28 UNF-3B STI



Rys. 4.2 Strony PRZECHODNIE sprawdzianów użytych do testów, 1– wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno, 2 – z węglika spiekaneego, 3 – ze stali szybko tnącej, 4 – ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryty powłoką DLC, 5 – ze stali szybko tnącej pokryty powłoką TiN

Sprawdziany gwintowe składają się z strony PRZECHODNIEJ (GO) i NIEPRZECHODNIEJ (NO GO), do badań użyto wyłącznie strony PRZECHODNIEJ (GO) sprawdzianów, ze względu na minimalne zużycie strony nieprzechodniej w trakcie eksploatacji w warunkach przemysłowych. Parametry sprawdzianu gwintowego trzpieniowego .250-28 UNF-3B STI zostały przedstawione w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Parametry sprawdzianu gwintowego trzpieniowego .250-28 UNF-3B STI

Parametr	Strona PRZECHODNIA sprawdzianu		Strona NIEPRZECHODNIA sprawdzianu	
Min. i max. Średnica podziałowa	6,9393 mm	6,9469 mm	6,9875 mm	6,9952 mm
Min. and max. Średnica wewnętrzna	7,5286 mm	7,5413 mm	7,3749 mm	7,3876 mm
Luz wierzchołkowy i zarys gwintu	0,1134 mm	pełny	0,2268 mm	splaszczony
Kąt zarysu gwintu	30° ± 15'		30° ± 15'	

4.3. Charakterystyka materiałów sprawdzianów gwintowych użytych do badań

4.3.1. Stal narzędziowa do pracy na zimno O1

Sprawdziany do badań wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 (ASTM A681) charakteryzują się wysoką (nadeutektoidalną) zawartością węgla oraz małą zawartością pierwiastków stopowych – głównie Mn, Cr, V i W – tabela 4.5. Stal narzędziowa do pracy na zimno stosowana jest do produkcji sprawdzianów gwintowych, gwintowników, narzynek, rozwiertaków i wiertel maszynowych (narzędzi pracujących do temperatury 200°C). Półfabrykaty do produkcji narzędzi są najczęściej w stanie obrobionym cieplnie – hartowane i nisko odpuszczane – tabela 4.6. Mikrostruktura wyrobów ze stali O1 po pełnej obróbce cieplnej składa się z niskoodpuszczonego martenzytu i licznych węglików stopowych typu M_4C_3 , M_2C , $M_{23}C_6$, M_6C (rys. 4.3-4.5).

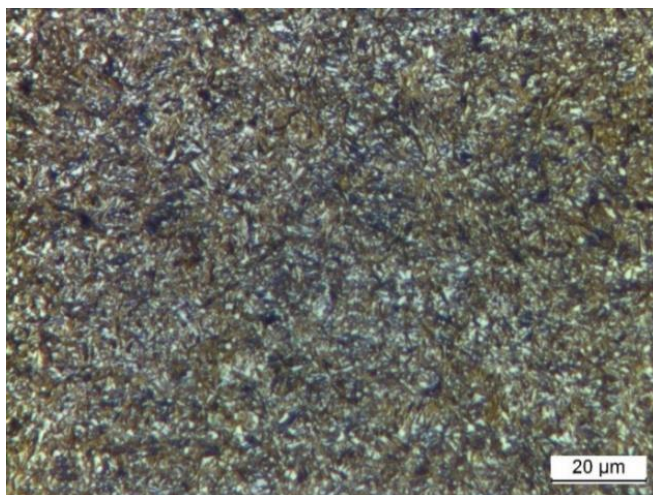
Tabela 4.5. Skład chemiczny stali narzędziowej do pracy na zimno (typ O1) wg ASTM A681 [65]

C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Fe
0.85 – 1.00	1.00 - 1.40	max. 0.030	max. 0.50	0.10 – 0.50	0.40 – 0.70	max. 0.30	0.40 – 0.60	Pozostała zawartość

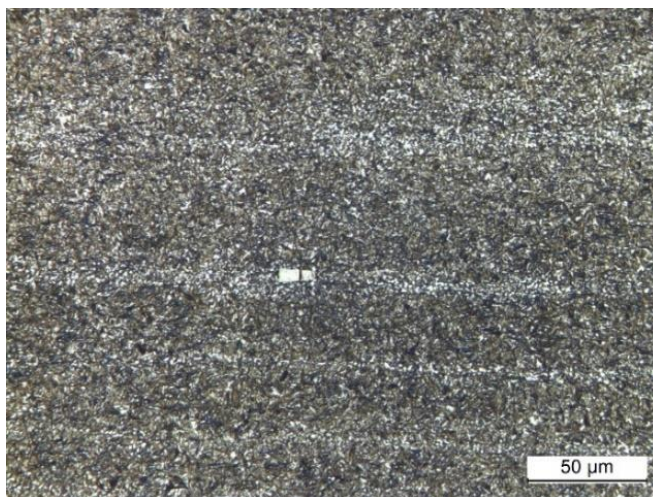
Tabela 4.6. Warunki przeprowadzonej obróbki cieplnej dla stali narzędziowej do pracy na zimno (typ O1) wg ASTM A681 [65]

Podgrzewanie wstępne	Temperatura austenizacji-kąpiel solna	Temperatura austenizacji *	Czas austenizacji	Medium chłodzące	Temperatura odpuszczania	Minimalna twardość
649 ± 14°C	788 ± 5,6°C	802 ± 5,6°C	5 – 15 min	Olej	204°C	59 HRC

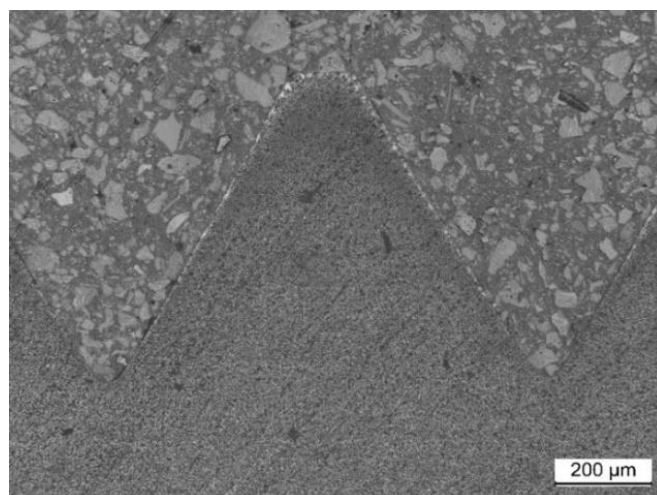
* W atmosferach ochronnych – zapobiegających odwęglaniu powierzchni



Rys. 4.3. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 – przekrój podłużny sprawdzianu. Martenzyt niskoodpuszczony oraz liczne drobne węgliki



Rys. 4.4. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 – przekrój podłużny sprawdzianu. Martenzyt niskoodpuszczony oraz pasmowo ułożone węgliki



Rys. 4.5. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 – przekrój podłużny sprawdzianu

4.3.2. Stal szybko tnąca molibdenowa HSS M-1

Sprawdziany do badań wykonano również ze stali szybko tnącej molibdenowej, typ M-1 (ASTM A600) o wysokiej (euteloidalnej) zawartości węgla oraz większej liczbie pierwiastków stopowych i ich wyższej zawartości w porównaniu do stali narzędziowej O1 – tabela 4.7. Ze stali szybko tnącej typu M1 wytwarza się gwintowniki, wiertła i frezy – przeznaczone do pracy w podwyższonych zakresach temperatury do ok. 600°C. Stosowane są w stanie obrobionym cieplnie – proces ich obróbki cieplnej jest złożony i składa się z etapów wstępnego nagrzewania, właściwego wyżarzania austenitującego w temperaturze ok. 1196°C przez minimum 5 min., procesu hartowania w oleju lub z zastosowaniem kąpeli w solach stopionych oraz kilkukrotnego wysokiego odpuszczania w zakresie do ok. 550-560°C – w celu przemiany austenitu szczytkowego oraz zminimalizowania ryzyka wystąpienia zjawiska kruchości na gorąco. Wysokie stężenie molibdenu również ogranicza czułość na kruche pękanie w temperaturze wysokiego odpuszczania. Mikrostruktura tej stali w stanie obrobionym cieplnie składa się z wysokoodpuszczonego martenzytu oraz licznych węglików stopowych typu MC, M₂C and M₆C [91] (rys. 4.6 – 4.8).

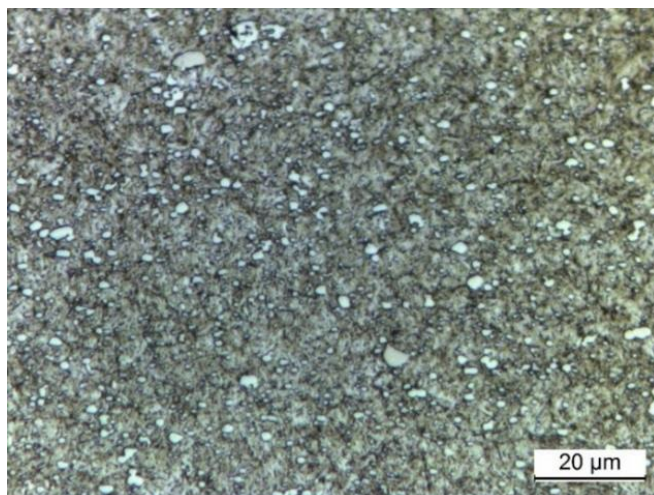
Charakterystykę warunków procesu standardowej obróbki cieplnej wyrobów ze stali szybko tnącej M1 zgodnie z ASTM A600 [68], przedstawiono w tabeli 4.8.

Tabela 4.7. Skład chemiczny stali szybko tnącej molibdenowej (typ M-1) wg ASTM A600 [68]

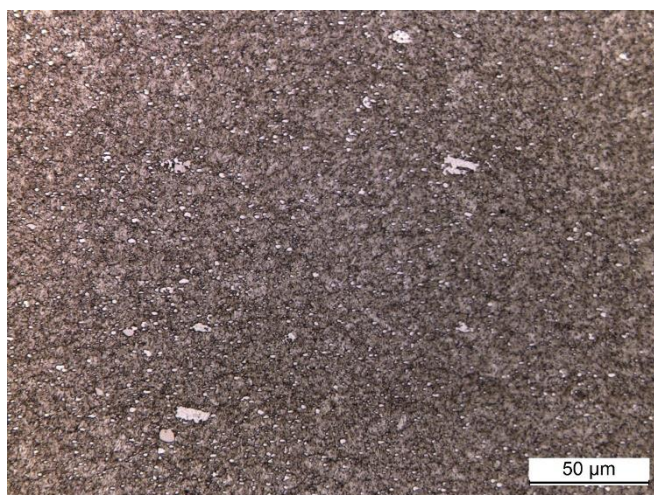
C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Mo	Fe
0.78 – 0.88	0.15 - 0.40	0.03	0.03	0.20 - 0.50	3.50 – 4.00	1.00 - 1.35	1.40 – 2.10	8.20 – 9.20	Pozostała zawartość

Tabela 4.8. Warunki przeprowadzonej obróbki cieplnej dla stali szybko tnącej HSS (typ M-1) wg ASTM A600 [68]

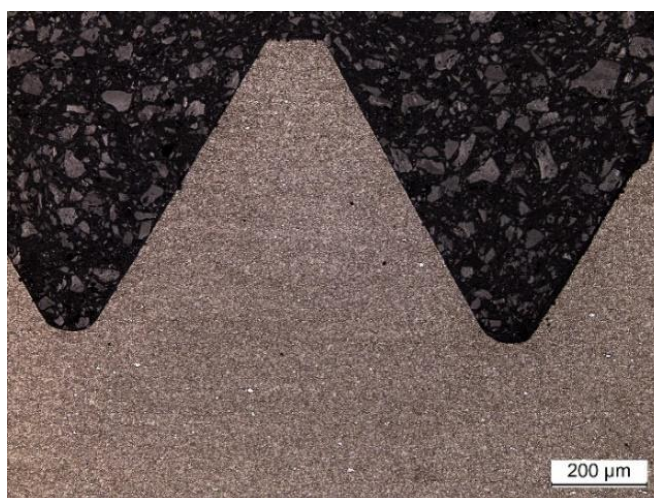
Podgrzewanie wstępne	Temperatura austenizacji- kąpiel solna	Czas austenizacji	Medium chłodzące	Temperatura odpuszczania	Minimalna twardość
732 – 843°C	1196°C	5 min minimum	Olej lub stopiona sól	552°C	64 HRC



Rys. 4.6. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M1 – przekrój podłużny sprawdzianu. Widoczna drobnoziarnista mikrostruktura oraz liczne węgliki stopowe – brak pasmowości [źródło własne]



Rys. 4.7. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M1 – przekrój podłużny sprawdzianu. Widoczna drobnoziarnista mikrostruktura oraz liczne węgliki stopowe – brak pasmowości [źródło własne]



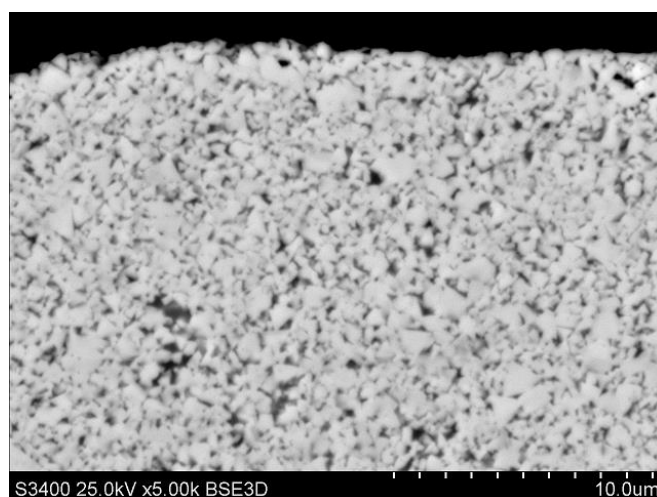
Rys. 4.8. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M1, brak pasmowości węglików – przekrój podłużny sprawdzianu [źródło własne]

4.3.3. Węgiel spiekany C-2, 10% Co

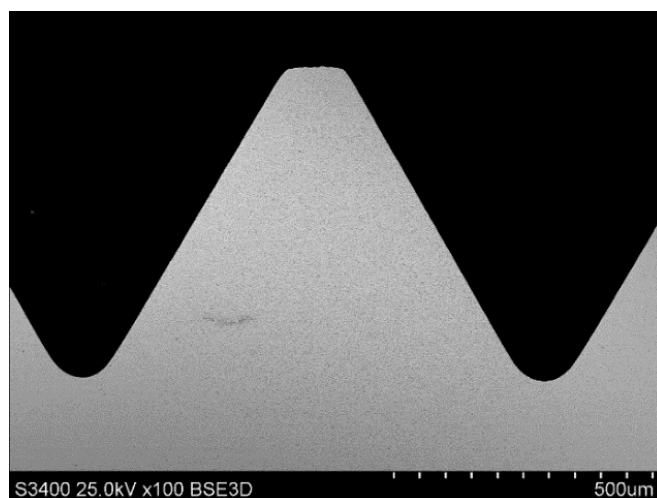
Do badań zastosowano również sprawdziany wykonane z węgla spiekane o oznaczeniu C-2, 10% Co zgodnie z amerykańskim oznaczeniem branżowym. Wyroby z tego materiału stosowane są do produkcji narzędzi skrawających, takich jak noże tokarskie, wiertła i frezy. Wykonywane są metodami metalurgii proszków, z zastosowaniem pras izostatycznych w technologii HIP. Mikrostruktura węgla C-2 jest dwufazowa (rys. 4.9. – 4.10.) – składa się z kryształów fazy WC – w ilości ok. 90% mas. oraz fazy bogatej w kobalt (Co) – w ilości ok. 10% mas. W zależności od producenta węgla spiekane C-2 występują niewielkie różnice w zawartości kobaltu i we właściwościach mechanicznych. Przykładowe, deklarowane przez producenta podstawowe właściwości węgla C-2 zgodnie przedstawiono w tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Parametry węgla spiekane (typ C-2) wg firmy Cennential Carbide

Amerykańskie oznaczenie branżowe	Skład chemiczny procentowo w stosunku do masy	Minimalna twardość	Wytrzymałość na zginanie (psi)	Wielkość ziarna
C-2	90 % WC 10% Co	92,1 HRA	450,000	Drobnoziarnisty



Rys. 4.9. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane C-2 (WC-Co) – przekrój podłużny sprawdzianu [źródło własne]



Rys. 4.10. Mikrostruktura sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane C-2 (WC-Co) – przekrój podłużny sprawdzianu [źródło własne]

4.4. Powłoki przeciwzużyciowe zastosowane do powlekania sprawdzianów gwintowych

W oparciu o wyniki badań własnych prowadzonych w ramach doktoratu wdrożeniowego w firmie Yasa Poland Sp. z o.o., przyjęto w badaniach własnych koncepcję wytworzenia powłok przeciwzużyciowych na powierzchni sprawdzianów gwintowych. Do badań przyjęto następujące rodzaje powłok przeciwzużyciowych:

- DLC Powłoka węglowa podobna do diamentu nakładana metodą PACVD,
- TiN Powłoka z azotku tytanu nakładana metodą Arc-PVD.

Wybór powyższych powłok był uzasadniony faktem, że posiadają udokumentowane badaniami naukowymi właściwości zwiększające odporność na zużycie warstwy wierzchniej pokrytych narzędzi. Kluczowym parametrem przy wyborze rodzaju powłok z dostępnych na rynku była ich odporność na zużycie ściernie, erozyjne i niski współczynnik tarcia. Wybrane powłoki charakteryzują się znaczną wytrzymałością na ścieranie zmniejszają współczynnik tarcia w układzie sprawdzian – przeciwpróbka (element konstrukcyjny samolotu). Powłoka DLC jest reprezentatywną powłoką dla metody wytwarzania powłok w procesach CVD a powłoka TiN jest reprezentatywną dla procesów wytwarzania metodą PVD. Wymienione powłoki są powszechnie stosowane do pokrywania narzędzi skrawających tj. gwintowniki [92, 93]

Dodatkowo niektórzy producenci sprawdzianów gwintowych zaczynają wprowadzać do swojej oferty handlowej sprawdziany pokryte powłoką z azotku tytanu TiN w celu zwiększenia ich odporności na zużycie [63, 20]. Na dostawcę procesu powlekania została wybrana firma Oerlikon Balzers Coating Poland Sp. z o.o. i firma Oerlikon Balzers Coating Sweden AB, ze względu na bardzo duże doświadczenie i pozycje światowego lidera w technologiach powierzchniowych [86].

Rodzaj zastosowanej powłoki przeciwzużyciowej do pokrywania sprawdzianów zależny był od materiału, z którego wykonano sprawdzian gwintowy. Sprawdziany wykonane ze stali szybko tnącej pokryto powłoką TiN ze względu na to, iż temperatura nanoszenia ($< 500^{\circ}\text{C}$) jest niższa niż temperatura odpuszczania materiału (552°C). Ze względu na niższą wartość temperatury procesu osadzania powłoki w porównaniu do temperatury procesu odpuszczania materiału podłoża zmniejszono potencjalne ryzyko zwiększenia objętości materiału podłoża pod wpływem oddziaływania temperatury procesu nakładania powłoki. Sprawdziany wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryto powłoką DLC w temperaturze $180 - 250^{\circ}\text{C}$. Temperatura odpuszczania materiału podłoża wynosi około 204°C , dlatego zachodziło ryzyko przekroczenia wymiarów z powodu zwiększenia objętości materiału (ang. *Dimensional Growth*) podczas procesu osadzania powłoki. W celu eliminacji ryzyka użycia niezgodnych wymiarowo sprawdzianów do testów eksploatacyjnych wszystkie sprawdziany powlekane powłokami TiN i DLC zostały poddane pomiarom metrologicznym w laboratorium Avio-Lab Sp. z o.o. przed i po pokrywaniu w celu potwierdzenia zgodności wymiarowej z wymaganiami. Sprawdziany, które nie spełniły kryteriów nie zostały dopuszczone do badań.

Charakterystykę parametrów powłoki DLC i TiN przedstawiono poniżej.

DLC – Powłoka węglowa podobna do diamentu nakładana metodą PACVD

Powłoka DLC została naniesiona przez firmę Oerlikon Balzers Coating Sweden AB w Halmstad, jest ona znana pod nazwą handlową BALINIT® TRITON. W tabeli 4.10. przedstawiono parametry powłoki diamentopodobnej.

Tabela 4.10. Parametry powłoki BALINIT®TRITON na podstawie deklaracji Oerlikon Balzers Coating [86]

Powłoka	Materiał powłoki	Technologia procesu powlekania	Mikrotwardość H_{IT} (Gpa)	Współczynnik tarcia (na sucho) do stali	Temperatura nanoszenia powłoki
BALINIT®TRITON	a-C:H	PACVD	~15-25	0,1 – 0,2	180 – 250 °C

TiN – Powłoka z azotku tytanu nakładany metodą Arc-PVD

Powłoka TiN została naniesiona przez firmę Oerlikon Balzers Coating Poland Sp. z o.o. w Polkowicach, jest ona znana pod nazwą handlową BALINIT® A. W tabeli 4.11. przedstawiono parametry powłoki z azotku tytanu.

Tabela 4.11. Parametry powłoki BALINIT® A na podstawie deklaracji Oerlikon Balzers Coating [86]

Powłoka	Materiał powłoki	Technologia procesu powlekania	Mikrotwardość H_{IT} (Gpa)	Współczynnik tarcia (na sucho) do stali	Temperatura nanoszenia powłoki
BALINIT® A	TiN	Arc-PVD	30 ± 3	~ 0,6	< 500 °C

W przemyśle stosuje się powłoki BALINIT® nakładając je na narzędzia skrawające warstwą od 0,5 µm do 4 µm, pomimo niewielkiej grubości są one twardsze niż stal. Te cienkowarstwowe powłoki o niskim współczynniku tarcia są wyjątkowo odporne na zużycie oraz obojętne chemicznie. W efekcie, w większości przypadków proces powlekania nie wpływa na geometrię ostrych krawędzi skrawających, jakość powierzchni, w tym parametry struktury geometrycznej i precyzyjne tolerancje produkcyjne [86].

Założono wymaganą, średnią grubości powłok TiN i DLC na ok. 2 µm (co w rezultacie powodowało zwiększenie średnicy podziałowej sprawdzianów o 4 µm) – osadzonych na podłożu sprawdzianów. Rzeczywistą grubość wytworzonych powłok deklarują producenci w Świadectwach Jakości – Oerlikon Balzers – dla wytwarzanej powłoki DLC o założonej grubości 2 µm deklaruje rzeczywistą grubość w zakresie ok. 2-2,5 µm. Natomiast dla wytwarzanej powłoki TiN o założonej grubości 2 µm producent deklaruje rzeczywistą grubość w zakresie ok. 2-3,2 µm. Pomiary grubości nakładanych powłok Arc-PVD i PACVD zostały przeprowadzone przez ich producenta – firmę Oerlikon Balzers – w oddziałach znajdujących się w Polkowicach (powłoka TiN) oraz w Halmstad (powłoka DLC). W celu weryfikacji rzeczywistej grubości wytworzonej powłoki producent w każdym procesie i dla każdego zestawu umieszcza próbkę wzorcową przeznaczoną do badań weryfikujących właściwości powłoki i wykonuje pomiary właściwości mechanicznych np. twardość powłoki, odporność na zarysowanie, a także pomiary grubości prowadzone na próbce płaskiej. Grubość naniesionych powłok dodatkowo weryfikowano podczas badań mikroskopowych w Katedrze Nauki o Materiałach Politechniki Rzeszowskiej.

4.5. Pomiary parametrów geometrycznych

4.5.1. Pomiary średnicy podziałowej z wyznaczeniem niepewności pomiaru

Pomiar średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych trzpieniowych przeprowadzono przy użyciu długościomierza uniwersalnego Precimar ULM 520 S-E firmy Mahr w laboratorium wzorcującym Avio-Lab Sp. z o.o. posiadającym akredytację Polskiego Centrum Akredytacji na wykonywanie wzorcowania sprawdzianów gwintowych trzpieniowych.

Celem badania było wyznaczenie średnicy podziałowej dla strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych .250-28 UNF-3B STI przed rozpoczęciem badań eksploatacyjnych i w ich trakcie. Pomiar średnicy podziałowej jest głównym parametrem stosowanym w przemyśle do określenia zużycia sprawdzianów gwintowych i na podstawie wyników pomiarów sprawdziany są klasyfikowane jako spełniające wymagania metrologiczne lub zużyte.

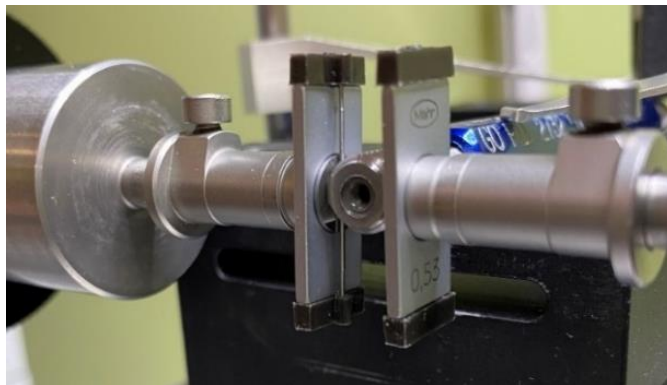
Wszystkie sprawdziany przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych były wzorcowane w celu określenia zgodności średnicy podziałowej z wymaganiami norm. Szczególnie istotne było zweryfikowanie sprawdzianów gwintowych po procesie powlekania w celu potwierdzenia, że nadal są zgodne wymiarowo.

Do pomiarów użyto długościomierza uniwersalnego Precimar ULM 520 S-E firmy Mahr (rys. 4.11.) wraz oprogramowaniem Precimar GMS 100, umożliwiającym automatyczne pomiary średnicy podziałowej z wyznaczeniem odchyłki od normy.

Przed wzorcowaniem sprawdziany były przemywane alkoholem etylowym, gwinty czyszczone twardą szczotką i osuszone sprężonym powietrzem, po przeprowadzeniu czyszczenia sprawdziany były sezonowane w laboratorium każdorazowo min. 2 h przed rozpoczęciem wzorcowania. Pomiary wykonano w klimatyzowanym pomieszczeniu w warunkach temperaturowych (20 ± 1)°C zgodnie z wymaganiami wzorcowania sprawdzianów gwintowych określonych w normie ASME B1.2 [17] Sprawdziany gwintowe trzpieniowe były mierzone metodą trójwałeczkową (rys. 4.12.). Do pomiaru zastosowano wałeczki o średnicy 0,53 mm, najlepiej dopasowana średnica wałeczków (ang. „Best-size” Wires) wg normy ASME B89.1.17 [27] wynosi 0,5237 mm. Zastosowana średnica wałeczków jest najbliższa najlepiej dopasowanej średnicy wałeczków.



Rys. 4.11. Długościomierz Precimar ULM 520 S-E firmy Mahr [źródło własne]

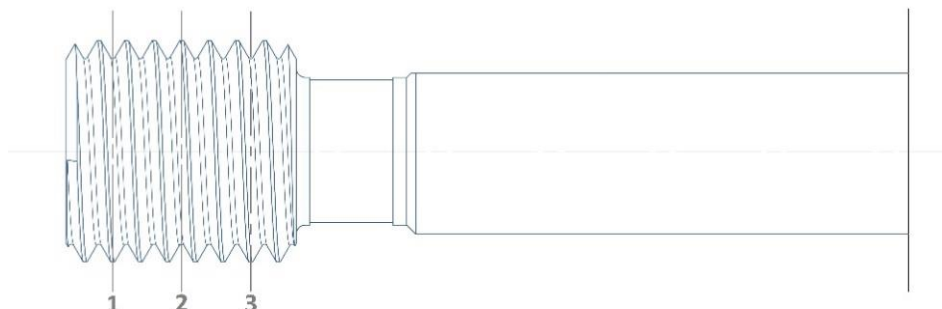


Rys. 4.12. Pomiar strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu trzpieniowego przeprowadzony metodą trójwałeczkową [źródło własne]

Pomiar średnicy podziałowej był przeprowadzony na poszczególnych etapach:

- 1) Przed rozpoczęciem badań eksploatacyjnych sprawdzianów gwintowych trzpieniowych poprzez pomiar sprawdzianów z pokryciem powłoką lub bez pokrycia w celu potwierdzenia zgodności zmierzonej średnicy podziałowej z wymaganiami normy.
- 2) W trakcie badań eksploatacyjnych, po każdorazowym sprawdzeniu 20 sztuk przeciwpróbek danym sprawdzianem weryfikując szybkość zużycia sprawdzianu.

Średnica podziałowa mierzona była w trzech płaszczyznach 1,2,3 (rys. 4.13.), po pomiarze w trzech przekrojach sprawdzian był obracany o 90° i pomiar ponownie przeprowadzany w trzech płaszczyznach (6 pomiarów).



Rys. 4.13. Płaszczyzny pomiaru średnicy podziałowej [źródło własne]

Metoda pomiaru średnicy podziałowej oparta na sześciu pomiarach, jest rekomendowaną metodą pomiarową wg normy IFI-301 [26] dla wzorcowania nowych sprawdzianów gwintowych przed dopuszczeniem ich do użytku. Ze względu na dokładność pomiaru metoda ta została zastosowana w pracach badawczych niniejszego doktoratu w odniesieniu do wszystkich wzorcowanych sprawdzianów.

Uzyskane wyniki pomiarów średnicy podziałowej, zostały porównane z nominalną średnicą podziałową wyliczoną na podstawie normy A-A-59158 [90].

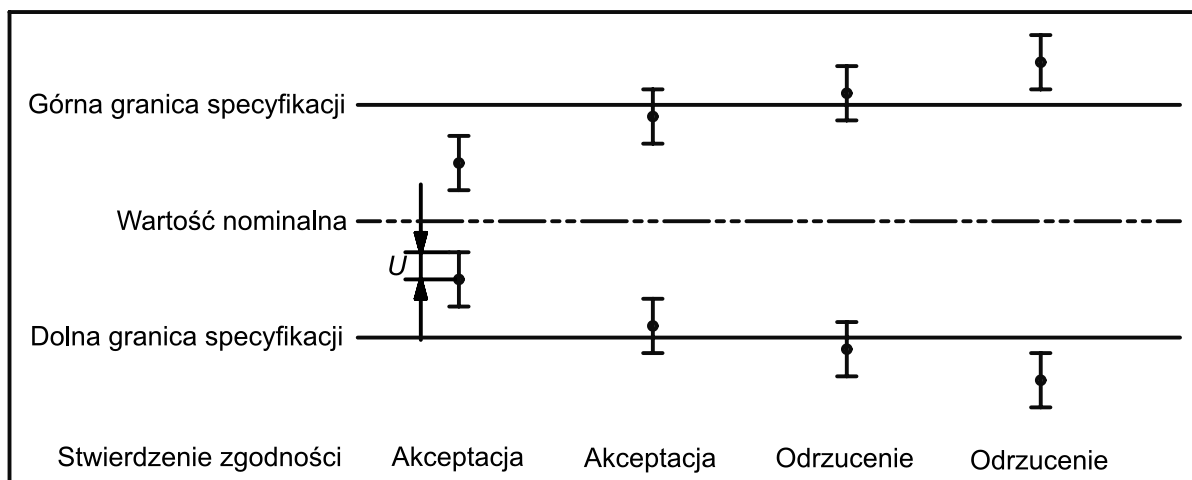
Stwierdzenie zgodności sprawdzianów z wymaganiami norm na podstawie wyników pomiarów średnicy podziałowej odbywało się poprzez zastosowanie binarnego stwierdzenia zgodności – prosta akceptacja (bez uwzględnienia niepewności pomiaru) zgodnie z wytycznym normy ILAC-G8:09 [94] (rys. 4.14.).

Stwierdzenia zgodności są przedstawiane jako:

- Spełnia – wartość zmierzona znajduje się poniżej granicy akceptacji, $AL = TL$,
- Nie spełnia – wartość zmierzona znajduje się powyżej granicy akceptacji, $AL = TL$.

Granica akceptacji (AL) – wyspecyfikowana górna lub dolna granica dopuszczalnych wartości wielkości zmierzonych

Granica tolerancji (TL) (granica specyfikacji) – wyspecyfikowana górna lub dolna granica dopuszczalnych wartości właściwości.



$U = 95\%$ rozszerzona niepewność pomiaru

Rys. 4.14. Graficzne przedstawienie binarnego stwierdzenia zgodności – prosta akceptacja [94]

Spójność pomiarowa podczas pomiarów średnicy podziałowej była zachowana, wyniki wzorcowania zostały odniesione do międzynarodowego wzorca pomiarowego długości poprzez zastosowanie długościomierza poziomego firmy Mahr Precimar ULM 520 S-E, nr fabryczny 1469/13.

Niepewność pomiaru średnicy podziałowej

Laboratorium wzorcujące Avio-Lab Sp. z o.o. dla każdego wykonanego wzorcowania sprawdzianu gwintowego określało niepewność pomiaru, ze względu na kluczowy charakter pomiarów średnicy podziałowej i prawidłową interpretację wyników, w ramach badań własnych przyjęto budżet niepewności oparty na budżecie Avio-Lab Sp. z o.o. zmodyfikowany o obliczenie rzeczywistych odchyłek podziałki gwintu w celu uzyskania dokładniejszych wyników pozwalających na precyzyjniejszą analizę i ocenę rozrzutów wyników pomiaru.

Średnicę podziałową sprawdzianu trzpieniowego gwintowego wyznacza się metodą pośrednią w oparciu o równanie pomiaru:

$$d_2 = M + M(\alpha_e \theta_e - \alpha_m \theta_m) - \frac{1}{2} \left(d_{w1} + \frac{1}{2} (d_{w2} + d_{w3}) \right) \left(1 + \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right) + \frac{P}{2} \operatorname{ctg}(\alpha/2) + p_1 + p_2 \quad (1)$$

gdzie:

M – długość pomiarowa mierzona prostopadle do osi gwintu,

α_e – współczynnik rozszerzalności cieplnej długościomierza,

θ_e – odstępstwo temperatury długościomierza od temperatury odniesienia (20°C),

α_m – współczynnik rozszerzalności cieplnej sprawdzianu,

θ_m – odstępstwo temperatury sprawdzianu od temperatury odniesienia (20°C),

P – podziałka gwintu,

α – kąt zarysu gwintu,

d_{w1}, d_{w2}, d_{w3} – średnice zaobserwowane wałeczków,

p_1 – poprawka na skręcenie wałeczków w brzdach gwintu,

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

Zastępczą średnicę wałeczka d_w oblicza się ze wzoru:

$$d_w = \frac{1}{2} \left[d_{w1} + \frac{1}{2} (d_{w2} + d_{w3}) \right] \quad (2)$$

Szacuje się odstępstwa temperatur θ_e i θ_m jako zerowe, przy czym ich niepewności są różne od zera.

Opis wielkości wejściowych

Opis wielkości wejściowych przedstawiono na podstawie sprawdzianu gwintowego trzpieniowego PRZECHODNIEGO .250-28 UNF-3B STI wg normy ASME B1.2 ; A-A-59158.

Parametry sprawdzianu:

- średnica podziałowa $d_2 = 6,9431 \pm 0,0038$ mm,
- podziałka 1/28 cala $P = 0,9071$ mm,
- kąt zarysu gwintu $\alpha = 60^\circ$,
- tolerancja podziałki $T_p = 7,6$ μ m,
- połowa tolerancji każdego kąta boku zarysu pełnego $T_{\alpha1}/2 = \pm 15'$,
- średnica zunifikowana wałeczków $d_w = 0,530$ mm (najlepiej dopasowana średnica wg normy ASME B89.1.17 wynosi 0,5237 mm).

Długość pomiarowa mierzona prostopadle do osi gwintu $M = 7,7474$ mm

Nacisk pomiarowy: $Q = 1,5$ N

Współczynniki rozszerzalności cieplnej wraz z odchyłkami granicznymi:

α_m (sprawdzian gwintowy, wałeczki pomiarowe – stal) = $(11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$ K

α_e (wzorzec inkrementalny długościomierza – szkło) = $(8 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$ K

Równanie niepewności standardowej złożonej $u(d_2)$

Zależność, z której wyznacza się niepewność standardową złożoną, ma postać:

$$u_c^2(d_2) = c_M^2 u^2(M) + c_{\alpha_e}^2 u^2(\alpha_e) + c_{\theta_e}^2 u^2(\theta_e) + c_{\alpha_m}^2 u^2(\alpha_m) + c_{\theta_m}^2 u^2(\theta_m) + c_{d_w}^2 u^2(d_w) + c_{d_w}^2 u^2(d_w) + c_P^2 u^2(P) + c_\alpha^2 u^2(\alpha) + c_{p_1}^2 u^2(p_1) + c_{p_2}^2 u^2(p_2) \quad (3)$$

Współczynniki wrażliwości:

$$c_M = \frac{\partial d_2}{\partial M} = 1 + \alpha_e \theta_e - \alpha_e \theta_e = 1$$

$$c_{\alpha_e} = \frac{\partial d_2}{\partial \alpha_e} = M \theta_e = 0$$

$$c_{\theta_e} = \frac{\partial d_2}{\partial \theta_e} = M \alpha_e$$

$$c_{\alpha_m} = \frac{\partial d_2}{\partial \alpha_m} = -M \theta_e = 0$$

$$c_{\theta_m} = \frac{\partial d_2}{\partial \theta_m} = -M \alpha_m$$

$$c_{d_w} = \frac{\partial d_2}{\partial \alpha} = - \left(1 + \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right) = -3$$

$$c_P = \frac{\partial d_2}{\partial P} = \frac{1}{2} \operatorname{ctg}(\alpha/2) = 0,86603$$

$$c_\alpha = \frac{\partial d_2}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2)} (d_w - d_{D0}) = 1,73205(d_w - d_{D0}) \quad , \text{gdzie } d_{D0} = \frac{P}{2 \cos(\alpha/2)} = 0,57735 \cdot P$$

$$c_{p1} = \frac{\partial d_2}{\partial p_1} = 1$$

$$c_{p2} = \frac{\partial d_2}{\partial p_2} = 1$$

Ostatecznie równanie (3) przyjmuje postać:

$$u_c^2(d_2) = u^2(M) + M^2 \alpha_\varepsilon^2 u^2(\theta_\varepsilon) + M^2 \alpha_m^2 u^2(\theta_m) + 9u^2(d_w) + 0,75u^2(P) + 0,25385\Delta^2 u^2(\alpha) + u^2(p_1) + u^2(p_2) \quad (4)$$

Niepewność standardowa $u(M)$ pomiaru wymiaru M

Niepewność rozszerzoną pomiaru długościomierzem ULM SE-520 oblicza się ze wzoru (dla odstępstwa temperatury długościomierza od temperatury odniesienia wynoszącego 1°C): $U = (0,09 + 0,5L/1000) \mu\text{m}$, gdzie L w mm. $L = M = 7,7474$ mm, stąd $U = 0,094 \mu\text{m}$. Zakłada się normalny rozkład błędów.

$$u(M) = \frac{U}{2} = \frac{0,094 \mu\text{m}}{2} = 0,047 \mu\text{m} \quad (5)$$

Niepewność standardowa $u(d_w)$ pomiaru średnicy wałeczków

Za niepewność pomiaru przyjmuje się odchyłki graniczne średnic wałeczków $\pm 0,50 \mu\text{m}$ zgodnie z deklaracją producenta wałeczków – firmy Mahr. Zakłada się rozkład normalny błędów.

$$u(d_w) = \frac{U}{2} = \frac{0,50 \mu\text{m}}{2} = 0,25 \mu\text{m} \quad (6)$$

Niepewność standardowa $u(P)$ pomiaru podziałki gwintu

Podziałkę zmierzono metodą stykową za pomocą stacjonarnego stanowiska do pomiaru konturów Mahr MarSurf XC 20. Pomiar podziałki wykonano na każdym zwoju gwintu, powtórzono po obrocie sprawdzianu o 180° i obliczono średnią arytmetyczną z uzyskanych wyników (tabela 4.12.).

Tabela 4.12. Zestawienie wyników pomiarów odchyłek podziałki

Zwój gwintu i	Średnia arytmetyczna obliczona z wyników pomiaru podziałki	Odchyłka podziałki E_p , μm	Odchyłka sumaryczna podziałki, μm
0 – 1	0,9065	0,0	0
1 – 2	0,9060	-0,5	-0,50
2 – 3	0,9068	+0,3	-0,20
3 – 4	0,9070	+0,5	+0,30
4 – 5	0,9069	+0,4	+0,7
5 – 6	0,9068	+0,3	+1,00
6 – 7	0,9061	-0,4	+0,60
7 – 8	0,9072	+0,7	+1,30
8 – 9	0,9062	-0,3	+1,00
9 – 10	0,9061	-0,4	+0,60
10 – 11	0,9064	-0,1	+0,50
11 – 12	0,9061	-0,4	+0,10

Odchyłka średnia podziałki wynosi:

$$\delta P_{sr} = \frac{\delta P_l}{\text{liczba zwojów}} = \frac{0,1\mu\text{m}}{12} = 0,008 \mu\text{m} \quad (7)$$

$$P = P_{nom} + \delta P_{sr} = 0,9071 + 0,000008 \text{ mm} = 0,9071 \text{ mm} \quad (8)$$

Błędy graniczne stacjonarnego stanowiska do pomiaru konturów MarSurf XC 20 są określone przez producenta Mahr [95]: $MPE_k = \pm(2,5+L/100) \mu\text{m}$, gdzie $L = P$.

$$MPE_K = \pm(2,5 + P/100)\mu\text{m} = \pm\left(2,5 + \frac{0,9071}{100}\right)\mu\text{m} = \pm 2,51 \mu\text{m} \quad (9)$$

Niepewność standardowa błędów granicznych stacjonarnego stanowiska do pomiaru konturów. Zakłada się prostokątny rozkład błędów:

$$u(MPE_K) = \frac{MPE_K}{\sqrt{3}} = \frac{2,51 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 1,45 \mu\text{m}$$

Niepewność standardowa pomiaru podziałki:

$$u(P) = u(MPE_K) = 1,45 \mu\text{m} \quad (10)$$

Niepewność standardowa $u(\alpha)$ pomiaru kąta gwintu

Za niepewność pomiaru przyjmuje się odchyłki graniczne kąta. Zakłada się rozkład prostokątny błędów.

$$u(\alpha) = \frac{\sqrt{2} \cdot T_{\alpha 1/2}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 15'}{\sqrt{3}} = 12,25' \quad (11)$$

Niepewność standardowa $u(p_1)$ wyznaczenia poprawki p_1

Poprawka jest liczona ze wzoru dokładnego przez oprogramowanie długościomierza, w związku z tym $u(p_1) = 0$. Zakłada się prostokątny rozkład błędów.

Niepewność standardowa $u(p_2)$ wyznaczenia poprawki p_2

Poprawka na odkształcenie sprężyste została wyznaczona z niepewnością rozszerzoną $\pm 10\%$ wartości poprawki p_2 , nacisk pomiarowy $Q = 1,5 \text{ N}$. Zakłada się prostokątny rozkład błędów:

$$p_2 = 1,205 \frac{\sqrt[3]{Q^2}}{\sqrt[4]{d_2^3 \sqrt{\frac{d_w}{2} \left(1 + \frac{d_w}{d_2}\right)}}} = 1,205 \frac{\sqrt[3]{1,5^2}}{\sqrt[4]{6,9431^3 \sqrt{\frac{0,530}{2} \left(1 + \frac{0,530}{6,9431}\right)}}} = 1,205 \frac{1,3104}{\sqrt[4]{6,9431^3 \sqrt{0,2852}}} = 1,08 \mu\text{m} \quad (12)$$

$$U = \pm 0,1 \cdot |A_2| = \pm 0,1 \cdot 1,08 \mu\text{m} = \pm 0,108 \mu\text{m} \quad (13)$$

$$u(p_2) = \frac{U(p_2)}{\sqrt{3}} = \frac{0,108 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,06 \mu\text{m} \quad (14)$$

Niepewność standardowa $u(\theta_e)$ odstępstwa temperatury długościomierza od temperatury odniesienia

Zgodnie z warunkami temperaturowymi $U = 1^\circ\text{C}$. Zakłada się prostokątny rozkład błędów:

$$u(\theta_e) = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,58^\circ\text{C} \quad (15)$$

Niepewność standardowa $u(\theta_m)$ odstępstwa sprawdzianu od temperatury odniesienia

Zgodnie z warunkami temperaturowymi $U = 1^\circ\text{C}$. Zakłada się prostokątny rozkład błędów:

$$u(\theta_m) = u(\theta_e) = 0,58^\circ\text{C} \quad (16)$$

Budżet niepewności pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego trzpieniowego .250-28 UNF-3B STI opracowany w oparciu o poszczególne niepewności składowe przedstawia tabela 4.13.

Tabela 4.13. Budżet niepewności

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w niepewności złożonej $u_i(y)$
M	7,7474	0,047 μm	Normalny	1,0	0,047 μm
θ_e	0° C	0,58 °C	Prostokątny	0,06 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	0,04 μm
θ_m	0° C	0,58 °C	Prostokątny	0,09 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	0,05 μm
d_w	0,530 mm	0,25 μm	Normalny	-3,0	-0,75 μm
P	0,9071 mm	1,45 μm	Prostokątny	0,86603	1,26 μm
α	60°	12,25'	Prostokątny	0,011	0,00 μm
p_1	0	0 μm	Prostokątny	1,0	0,00 μm
p_2	0,00108 mm	0,06 μm	Prostokątny	1,0	0,06 μm
d_2	6,9431 mm				1,47 μm

Niepewność standardowa

$$u_c(d_2) = 1,47 \mu\text{m} \quad (17)$$

Niepewność rozszerzona

Niepewność rozszerzona przy prawdopodobieństwie rozszerzenia 95% i współczynnika rozszerzenia $k = 2$ wynosi:

$$U = k u_c(d_2) = 2 \cdot 1,47 \mu\text{m} = 2,94 \mu\text{m} \approx 3,0 \mu\text{m} \quad (18)$$

Wynik pomiaru wraz z niepewnością rozszerzoną

Dla strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego trzpieniowego .250-28 UNF-3B STI otrzymano:

$$d_2 = (6,9431 \pm 0,0030) \text{ mm}$$

$$k=2$$

Niepewność rozszerzona U stanowi 39,5% tolerancji średnicy podziałowej sprawdzianu.

Metody pomiarowe oparte na pomiarach przy użyciu długościomierza stosowane w laboratoriach z zakresu długości i kąta deklarują zbliżoną niepewność pomiaru. Laboratorium akredytowane Arkom (nr akredytacji AP 154) przy pomiarze sprawdzianu $\frac{1}{4}$ -28 UNF-3B STI deklaruje niepewność 4,2 μm [96,97,98,99].

4.5.2. Pomiary chropowatości

Pomiary chropowatości powłok przeprowadzono przy użyciu mikroskopu różnicowania ogniskowego InfiniteFocus G4 firmy Alicona, będącego na wyposażeniu Katedry Techniki Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej.

Pomiary chropowatości powierzchni przeprowadzono w celu oceny struktury geometrycznej sprawdzianów gwintowych powlekanych powłokami przeciwzużyciowymi i bez pokrycia. W ramach badań wyznaczono parametry chropowatości 2D i 3D.

Na podstawie analizy danych literaturowych przyjęto, że chropowatość powłoki jest kluczowym parametrem wpływającym na zużycie sprawdzianu w przypadku węzła trącego sprawdzian – element konstrukcyjny samolotu. Im niższe wartości parametrów chropowatości tym mniejszy efekt tarcia i zużycia w trakcie eksploatacji.

Pomiary przeprowadzono przy użyciu mikroskopu różnicowania ogniskowego InfiniteFocus G4 firmy Alicona (rys. 4.16.) wykorzystującego do uzyskania obrazu światło widzialne, z zastosowaniem obiektywu x50. Pionowa rozdzielczość wynosiła 100 nm, a wielkość piksela – 176 nm x 176 nm. Ze względu na rozmiar gwintu zastosowanie metody stykowej przy użyciu dostępnego sprzętu pomiarowego nie było możliwe, więc została zastosowana optyczna metoda pomiaru.

Na podstawie danych literaturowych do oceny struktury geometrycznej powierzchni wybrano parametry chropowatości 2D i 3D [100] z których dla parametrów 2D wyznaczano:

- Ra (średnia arytmetyczna wartości bezwzględnych rzędnych),
- Rz (największa wysokość profilu).

Natomiast z grupy parametrów chropowatości 3D wyznaczono następujące parametry:

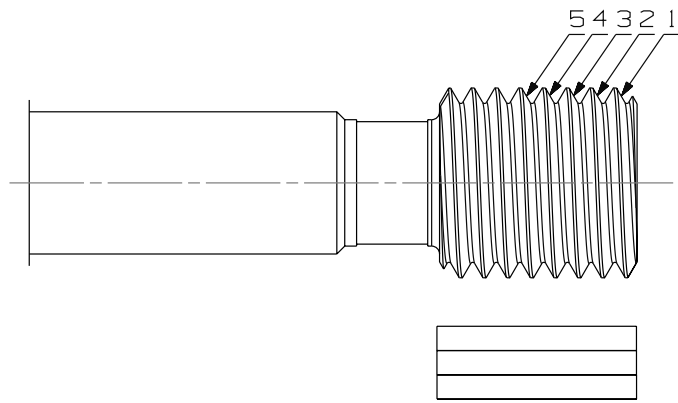
- Sa (średnia arytmetyczna wysokość powierzchni),
- Sdr (współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni),
- Sku (współczynnik nachylenia powierzchni),
- Ssk (współczynnik asymetrii powierzchni).

Pomiary przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm: PN-EN ISO 21920-2 [101] i PN-EN ISO 25178-2 [102].

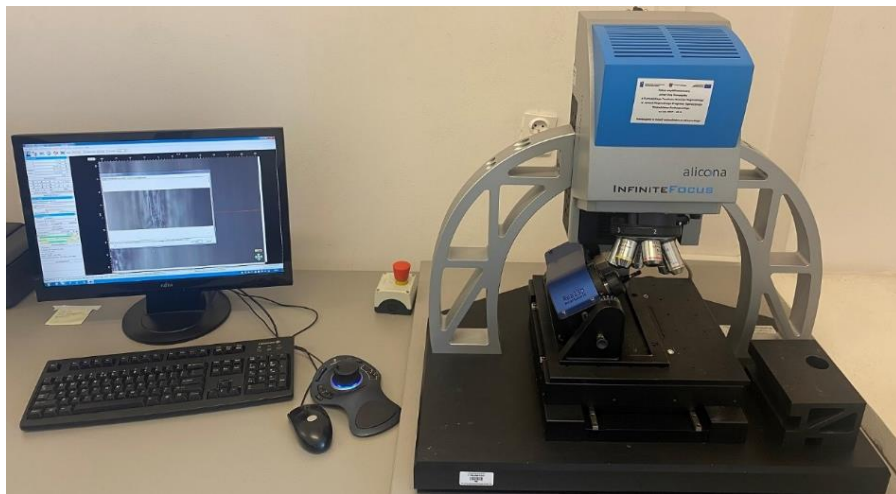
Do pomiarów parametrów chropowatości wybrano następujące strony PRZECHODNIE sprawdzianów:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno pokryty powłoką przeciwzużyciową DLC
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybkoobrotowej pokryty powłoką przeciwzużyciową TiN
- .250-28 UNF-3B STI wykonany z węgla spiekanego
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybkoobrotowej HSS

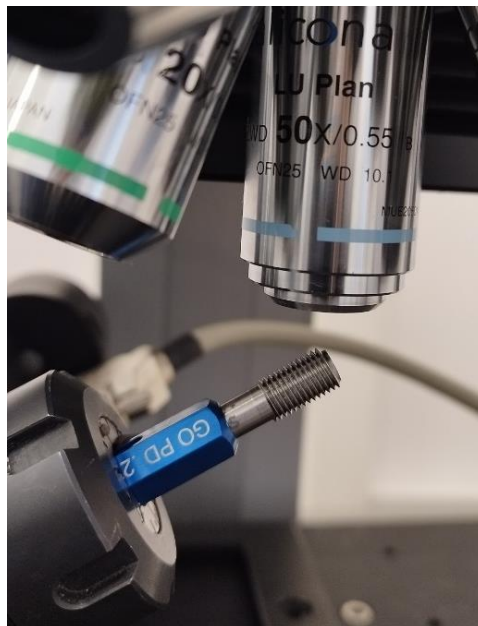
Pomiary zostały przeprowadzone na pierwszych pięciu zwojach gwintu poprzez pomiar parametrów chropowatości boków zarysu gwintu (rys. 4.15. i rys. 4.17.). W przypadku parametrów 2D na każdej płaszczyźnie pomiarowej dokonano pomiaru w 3 odcinkach oddalonych o siebie o równą odległość (rys. 4.15.).



Rys. 4.15. Schemat obrazujący sposób przeprowadzenie pomiarów parametrów 2D i 3D chropowości [źródło własne]



Rys. 4.16. Mikroskop różnicowania ogniskowego InfiniteFocus G4 firmy Alicona [źródło własne]



Rys. 4.17. Pomiary chropowości powierzchni sprawdzianu gwintowego trzpieniowego [źródło własne]

4.6. Badania morfologii powierzchni i mikrostruktury sprawdzianów gwintowych

Obserwacje makro i mikroskopowe na powierzchni i na przekrojach sprawdzianów nowych i po testach – bez powłok oraz z powłokami przeciwzużyciowymi realizowano w Katedrze Nauki o Materiałach i Uczelnianym Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego – jednostce Politechniki Rzeszowskiej posiadającej akredytację PCA oraz w Machinefish Materials & Technologies Sp. z o.o., przy zastosowaniu technik skaningowej mikroskopii elektronowej oraz mikroskopii świetlnej.

4.6.1. Obserwacje powierzchni sprawdzianów gwintowych

Obserwacje makro i mikroskopowe prowadzono w celu analizy morfologii powierzchni materiałów sprawdzianów nowych bez powłok i z naniesionymi powłokami przeciwzużyciowymi. Prowadzono analizę porównawczą stanu morfologii powierzchni sprawdzianów nowych ze stanem powierzchni sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych, a także ocenę stopnia zużycia ich warstwy wierzchniej oraz wytworzonych na ich podłożu powłok.

Badania makroskopowe prowadzono w zakresie powiększeń od ok. 8 do ok. 50x, natomiast badania mikroskopowe w zakresie powiększeń powyżej 50x do ok. 200x prowadzono jednocześnie przy użyciu optycznego mikroskopu optycznego VHX-6000 firmy Keyence (wraz z dedykowanym oprogramowaniem), a także przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) S3400N firmy Hitachi w zakresie powiększeń od ok. 8 do ok. 50x, który został użyty do badania mikroskopowego w zakresie powiększeń >50x (rys. 4.18.).

Do badań wybrano strony PRZECHODNIE następujących sprawdzianów:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno pokryty powłoką przeciwzużyciową DLC – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybko tnącej pokryty powłoką przeciwzużyciową TiN – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),
- .250-28 UNF-3B STI wykonany z węgla spiekane go – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybko tnącej HSS – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),



Rys. 4.18. Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) model S3400N firmy Hitachi [źródło własne]

Obserwacje SEM – powierzchni prowadzono w trybie elektronów wtórnych SE (ang. *Secondary Electrons Mode*) oraz w trybie elektronów wstecznie rozproszonych BSE (ang. *Backscattered Electrons Mode*) – umożliwiającym wstępną ocenę różnic składu chemicznego w poszczególnych mikroobszarach. Podczas obserwacji SEM prowadzono jednocześnie w wybranych mikroobszarach półilościową analizę składu chemicznego metodą spektroskopii z dyspersją energii promieniowania rentgenowskiego (EDS). Podczas analizy przy użyciu oprogramowania Noran przeliczono stechiometrycznie zawartość węgla, tlenu i azotu występujących w związkach takich jak azotki, tlenki czy powłoka węglowa typu DLC.

Obserwacje makro- i mikroskopowe SEM stron PRZECHODNICH sprawdzianów nowych i sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych prowadzono na ich powierzchni bocznej oraz stosując tryb obserwacji w rzucie wzdłuż osi sprawdzianu z zastosowaniem jednokierunkowego pochylenia (ang. *tilt*) stolika roboczego o wartość kąta ok. 35°.

Do badań wybrano strony PRZECHODNIE następujących sprawdzianów:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno pokryty powłoką przeciwzużyciową DLC – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybko tnącej pokryty powłoką przeciwzużyciową TiN – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany z węgla spiekane go – nowy i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybko tnącej HSS – i po zakończeniu testów eksploatacyjnych),

4.5.3. Obserwacje mikroskopowe na przekrojach sprawdzianów i kolektorów

Obserwacje mikrostruktury i ocenę morfologii składników fazowych materiału podłoża sprawdzianów gwintowych wykonanych ze stali szybko tnącej i ze stali do pracy na zimno prowadzono przy zastosowaniu mikroskopu świetlnego firmy Leica DMI3000M (rys. 4.19.) wyposażonego w aparat do cyfrowej rejestracji obrazu oraz oprogramowanie Leica Application Suite LAS do jego przetwarzania oraz przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) S3400N firmy Hitachi (rys. 4.18.) wyposażonego w spektrometr UltraDry EDS firmy Thermo Scientific do analizy składu chemicznego wraz z oprogramowaniem Noran.

Obserwacje mikroskopowe prowadzono w celu oceny mikrostruktury dla poszczególnych materiałów, a także oceny wpływu rodzaju i metody osadzania powłoki na zmianę mikrostruktury w strefie przypowierzchniowej. Zgłady metalograficzne do badań wykonano według poniższej metodyki.

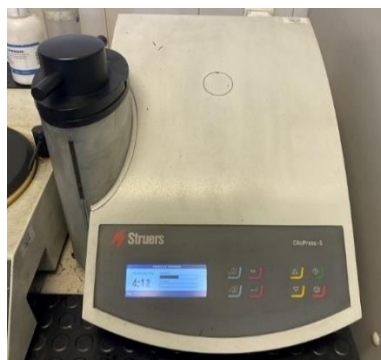
Próbki przecięte za pomocą drążarki elektro-iskrowej firmy ZapBP lub za pomocą przecinarki precyzyjnej Accutom-50 firmy Struers (rys. 4.20.) poddawano procesowi mycia w myjce ultradźwiękowej w alkoholu izopropylowym przez 10 minut. Wyszuszone próbki inkludowano na gorąco w prasie hydraulicznej CitoPress-5 firmy Struers (rys. 4.21.) w temperaturze 180°C, przy ciśnieniu 125 bar i w czasie 6 min, w żywicy fenolowej elektroprzewodzącej Polyfast firmy Struers – przeznaczonej do badań SEM (rys. 4.22.).



Rys. 4.19. Mikroskop świetlny DMI3000M firmy Leica [źródło własne]



Rys. 4.20. Przecinarka precyzyjna Accutom-50 firmy Struers [źródło własne]



Rys. 4.21. Prasa hydrauliczna CitoPress-5 firmy Struers [źródło własne]



Rys. 4.22. Zainkludeowane próbki sprawdzianów [źródło własne]

Zgłady metalograficzne wykonane ze sprawdzianów gwintowych ze stali narzędziowej O1, stali szybko tnącej M-1, również z wytworzonymi powłokami TiN i DLC, a także z korpusów (przeciwpróbek) wykonanych ze stali 15-5 PH, stopu tytanu Ti-6Al-4V oraz stopu aluminium 7075, szlifowano przy użyciu szlifierko-polerki ręcznej LaboPol-25 (rys. 4.23.), szlifierko-polerki półautomatycznej Tegrapol-25 z głowicą TegraForce-5 firmy Struer (rys. 4.24.), a także szlifierko-polerki półautomatycznej MetaServ® 250 z głowicą Vector Power Head firmy Buehler na wodnych papierach ściernych firmy Struers, stosując rozmiary ziaren 120, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200 i 2400. Ze względu na bardzo dużą twardość sprawdzianów wykonanych z węgla spiekanego WC-Co próbki te szlifowano przy użyciu specjalnych tarcz szlifierskich Piano 80, 120, 220, 500, 1000 i 2000 firmy Struers. Wyszlifowane zgłady polerowano na bawełnianych płótnach polerskich typu MD-Mol i MD-NAP oraz przy użyciu zawieszin diamentowych o frakcji polikrystalicznej typu DP-P o rozmiarze ziarna 9, 6 i 3µm. Na każdym etapie szlifowania i polerowania powierzchnię zgładów myto przy użyciu mydlin i wody demineralizowanej, po czym przepłukiwano przy użyciu alkoholu etylowego osuszając sprężonym powietrzem.

W celu ujawnienia mikrostruktury sprawdzianów wykonanych ze stali szybko tnącej HSS oraz stali narzędziowej do pracy na zimno zastosowano trawienie chemiczne zgładów wypolerowanych przy użyciu odczynnika „Nital” o stężeniu 5%, składającego się z 5 cm³ HNO₃ 65% cz.d.a. dodanego do 95 cm³ C₂H₅OH cz.d.a. Trawienie zostało przeprowadzone zgodnie z normą ASTM E407-07 oraz w oparciu o ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures. Zgłady z węgla spiekanego WC-Co nie były poddawane trawieniu i były obserwowane bezpośrednio na wypolerowanych zgładach za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

Prowadzono również obserwacje mikroskopowe i charakterystykę stanu mikrostruktury materiału przeciwpróbek wykonanych ze stali 15-5 PH, stopu tytanu Ti-6Al-4V oraz ze stopu aluminium 7075.

W celu ujawnienia mikrostruktury materiału przeciwpróbek wypolerowane zgłady metalograficzne wykonane z różnych stopów metali trawiono za pomocą następujących odczynników i wg przyjętych procedur:

- zgład kolektora ze stali 15-5 PH trawiono 15 sekund, przez pocieranie odczynnikiem Marble o składzie: 10 g CuSO₄, 50 cm³ HCl – 36% cz.d.a., 50 cm³ wody destylowanej,
- zgład kolektora ze stopu tytanu Ti-6Al-4V trawiono 10 sekund, przez nałożenie odczynnika Krolla o składzie: 2 cm³ HF, 6 cm³ HNO₃, 92 cm³ wody destylowanej,
- zgład kolektora ze stopu aluminium 7075 trawiono 5 sekund, przez zanurzenie i pocieranie odczynnikiem Kellera o składzie: 2 cm³ HF, 3 cm³ HCl 36% cz.d.a., 5 cm³ HNO₃ 65% cz.d.a., 190 cm³ wody destylowanej.



Rys. 4.23. Szlifierko-polerka ręczna LaboPol-25 firmy Struers [źródło własne]



Rys. 4.24. Szlifierko-polerka półautomatyczna Tegrapol-25 z głowicą TegraForce-5 firmy Struers [źródło własne]

Zgłady metalograficzne do badań mikroskopowych wykonano z następujących sprawdzianów:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybko tnącej HSS,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany z węgla spiekanego.

Wykonano również zgłady metalograficzne z próbek materiałów z następujących kolektorów hydraulicznych:

- modułu autopilota samolotu Boeing 737 wykonany ze stopu aluminium 7075,
- hamulca samolotu Airbus A350 wykonany ze stopu tytanu Ti-6Al-4V,
- OB spoileru samolotu Boeing Dreamliner 787 wykonany ze stali nierdzewnej 15-5 PH.

Obserwacje mikroskopowe SEM prowadzono również na przekrojach w kierunku wzdłużnym sprawdzianów nowych i sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych.

W tym celu sprawdziany przecięto wzdłuż ich osi przy użyciu drążarki drutowej elektroiskrowej firmy ZapBP, lecz zaniechano tej metody, ponieważ stwierdzono zbyt dużą degradację przeciętego materiału podłoża i powłoki w postaci głębokich wżerów erozyjnych, spowodowanych intensywnymi wyładowaniami elektrycznymi, uszkadzających naniesioną uprzednio powłokę, dlatego proces cięcia realizowano przy użyciu mechanicznej przecinarki precyzyjnej Accutom-50 firmy Struers (rys. 4.20.) z zastosowaniem tarczy 50A13 ze spiekanego korundu oraz tarczy z nasypem diamentowym MOD13 firmy Struers. Zgłady metalograficzne sprawdzianów z powłokami wykonano następnie zgodnie z wcześniej opisaną metodyką.

Pomiary grubości oraz analizę składu chemicznego EDS (SEM) powłok DLC i TiN wytworzonych na powierzchni sprawdzianów gwintowych prowadzono podczas obserwacji na przekrojach nietrawionych zgładów metalograficznych przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) S3400N firmy Hitachi wraz z wbudowanym oprogramowaniem, a także weryfikowano za pomocą oprogramowania CarlZeiss AxioVision.

4.7. Badania odporności na zużycie

4.7.1. Testy eksploatacyjne

Testy eksploatacyjne sprawdzianów gwintowych trzpieniowych przeprowadzono przy użyciu części lotniczych w Yasa Poland Sp. z o.o. w warunkach przemysłowych.

Celem badań było określenie szybkości zużycia sprawdzianów gwintowych trzpieniowych w warunkach przemysłowych przy użyciu różnych rodzajów materiałów sprawdzianów, różnych powłok i przy zastosowaniu części lotniczych w charakterze przeciwpróbek wykonanych z różnych materiałów.

Testy eksploatacyjne przeprowadzono na stanowisku kontroli końcowej części lotniczych w warunkach przemysłowych przez okres 3 lat i były one poprzedzone badaniami wstępnymi, w trakcie pomiarów w pomieszczeniu utrzymywana była temperatura $20 \pm 1^\circ\text{C}$. W trakcie badań wstępnych określono, jakiego rodzaju sprawdziany ulegają szybkiemu zużyciu, przeprowadzono testy przy użyciu różnych rodzajów kolektorów, wyselekcjonowano elementy lotnicze produkowane w dużych ilościach i będące reprezentatywne dla poszczególnych typów. Części lotnicze użyte do testów eksploatacyjnych były elementami produkowanymi na bieżąco w ramach zamówień i były w pełni zgodne wymiarowo. Przez okres trwania testów ponad 2000 takich części zostało wykorzystanych w charakterze przeciwpróbek. Ze względu na długi okres testów eksploatacyjnych każdego ze sprawdzianów (około 6 miesięcy), wykonanie powtórzonych badań dla każdego z rodzajów sprawdzianów i przeciwpróbki nie było możliwe w przyjętych ramach czasowych doktoratu wdrożeniowego. Dodatkowo powtórzenie badań dla każdego ze sprawdzianów nie oddało by oryginalnych warunków w jakich testy były przeprowadzone za pierwszym razem. Testy eksploatacyjne 6 miesięczne odzwierciedlały pod względem ilości użytych przeciwpróbek 12 miesięczne obciążenie sprawdzianów gwintowych używanych w kontroli końcowej przy sprawdzaniu części lotniczych.

Głównym kryterium eksploatacyjnym określającym żywotność sprawdzianów gwintowych wykonanych zgodnie z koncepcją z nowo zaproponowanych materiałów oraz z nałożonymi powłokami o ochronnych właściwościach było założenie określające trwałość tych sprawdzianów jako większą niż sprawdzianów standardowych dotychczas powszechnie stosowanych komercyjnie i utrzymanie przez nie wymaganych wymiarów w trakcie oraz po zakończonych próbach eksploatacyjnych wynoszących 200 cykli wkręceń w otwory gwintowane korpusów (w charakterze przeciwpróbek) wykonanych z różnych materiałów – stopu aluminium 7075, stali 15-5 PH oraz stopu tytanu Ti-6Al-4V. Czynnikiem/parametrem określającym spełnienie powyższego kryterium był pomiar średnicy podziałowej w laboratorium wzorcującym.

Opracowano plan badań eksploatacyjnych, w oparciu o sprawdziany gwintowe calowe .250-28 UNF-3B STI i części lotnicze w charakterze przeciwpróbek. Wytypowano następujące rodzaje materiałów z których zostały wykonane sprawdziany:

- stal narzędziowa do pracy na zimno 01 (standardowy materiał do produkcji sprawdzianów),
- węgiel spiekany C-2,
- stal szybkotnąca M1.

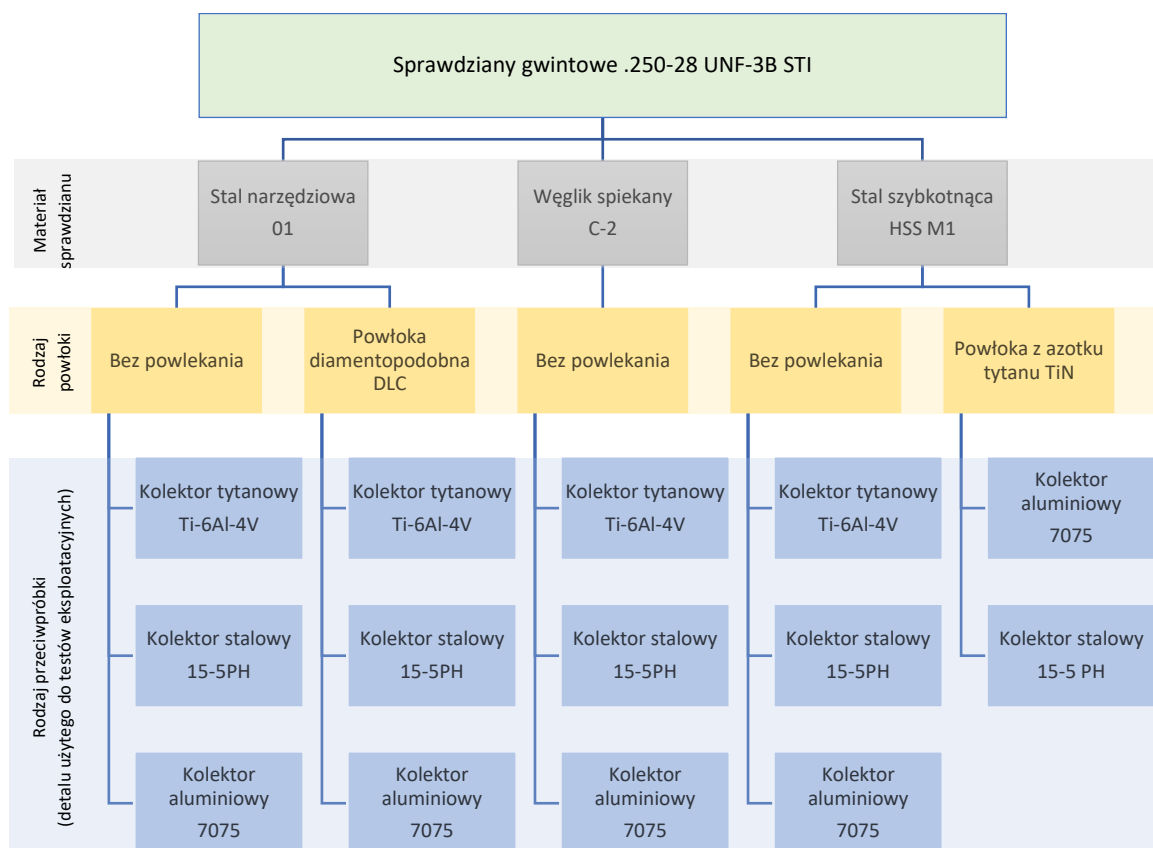
Testom eksploatacyjnym poddano sprawdziany bez pokrycia i z pokryciem powłokami przeciwozużyciowymi:

- powłoką diamentopodobną DLC,
- powłoką z azotku tytanu TiN.

Elementy konstrukcyjne samolotów w charakterze przeciwpróbek były wykonane z:

- tytanu Ti-6Al-4V,
- stali 15-5PH
- aluminium 7075.

Zużycie testowano używając różnych kombinacji sprawdzianów i przeciwpróbek, szczegółowy plan przyjętych plan badań eksploatacyjnych w formie graficznej przedstawiono na rys. 4.25.



Rys. 4.25. Schemat badań eksploatacyjnych w warunkach przemysłowych

Przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych przyjęto następującą metodykę testów: sprawdzian gwintowy był wkręcany jednokrotnie do jednego otworu gwintowego z użyciem oleju Terebor zgodnie z zalecaniami producenta sprawdzianu, żeby stosować smarowanie podczas inspekcji części [10]. Stosowanie oleju podczas inspekcji detali ma zapobiegać obklejaniu się sprawdzianu gwintowego materiałem pochodzącym z przeciwpróbki i przeciwdziałać zacięciu sprawdzianu w sprawdzanej części.

Istotnym czynnikiem wpływającym na zużycie w przypadku pary trącej sprawdzian – część, oprócz smarowania są również główne parametry gwintu i sprawdzianu tj. średnica podziałowa, zewnętrzna, wewnętrzna. Parametry gwintu były weryfikowane okresowo na częściach lotniczych przy użyciu stacjonarnego stanowiska do pomiaru konturów Mahr MarSurf XC 20 w celu potwierdzenia ich zgodności z wymaganymi normami a parametry sprawdzianów tj. średnica zewnętrzna, kąt gwintu były weryfikowane przez producenta, natomiast średnica podziałowa była weryfikowana w trakcie i przed testami eksploatacyjnymi. Jeden element lotniczy był sprawdzany maksymalnie przez dwa różne sprawdziany używane w testach, w celu uniknięcia zużycia gwintu w części lotniczej, który mógłby mieć wpływ na wyniki testów. Po sprawdzeniu zapisywany był numer seryjny elementu na karcie pomiarowej i przystępowano do pomiaru kolejnej części. Poszczególne sprawdziany były używane w testach eksploatacyjnych aż do momentu stwierdzenia zużycia sprawdzianu gwintowego, następowało to poprzez

stwierdzenie przekroczenia dolnej granicy tolerancji średnicy podziałowej potwierdzone pomiarem średnicy podziałowej lub w przypadku sprawdzenia 200 elementów lotniczych (przeciwpróbek) sprawdzonych tym samym sprawdzianem. Tolerancja sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wynosi 8 mikrometrów, większość zastosowanych sprawdzianów użytych do testów eksploatacyjnych miała średnice podziałową blisko góry tolerancji.

Stanowisko do sprawdzania elementów konstrukcyjnych samolotów w czasie testów eksploatacyjnych zostało przedstawione na rys. 4.26.



Rys. 4.26. Stanowisko do przeprowadzania testów eksploatacyjnych [źródło własne]

Do testów eksploatacyjnych sprawdzianów gwintowych .250-28 UNF-3B STI użyto następujących części lotniczych w charakterze przeciwpróbek:

- kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737 wykonany ze stopu aluminium 7075,
- kolektor hydrauliczny hamulca samolotu Airbus A350 wykonany ze stopu tytanu Ti-6Al-4V,
- kolektor hydrauliczny OB spoileru samolotu Boeing Dreamliner 787 wykonany ze stali nierdzewnej 15-5 PH.

Kolektory posiadały otwory gwintowane .250 – 28 UNF-3B STI o następujących parametrach (tabela 4.14.):

Tabela 4.14. Parametry gwintu .250 – 28 UNF-3B STI

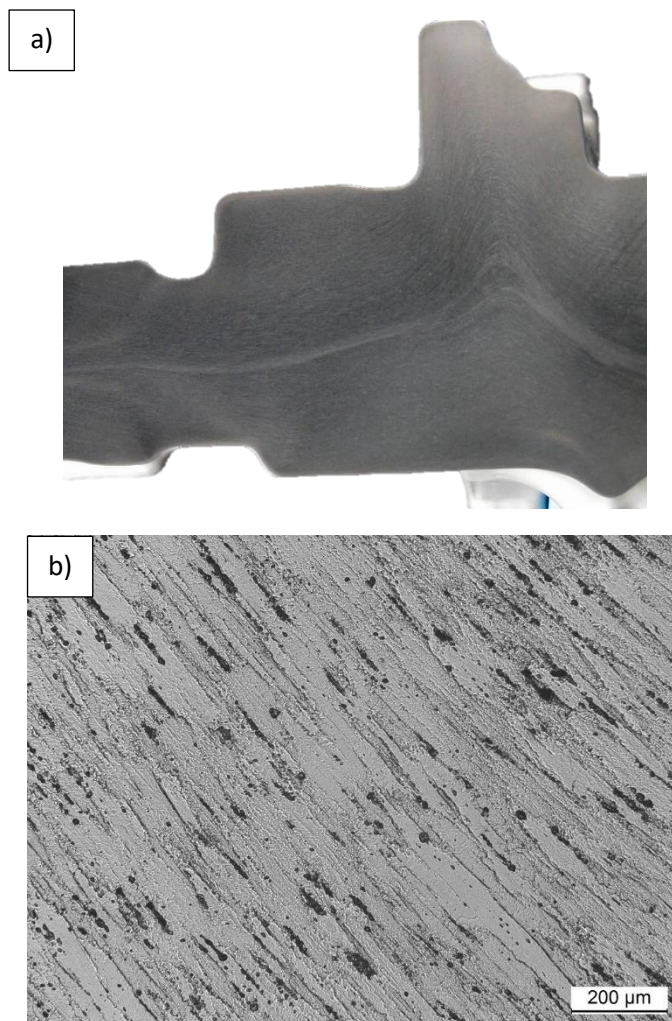
Gwint .250 – 28 UNF-3B STI		
Średnica podziałowa gwintu wewnętrznego (D_2)	min. 6,939 mm	max. 6,995 mm
Średnica wewnętrzna gwintu wewnętrznego (D_1)	min. 6,546 mm	max. 6,721 mm
Min. średnica zewnętrzna gwintu wewnętrznego (D)	7,529	
Kąt zarysu gwintu	$30^\circ \pm 15'$	

Charakterystyka części lotniczych użytych do testów eksploatacyjnych, z uwzględnieniem rozmieszczenia otworów gwintowych i opisu materiałów z jakich zostały one wykonane została przedstawiona poniżej.

Kolektor hydrauliczny modułu autopilota samolotu Boeing 737

Do testów eksploatacyjnych wybrano elementy konstrukcyjne samolotów wykonane z odkuwek aluminiowych gatunku 7075-T73. Materiał został wykonany zgodnie z wymaganiami normy AMSA22771. Kolektory hydrauliczne wytworzono w procesach kucia matrycowego realizowanego w kilku etapach w matrycach zamkniętych oraz w procesie frezowania i elektrodrążenia gotowych elementów. Mikrostruktura stopu aluminium 7075 została przedstawiona na rys. 4.27. a) i b) z przedstawianiem kierunku płynięcia materiału podczas kucia – rys. 4.27 a).

Stop aluminium 7075 jest jednym z najpopularniejszych gatunków aluminium stosowanych do produkcji elementów konstrukcyjnych samolotów, charakteryzuje bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie połączoną z dużą odpornością na korozję [103].



Rys. 4.27. Mikrostruktura stopu aluminium – gatunek 7075, zdjęcia wykonane ze pomocą mikroskopii świetlnej [104, źródło własne]

Skład chemiczny stopu aluminium (gatunek 7075) użytego do wyprodukowania kolektora hydraulicznego przedstawiono w tabeli 4.15.

Tabela 4.15. Skład chemiczny aluminium wyrażony w procentach wagowych (gatunek 7075) [105]

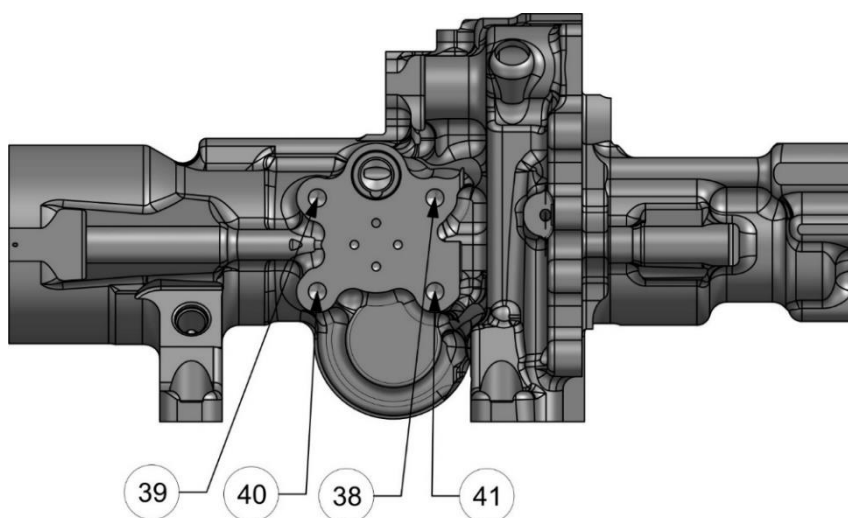
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Inne	Al
max. 0.40	max. 0.5	1.6 – 2.4	max. 0.30	2.1 – 2.9	0.18 - 0.28	5.1 – 6.1	max. 0.20	8.20 – 9.20	max. 0.15	Pozostała zawartość

Obróbkę cieplną odkuwek prowadzono zgodnie z wymaganiami normy AMS2772 [106], tak żeby gotowe kolektory cechowały się stanem umocnienia T73 – materiał został w pełni przestarzony w celu osiągnięcia najlepszej odporności na korozję naprężeniową [107]. Stan umocnienia T73 charakteryzuje się wartością R_{02} – min. 386 Mpa, R_m – min 455 Mpa, przy wydłużeniu A ok. 7% [106].

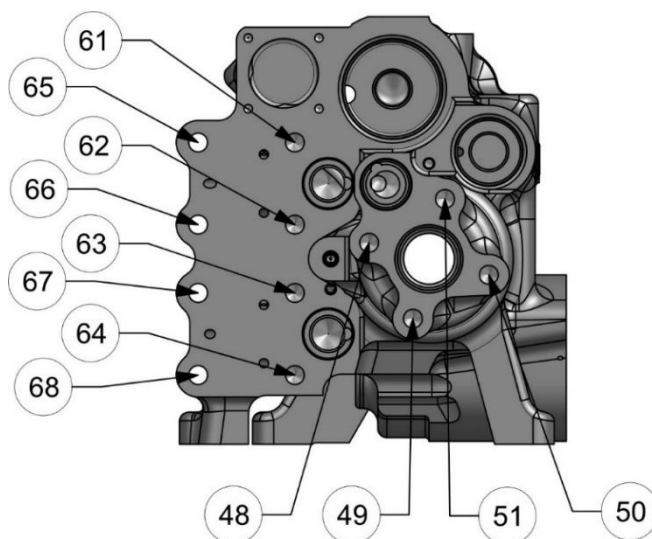
W kolektorze hydraulicznym do samolotu Boeing 737 znajduje się 16 otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI. Schemat ich rozmieszczenia pokazano na rysunkach 4.28. – 4.29., a wymiary głębokości otworów są przedstawione w tabeli 4.16. W trakcie testów eksploatacyjnych 6 z 16 otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI podlegało sprawdzeniu (po dwa otwory gwintowane z danej grupy otworów).

Tabela 4.16. Głębokości otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI [źródło własne]

Numer otworu gwintowanego	Głębokość gwintów
38 – 41	Głębokość minimalna: 10,414 mm (.41 cala)
61 -68	Głębokość minimalna: 10,414 mm (.41 cala)
48 – 51	Głębokość minimalna: 7,366 mm (.29 cala)



Rys. 4.28. Widok elementu pokazujący lokalizację otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI numer 38-41 [źródło własne]

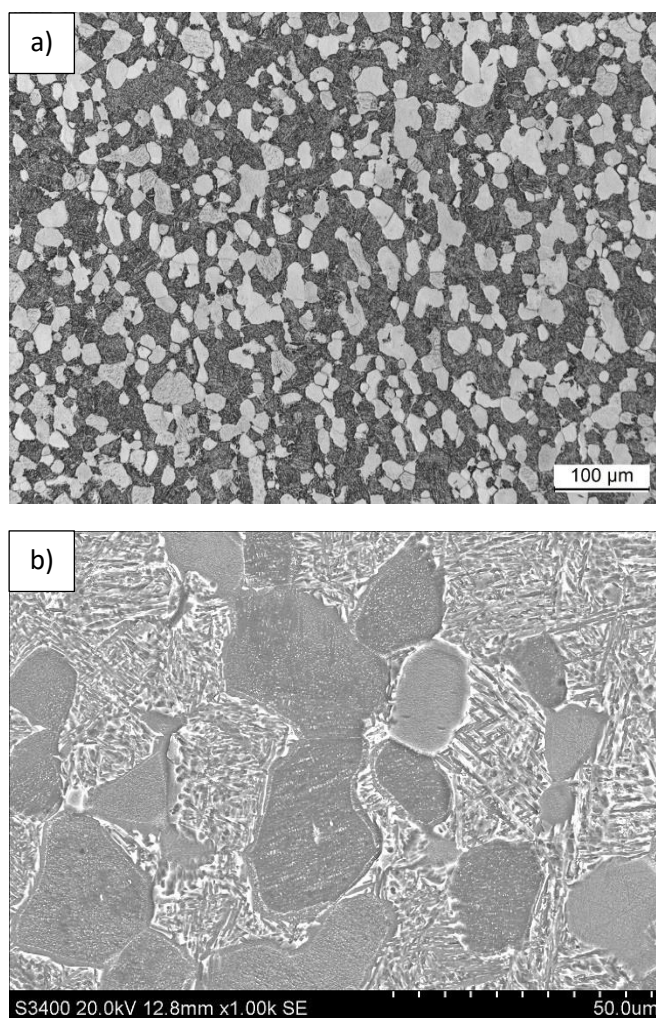


Rys. 4.29. Widok elementu pokazujący lokalizację otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI numer 61-68 ; 48-51 [źródło własne]

Kolektor hydrauliczny hamulca samolotu Airbus A350

Do testów eksploatacyjnych wybrano elementy konstrukcyjne samolotów wykonane z odkuwek ze stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5). Materiał został wykonany zgodnie z wymaganiami normy AMS 4928 [108].

Stop tytanu Ti-6Al-4V cechuje się dwufazową mikrostrukturą $\alpha+\beta$ (rys. 4.30.) – jest jednym z najpowszechniej stosowanych w przemyśle lotniczym stopów tytanu. Ze względu na swoje właściwości jest on szeroko stosowany do produkcji elementów konstrukcyjnych samolotów, tj. turbiny gazowe samolotów i łopatki [48]. Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na rozciąganie (min. 896 Mpa) [108], w tym na pełzanie, odpornością na korozję i zmęczenie mechaniczne. Wadą stopu Ti-6Al-4V jest słaba skrawalność oraz jak większości stopów tytanu – niska odporność na utlenianie w podwyższonych zakresach temperatury [109].



*Rys. 4.30. Mikrostruktura odkuwki tytanowej (gatunek Ti-6Al-4V).
Widoczna bi-modalna mikrostruktura $\alpha+\beta$.*

*a) zdjęcie wykonane ze pomocą mikroskopii świetlnej
b) zdjęcie wykonane za pomocą mikroskopii elektronowej (SEM) [źródło własne]*

Kolektory hydrauliczne wytworzono w procesach kucia matrycowego realizowanego w kilku etapach w matrycach zamkniętych oraz w procesie frezowania gotowych elementów.

Obróbka cieplna stopu Ti-6Al-4V składa się z różnych procesów, w zależności od sposobu wytwarzania elementów, w tym rodzajów procesów przeróbki plastycznej. Elementy ze stopu Ti-6Al-4V w zależności od etapu mogą być poddawane wyżarzaniu międzyoperacyjnemu, odprężającemu, rekrytalizującemu, zmiękcżającemu, przesycaaniu (hartowaniu) i starzeniu [37, 49].

Obróbkę cieplną materiału odkuwek prowadzono zgodnie z wymaganiami normy AMSH81200 – stop wyżarzono w temperaturze 544°C przez 2h i chłodzono swobodnie na powietrzu – dla zapewnienia powierzchni wolnej od zgorzelin tlenkowych. W wyniku procesu wyżarzania odkuwek uzyskuje się wartość R_{02} min. 827 Mpa, R_m min. 896 Mpa, przy wydłużeniu A4 8% [108].

Skład chemiczny tytanu (gatunek Ti-6Al-4V) użytego do wyprodukowania kolektora hydraulicznego przedstawiono w tabeli 4.17.

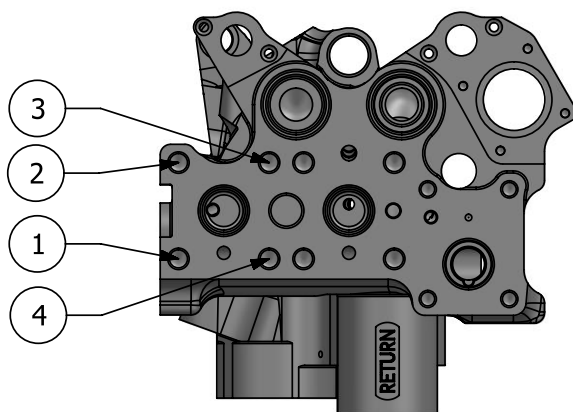
Tabela 4.17. Skład chemiczny tytanu wyrażony w procentach wagowych (gatunek Ti-6Al-4V) [108]

Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	Pozostałe pierwiastki	Ti
5.50 - 6.75	3.50 - 4.50	max. 0.30	max. 0.20	max. 0.08	max. 0.05	max. 0.0125	max. 0.0125	max. 0.40	Pozostała zawartość

W kolektorze hydraulicznym hamulca samolotu Airbus A350 znajduje się 8 otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI, ich rozmieszczenie pokazano schematycznie jest na rysunku rys. 4.31. a wymiary głębokości otworów zamieszczono w tabeli 4.18. W trakcie testów eksploatacyjnych wszystkie otwory gwintowane .250-28 UNF-3B STI podlegały sprawdzeniu.

Tabela 4.18. Głębokości otworów gwintowanych [źródło własne]

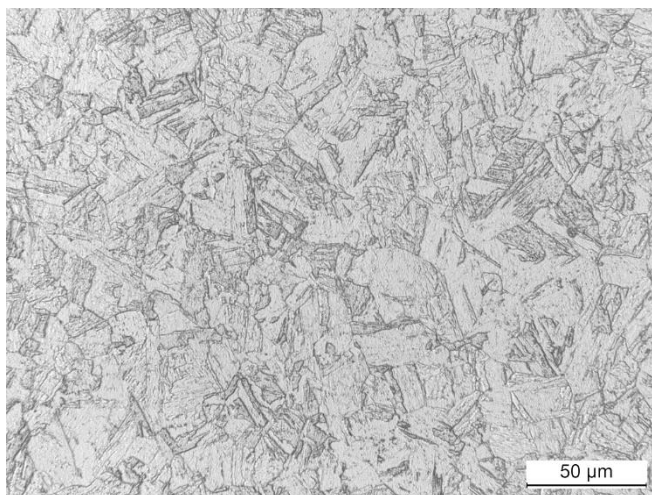
Numer otworu gwintowanego	Głębokość gwintów
1 – 8	Głębokość minimalna: 10,668 mm (.42 cala)



Rys. 4.31. Widok elementu pokazujący lokalizację otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI numer 1-8 [źródło własne]

Kolektor hydrauliczny OB spoileru samolotu Dreamliner 787

Do testów eksploatacyjnych wybrano elementy konstrukcyjne samolotów wykonane ze stali nierdzewnej martenzytycznej umacnianej wydzielinowo – gatunek 15-5 PH. Materiał został wykonany zgodnie z wymaganiami normy AMS5659 [110], w stanie utwardzenia cieplnego H1025. Mikrostruktura materiału 15-5 PH została przedstawiona na rys. 4.32.



Rys. 4.32. Mikrostruktura stali nierdzewnej martenzytycznej umacnianej wydzielinowo – gatunek 15-5 PH, zdjęcia wykonane ze pomocą mikroskopii świetlnej [źródło własne]

Kolektory hydrauliczne OB spoileru zostały wykonane w procesie frezowania z półfabrykatów uzyskanych poprzez pocięcie walcowanego pręta o przekroju prostokątnym.

Zgodnie z wymaganiami normy AMS 5659 twardość materiału wynosi nie więcej niż 363 HB, co wynika z jego stanu umocnienia po obróbce cieplnej, składającej się z procesów przesycania z temperatury 1038°C – elementu wygrzanego przez 30 min, oraz starzenia w temperaturze 552°C/4h, podczas którego zachodził proces umacniania wydzielinowego. W wyniku procesu wyżarzania uzyskuje się wartość R_{02} min. 1000 Mpa, R_m min. 1069 Mpa, przy wydłużeniu A4 12% [110].

Skład chemiczny stali umacnianej wydzielinowo (gatunek 15-5 PH) użytego do wyprodukowania kolektora hydraulicznego przedstawiono w tabeli 4.19.

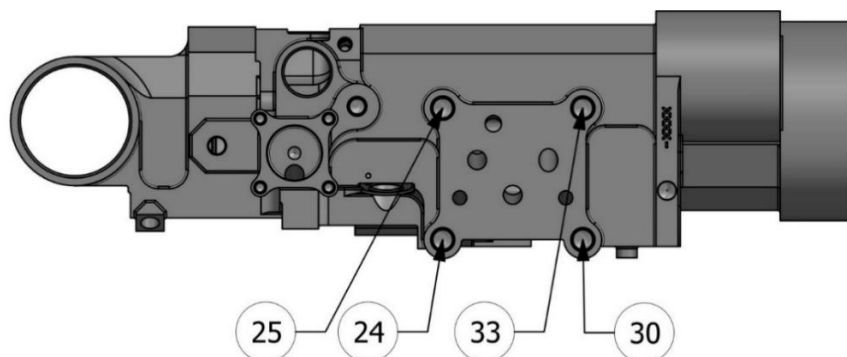
Tabela 4.19. Skład chemiczny stali nierdzewnej (gatunek 15-5 PH) [110]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Cu	Mo	Fe
max. 0.07	max. 1,00	max. 1,00	max. 0,030	max. 0,015	14,00 – 15,50	3.50 – 5.50	0,15 – 0,45	2.50 – 4.50	max. 0,50	Pozostała zawartość

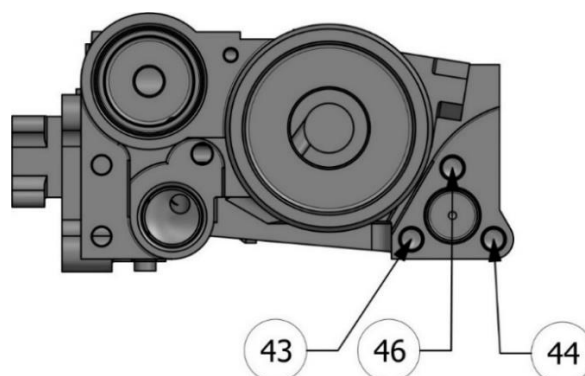
W kolektorze hydraulicznym do samolotu Boeing 737 znajduje się 7 otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI, ich rozmieszczenie pokazane jest na rysunkach 4.33. – 4.34. a głębokości otworów są zamieszczone w tabeli 4.20. W trakcie testów eksploatacyjnych wszystkie otwory gwintowane .250-28 UNF-3B STI podlegały sprawdzeniu.

Tabela 4.20. Numeracja i głębokość otworów gwintowanych .250-28 UNF-3B STI [źródło własne]

Numer otworu gwintowanego	Głębokość gwintów
24 – 33	Głębokość minimalna: 10,668 mm (.42 cala)
43,44,46	Głębokość minimalna: 10,668 mm (.42 cala)



Rys. 4.33. Widok elementu pokazujący otwory gwintowane 24-25 ; 30, 33 [źródło własne]



Rys. 4.34. Widok elementu pokazujący otwory gwintowane 43-44 ; 46 [źródło własne]

4.7.2. Badanie przyczepności powłoki do podłoża metodą testu na zarysowanie

Badanie przyczepności powłok do podłoża przeprowadzono w Katedrze Nauki o Materiałach i LBMdPL Politechniki Rzeszowskiej.

Celem badania było wyznaczenie adhezji powłoki TiN i DLC do podłoża sprawdzianu metodą testu na zarysowanie i porównanie uzyskanych wyników dla poszczególnych powłok.

Silna przyczepność powłoki do materiału podłoża jest kluczowym elementem wpływającym na żywotność powlekanego sprawdzianu.

Badanie adhezji przeprowadzono metodą zarysowania (ang. *Scratch Test*) na powierzchni stali narzędziowej O1 z wytworzoną powłoką DLC w procesie PACVD oraz na powierzchni stali szybko tnącej M-1 z wytworzoną powłoką TiN w procesie Arc-PVD. Próby te prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 20502 [89], przy użyciu testera zarysowania Revetest® firmy CSM Instruments (rys. 4.35.). Obszary powierzchni z wytworzonymi powłokami poddawano zarysowaniu rylcem diamentowym o geometrii Rockwella C na odcinku 10 mm, stosowano metodę z narastającym obciążeniem wynoszącym

ok. 99 N/min (próba progresywna), wartość siły obciążenia początkowego wyniosła 0.9 N oraz obciążenia końcowego 50 N lub 100 N. Przyjęcie tych parametrów próby umożliwiło zainicjowanie i wywołanie uszkodzeń w badanych powłokach. Oceniano charakter obszaru zarysowania – jego przebieg, rodzaj uszkodzeń wewnątrz rysy, a także rodzaj i charakter uszkodzeń rozchodzących się poza jej obszarem. Jako główne kryterium do oceny trwałości wytworzonych powłok przyjęto sprzężone analizy zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej połączone z prowadzonymi obserwacjami mikroskopowymi obszaru zarysowania za pomocą technik mikroskopii świetlnej i elektronowej. Wyznaczano w ten sposób wartości siły obciążenia krytycznego L_{c1} , L_{c2} , L_{cn+1} – wywołujące dany rodzaj uszkodzenia adhezyjnego lub kohezyjnego.



Rys. 4.35. Tester zarysowania Revetest firmy CSM

Do badania przyczepności podłoża wybrano próbki sprawdzianów ze zeszlifowanym gwintem do połowy, następnie pokryto je następującymi powłokami (rys. 4.36),:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno został pokryty powłoką DLC,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybkoobrotowej HSS został pokryty powłoką TiN.



1



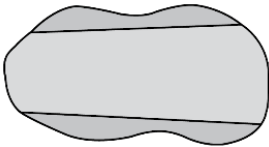
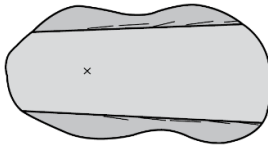
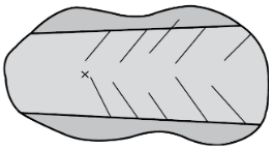
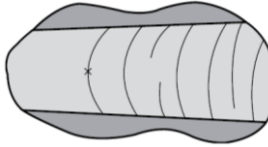
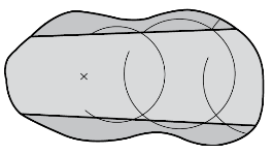
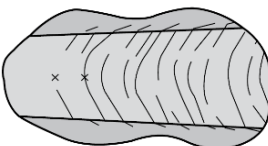
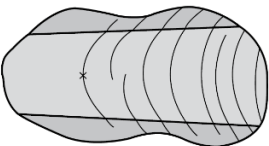
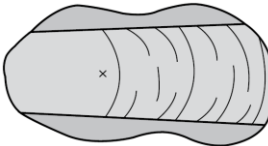
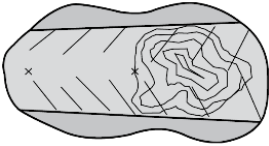
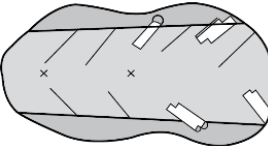
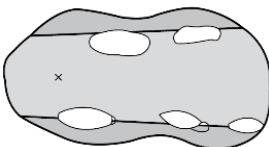
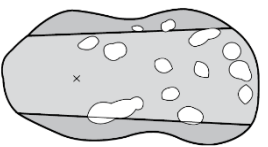
2

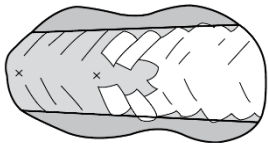
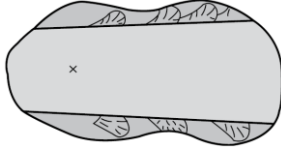
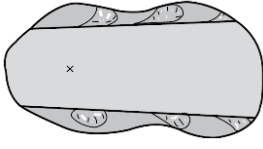
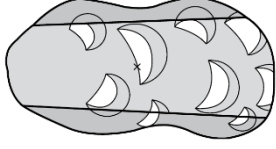
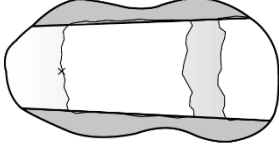
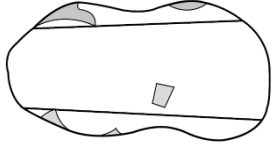
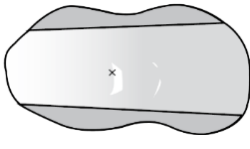
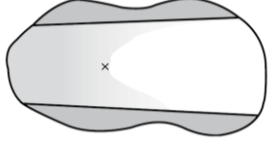
1 – sprawdzian ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryty powłoką DLC,

2 – sprawdzian ze stali szybkoobrotowej pokryty powłoką TiN

Rys. 4.36. Sprawdziany ze zeszlifowanym gwintem do połowy, użyte do testów [źródło własne]

Ocenę wyników próby zarysowania „scratch-test” przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 20502 [89], poniżej przedstawiono przykładowe schematy uszkodzeń.

 <p>a) Deformacja plastyczna</p>	 <p>b) Wydłużone pęknięcia na krawędziach śladu zarysowania</p>
 <p>c) Pęknięcia skierowane do przodu w kształcie litery V, przy krawędziach, wewnątrz śladu zarysowania</p>	 <p>d) Rozciągliwy typ pęknięcia Hertza wewnątrz śladu zarysowania</p>
 <p>e) Typu Hertza koliste</p>	 <p>f) Połączenie pęknięć pokazanych na rysunkach c) i d) wewnątrz śladu zarysowania (z pominięciem deformacji śladów szlifowania)</p>
 <p>g) Połączenie pęknięć pokazanych na rysunkach c) i d) rozciągniętych poza ślad zarysowania</p>	 <p>h) Odształcone pęknięcia typu konforemnego</p>
 <p>i) Pęknięcia jak pokazano na rysunku c), z utworzonym pęcherzem</p>	 <p>j) Pęknięcia jak pokazano na rysunku c), z lokalnymi odpryskami na granicy rozdziału</p>
 <p>k) Odpryski na granicy rozdziału przy brzegu śladu zarysowania</p>	 <p>l) Lokalne odpryski wewnątrz i obok śladu zarysowania</p>

 <p>m) Pęknięcia, jak pokazano na rysunku c) z dużymi odpryskami granic rozdziału</p>	 <p>n) Odpryski kohezyjne wzdłuż brzegów zarysowania</p>
 <p>o) Odpryski wzdłuż brzegów zarysowania, zarówno kohezyjne jak i granic rozdziału</p>	 <p>p) Duże odpryski granicy rozdziału o kształcie łuski</p>
 <p>q) Odpryski granic rozdziału na dużą skalę wewnątrz śladu zarysowania</p>	 <p>r) Duża powierzchnia odprysku granicy rozdziału</p>
 <p>s) Nieciągła plastyczna perforacja powłoki</p>	 <p>t) Ciągła plastyczna perforacja powłoki</p>

Rys. 4.37. Atlas rodzajów uszkodzeń otrzymanych w próbie zarysowania wg PN-EN ISO 20502 [89]

4.8. Badania właściwości mechanicznych

4.8.1. Pomiary twardości materiałów

Pomiary twardości sprawdzianów przeprowadzono w pracowni P1, w Uczelnianym Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej objętym akredytacjami PCA i Nadcap w wykonywaniu pomiarów twardości.

Celem badania było potwierdzanie zgodności twardości materiałów z wymaganiami zawartymi w specyfikacjach.

Pomiary twardości powierzchni sprawdzianów wykonanych ze stali narzędziowej O1, stali szybko tnącej M-1 oraz węgla spiekane C-2 prowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6508-1, PN-EN ISO 3738-1, ASTM E18 dla pomiarów wykonanych metoda Rockwella.

Pomiary metodą Rockwella prowadzono przy użyciu twardościomierza ZHU250 firmy Zwick/Roel (rys. 4.36.), na powierzchni sprawdzianów zeszlifowanych w celu uzyskania płaskiej powierzchni pomiarowej. Przed wykonaniem pomiarów zweryfikowano prawidłowość odczytów twardościomierza poprzez pomiar wzorca twardości EP 18213747 o twardości 54,8 HRC dla skali C i wzorca IN5967L o twardości 73,88 HRA dla skali A.

Pomiary badanych próbek sprawdzianów przeprowadzono używając skali C dla próbek wykonanych ze stali narzędziowej O1, stali szybkotnącej M-1 i skali A dla próbki wykonanej z węglika spiekanego C-2. Zastosowano wgłębnik o kształcie diamentowego stożka i kącie 120°, pomiary przeprowadzono stosując obciążenia 60kg dla HRA i 150kg dla HRC, pomiary powtórzono pięciokrotnie i wyliczono średnią arytmetyczną oznaczającą średnią twardość badanego materiału.



Rys. 4.38. Twardościomierz ZHU250 firmy Zwick/Roel

Do pomiarów twardości wybrano następujące próbki sprawdzianów:

- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali do pracy na zimno,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany ze stali szybkotnącej HSS,
- .250-28 UNF-3B STI wykonany z węglika spiekanego.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.7. Wyniki pomiarów średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych

Badanie odporności sprawdzianów gwintowych na zużycie w testach eksploatacyjnych zostało przeprowadzone w warunkach przemysłowych przy użyciu części lotniczych będących w ciągłej produkcji zgodnie z przyjętą metodyką. Średnica podziałowa będąca wskaźnikiem zużycia została zweryfikowana na zgodność z wymaganiami norm przed rozpoczęciem testów i każdorazowo po sprawdzeniu 20 sztuk części lotniczych. Testy eksploatacyjne były prowadzone do momentu stwierdzenia zużycia sprawdzianu gwintowego lub do momentu wkręcenia sprawdzianu w 200 sztuk kolektorów hydraulicznych będących przeciwpróbkami użytymi do testów. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej dla sprawdzianów, które uległy zużyciu przed zakończeniem testów eksploatacyjnych (osiągnięciem wkręcenia sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek) zostały przedstawione w tabelach i na rysunkach każdorazowo po wkręceniu w 20 przeciwpróbek. Wyniki pomiarów średnicy podziałowej dla sprawdzianów, które przeszły pełny cykl testów eksploatacyjnych (wkręcenie w 200 sztuk przeciwpróbek) zostały przedstawione z pominięciem wyników wzorcowania po każdym wkręceniu w 20 przeciwpróbek i przedstawione po wkręceniu w 40 przeciwpróbek. Dla każdego rodzaju kolektora zostały opracowane wykresy przedstawiające zmianę średnicy podziałowej w zależności od rodzaju materiału z jakiego był wykonany sprawdzian gwintowy, wyniki zostały przedstawione w interwale co 20 przeciwpróbek.

Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych charakteryzowały się rozrzutem uzyskanych wartości, niemniej jednak mieścił się on w obszarze niepewności pomiaru wyliczonego każdorazowo dla poszczególnych wzorcowań według opracowanego budżetu niepewności na potrzeby badań własnych – ok. 3 mikrometry (rozdział 4.5.1.).

5.7.1. Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych modułu autopilota samolotu Boeing 737

Sprawdziany gwintowy .250-28 UNF-3B STI wykonane z różnych materiałów, również z zastosowaniem powłok przeciwwuzyciowych zostały poddane testom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowych poprzez sprawdzanie kolejno kolektorów modułu autopilota samolotu Boeing 737 wykonanych ze stopu aluminium 7075. W każdym z korpusów sprawdzeniu poddano sześć gwintów .250-28 UNF-3B STI stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu. Kolektory aluminiowe pełniły rolę przeciwpróbek w testach eksploatacyjnych.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w trakcie i po zakończeniu, 5.7.1. a – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 (tabela 5.1. – 5.6., rys. 5.1.), 5.7.1. b – dla sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 (tabela 5.7. – 5.12., rys. 5.2.), 5.7.1. c – dla sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane (tabela 5.13. – 5.18., rys. 5.3.), 5.7.1. d – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 z powłoką DLC (tabela 5.19. – 5.24., rys. 5.4.), 5.7.1. e – dla sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 z powłoką TiN (tabela 5.25. – 5.30., rys. 5.5.). Uzyskane wyniki zestawiono na wykresie (rys. 5.6.) przedstawiając różnice w szybkości zużycia poszczególnych sprawdzianów w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze stopu aluminium 7075.

a) Sprawdźnian gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1

Tabela 5.1. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9450			
2	1 / 0°	6,9460			
3	1 / 0°	6,9461			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9458			
1	2 / 90°	6,9458			

Tabela 5.2. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9453			
2	1 / 0°	6,9452			
3	1 / 0°	6,9455			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9448			

Tabela 5.3. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9452			
2	1 / 0°	6,9458			
3	1 / 0°	6,9458			
3	2 / 90°	6,9458			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9449			

Tabela 5.4. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych






Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9456			
2	1 / 0°	6,9459			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9454			

Tabela 5.5. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w kolejne 160 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych






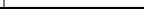




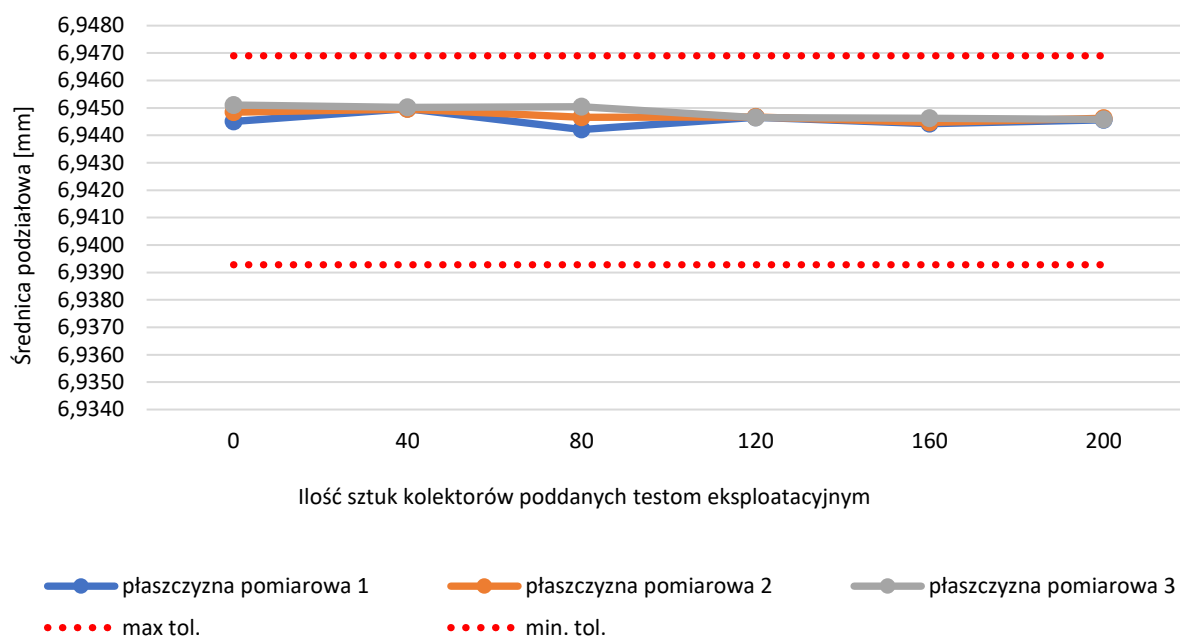
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9458			
2	1 / 0°	6,9457			
3	1 / 0°	6,9458			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9457			
1	2 / 90°	6,9457			

Tabela 5.6. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w kolejne 200 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9452			
2	1 / 0°	6,9457			
3	1 / 0°	6,9454			
3	2 / 90°	6,9456			
2	2 / 90°	6,9455			
1	2 / 90°	6,9455			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową blisko górnej granicy tolerancji, po wkręceniu sprawdzianu w pierwsze 40 aluminiowych kolektorów hydraulicznych (użytych w charakterze przeciwpróbek) nastąpiło jego dotarcie zaobserwowane poprzez zmniejszenie średnicy podziałowej (rys. 5.1., tab. 5.2.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal blisko górnej granicy tolerancji (rys. 5.1., tab. 5.3.), co dało podstawę zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

b) Sprawdzian gwintowy wykonany ze stali szybko tnącej M-1

Tabela 5.7. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9437			
2	1 / 0°	6,9432			
3	1 / 0°	6,9431			
3	2 / 90°	6,9435			
2	2 / 90°	6,9426			
1	2 / 90°	6,9446			

Tabela 5.8. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9410			
2	1 / 0°	6,9421			
3	1 / 0°	6,9426			
3	2 / 90°	6,9424			
2	2 / 90°	6,9422			
1	2 / 90°	6,9411			

Tabela 5.9. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9413			
2	1 / 0°	6,9429			
3	1 / 0°	6,9428			
3	2 / 90°	6,9422			
2	2 / 90°	6,9427			
1	2 / 90°	6,9418			

Tabela 5.10. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych




Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9418			
2	1 / 0°	6,9425			
3	1 / 0°	6,9433			
3	2 / 90°	6,9423			
2	2 / 90°	6,9426			
1	2 / 90°	6,9417			

Tabela 5.11. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych













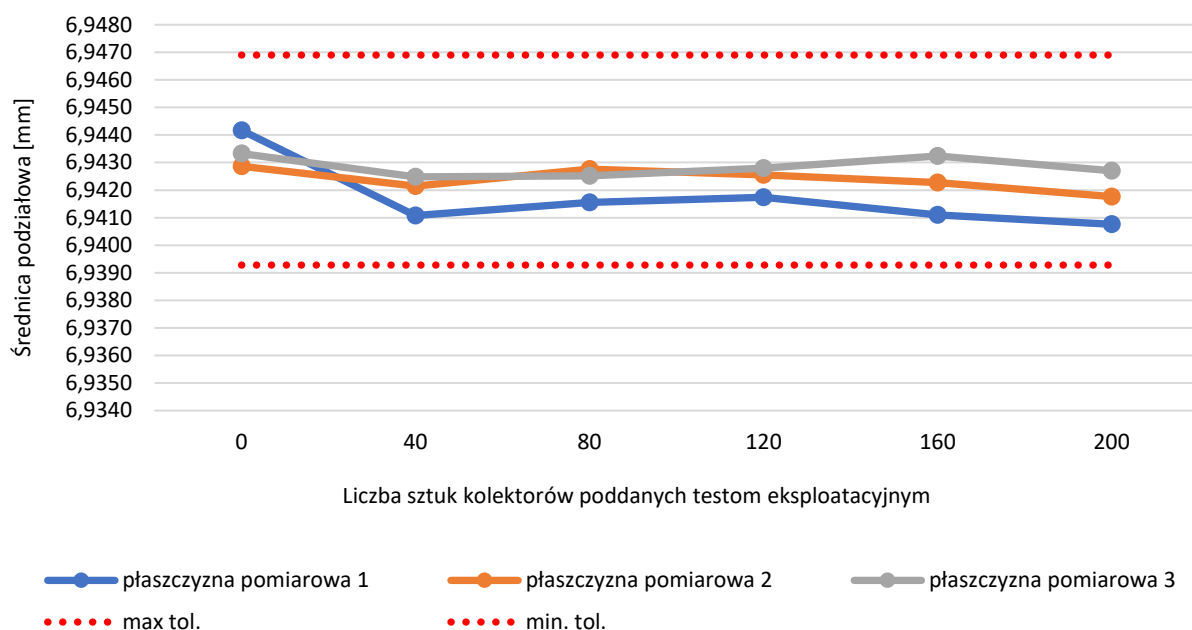
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9411			
2	1 / 0°	6,9425			
3	1 / 0°	6,9433			
3	2 / 90°	6,9432			
2	2 / 90°	6,9421			
1	2 / 90°	6,9412			

Tabela 5.12. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w kolejne 200 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9399			
2	1 / 0°	6,9413			
3	1 / 0°	6,9432			
3	2 / 90°	6,9429			
2	2 / 90°	6,9422			
1	2 / 90°	6,9416			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkołnącej. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową blisko środka pola tolerancji, po wkręceniu sprawdzianu w pierwsze kilkadziesiąt kolektorów hydraulicznych nastąpiło jego dotarcie zaobserwowane poprzez zmniejszenie średnicy podziałowej (rys. 5.2., tab. 5.8. – 5.9.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpórek, sprawdzian nie uległ zużyciu, średnica podziałowa szczególnie w obszarze pierwszej płaszczyzny pomiarowej znajdowała się nadal w tolerancji, blisko dolnej granicy tolerancji (rys. 5.2., tab. 5.12.). co dało podstawę zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

c) Sprawdzian gwintowy wykonany z węgla spiekanego C-2

Tabela 5.13. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9464			
2	1 / 0°	6,9460			
3	1 / 0°	6,9468			
3	2 / 90°	6,9469			
2	2 / 90°	6,9463			
1	2 / 90°	6,9459			

Tabela 5.14. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa mm	Tolerancja		Przekroczenie μm
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9440			
2	1 / 0°	6,9460			
3	1 / 0°	6,9461			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9458			
1	2 / 90°	6,9439			

Tabela 5.15. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9440			
2	1 / 0°	6,9444			
3	1 / 0°	6,9465			
3	2 / 90°	6,9466			
2	2 / 90°	6,9456			
1	2 / 90°	6,9444			

Tabela 5.16. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9438			
2	1 / 0°	6,9455			
3	1 / 0°	6,9467			
3	2 / 90°	6,9460			
2	2 / 90°	6,9449			
1	2 / 90°	6,9428			

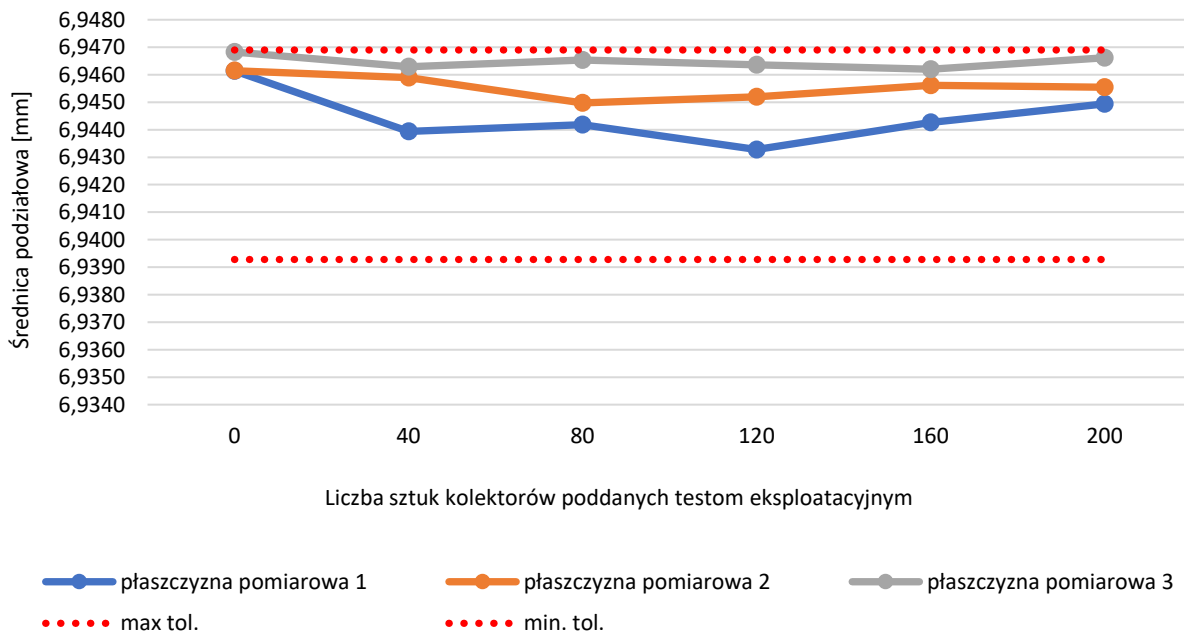
Tabela 5.17. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9445			
2	1 / 0°	6,9456			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9456			
1	2 / 90°	6,9440			

Tabela 5.18. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9449			
2	1 / 0°	6,9453			
3	1 / 0°	6,9466			
3	2 / 90°	6,9467			
2	2 / 90°	6,9458			
1	2 / 90°	6,9453			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji, po wkręceniu sprawdzianu w pierwsze 40 aluminiowych kolektorów hydraulicznych nastąpiło zmniejszenie średnicy podziałowej przez prawdopodobne jego dotarcie (rys. 5.3., tab. 5.14.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal blisko górnej granicy tolerancji (rys. 5.3., tab. 5.18.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniający wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

d) Sprawdzian gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryty powłoką DLC

Tabela 5.19. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9450			
2	1 / 0°	6,9460			
3	1 / 0°	6,9461			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9458			
1	2 / 90°	6,9458			

Tabela 5.20. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9453			
2	1 / 0°	6,9452			
3	1 / 0°	6,9455			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9448			

Tabela 5.21. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9452			
2	1 / 0°	6,9458			
3	1 / 0°	6,9458			
3	2 / 90°	6,9458			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9449			

Tabela 5.22. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9456			
2	1 / 0°	6,9459			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9454			

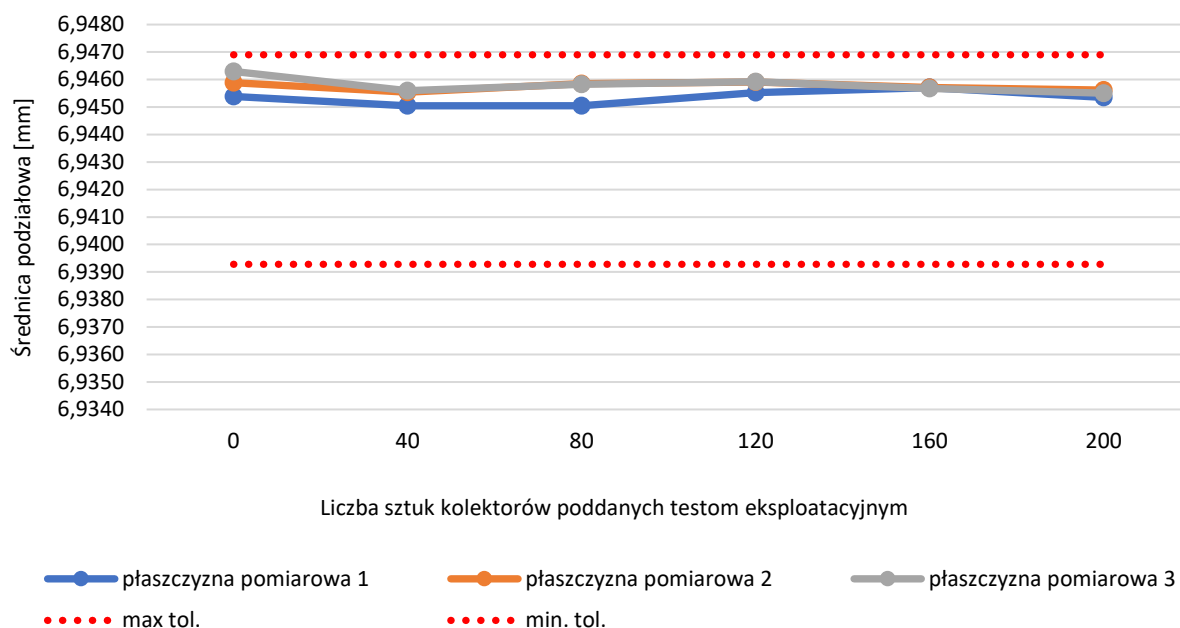
Tabela 5.23. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9458			
2	1 / 0°	6,9457			
3	1 / 0°	6,9457			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9457			
1	2 / 90°	6,9457			

Tabela 5.24. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9452			
2	1 / 0°	6,9457			
3	1 / 0°	6,9454			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9455			
1	2 / 90°	6,9455			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.4.



Rys. 5.4. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno z powłoką DLC. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych po powlekanii powłoką DLC charakteryzował się średnicą podziałową blisko górnej granicy tolerancji, przez cały okres przeprowadzania testów aż do ich zakończenia średnica podziałowa sprawdzianu znajdowała się w obszarze górnej tolerancji (rys. 5.4., tab. 5.19. – 5.24.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal blisko górnej granicy tolerancji (rys. 5.4., tab. 5.24.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

e) Sprawdzan gwintowy wykonany ze stali szybkotnącej pokryty powłoką TiN

Tabela 5.25. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9469			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9469			
3	2 / 90°	6,9469			
2	2 / 90°	6,9469			
1	2 / 90°	6,9468			

Tabela 5.26. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9463			
2	1 / 0°	6,9465			
3	1 / 0°	6,9466			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9466			
1	2 / 90°	6,9462			

Tabela 5.27. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9467			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9467			
3	2 / 90°	6,9467			
2	2 / 90°	6,9468			
1	2 / 90°	6,9467			

Tabela 5.28. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9468			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9467			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9467			
1	2 / 90°	6,9467			

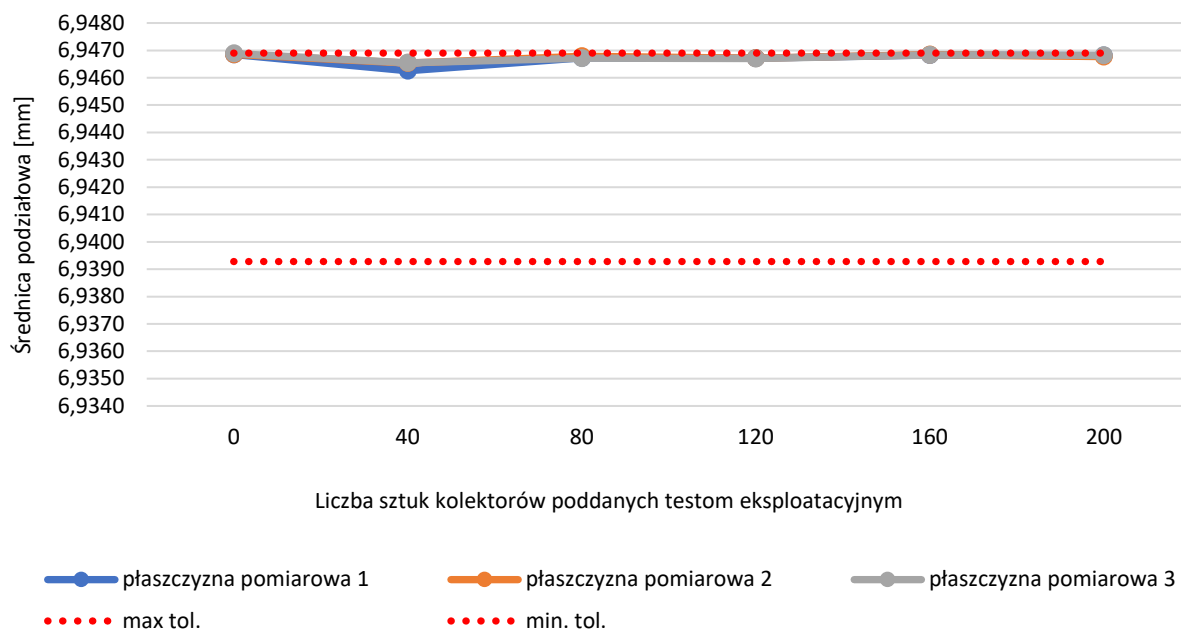
Tabela 5.29. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9469			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9469			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9469			
1	2 / 90°	6,9468			

Tabela 5.30. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk aluminiowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9469			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9469			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9467			
1	2 / 90°	6,9468			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.5.

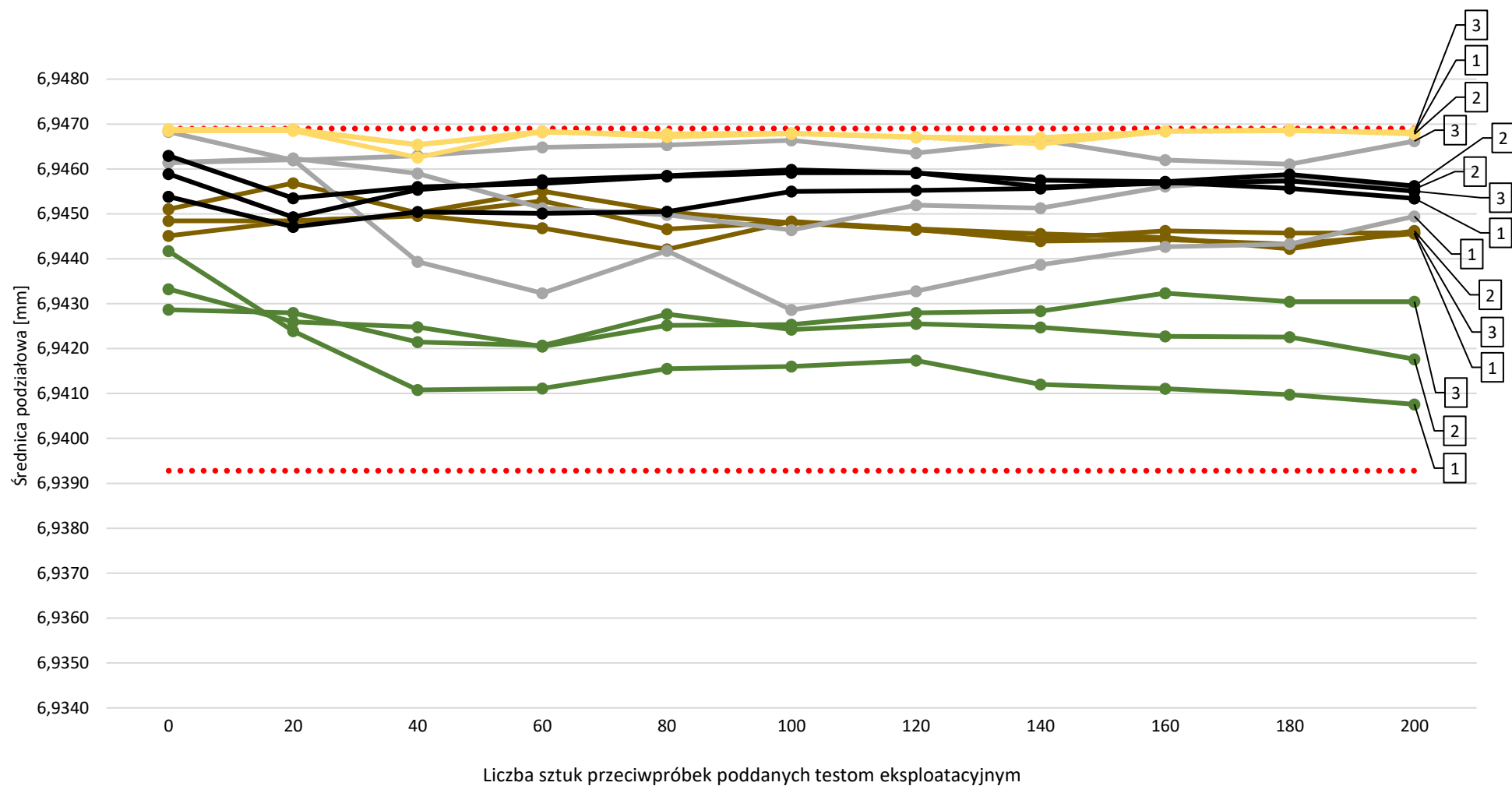


Rys. 5.5. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej z powłoką TiN. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych po powlekanii powłoką TiN charakteryzował się średnicą podziałową w górnej granicy tolerancji, przez cały okres przeprowadzania testów aż do ich zakończenia średnica podziałowa sprawdzianu znajdowała się w obszarze górnej tolerancji (rys. 5.5., tab. 5.25. – 5.30.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal blisko górnej granicy tolerancji (rys. 5.5., tab. 5.24.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

Na rys. 5.6. zestawiono wyniki pomiarów średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w ich trakcie i po zakończeniu. Testy eksploatacyjne przeprowadzono na kolektorach hydraulicznych modułu autopilota samolotu Boeing 737 wykonanych ze stopu aluminium 7075 w charakterze przeciwpróbek oraz przy użyciu sprawdzianów gwintowych .250-28 UNF-3B STI wykonanych z następujących materiałów:

- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 (standardowy materiał do produkcji sprawdzianów),
- stali szybko tnącej M-1,
- węgla spiekanego,
- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytej powłoką DLC,
- stali szybko tnącej M-1 pokrytej powłoką TiN.



..... min. tol.
 ● stal szybko tnąca
 ● stal szybko tnąca pokryta powłoką TiN

..... max tol.
 ● węgiel spiekany

● stal narzędziowa do pracy na zimno
 ● stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC

Rys. 5.6. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych w wyniku przeprowadzenia testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych modułu autopilota samolotu Boeing 737 wykonanych ze stopu aluminium 7075

Na podstawie przeprowadzonych testów eksploatacyjnych (rys. 5.6.) stwierdzono, że wszystkie sprawdziany gwintowe poddane testom eksploatacyjnym przy użyciu kolektorów hydraulicznych modułu autopilota samolotu Boeing 737 w charakterze przeciwpróbek po zakończonych testach eksploatacyjnych nadal spełniały wymagania metrologiczne i były w pełni zgodne wymiarowo (średnica podziałowa sprawdzianów znajdowała się w tolerancji wymiarowej). Zaobserwowano w trakcie testów eksploatacyjnych zmniejszone przywieranie cząstek materiału przeciwpróbki do powierzchni sprawdzianów z powłoką przeciwzużyciową z azotku tytanu i diamentopodobnej (rozdział 5.11.2.).

5.7.2. Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787

Sprawdziany gwintowy .250-28 UNF-3B STI wykonane z różnych materiałów, również z zastosowaniem powłok przeciwzużyciowych zostały poddane testom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowych poprzez sprawdzanie kolejno kolektorów hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787 wykonanych ze stali nierdzewnej 15-5 PH. W każdym z korpusów poddano sprawdzeniu siedem gwintów .250-28 UNF-3B STI stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu. Kolektory stalowe pełniły rolę przeciwpróbek w testach eksploatacyjnych.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w trakcie i po zakończeniu, 5.7.2. a – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 (tabela 5.31. – 5.35., rys. 5.7.), 5.7.2. b – dla sprawdzianu wykonanego ze stali szybkotnącej M-1 (tabela 5.36. – 5.41., rys. 5.8.), 5.7.2. c – dla sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane C-2 (tabela 5.42. – 5.47., rys. 5.9.), 5.7.2. d – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 z powłoką DLC (tabela 5.48. – 5.53., rys. 5.10.), 5.7.2 e – dla sprawdzianu wykonanego ze stali szybkotnącej M-1 z powłoką TiN (tabela 5.54. – 5.59., rys. 5.11.). Uzyskane wyniki zestawiono na wykresie (rys. 5.12.) przedstawiając różnice w szybkości zużycia poszczególnych sprawdzianów w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze stali nierdzewnej 15-5 PH.

a) Sprawdź gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1

Tabela 5.31. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9454			
2	1 / 0°	6,9459			
3	1 / 0°	6,9463			
3	2 / 90°	6,9463			
2	2 / 90°	6,9457			
1	2 / 90°	6,9453			

Tabela 5.32. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 20 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9463			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9442			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9444			
1	2 / 90°	6,9469			

Tabela 5.33. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9424			
2	1 / 0°	6,9463			
3	1 / 0°	6,9442			
3	2 / 90°	6,9462			
2	2 / 90°	6,9429			
1	2 / 90°	6,9457			

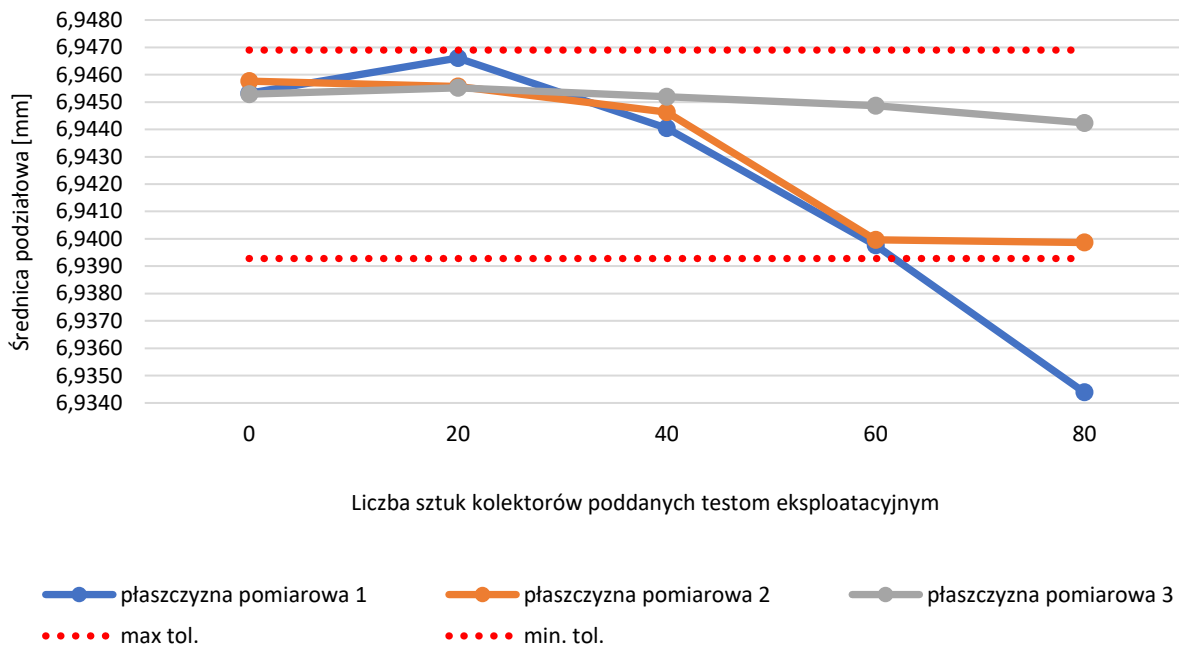
Tabela 5.34. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 60 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9398			
2	1 / 0°	6,9401			
3	1 / 0°	6,9446			
3	2 / 90°	6,9452			
2	2 / 90°	6,9399			
1	2 / 90°	6,9398			

Tabela 5.35. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9368	[Red bar]		-2,5
2	1 / 0°	6,9396	[Green bar]		
3	1 / 0°	6,9434	[Green bar]		
3	2 / 90°	6,9451	[Green bar]		
2	2 / 90°	6,9401	[Green bar]		
1	2 / 90°	6,9320	[Red bar]		-7,3

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową w zakresie górnej granicy tolerancji, po wkręceniu sprawdzianu w pierwsze 40 aluminiowych kolektorów hydraulicznych nastąpiło jego dotarcie zaobserwowane poprzez zmniejszenie średnicy podziałowej (rys. 5.7., tab. 5.33.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 80 sztuk przeciwpróbek, stwierdzono przekroczenie dolnej granicy tolerancji średnicy podziałowej w 1 płaszczyźnie pomiarowej (rys. 5.7., tab. 5.35.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako niespełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

b) Sprawdźnian gwintowy wykonany ze stali szybkotnącej M-1

Tabela 5.36. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9437			
2	1 / 0°	6,9449			
3	1 / 0°	6,9452			
3	2 / 90°	6,9446			
2	2 / 90°	6,9440			
1	2 / 90°	6,9437			

Tabela 5.37. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9433			
2	1 / 0°	6,9437			
3	1 / 0°	6,9437			
3	2 / 90°	6,9435			
2	2 / 90°	6,9434			
1	2 / 90°	6,9434			

Tabela 5.38. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych






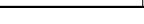
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9408			
2	1 / 0°	6,9406			
3	1 / 0°	6,9422			
3	2 / 90°	6,9424			
2	2 / 90°	6,9413			
1	2 / 90°	6,9407			

Tabela 5.39. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych






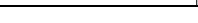
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9404			
2	1 / 0°	6,9407			
3	1 / 0°	6,9413			
3	2 / 90°	6,9428			
2	2 / 90°	6,9415			
1	2 / 90°	6,9398			

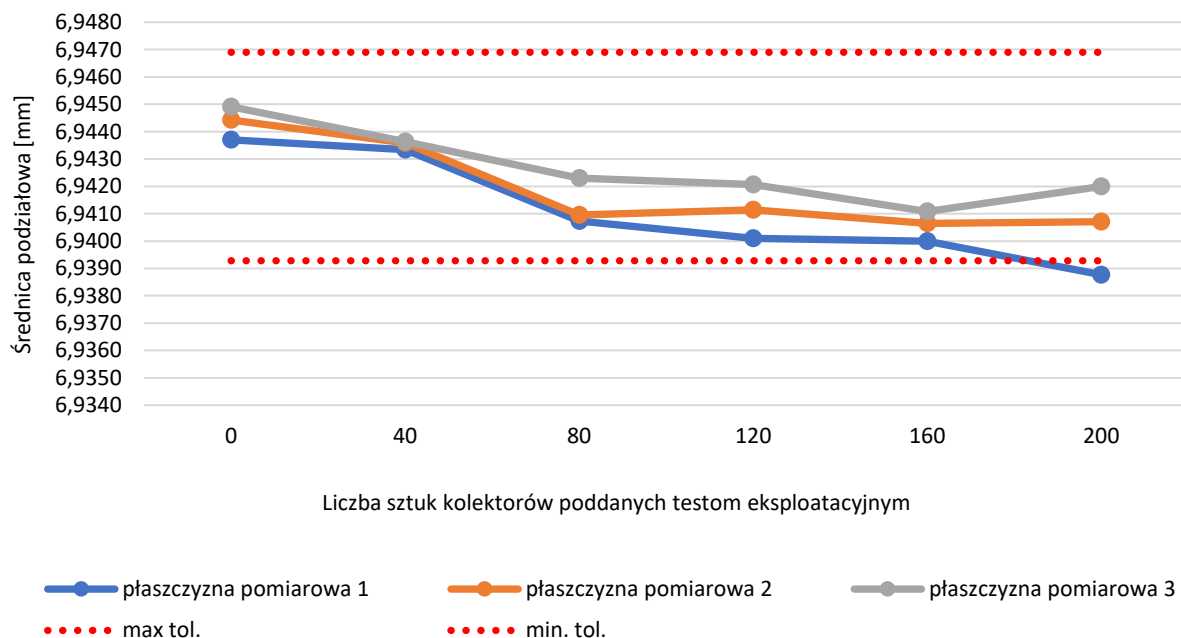
Tabela 5.40. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9402			
2	1 / 0°	6,9412			
3	1 / 0°	6,9415			
3	2 / 90°	6,9418			
2	2 / 90°	6,9418			
1	2 / 90°	6,9406			

Tabela 5.41. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9388			-0,5
2	1 / 0°	6,9406			
3	1 / 0°	6,9418			
3	2 / 90°	6,9422			
2	2 / 90°	6,9408			
1	2 / 90°	6,9388			-0,5

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.8.



Rys. 5.8. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali szybkołującej. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową w obszarze środka pola tolerancji dla średnicy podziałowej. Zarejestrowano postępujące zmniejszenie średnicy podziałowej, które obserwowano po każdym wzorcowaniu sprawdzianu wykonanym po wkręceniu sprawdzianu w 20 sztuk przeciwpróbek, co świadczy o zużywaniu się sprawdzianu. Testy zakończono po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek (zużycie nastąpiło w przedziale pomiędzy wkręceniem w 180 a 200 przeciwpróbkę). Po zakończonych testach średnica podziałowa w obszarze 1 płaszczyzny sprawdzianu znajdowała się poniżej granicy tolerancji (rys. 5.8., tab. 5.41.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako niespełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

c) Sprawdzian gwintowy wykonany z węgla spiekanego C-2

Tabela 5.42. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9467			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9468			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9463			
1	2 / 90°	6,9464			

Tabela 5.43. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9465			
2	1 / 0°	6,9466			
3	1 / 0°	6,9466			
3	2 / 90°	6,9466			
2	2 / 90°	6,9467			
1	2 / 90°	6,9466			

Tabela 5.44. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa mm	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9463			
2	1 / 0°	6,9464			
3	1 / 0°	6,9464			
3	2 / 90°	6,9464			
2	2 / 90°	6,9464			
1	2 / 90°	6,9464			

Tabela 5.45. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9469			
2	1 / 0°	6,9468			
3	1 / 0°	6,9469			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9468			
1	2 / 90°	6,9469			

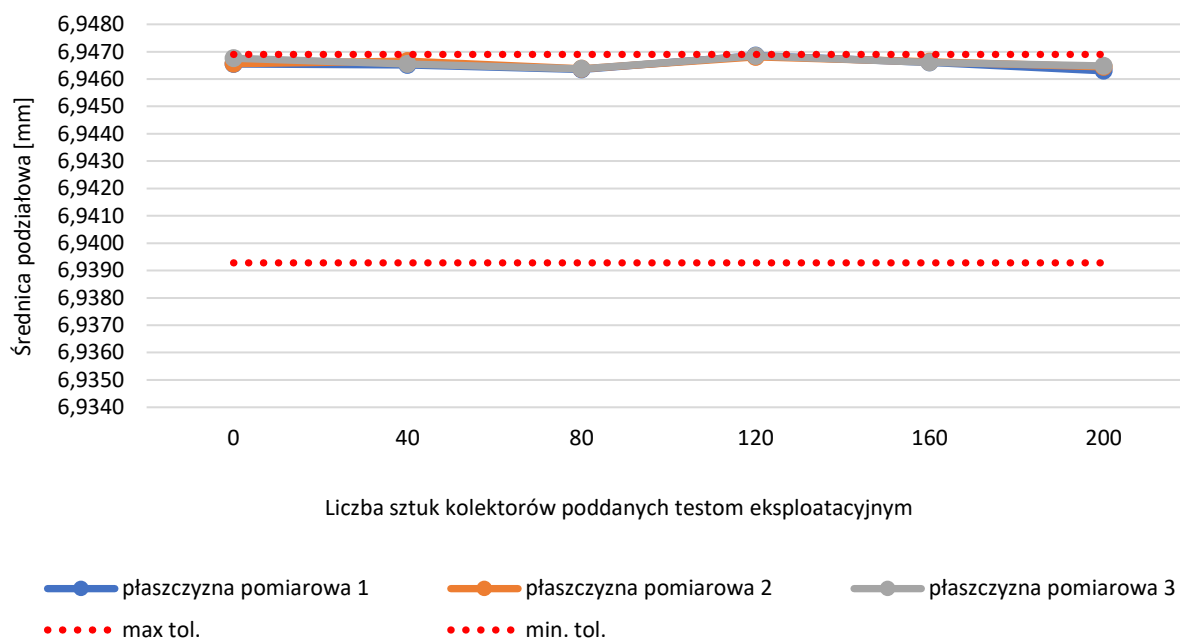
Tabela 5.46. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9466			
2	1 / 0°	6,9466			
3	1 / 0°	6,9466			
3	2 / 90°	6,9466			
2	2 / 90°	6,9466			
1	2 / 90°	6,9466			

Tabela 5.47. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9465			
2	1 / 0°	6,9464			
3	1 / 0°	6,9465			
3	2 / 90°	6,9465			
2	2 / 90°	6,9465			
1	2 / 90°	6,9461			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane w trakcie testów eksploatacyjnych. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, po powlekanii powłoką DLC, charakteryzował się średnicą podziałową blisko górnej granicy tolerancji, przez cały okres przeprowadzania testów aż do ich zakończenia średnica podziałowa sprawdzianu znajdowała się w obszarze górnej tolerancji (rys. 5.9., tab. 5.43. – 5.46.). Testy zakończono po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal blisko górnej granicy tolerancji (rys. 5.9., tab. 5.47.), co dało podstawę do zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

d) Sprawdzian gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryty powłoką DLC

Tabela 5.48. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9458			
2	1 / 0°	6,9462			
3	1 / 0°	6,9466			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9467			
1	2 / 90°	6,9459			

Tabela 5.49. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9442			
2	1 / 0°	6,9445			
3	1 / 0°	6,9445			
3	2 / 90°	6,9450			
2	2 / 90°	6,9449			
1	2 / 90°	6,9444			

Tabela 5.50. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9449			
2	1 / 0°	6,9452			
3	1 / 0°	6,9455			
3	2 / 90°	6,9455			
2	2 / 90°	6,9456			
1	2 / 90°	6,9451			

Tabela 5.51. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych






Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa mm	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9448			
2	1 / 0°	6,9449			
3	1 / 0°	6,9447			
3	2 / 90°	6,9447			
2	2 / 90°	6,9448			
1	2 / 90°	6,9446			

Tabela 5.52. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych













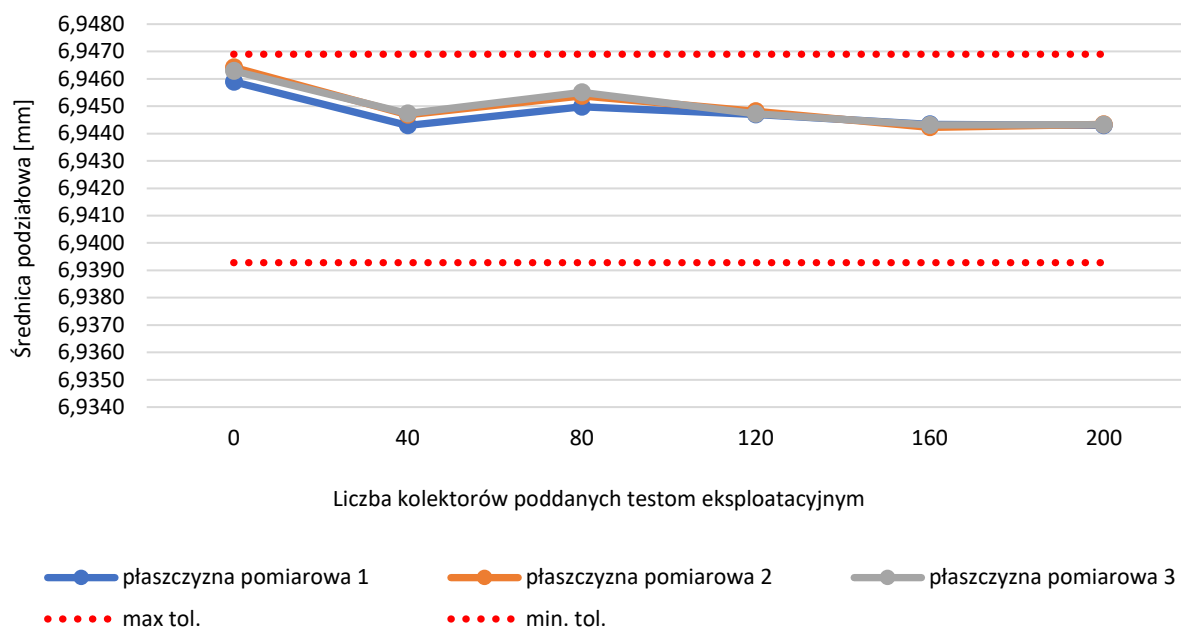
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9444			
2	1 / 0°	6,9443			
3	1 / 0°	6,9443			
3	2 / 90°	6,9443			
2	2 / 90°	6,9442			
1	2 / 90°	6,9443			

Tabela 5.53. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9443			
2	1 / 0°	6,9444			
3	1 / 0°	6,9443			
3	2 / 90°	6,9443			
2	2 / 90°	6,9443			
1	2 / 90°	6,9443			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.10.



Rys. 5.10. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno z powłoką DLC. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych w stanie po nałożeniu powłoki DLC, charakteryzował się średnicą podziałową w zakresie pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.10., tab. 5.48.). Po wkręceniu sprawdzianu w pierwsze 40 stalowych kolektorów hydraulicznych nastąpiło jego dotarcie zaobserwowane poprzez zmniejszenie średnicy podziałowej (rys. 5.9., tab. 5.43.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal pomiędzy środkową, a górną granicą tolerancji (rys. 5.9., tab. 5.47.), co dało podstawę zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

e) Sprawdzan gwintowy wykonany ze stali szybko tnącej pokryty powłoką TiN

Tabela 5.54. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu - przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9448			
2	1 / 0°	6,9469			
3	1 / 0°	6,9468			
3	2 / 90°	6,9460			
2	2 / 90°	6,9465			
1	2 / 90°	6,9456			

Tabela 5.55. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9449			
2	1 / 0°	6,9456			
3	1 / 0°	6,9465			
3	2 / 90°	6,9462			
2	2 / 90°	6,9456			
1	2 / 90°	6,9448			

Tabela 5.56. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9459			
2	1 / 0°	6,9461			
3	1 / 0°	6,9468			
3	2 / 90°	6,9466			
2	2 / 90°	6,9461			
1	2 / 90°	6,9460			

Tabela 5.57. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9458			
2	1 / 0°	6,9460			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9458			

Tabela 5.58. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych













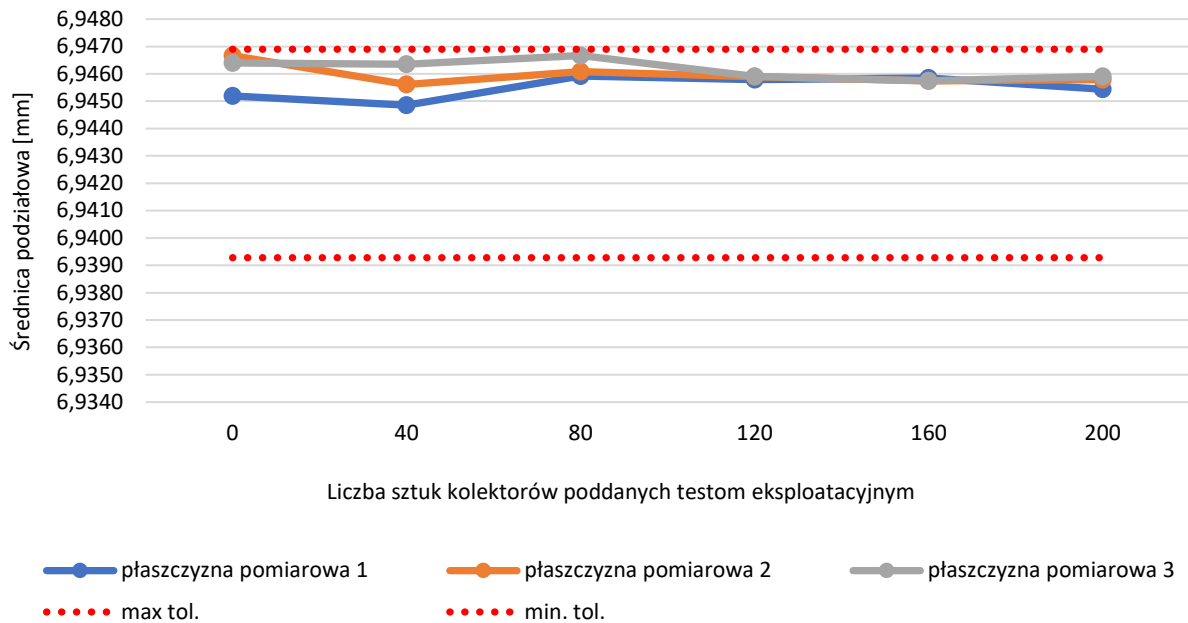
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9459			
2	1 / 0°	6,9458			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9456			
2	2 / 90°	6,9457			
1	2 / 90°	6,9458			

Tabela 5.59. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk stalowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9453			
2	1 / 0°	6,9458			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9457			
1	2 / 90°	6,9456			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.11.

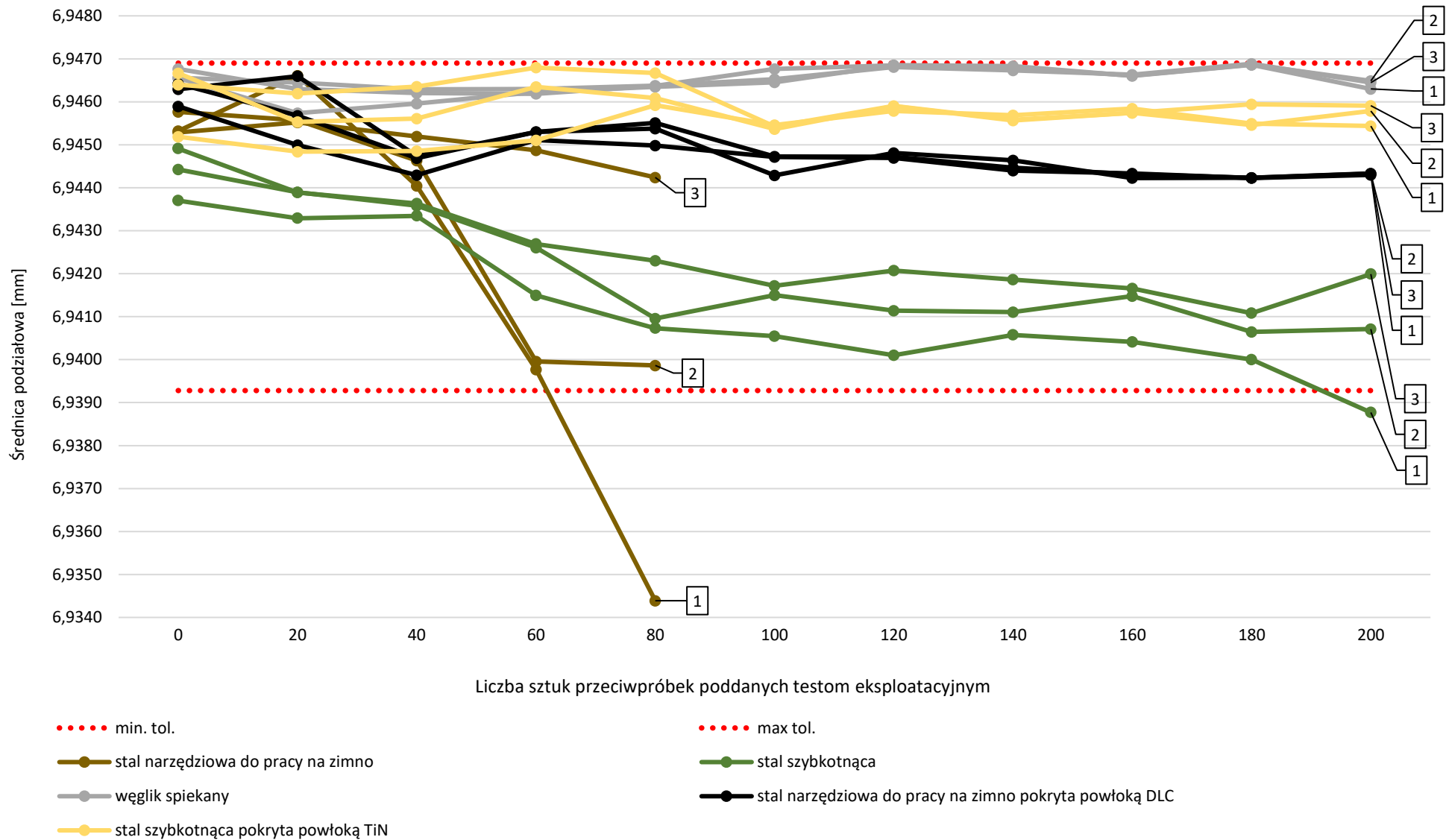


Rys. 5.11. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej z powłoką TiN. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, w stanie po nałożeniu powłoki TiN, charakteryzował się średnicą podziałową w zakresie pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.54.). Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.10., tab. 5.53.), co dało podstawę zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniającego wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

Na rys. 5.12. zestawiono wyniki pomiarów średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w ich trakcie i po zakończeniu. Testy eksploatacyjne przeprowadzono na kolektorach hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787 wykonanych ze stali nierdzewnej 15-5 PH w charakterze przeciwpróbek oraz przy użyciu sprawdzianów gwintowych .250-28 UNF-3B STI wykonanych z następujących materiałów:

- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 (standardowy materiał do produkcji sprawdzianów),
- stali szybko tnącej M-1,
- węgla spiekanego,
- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytej powłoką DLC,
- stali szybko tnącej M-1 pokrytej powłoką TiN.



Rys. 5.12. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych w wyniku przeprowadzenia testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787 wykonanych ze stali nierdzewnej 15-5 PH

Na podstawie przeprowadzonych testów eksploatacyjnych (rys. 5.12.) stwierdzono, że sprawdziany gwintowe wykonane z węgla spiekanego, stali do pracy na zimno z powłoką DLC, stali szybko tnącej z powłoką TiN poddane testom eksploatacyjnym przy użyciu kolektorów hydraulicznych OB spoileru samolotu Dreamliner 787 w charakterze przeciwpróbek po zakończonych testach eksploatacyjnych nadal spełniały wymagania metrologiczne i były w pełni zgodne wymiarowo (średnica podziałowa sprawdzianów znajdowała się w tolerancji wymiarowej). Zaobserwowano zużycie sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali do pracy na zimno po wkręceniu w 80 sztuk przeciwpróbek i sprawdzianu gwintowego ze stali szybko tnącej po wkręceniu w 200 sztuk przeciwpróbek. Stwierdzono, że sprawdzian ze stali do pracy na zimno i sprawdzian gwintowy ze stali szybko tnącej nie spełniły założeń, tj. ich średnica podziałowa była poza tolerancją wymiarową przed zakończeniem testów eksploatacyjnych. Jednakże sprawdzian gwintowy ze stali szybko tnącej charakteryzował się większą trwałością w porównaniu do sprawdzianu ze stali narzędziowej do pracy na zimno i uległ zużyciu po wkręceniu w 200 przeciwpróbek, a standardowy sprawdzian wykonany ze stali do pracy na zimno uległ zużyciu po wkręceniu w 80 przeciwpróbek.

5.7.3. Wyniki testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350

Sprawdziany gwintowy .250-28 UNF-3B STI wykonane z różnych materiałów, również z zastosowaniem powłok przeciwzużyciowych zostały poddane testom eksploatacyjnym w warunkach przemysłowych poprzez sprawdzanie kolejno kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350 wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. W każdym z korpusów poddano sprawdzeniu osiem gwintów .250-28 UNF-3B STI stroną PRZECHODNIĄ sprawdzianu. Kolektory aluminiowe pełniły rolę przeciwpróbek w testach eksploatacyjnych.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w trakcie i po ich zakończeniu, 5.7.3. a – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 (tabela 5.60. – 5.63., rys. 5.13.), 5.7.3. b – dla sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 (tabela 5.64. – 5.69., rys. 5.14.), 5.7.3. c – dla sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego C-2 (tabela 5.70. – 5.75., rys. 5.15.), 5.7.3. d – dla sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 z powłoką DLC (tabela 5.76. – 5.81., rys. 5.16.). Uzyskane wyniki zestawiono na wykresie (rys. 5.17.) przedstawiając różnice w szybkości zużycia poszczególnych sprawdzianów w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze tytanu Ti-6Al-4V.

a) Sprawdzan gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1

Tabela 5.60. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9414			
2	1 / 0°	6,9406			
3	1 / 0°	6,9410			
3	2 / 90°	6,9401			
2	2 / 90°	6,9409			
1	2 / 90°	6,9417			

Tabela 5.61. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 20 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9401			
2	1 / 0°	6,9398			
3	1 / 0°	6,9396			
3	2 / 90°	6,9396			
2	2 / 90°	6,9404			
1	2 / 90°	6,9404			

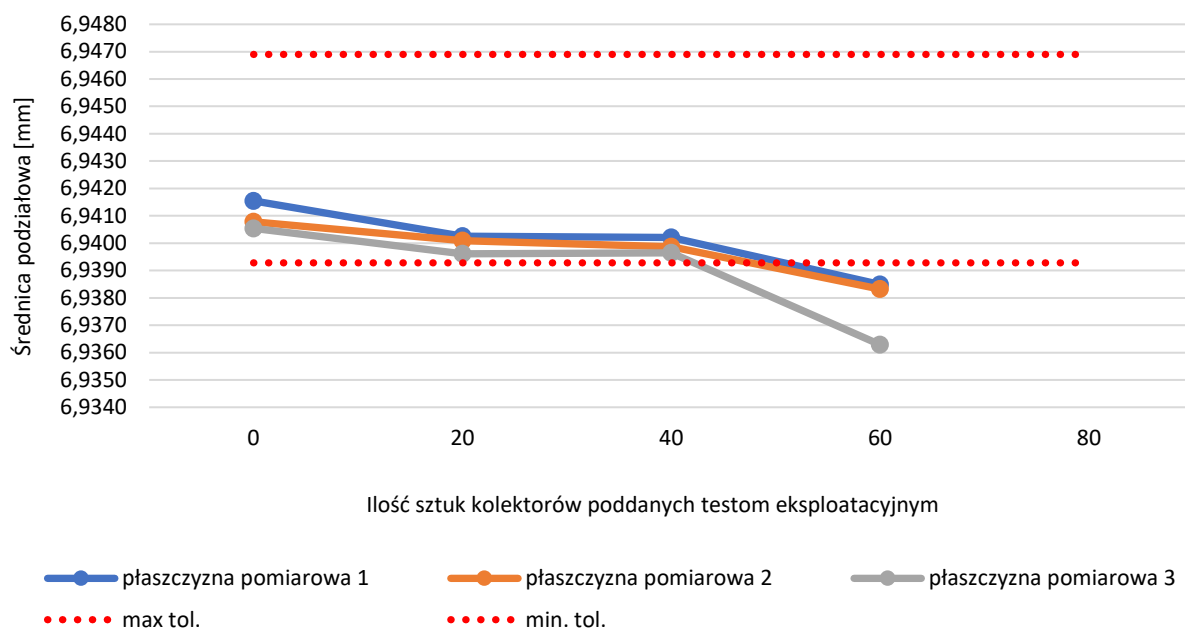
Tabela 5.62. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9404			
2	1 / 0°	6,9398			
3	1 / 0°	6,9395			
3	2 / 90°	6,9398			
2	2 / 90°	6,9399			
1	2 / 90°	6,9401			

Tabela 5.63. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 60 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9385			-0,8
2	1 / 0°	6,9379			-1,4
3	1 / 0°	6,9362			-3,1
3	2 / 90°	6,9364			-2,9
2	2 / 90°	6,9388			-0,5
1	2 / 90°	6,9385			-0,8

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych wykonany przez producenta charakteryzował się średnicą podziałową w zakresie pomiędzy środkiem a dolną granicą tolerancji. Testy zakończono po wkręceniu sprawdzianu w 60 sztuk przeciwpróbek, (rys. 5.11., tab. 5.57.), stwierdzono przekroczenie dolnej granicy tolerancji średnicy podziałowej w trzech płaszczyznach pomiarowych

b) Sprawdzan gwintowy wykonany ze stali szybkotnącej M-1

Tabela 5.64. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9450			
2	1 / 0°	6,9432			
3	1 / 0°	6,9460			
3	2 / 90°	6,9421			
2	2 / 90°	6,9426			
1	2 / 90°	6,9446			

Tabela 5.65. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 20 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9427			
2	1 / 0°	6,9420			
3	1 / 0°	6,9446			
3	2 / 90°	6,9429			
2	2 / 90°	6,9421			
1	2 / 90°	6,9440			

Tabela 5.66. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9414			
2	1 / 0°	6,9411			
3	1 / 0°	6,9434			
3	2 / 90°	6,9429			
2	2 / 90°	6,9422			
1	2 / 90°	6,9412			

Tabela 5.67. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 60 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych






Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9408			
2	1 / 0°	6,9413			
3	1 / 0°	6,9424			
3	2 / 90°	6,9435			
2	2 / 90°	6,9405			
1	2 / 90°	6,9407			

Tabela 5.68. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych









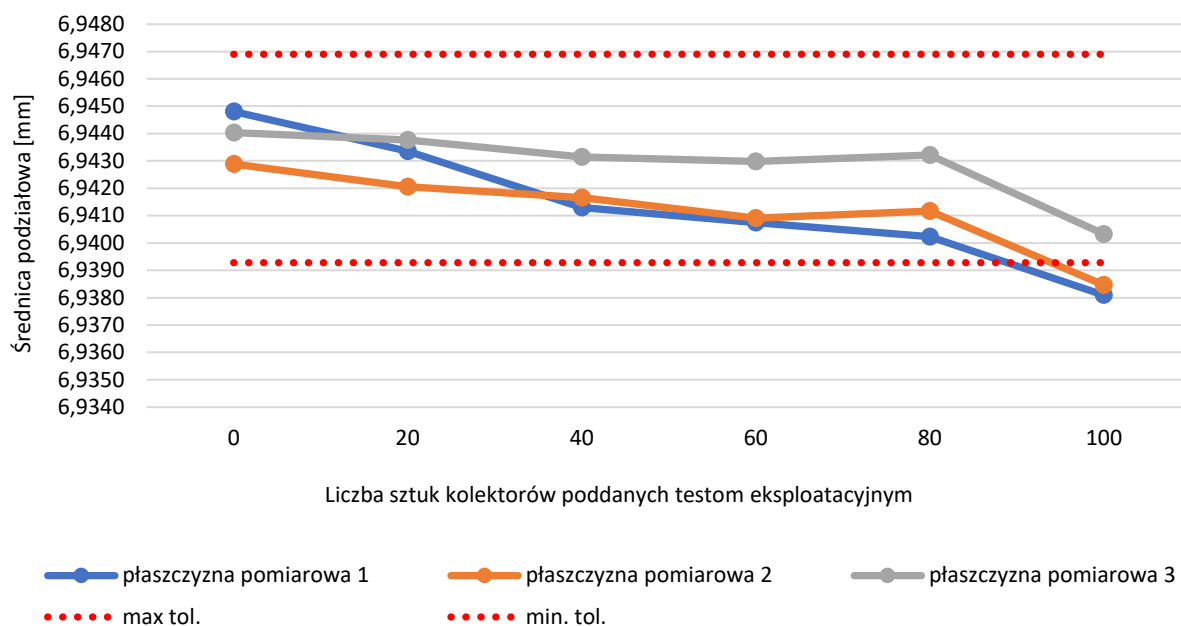
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9400			
2	1 / 0°	6,9410			
3	1 / 0°	6,9431			
3	2 / 90°	6,9434			
2	2 / 90°	6,9414			
1	2 / 90°	6,9404			

Tabela 5.69. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 100 tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9380			-1,2
2	1 / 0°	6,9384			-0,9
3	1 / 0°	6,9400			
3	2 / 90°	6,9406			
2	2 / 90°	6,9385			-0,7
1	2 / 90°	6,9382			-1,1

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.14.



Rys. 5.14. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego ze stali szybkołotnej. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową środka pola tolerancji (rys. 5.64.). Zużycie przebiegało w sposób stopniowy, poprzez zmniejszanie się średnicy podziałowej i obserwowane w trakcie wzorcowania sprawdzianu gwintowego po każdym wkręceniu w 20 sztuk przeciwpróbek. Testy zakończono po wkręceniu sprawdzianu w 100 sztuk przeciwpróbek, (rys. 5.12., tab. 5.63.), stwierdzono przekroczenie dolnej granicy tolerancji średnicy podziałowej w dwóch płaszczyznach pomiarowych, co dało podstawę do zaklasyfikowania sprawdzianu jako niespełniającego wymagania.

c) Sprawdzian gwintowy wykonany z węgla spiekanego C-2

Tabela 5.70. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9454			
2	1 / 0°	6,9458			
3	1 / 0°	6,9445			
3	2 / 90°	6,9446			
2	2 / 90°	6,9450			
1	2 / 90°	6,9448			

Tabela 5.71. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9449			
2	1 / 0°	6,9456			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9451			
2	2 / 90°	6,9458			
1	2 / 90°	6,9443			

Tabela 5.72. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9442			
2	1 / 0°	6,9442			
3	1 / 0°	6,9448			
3	2 / 90°	6,9447			
2	2 / 90°	6,9447			
1	2 / 90°	6,9446			

Tabela 5.73. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9436			
2	1 / 0°	6,9441			
3	1 / 0°	6,9432			
3	2 / 90°	6,9435			
2	2 / 90°	6,9440			
1	2 / 90°	6,9445			

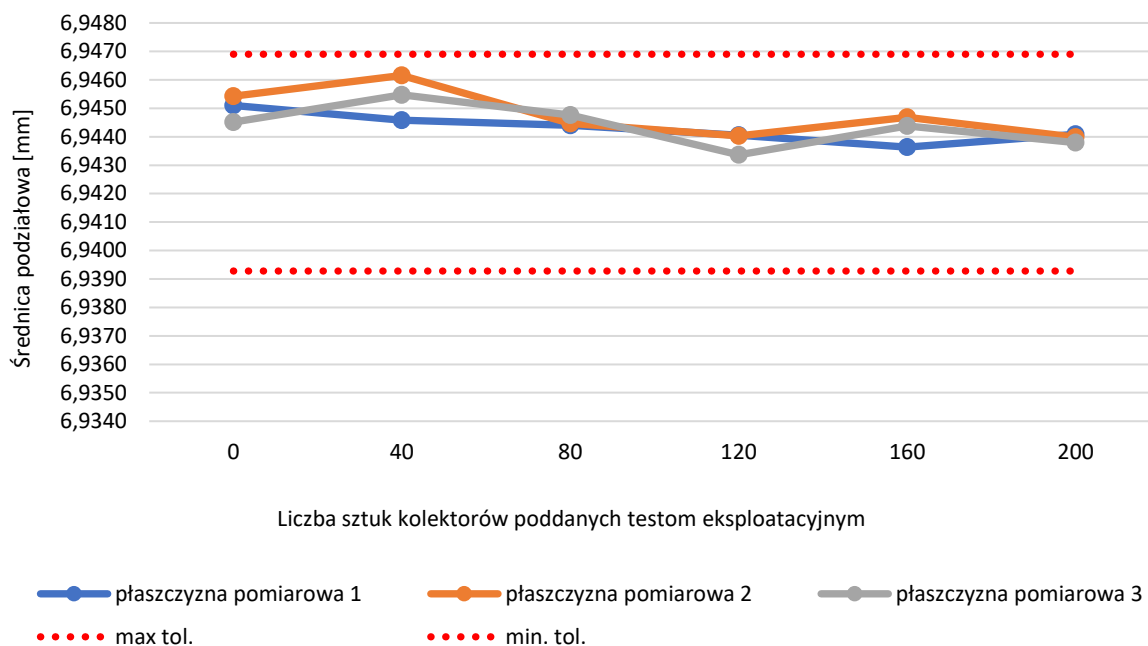
Tabela 5.74. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9437			
2	1 / 0°	6,9449			
3	1 / 0°	6,9440			
3	2 / 90°	6,9444			
2	2 / 90°	6,9445			
1	2 / 90°	6,9435			

Tabela 5.75. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9437			
2	1 / 0°	6,9438			
3	1 / 0°	6,9436			
3	2 / 90°	6,9440			
2	2 / 90°	6,9442			
1	2 / 90°	6,9445			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.15.



Rys. 5.15. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych, wykonany przez producenta, charakteryzował się średnicą podziałową pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji dla średnicy podziałowej (rys. 5.11., tab. 5.64.) Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.11., tab. 5.69.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniający wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

d) Sprawdzan gwintowy wykonany ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokryty powłoką DLC

Tabela 5.76. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ nowego sprawdzianu – przed testami eksploatacyjnymi


Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9452			
2	1 / 0°	6,9467			
3	1 / 0°	6,9468			
3	2 / 90°	6,9468			
2	2 / 90°	6,9466			
1	2 / 90°	6,9450			

Tabela 5.77. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 40 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych





Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9446			
2	1 / 0°	6,9451			
3	1 / 0°	6,9464			
3	2 / 90°	6,9463			
2	2 / 90°	6,9460			
1	2 / 90°	6,9449			

Tabela 5.78. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 80 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych


Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9450			
2	1 / 0°	6,9453			
3	1 / 0°	6,9459			
3	2 / 90°	6,9459			
2	2 / 90°	6,9459			
1	2 / 90°	6,9451			

Tabela 5.79. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 120 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych







Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9435			
2	1 / 0°	6,9451			
3	1 / 0°	6,9453			
3	2 / 90°	6,9457			
2	2 / 90°	6,9449			
1	2 / 90°	6,9439			

Tabela 5.80. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 160 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych













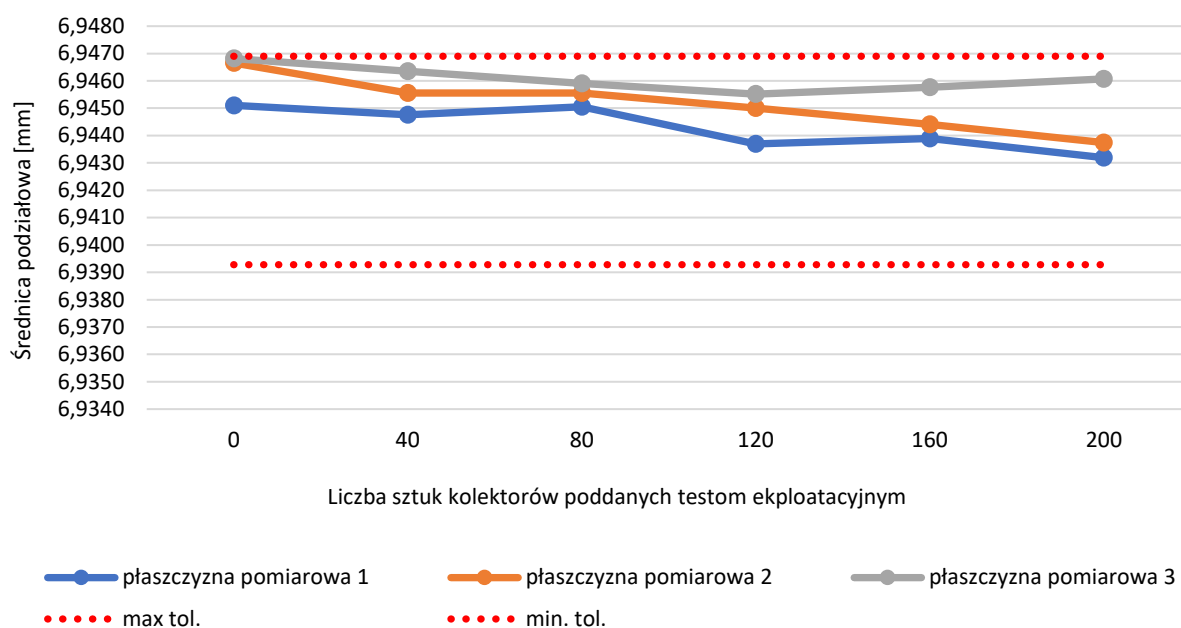
Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		Przekroczenie [μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9442			
2	1 / 0°	6,9447			
3	1 / 0°	6,9458			
3	2 / 90°	6,9458			
2	2 / 90°	6,9441			
1	2 / 90°	6,9436			

Tabela 5.81. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu po wkręceniu w 200 sztuk tytanowych kolektorów hydraulicznych

Płaszczyzna pomiarowa	Pomiar / kąt obrotu	Średnica podziałowa [mm]	Tolerancja		[Przekroczenie μm]
			Min	Max	
1	1 / 0°	6,9431			
2	1 / 0°	6,9441			
3	1 / 0°	6,9460			
3	2 / 90°	6,9462			
2	2 / 90°	6,9454			
1	2 / 90°	6,9434			

Uzyskane wyniki pomiaru średnicy podziałowej przed i w trakcie testów eksploatacyjnych zostały przedstawione w formie graficznej na rys. 5.16.

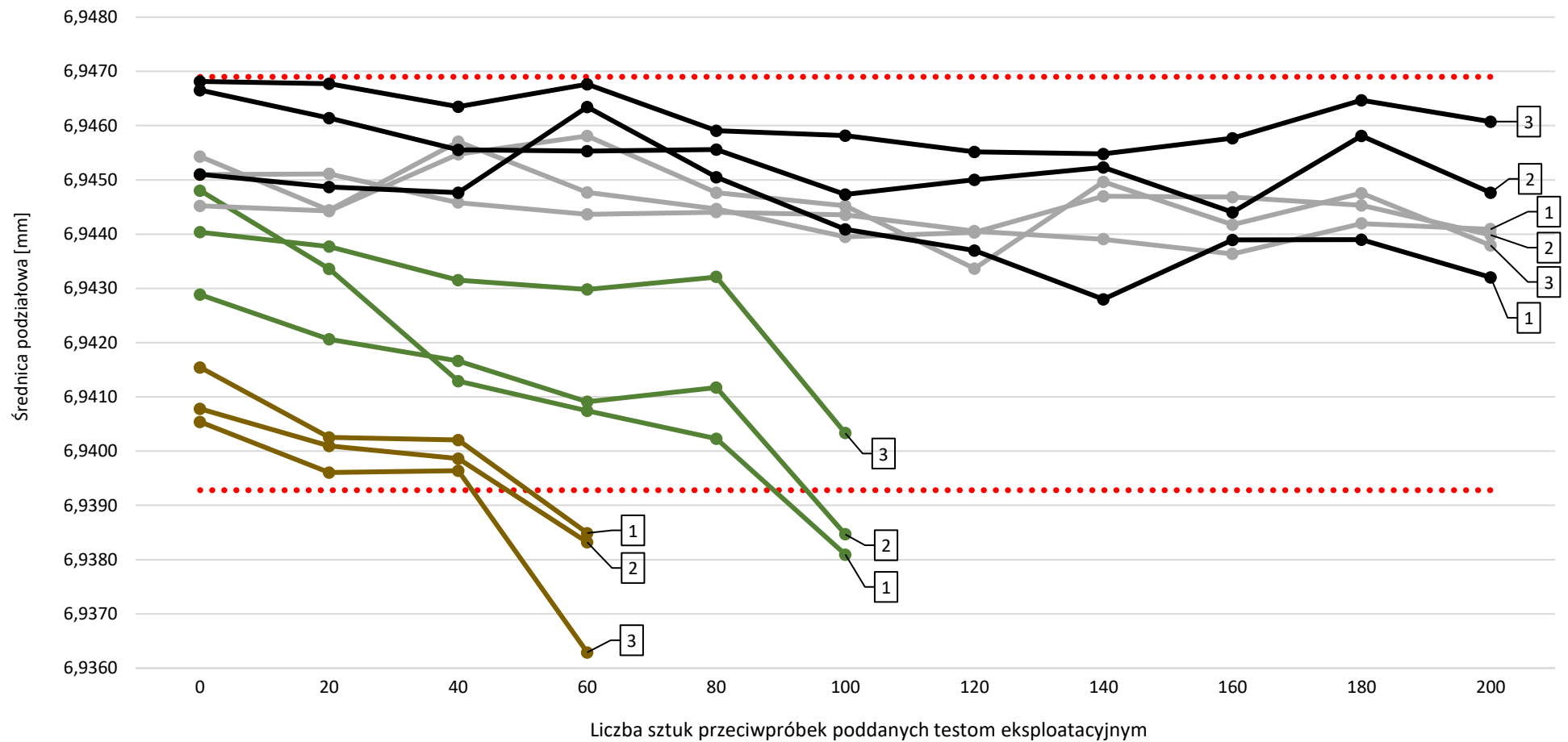


Rys. 5.16. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu stali narzędziowej do pracy na zimno z powłoką DLC. Wyniki pomiaru średnicy podziałowej w trakcie testów eksploatacyjnych przedstawiono z podziałem na płaszczyzny sprawdzianu gwintowego

Sprawdzian gwintowy użyty do testów eksploatacyjnych w stanie po nałożeniu powłoki DLC, charakteryzował się średnicą podziałową w zakresie pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.14., tab. 5.70.) Testy zakończyły się po wkręceniu sprawdzianu w 200 sztuk przeciwpróbek, po zakończonych testach średnica podziałowa znajdowała się nadal pomiędzy środkową a górną granicą tolerancji (rys. 5.14., tab. 5.75.), co było powodem zaklasyfikowania sprawdzianu jako spełniający wymagania odnośnie średnicy podziałowej.

Na rys. 5.17. zestawiono wyniki pomiarów średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych przed rozpoczęciem testów eksploatacyjnych, w ich trakcie i po zakończeniu. Testy eksploatacyjne przeprowadzono na kolektorach hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350 wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V w charakterze przeciwpróbek oraz przy użyciu sprawdzianów gwintowych .250-28 UNF-3B STI wykonanych z następujących materiałów:

- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 (standardowy materiał do produkcji sprawdzianów),
- stali szybko tnącej M-1,
- węgliką spiekanego,
- stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytej powłoką DLC.



..... min. tol. max tol. —●— stal narzędziowa do pracy na zimno —●— stal szybko tnąca —●— węgielk piekany —●— stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC

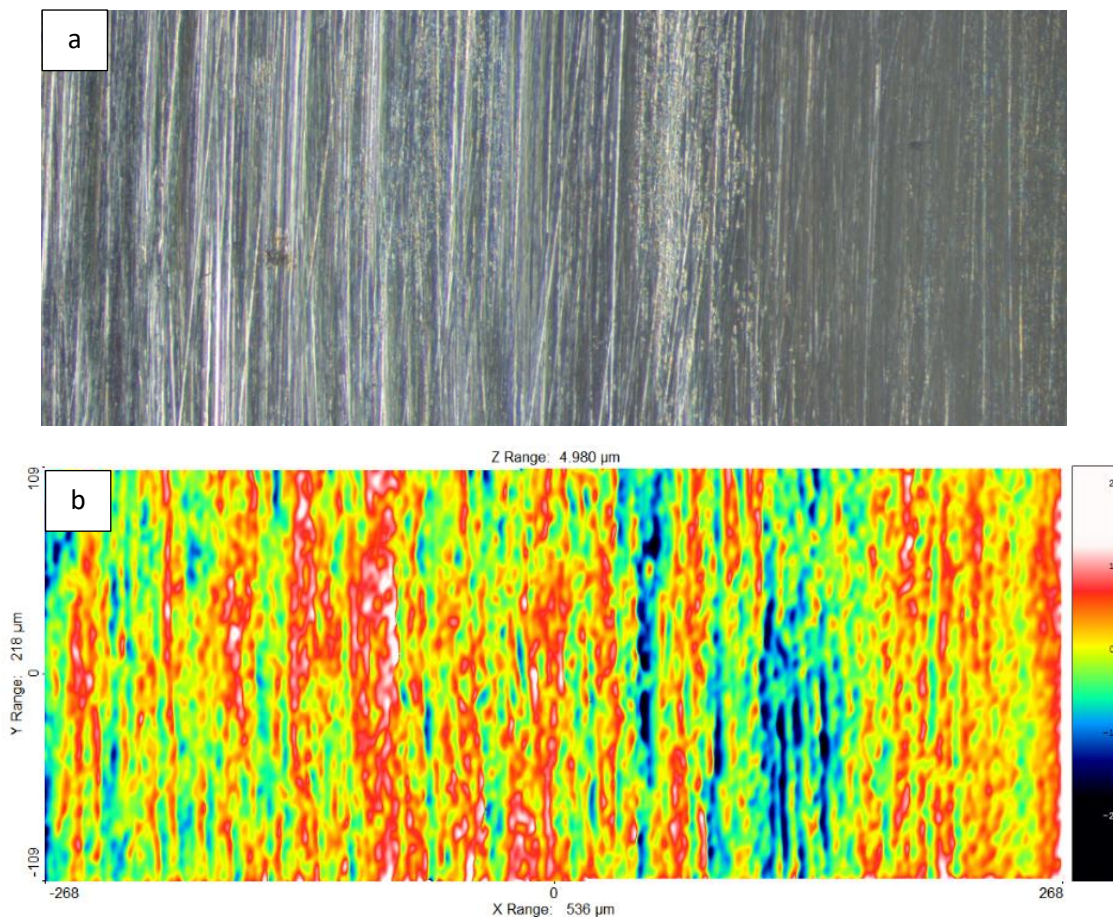
5.17. Wykres zmiany średnicy podziałowej strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych w wyniku przeprowadzenia testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350 wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V

Na podstawie przeprowadzonych testów eksploatacyjnych (rys. 5.17.) stwierdzono, że sprawdziany gwintowe wykonane z węgla spiekanego, stali do pracy na zimno z powłoką DLC poddane testom eksploatacyjnym przy użyciu kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350 w charakterze przeciwpróbek, wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V po zakończonych testach eksploatacyjnych nadal spełniały wymagania metrologiczne i były w pełni zgodne wymiarowo (średnica podziałowa sprawdzianów znajdowała się w tolerancji wymiarowej). Zaobserwowano zużycie sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali do pracy na zimno po wkręceniu w 60 sztuk przeciwpróbek i sprawdzianu gwintowego ze stali szybkołnącej po wkręceniu w 100 sztuk przeciwpróbek. Stwierdzono, że sprawdzian ze stali do pracy na zimno i sprawdzian gwintowy ze stali szybkołnącej nie spełniły przyjętych kryteriów, tj. ich średnica podziałowa była poza tolerancją wymiarową po zakończeniu testów eksploatacyjnych. Na podstawie wykonanych testów eksploatacyjnych prowadzonych przez około 6 miesięcy przy użyciu kolektorów hydraulicznych hamulca samolotu Airbus A350 stwierdzono, że wzorcowanie sprawdzianów gwintowych wykonanych z węgla spiekanego i stali do pracy na zimno pokrytej powłoką DLC może być przeprowadzane co 6 miesięcy a nie co 3 miesiące. Średnica podziałowa w przypadku obu sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych znajdowała się w górnej granicy tolerancji średnicy podziałowej. Jest to wzrost o 3 miesiące w stosunku do czasookresu wzorcowania sprawdzianów gwintowych wykonanych ze standardowego materiału – stali do pracy na zimno O1. Zastosowanie stali szybkołnącej M-1 jako materiału do produkcji sprawdzianów gwintowych nie zwiększyło w istotny sposób żywotności sprawdzianu gwintowego.

Na podstawie wyników badań własnych – 6 miesięcznych testów eksploatacyjnych, odzwierciedlających 12 miesięczne obciążenie sprawdzianów gwintowych używanych w kontroli końcowej przy sprawdzaniu części lotniczych, a także w oparciu o dotychczasową praktykę przemysłową dokonano oceny, że żywotność sprawdzianów wykonanych z węgla spiekanego, stali do pracy na zimno z powłoką DLC, stali szybkołnącej z powłoką TiN wyniesie założone minimum 12 miesięcy. Dodatkowo po zakończeniu testów eksploatacyjnych każdy z tych sprawdzianów uległ zużyciu mniejszemu niż połowa jego tolerancji dla średnicy podziałowej, co pozwoliło na zdefiniowanie również czasookresu wzorcowania dla sprawdzianów wykonanych z węgla spiekanego, stali do pracy na zimno z powłoką DLC, stali szybkołnącej z powłoką TiN używanych do inspekcji kolektorów hydraulicznych i obudów ze stali i tytanu w firmie Yasa Poland Sp. z o.o. na 6 miesięcy.

5.8. Wyniki pomiarów chropowatości warstwy wierzchniej sprawdzianów

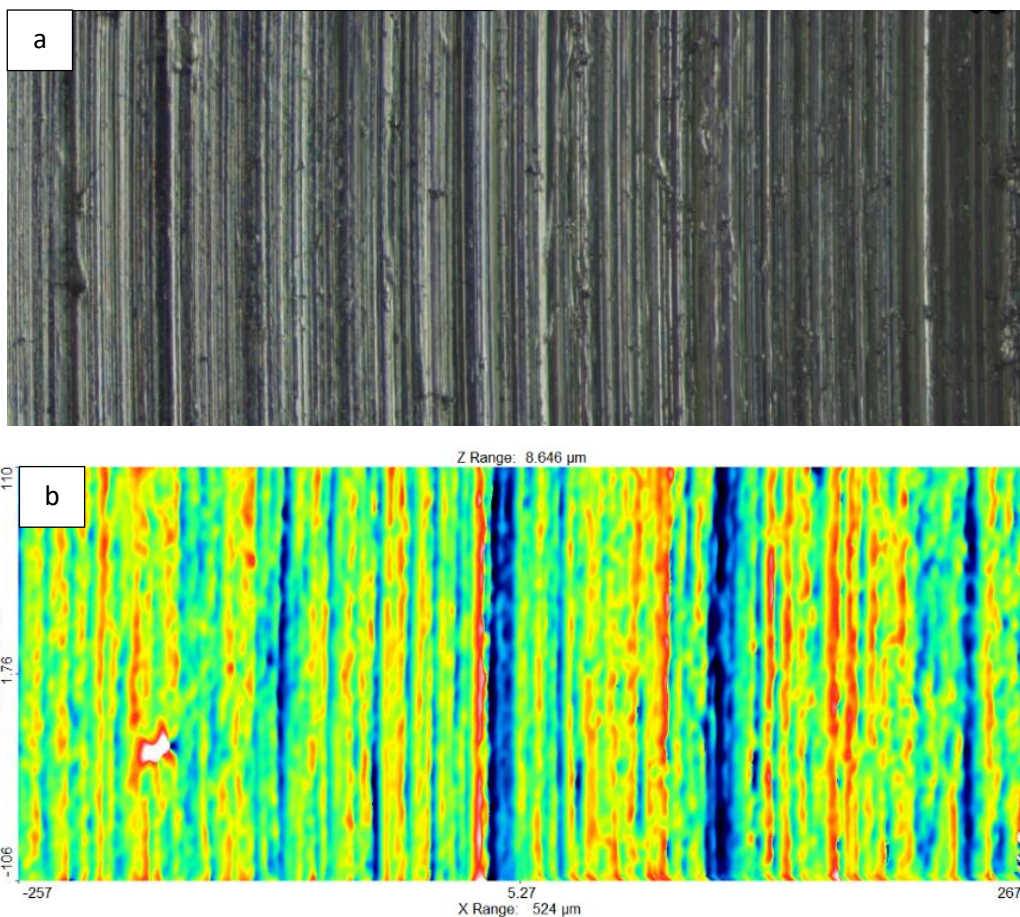
Na podstawie pomiarów chropowatości przeprowadzonych za pomocą mikroskopu różnicowania ogniskowego InfiniteFocus G4 firmy Alicona wykonanych zgodnie z wytycznymi norm PN-EN ISO 21920-2 [101] i PN-EN ISO 25178-2 [102], otrzymano i opracowano wyniki, które przedstawiono na rys. 5.18 – 5.22. – obrazują one stan powierzchni sprawdzianów, w tym zestawione wyniki zmierzonych parametrów struktury geometrycznej sprawdzianów (tabele 5.82 – 5.86.).



Rys. 5.18. Stan powierzchni boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1
 a) widok rzeczywisty powierzchni,
 b) obraz topografii powierzchni

Tabela 5.82. Wyniki pomiaru parametrów chropowatości 2D i 3D powierzchni boków zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno O1

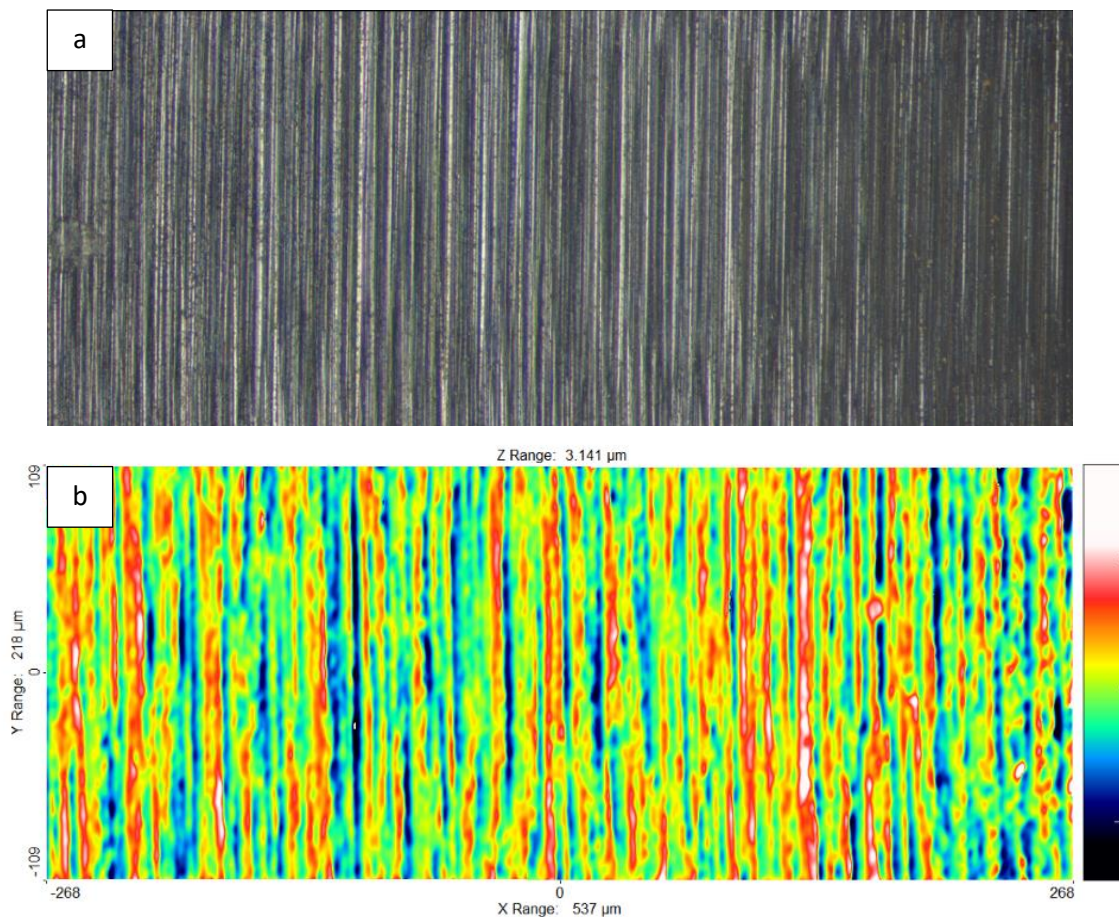
Parametr chropowatości 2D	Numer pomiaru (wartość średnia z 3 pomiarów)					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Ra [μm]	0,38	0,35	0,37	0,36	0,43	0,38	0,03
Rz [μm]	2,99	2,86	2,67	2,70	4,01	3,05	0,55
Parametr chropowatości 3D	Numer pomiaru					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Sa [μm]	0,38	0,38	0,38	0,36	0,46	0,39	0,04
Sku [μm]	3,15	3,13	3,42	3,05	4,98	3,55	0,81
Ssk [μm]	-0,21	-0,08	-0,31	-0,07	-0,80	-0,29	0,29
Sdr [%]	2,72	2,48	2,56	3,01	2,81	2,72	0,21



Rys. 5.19. Stan powierzchni boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1
 a) widok rzeczywisty powierzchni
 b) obraz topografii powierzchni

Tabela 5.83. Wyniki pomiaru parametrów chropowatości 2D i 3D powierzchni boków zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1

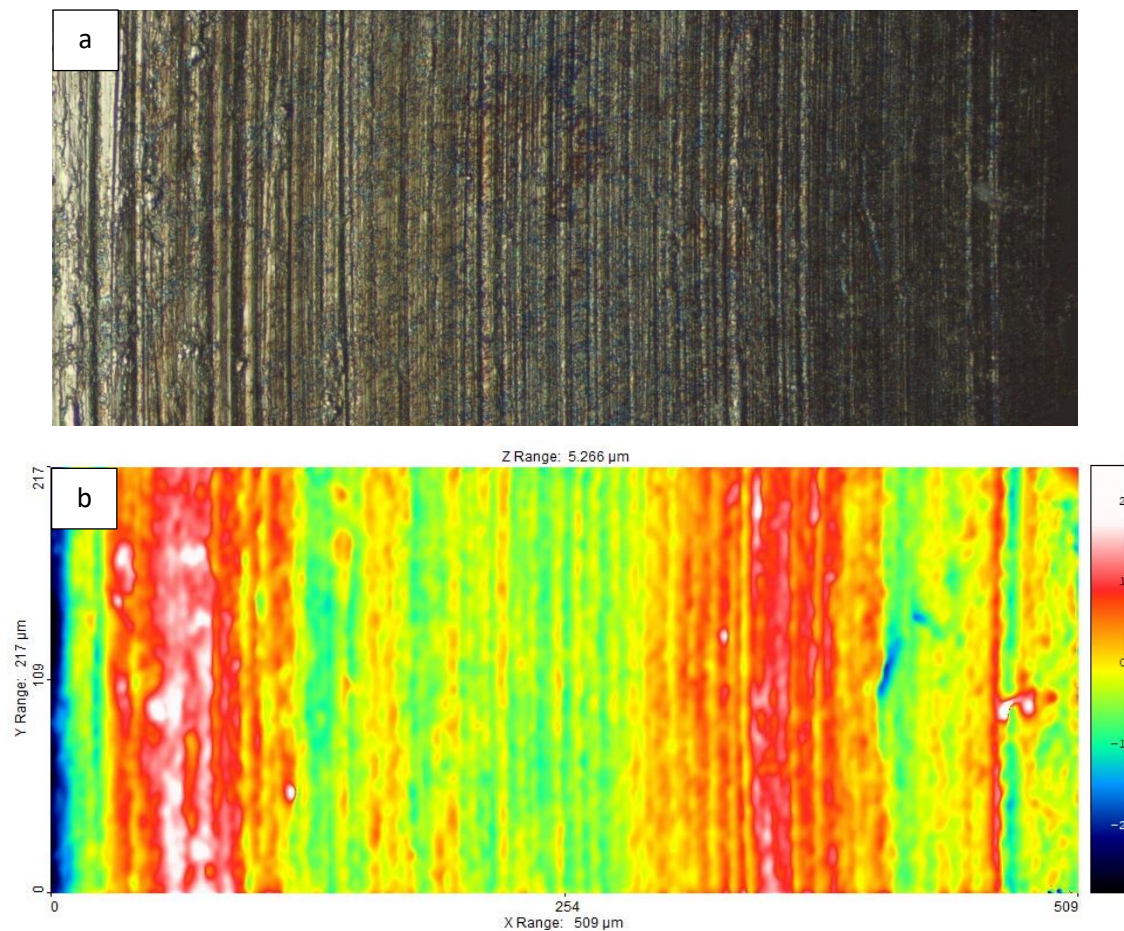
Parametr chropowatości 2D	Numer pomiaru (wartość średnia z 3 pomiarów)					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Ra [μm]	0,45	0,53	0,50	0,46	0,49	0,49	0,03
Rz [μm]	3,37	3,74	3,80	3,69	3,49	3,62	0,18
Parametr chropowatości 3D	Numer pomiaru					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Sa [μm]	0,44	0,54	0,49	0,46	0,49	0,48	0,04
Sku [μm]	3,32	3,11	3,02	5,89	3,36	3,74	1,21
Ssk [μm]	-0,23	-0,52	-0,31	0,03	-0,33	-0,27	0,20
Sdr [%]	3,40	3,98	4,55	4,99	4,15	4,21	0,60



Rys. 5.20. Stan powierzchni boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego C-2
 a) widok rzeczywisty powierzchni
 b) obraz topografii powierzchni

Tabela 5.84. Wyniki pomiaru parametrów chropowatości 2D i 3D powierzchni boków zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego C-2

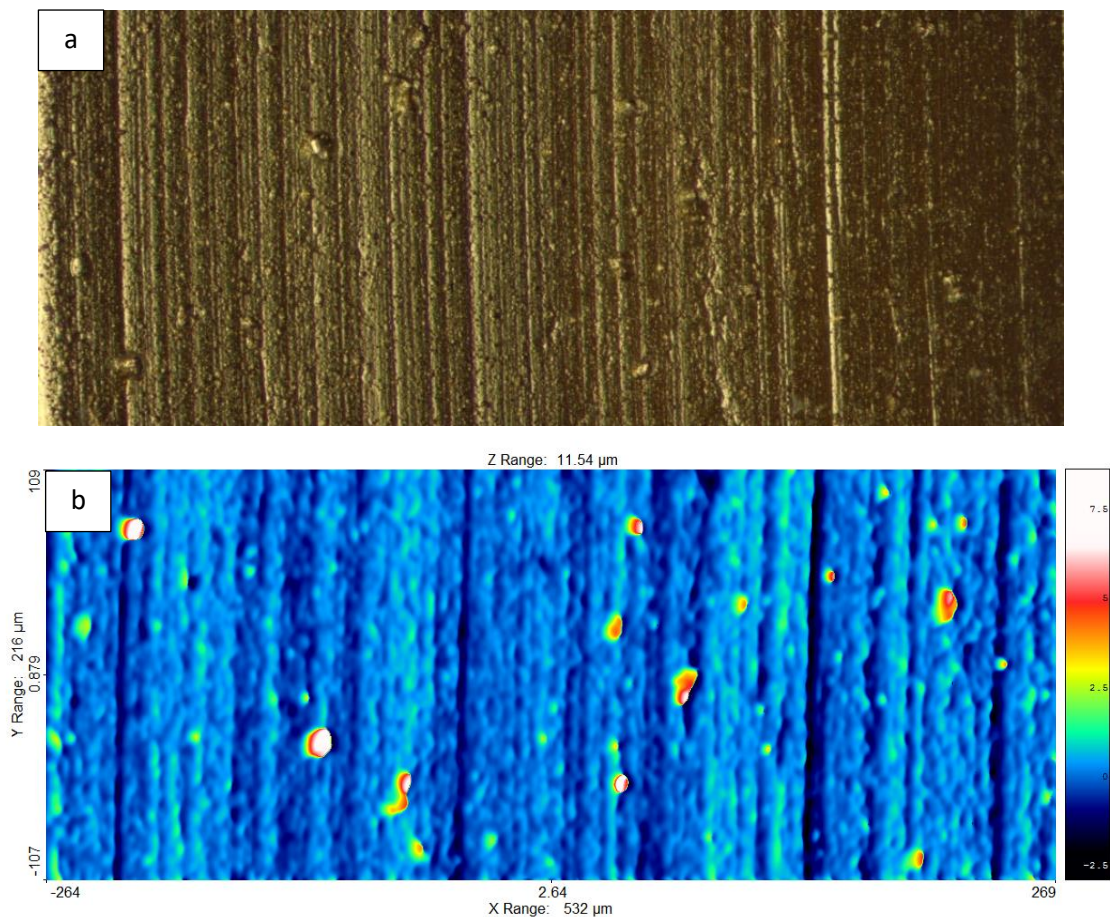
Parametr chropowatości 2D	Numer pomiaru (wartość średnia z 3 pomiarów)					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Ra [μm]	0,31	0,33	0,32	0,31	0,32	0,32	0,01
Rz [μm]	2,18	2,41	2,42	2,47	2,26	2,35	0,12
Parametr chropowatości 3D	Numer pomiaru					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Sa [μm]	0,31	0,35	0,32	0,33	0,31	0,32	0,02
Sku [μm]	6,31	63,88	4,35	8,48	2,97	17,20	26,18
Ssk [μm]	0,27	3,83	0,10	0,83	-0,01	1,0	1,61
Sdr [%]	2,45	3,13	2,73	2,85	2,54	2,74	0,27



Rys. 5.21. Stan powierzchni boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytego powłoką DLC
 a) widok rzeczywisty powierzchni,
 b) obraz topografii powierzchni

Tabela 5.85. Wyniki pomiaru parametrów chropowatości 2D i 3D powierzchni boków zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytego powłoką DLC

Parametry chropowatości 2D	Numer pomiaru (wartość średnia z 3 pomiarów)					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Ra [μm]	0,21	0,23	0,35	0,35	0,34	0,30	0,07
Rz [μm]	1,21	1,56	1,67	1,95	2,13	1,70	0,36
Parametry chropowatości 3D	Numer pomiaru					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Sa [μm]	0,22	0,24	0,37	0,37	0,41	0,32	0,09
Sku [μm]	10,63	6,05	3,97	4,16	5,20	6,0	2,72
Ssk [μm]	0,78	-0,79	0,02	-0,31	0,18	-0,02	0,58
Sdr [%]	1,04	1,09	1,76	1,05	1,60	1,31	0,34



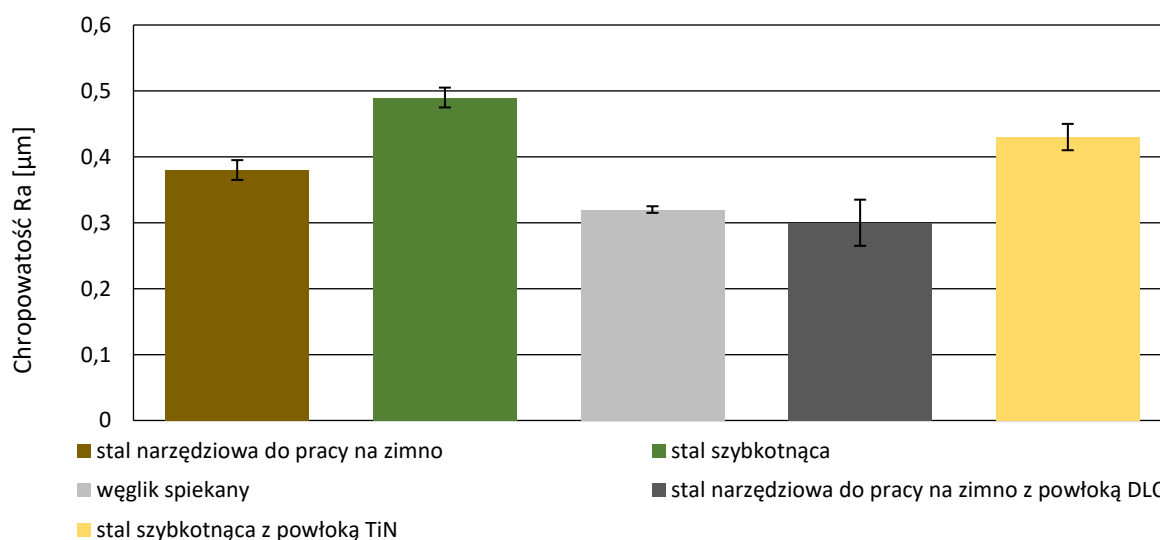
Rys. 5.22. Stan powierzchni boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1 pokryty powłoką TiN
 a) obraz rzeczywisty powierzchni
 b) topografia powierzchni

Tabela 5.86. Wyniki pomiaru parametrów chropowatości 2D i 3D sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1 pokrytego powłoką TiN

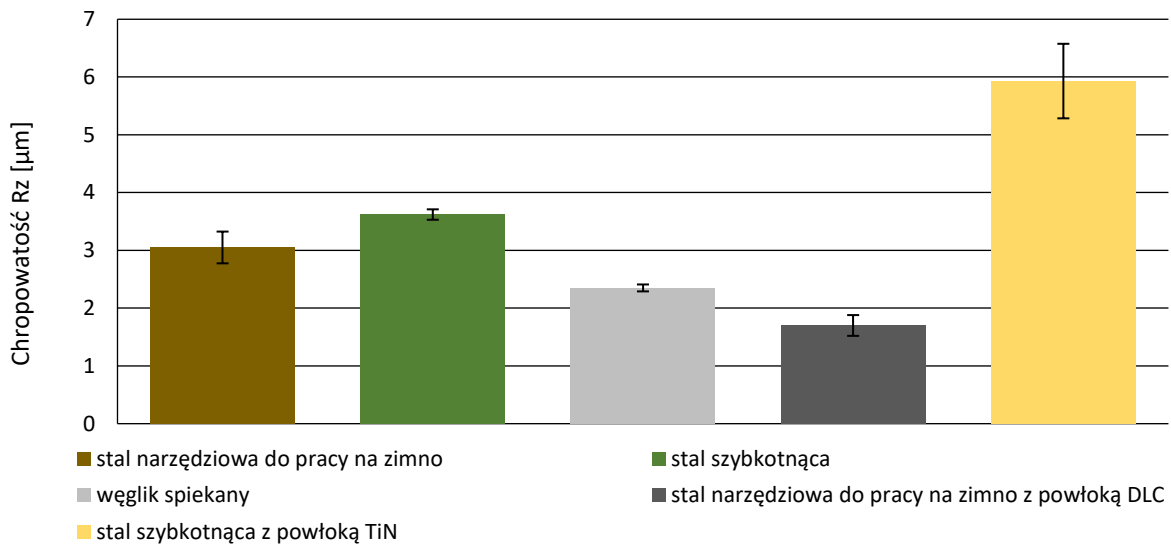
Parametry chropowatości 2D	Numer pomiaru (wartość średnia z 3 pomiarów)					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Ra [μm]	0,37	0,49	0,44	0,42	0,44	0,43	0,04
Rz [μm]	4,20	6,30	7,53	6,52	5,12	5,93	1,29
Parametry chropowatości 3D	Numer pomiaru					Wartość średnia (5 punktów pomiarowych)	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
Sa [μm]	0,43	0,47	0,43	0,39	0,45	0,43	0,03
Sku [μm]	36,90	14,39	31,81	30,74	21,15	26,99	9,06
Ssk [μm]	4,30	1,37	3,32	3,03	1,74	2,75	1,20
Sdr [%]	8,53	5,73	7,20	7,45	7,08	7,20	1,0

Analiza morfologii powierzchni sprawdzianów na podstawie obserwacji mikroskopowych obrazów rzeczywistych i ich topografii wykazała, że warstwa wierzchnia wszystkich sprawdzianów posiada kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni będącej skutkiem procesu technologicznego produkcji sprawdzianów (szlifowania). Zaobserwowano ślady równoległych wgłębień (mikrorysy) o zmiennej głębokości, które są charakterystyczne dla tego procesu. Widoki rzeczywiste powierzchni sprawdzianów powlekanych powłokami ochronnymi (DLC na podłożu stali do pracy na zimno O1, TiN na podłożu stali szybko tnącej M-1) i ich topografie wykazują kierunkowość struktury powierzchni zbliżonej do struktury powierzchni sprawdzianów bez powłok wykonanych ze stali do pracy na zimno O1 i stali szybko tnącej M-1. Mikronierówności powierzchni powstałe w wyniku szlifowania materiału pozostają w dalszym ciągu widoczne, pomimo nałożenia powłok. Spowodowane jest to ich niewielką grubością (TiN 2-3,2 μm ; DLC 2-2,5 μm , wg. deklaracji producenta) oraz bardzo dobrym ich przyleganiem i wypełnieniem, a tym samym odwzorowaniem stanu powierzchni podłoża. Obrazy topografii powierzchni sprawdzianów bez powłok przeciwzuzyciowych ujawniły różnice w strukturze powierzchni stali do pracy na zimno O1, stali szybko tnącej M-1 i węgla spiekane C-2 – związane z różną szlifowalnością materiału, a także spowodowane warunkami samego procesu szlifowania tj. rodzajem użytej ściernicy, jej gradacją, a także wartością zadanych technologicznych parametrów skrawania podczas procesu szlifowania. Dodatkowo w wyniku analizy topografii powierzchni sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 pokrytego powłoką TiN ujawniono występowanie wypukłych mikroobszarów o kulistej morfologii, świadczących o obecności charakterystycznych mikrokropelek, tzw. fazy kropelkowej, tworzącej się na powierzchni powłok z azotku tytanu podczas ich wytwarzania metodą Arc-PVD (odparowania łukiem elektrycznym).

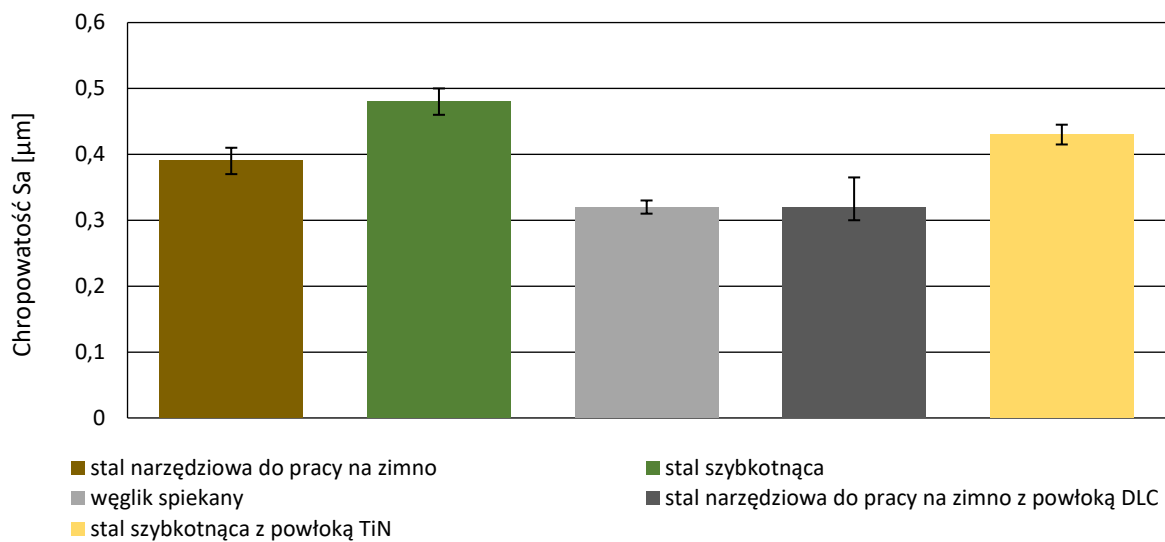
W celu oceny stopnia zróżnicowania struktury geometrycznej powierzchni sprawdzianów porównano uzyskane wyniki pomiarów parametrów chropowatości dla poszczególnych sprawdzianów i zestawiono na wykresach jako wartości średnie parametrów chropowatości 2D i 3D w zależności od rodzaju materiału sprawdzianu (rys. 5.23 – 5.28.).



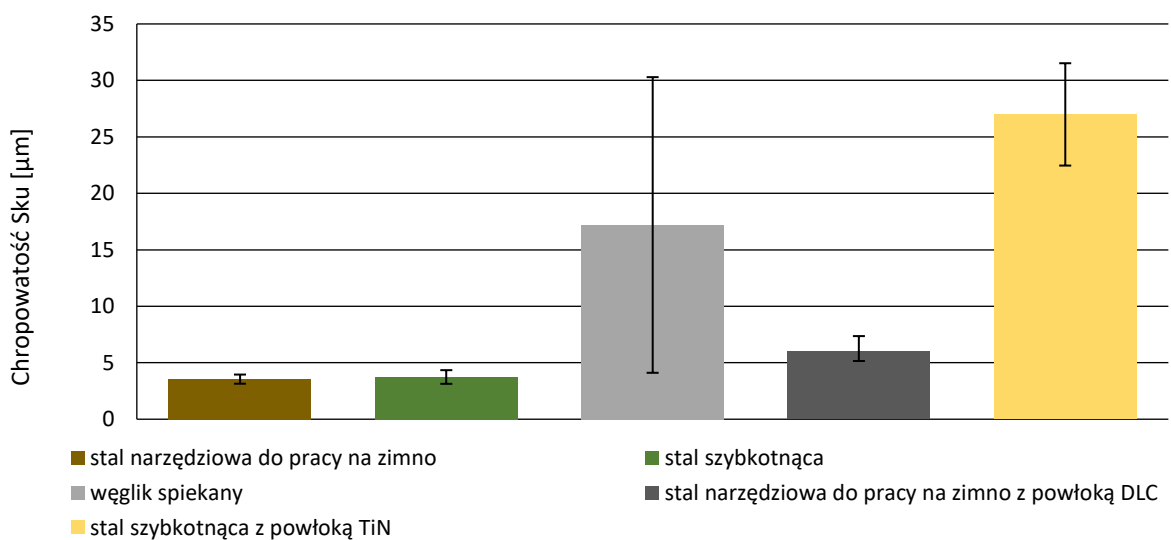
Rys. 5.23. Wykres zróżnicowania parametru Ra na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża



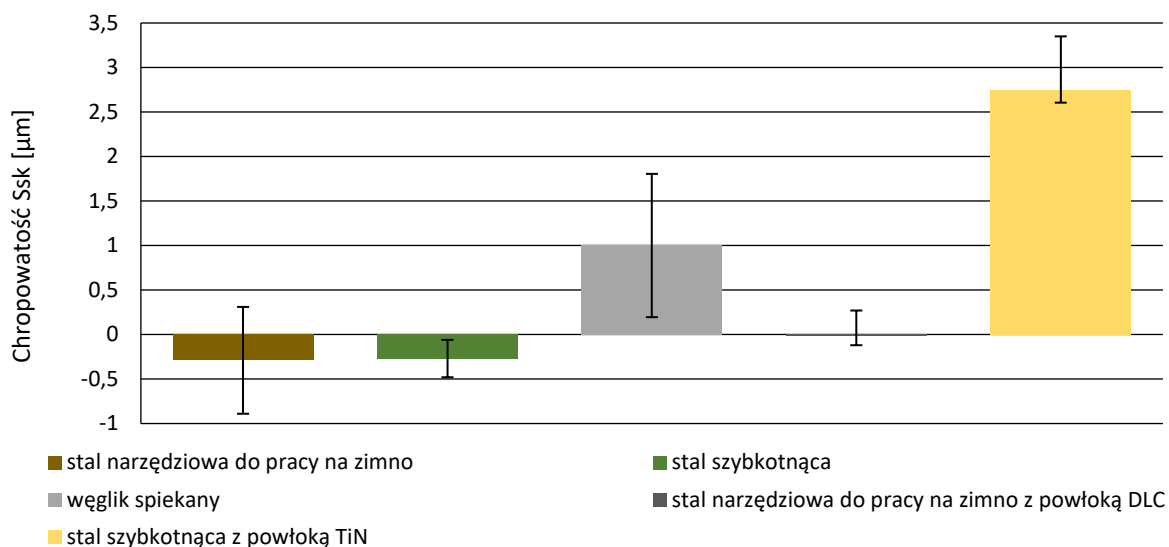
Rys. 5.24. Wykres zróżnicowania parametru Rz na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża



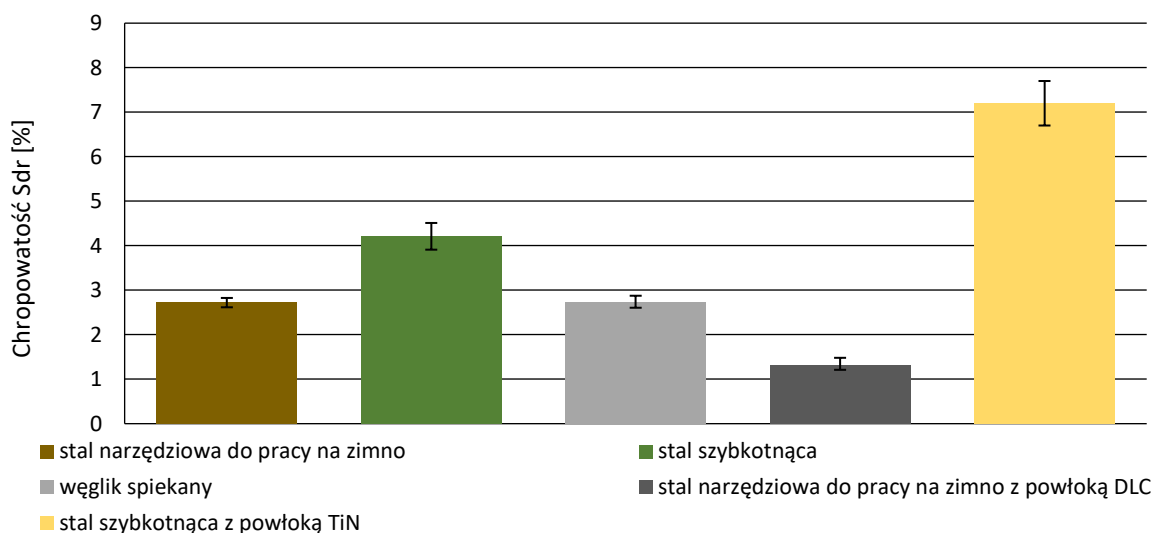
Rys. 5.25. Wykres zróżnicowania parametru Sa na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża



Rys. 5.26. Wykres zróżnicowania parametru Sku na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża



Rys. 5.27. Wykres różnicowania parametru Ssk na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża



Rys. 5.28. Wykres różnicowania parametru Sdr na bokach zarysu gwintu w zależności od materiału podłoża

Na podstawie przedstawionych wyników na rys. 5.23. – 5.24. i w tab. 5.82. – 5.86. stwierdzono, że najmniejszymi wartościami ze zmierzonych parametrów chropowatości 2D (R_a , R_z) charakteryzują się powierzchnie boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno z powłoką DLC. Parametry chropowatości 2D wynosiły odpowiednio: $R_a = 0,30 \mu\text{m}$ (wartość średnia); $R_z = 1,70 \mu\text{m}$ (wartość średnia). Z kolei najwyższymi wartościami parametrów chropowatości 2D (R_a , R_z) charakteryzowały się powierzchnie boków zarysu gwintu sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1: parametr $R_a = 0,49 \mu\text{m}$, powierzchnie boków zarysu gwintu sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej z powłoką TiN: parametr $R_z = 5,93 \mu\text{m}$. Na podstawie uzyskanych wyników, stwierdzono że najprawdopodobniej wysoka wartość parametru chropowatości powłoki TiN była związana z mikronierównościami wypukłych powierzchni w postaci fazy kropelkowej i wklęsłych w postaci mikrokraterów związanych z metodą napyłania jonowego Arc-PVD powłoki z azotku tytanu (TiN). W wyniku przeprowadzonej analizy parametrów chropowatości 3D (S_a , S_{ku} , S_{sk} , S_{dr}) na podstawie rys. 5.25. – 5.28. i tabeli 5.82. – 5.86. – zaobserwowano, że najmniejszymi wartości parametru S_a charakteryzują się powierzchnie boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego z węgla spiekane C-2 i boku zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali do pracy na zimno pokrytej powłoką DLC, w obu przypadkach wartość

parametru wyniosła $S_a = 0,32 \mu\text{m}$ (wartość średnia), z kolei najwyższą wartością parametru S_a charakteryzowały się powierzchnie boków zarysu gwintu sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1: $S_a = 0,48$ (wartość średnia). Poddano również analizie wyniki pomiarów S_{sk} i S_{ku} , rys. 5.26. – 5.27., tab. 5.82. – 5.86., według danych literaturowych [100] wartość parametru $S_{sk} < 0$ świadczy o przewadze wgłębień na powierzchni, a z kolei wartość parametru $S_{sk} > 0$ świadczy o przewadze występowania wierzchołków na powierzchni. Najwyższą wartością parametru S_{sk} charakteryzowała się powierzchnia sprawdzianu wykonana ze stali szybkoobrotowej M-1 z powłoką TiN: $S_{sk} = 2,75$, podobnie jak w przypadku wysokich wartości R_a dla tej próbki prawdopodobnie powodem było występowanie fazy kropelkowej na powierzchni, w wyniku nakładania powłoki TiN metoda Arc-PVD. Według danych literaturowych [100] parametr S_{ku} pokazuje charakter niedoskonałości na powierzchni i ich dystrybucje, powierzchnia o rozkładzie wysokości Gaussa ma wartość $S_{ku} = 3$. W przypadku $S_{ku} < 3$ badana powierzchnia jest bardziej płaska i występujące niedoskonałości są łagodne. W przypadku $S_{ku} > 3$ obszar zawiera nierówne ostre wzniesienia lub mikrokratery. Najwyższą wartością S_{ku} powierzchni boków gwintu ze wszystkich próbek poddanych badaniom miał sprawdzian wykonany ze stali szybkoobrotowej pokryty powłoką TiN: $S_{ku} = 26,99 \mu\text{m}$. Ponownie, prawdopodobną przyczyną są mikrokratery na powierzchni i faza kropelkowa powłoki pochodząca z nanoszenia powłoki azotku tytanu. Duże wartości odchylenia standardowego w przypadku pomiaru parametrów chropowatości S_{sk} i S_{ku} dla poszczególnych sprawdzianów wynikały z dużego rozrzutu wyników pomiędzy poszczególnymi bokami zarysu gwintu. Dokonano również analizy parametru S_{dr} (rys. 5.28., tab. 5.82. – 5.86.), który jest ważnym parametrem w przypadku analizy powierzchni materiału przeznaczonego do pokrycia powłoką ochronną, określa on rzeczywistą powierzchnię styku, dla idealnie płaskiej powierzchni wynosi $S_{dr}=0$ [*wpływ powierzchni na właściwości eksploatacyjne maszyn*]. Spośród sprawdzianów nie pokrytych powłokami przeciwzużyciowymi najmniejszą wartością parametru S_{dr} charakteryzowały się powierzchnie boków zarysu gwintu sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali do pracy na zimno O1: $S_{dr} = 2,72$ (wartość średnia), z kolei najwyższą wartością parametru S_{dr} charakteryzowała się powierzchnia sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1: $S_{dr} = 2,74$ (wartość średnia). Na podstawie analizy tych wyników można stwierdzić, że powierzchnia boków zarysu gwintu sprawdzianu wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1 ma najlepsze rozwinięcie powierzchni i powłoka TiN w sposób trwały połączy się z powierzchnią.

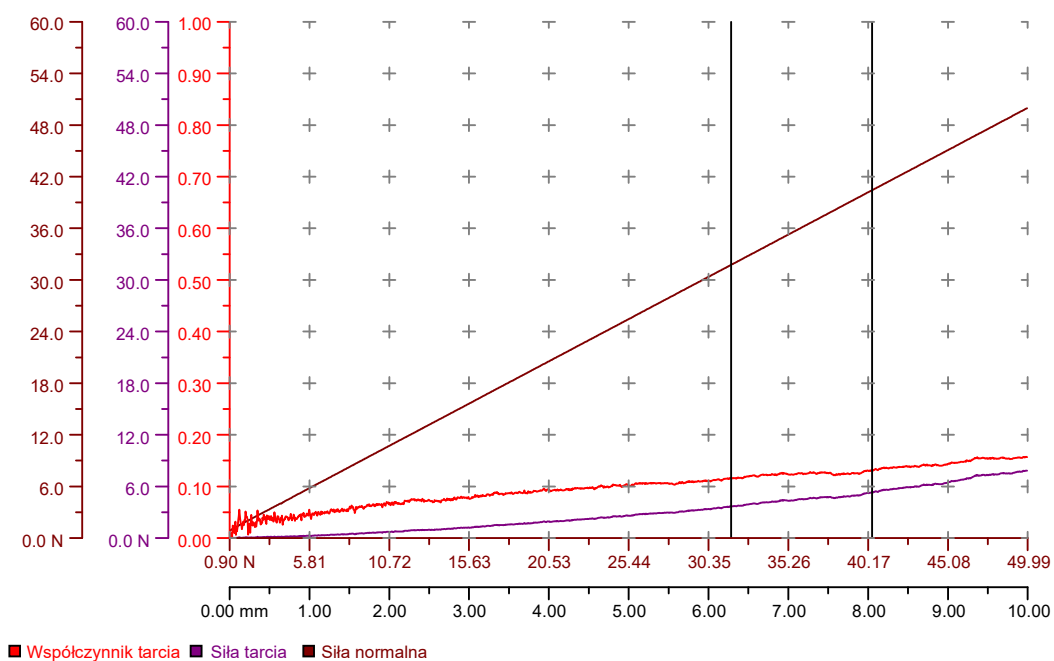
5.9. Wyniki badań przyczepności powłoki do podłoża

Założono, że najważniejszym czynnikiem eksploatacyjnym o żywotności sprawdzianów gwintowych jest zachowanie ich wymiarów w tolerancji określonej normami branżowymi. Przyjęto, że w głównym stopniu o trwałości sprawdzianów z nałożonymi na ich powierzchni powłokami TiN i DLC decyduje trwałość tych powłok, dlatego w metodyce badawczej jako główne kryterium żywotności sprawdzianów przyjęto trwałość, w tym odporność na zużycie wytworzonych na ich podłożu powłok TiN i DLC, którą określano podczas próby odporności na zarysowanie (scratch test).

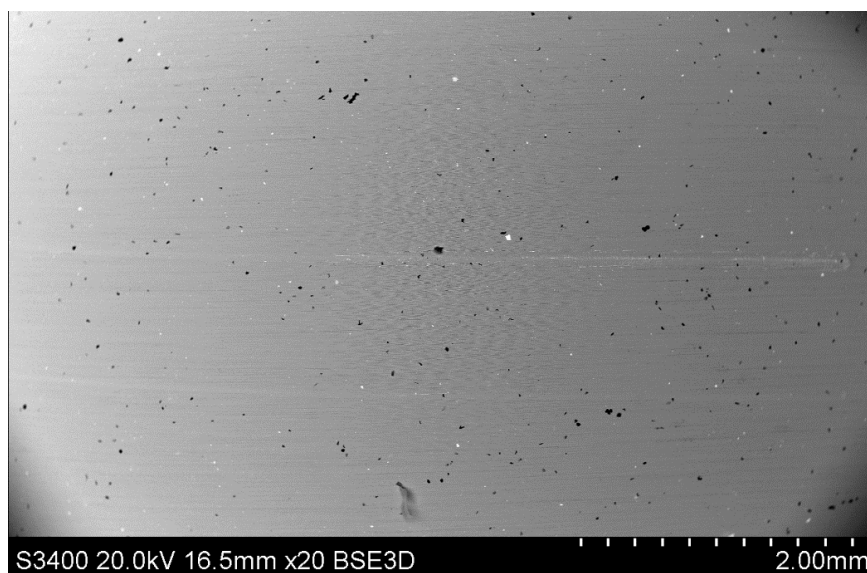
Zgodnie z przyjętą metodyką, badania przyczepności powłok do podłoża zostały przeprowadzone zgodnie z wytycznymi normy PN-EN ISO 4288 przy użyciu testera zarysowania Revetest® firmy CSM Instruments. W ich trakcie weryfikowano odporność na zużycie adhezyjne i kohezyjne badanych powłok. Do badań użyto 3 próbki pokryte powłoką TiN i 3 próbki pokryte powłoką DLC, dla każdej z nich wykonano po jednej próbie zarysowania. Ustalono wartości siły obciążenia krytycznego L_{C1} , L_{C2} i L_{Cn+1} wywołującej dany typ uszkodzenia warstwy. Opracowanie wyników oparto na podstawie sprzężonej analizy rejestracji sygnału emisji akustycznej i obserwacji mikroskopowych zarysowanych powłok – za pomocą technik mikroskopii świetlnej i elektronowej. Dokonano oceny i klasyfikacji rodzaju uszkodzenia powłoki pod wpływem oddziaływania na jej powierzchnię rylca diamentowego o geometrii Rockwella C, przy stale narastającym obciążeniu (próba progresywna) do maksymalnego obciążenia końcowego o sile 50 N lub 100N.

a) Wyniki badań przyczepności powłoki azotku tytanu TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybko tnącej podczas próby scratch test

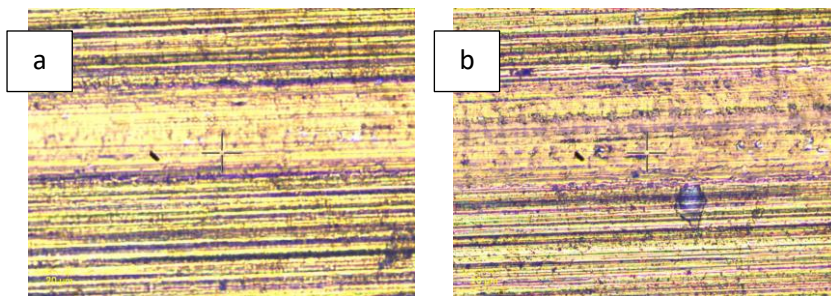
Wyniki pomiarów dla próbki nr 1



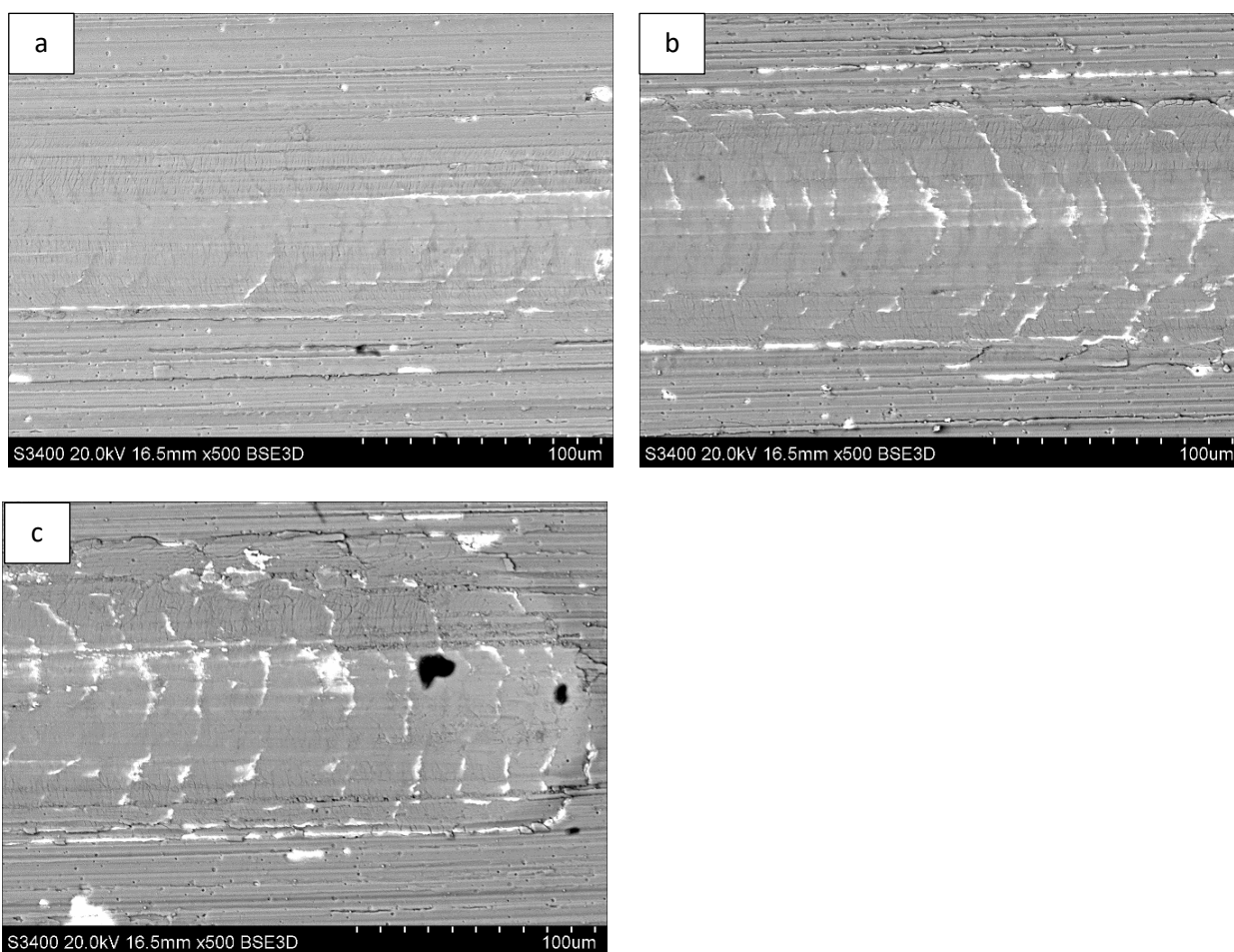
Rys. 5.29. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki z azotku tytanu TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybko tnącej



Rys. 5.30. Obszar zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej



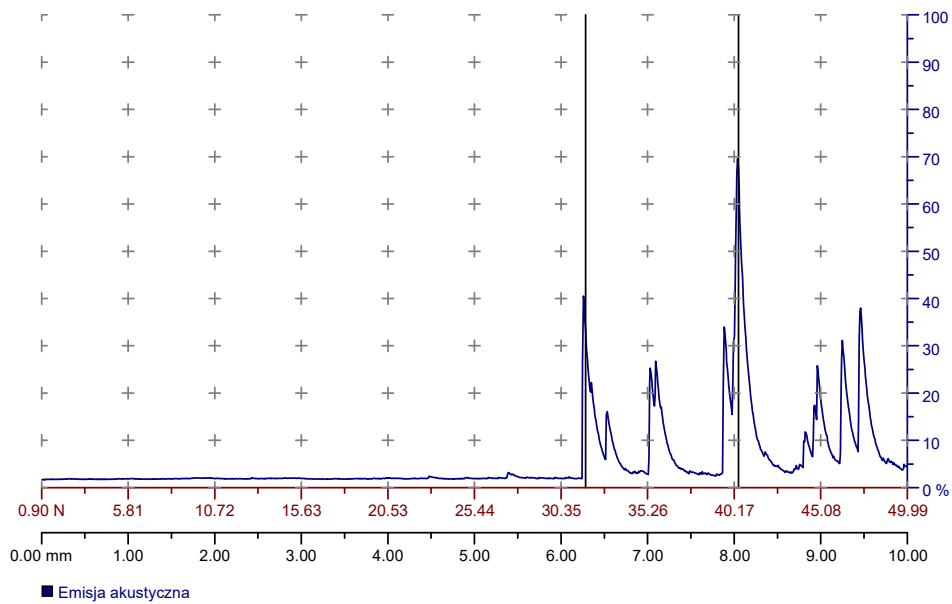
Rys. 5.31. Obszary zarysowanej powierzchni powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem: 746) a) obszar deformacji plastycznej powłoki, b) obszar postępującej deformacji plastycznej powłoki z pęknięciami typu konforemnego



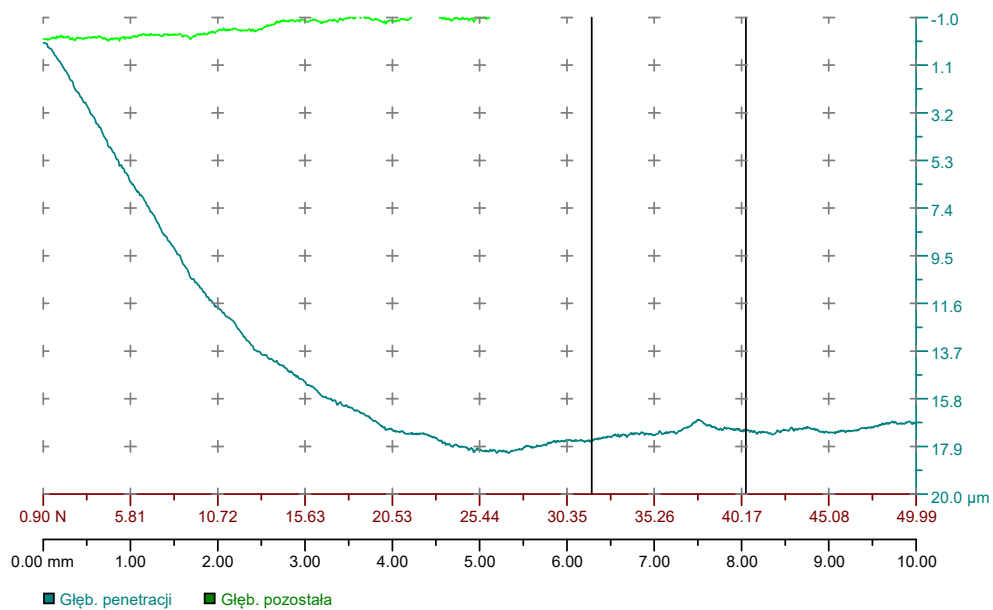
Rys. 5.32. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c : a) $L_{c1} = 31.75$ N, b) $L_{c2} = 40.41$ N, c) postępująca, nieciągła deformacja plastyczna powłoki

Tabela 5.87. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki TiN obserwowanych podczas badań mikroskopowych SEM przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
Numer 1- stal narzędziowa na zimno pokryta powłoką TiN	31.75	Obszar deformacji plastycznej powłoki
	40.41	Obszar postępującej deformacji plastycznej powłoki z pęknięciami typu konforemnego

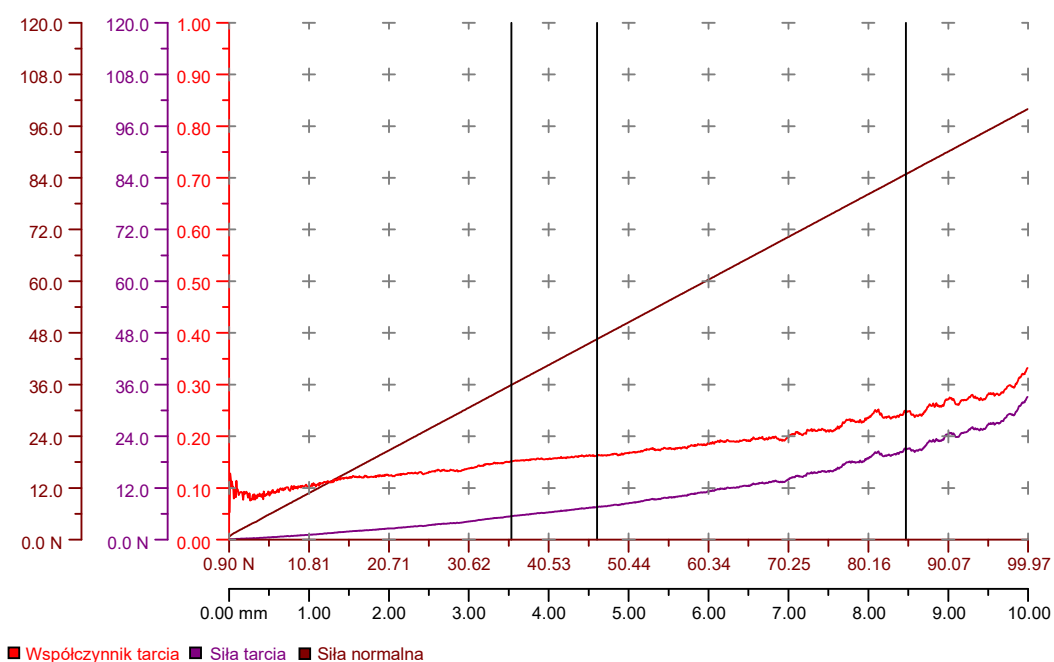


Rys. 5.33. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybkoctnej

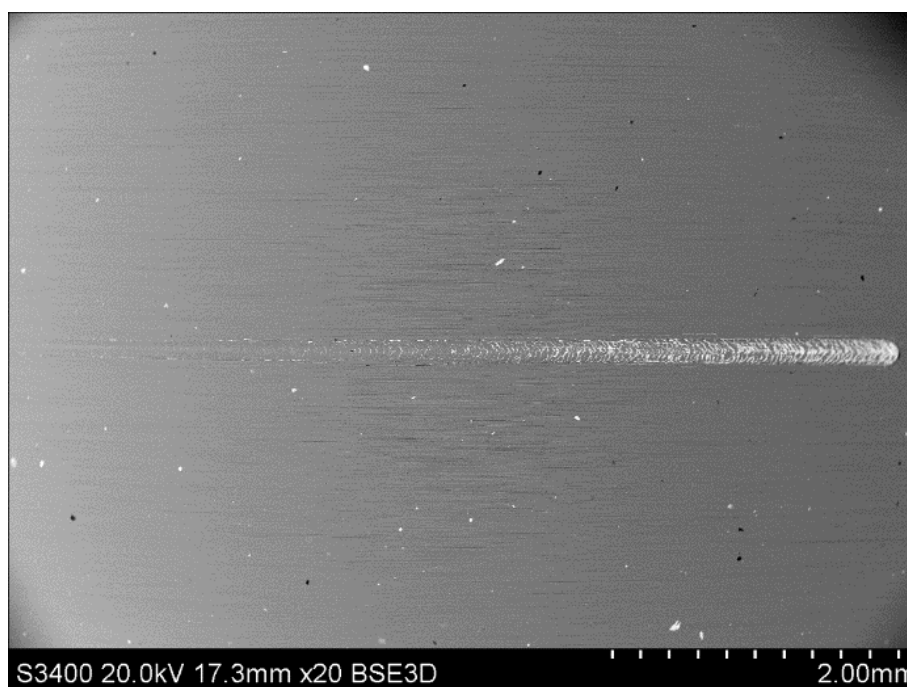


Rys. 5.34. Profil głębokości wgłębniaka podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybkoctnej

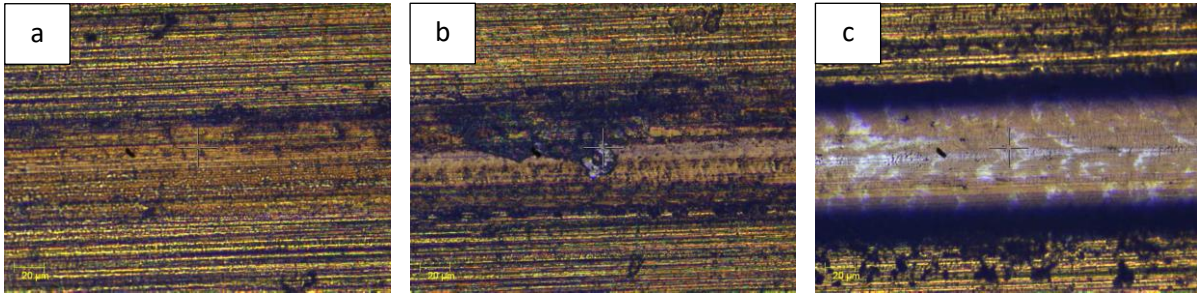
Wyniki pomiarów dla próbki nr 2



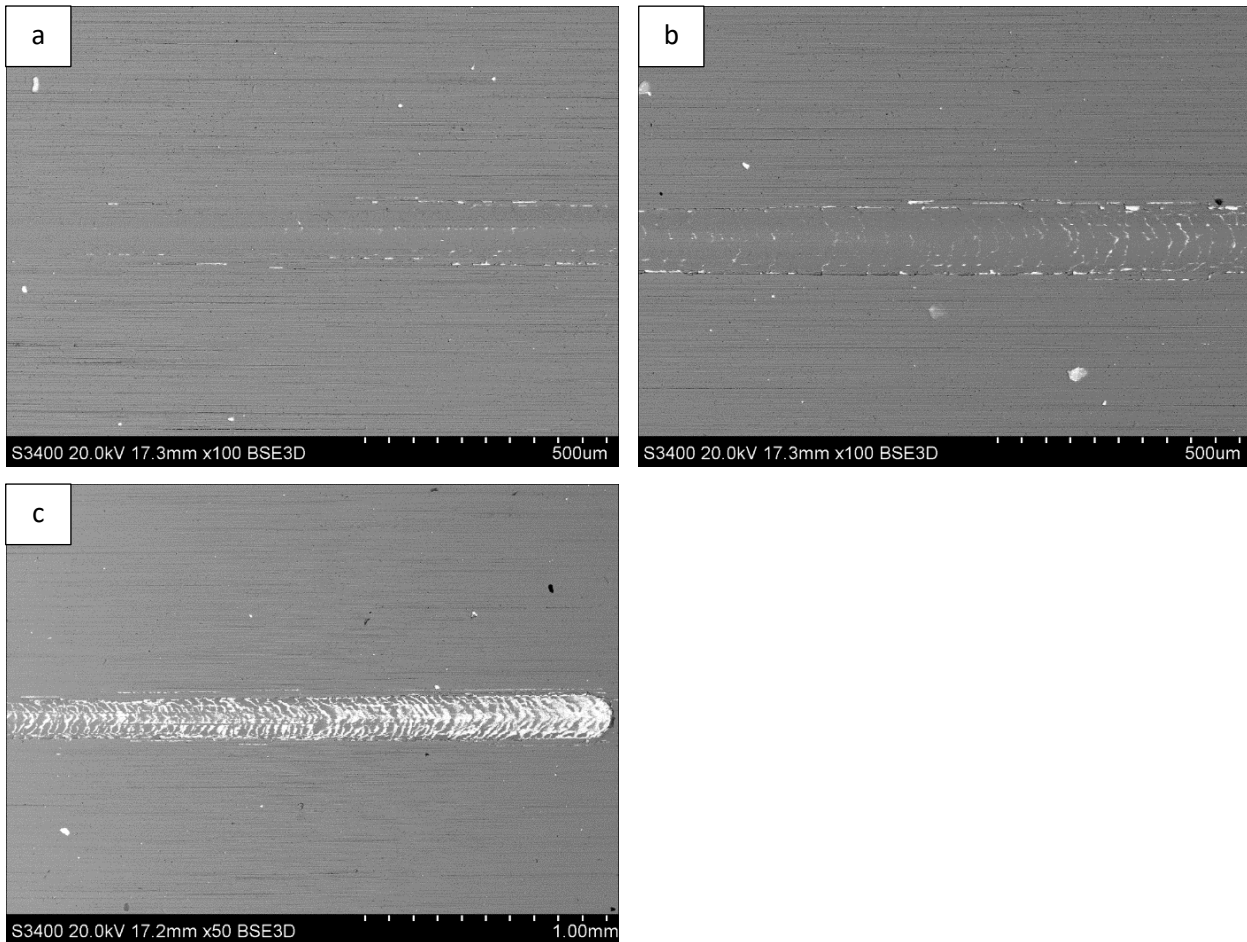
Rys. 5.35. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki z azotku tytanu TiN wytworzonej w procesie ARC-PVD na podłożu stali szybko tnącej



Rys. 5.36. Obszar zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej



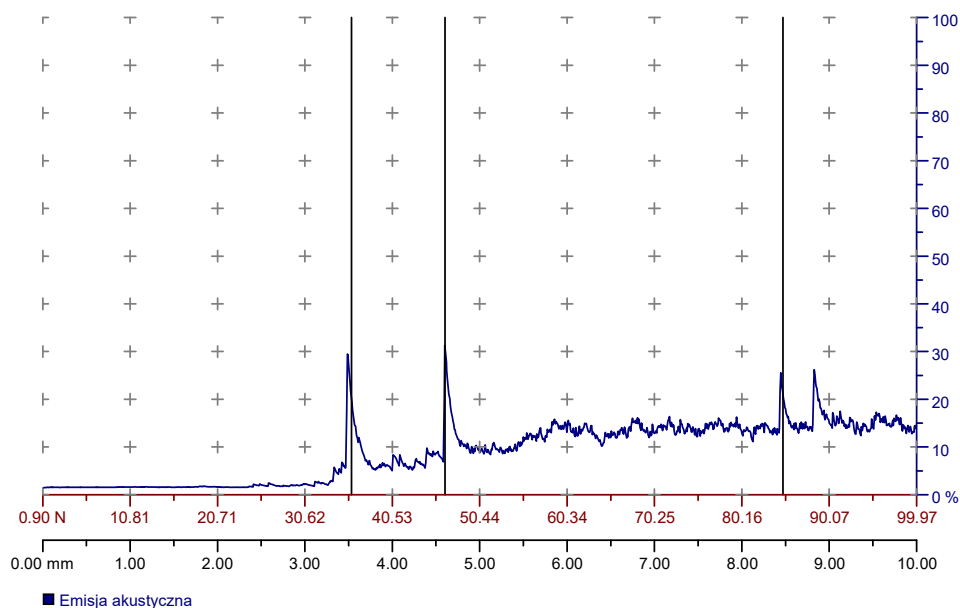
Rys. 5.37. Obszary zarysowanej powierzchni powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem: 746) obszar deformacji plastycznej powłoki, b) obszar inicjacji pęknięć typu konferemnego oraz nieciągłej plastycznej perforacji powłoki, c) obszar postępującej nieciągłej perforacji powłoki



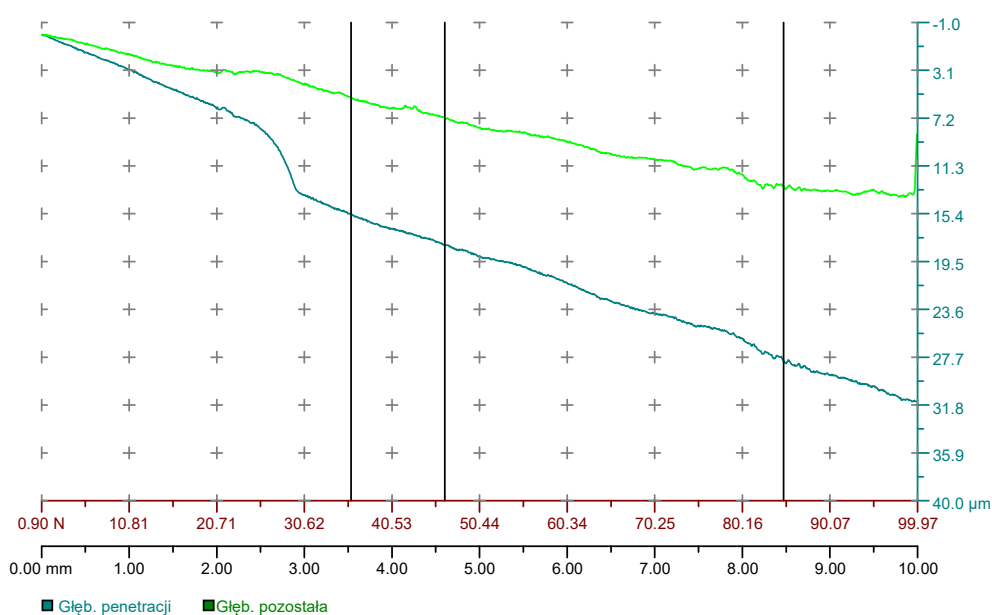
Rys. 5.38. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c :
a) $L_{c1} = 35.91 \text{ N}$, b) $L_{c2} = 46.51 \text{ N}$, c) $L_{c3} = 84.82 \text{ N}$

Tabela 5.88. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki TiN obserwowanych podczas badań mikroskopowych SEM przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
Nr 2 – stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką TiN	35.91	Obszar deformacji plastycznej powłoki i inicjacji pęknięć typu konferemnego
	46.51	Obszar inicjacji nieciągłej plastycznej perforacji powłoki i pęknięć typu konferemnego
	84.82	Obszar postępującej nieciągłej plastycznej perforacji powłoki oraz przejścia w plastyczną ciągłą perforację

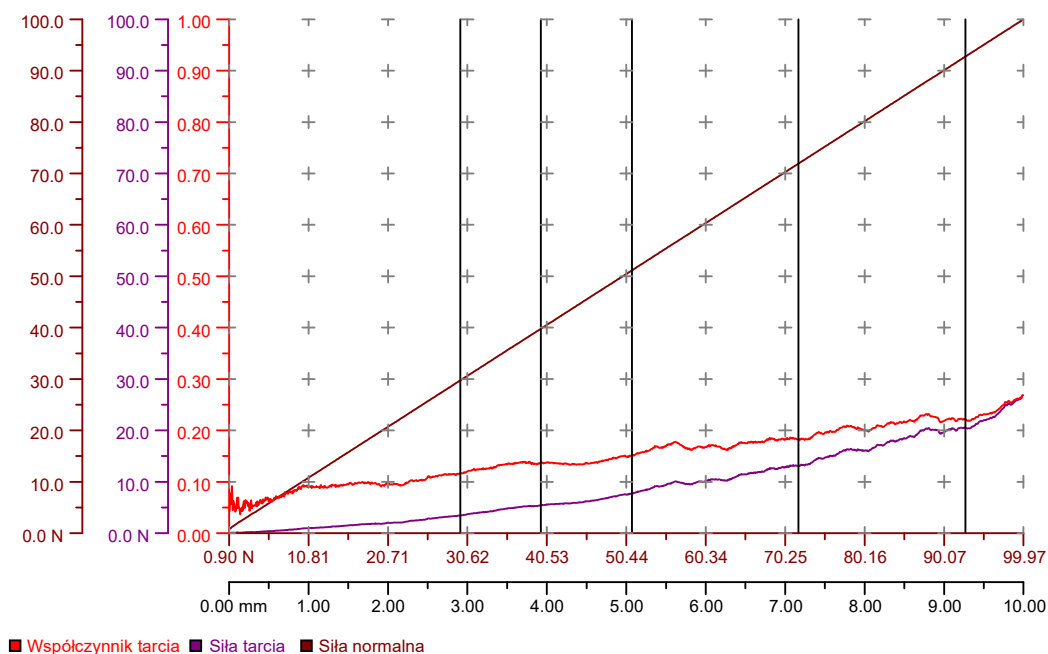


Rys. 5.39. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni warstwy TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybko tnącej

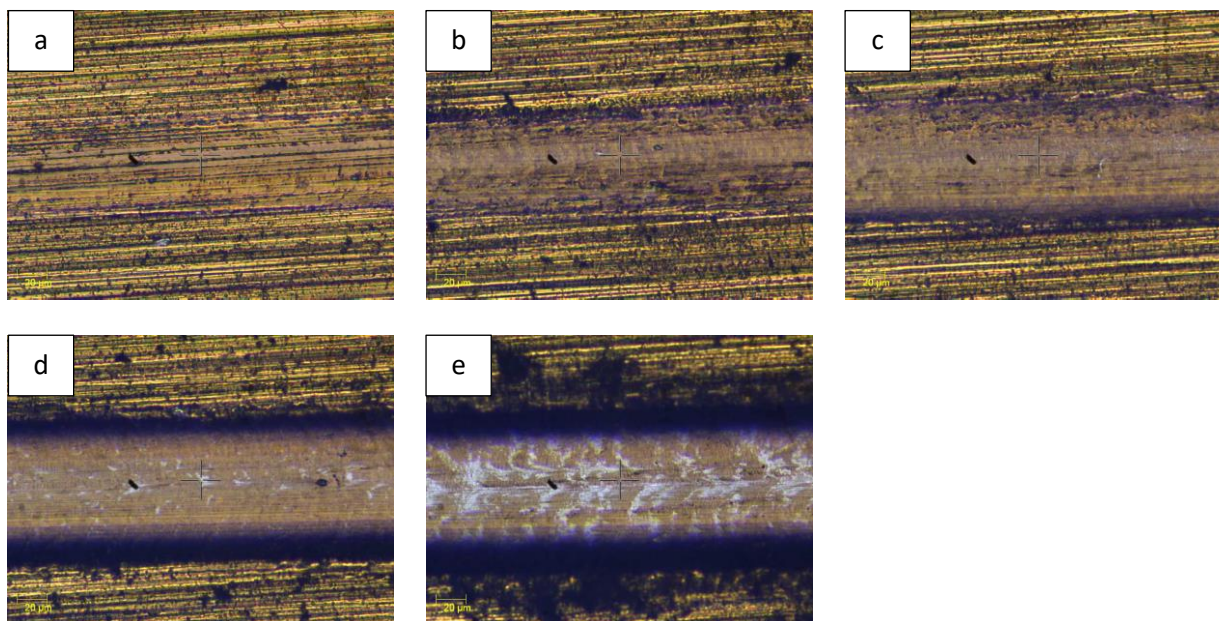


Rys. 5.40. Profil głębokości wgłębnika podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni warstwy TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybko tnącej

Wyniki pomiarów dla próbki nr 3

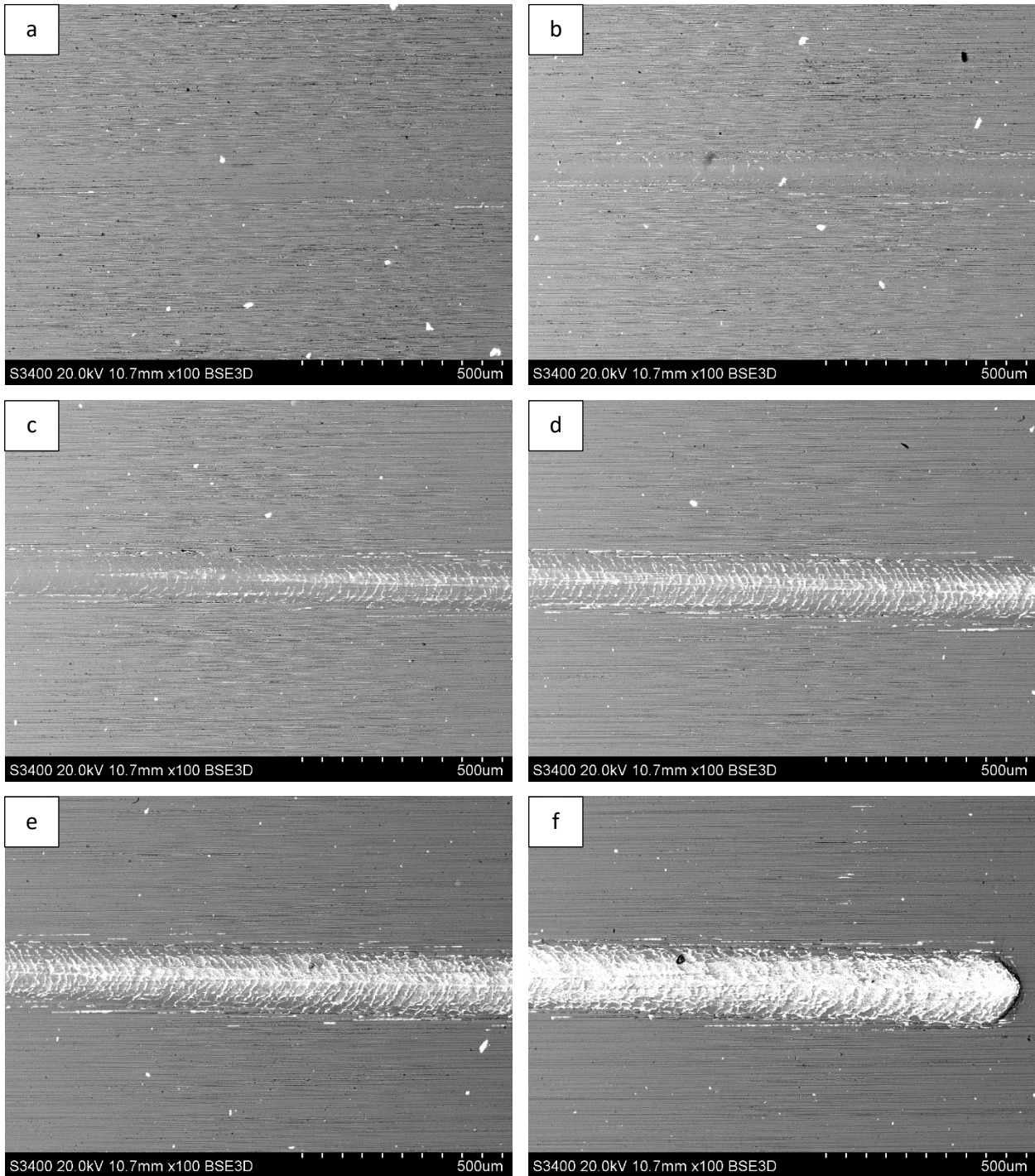


Rys. 5.41. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki z azotku tytanu TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybkootnęcej



Rys. 5.42. Obszary zarysowanej powierzchni powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybkootnęcej – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem:

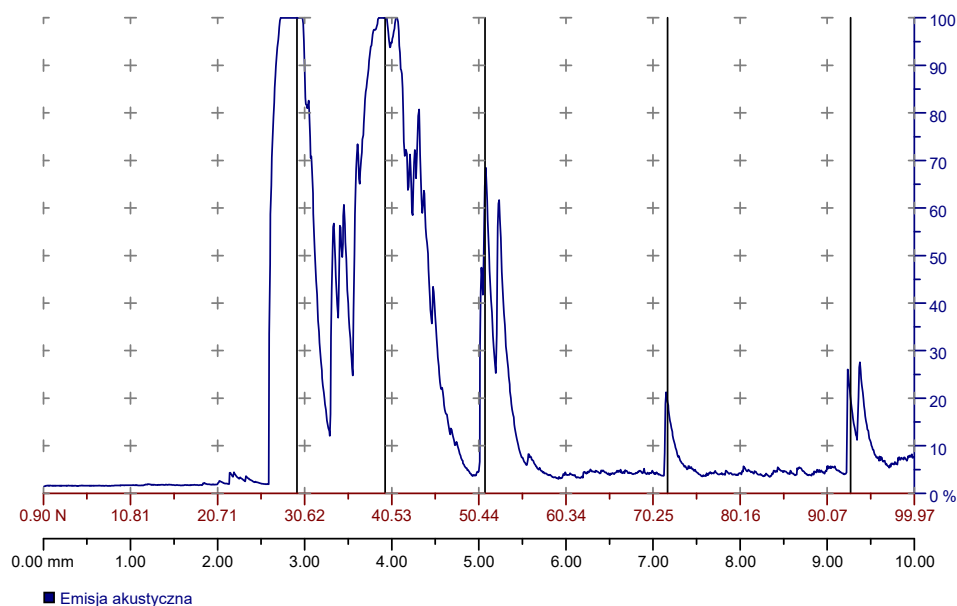
- obszar deformacji plastycznej,
- postępująca deformacja plastyczna oraz inicjacja pęknięć typu konferemnego,
- obszar postępujących pęknięć typu konferemnego,
- obszar inicjacji nieciągłej plastycznej perforacji powłoki,
- postępująca plastyczna, nieciągła perforacja powłoki – początek zauważalnej degradacji powłoki



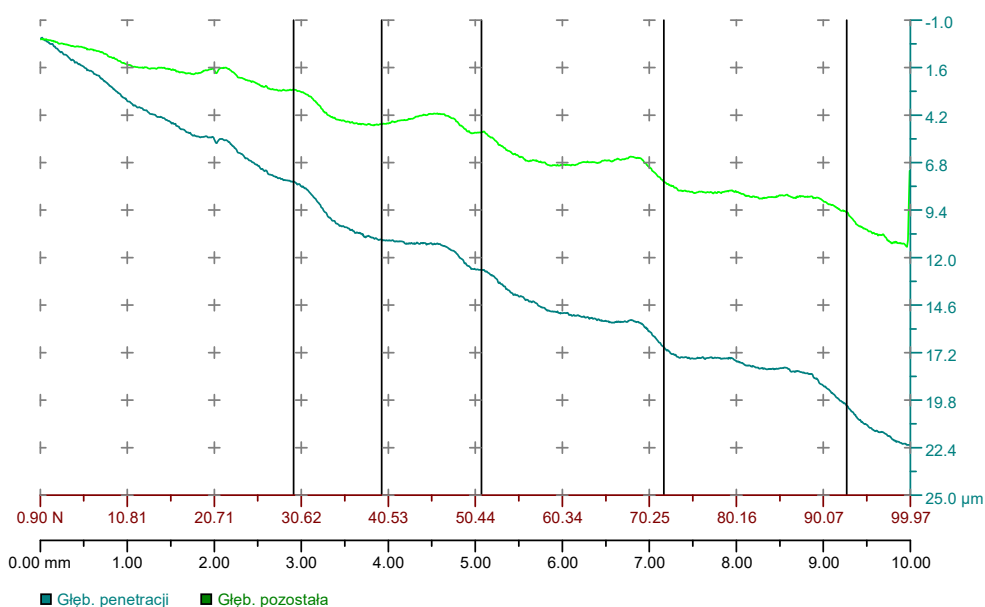
Rys. 5.43. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki TiN wytworzonej na podłożu stali szybko tnącej oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c :
 a) obszar deformacji plastycznej powłoki b) $L_{c1} = 21\text{N}$, c) $L_{c2} = 29.75\text{ N}$, d) $L_{c3} = 39.76\text{ N}$, e) $L_{c4} = 51.13\text{ N}$, $L_{c5} = 71.89\text{ N}$, f) $L_{c5} = 92.71\text{ N}$;

Tabela 5.89. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki TiN obserwowanych podczas badań mikroskopowych SEM przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
	<21	Obszar deformacji plastycznej powłoki
Nr 3 – stal szybkotnąca pokryta powłoką TiN	21	Obszar inicjacji pęknięć typu konferemnego
	29.75	Obszar inicjacji nieciągłej plastycznej perforacji i pęknięć typu konferemnego
	39.76	
	51.13	Obszar postępującej, nieciągłej plastycznej perforacji powłoki i pęknięć typu konferemnego, znaczne uszkodzenia powłoki
	71.89	
92.71	Obszar degradacji powłoki i ciągłej plastycznej perforacji powłoki	



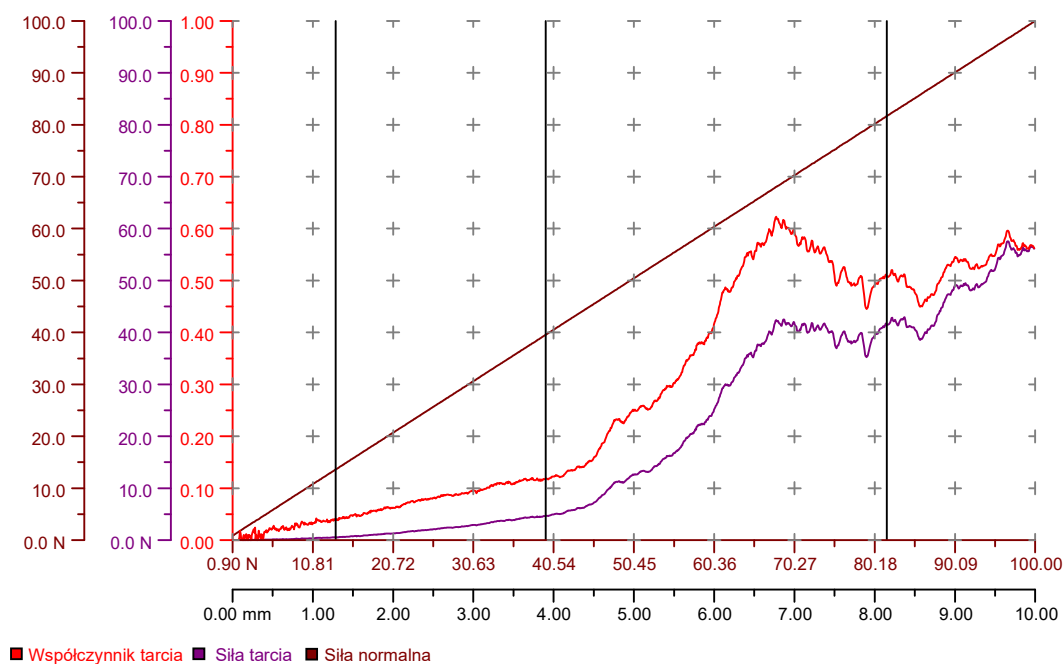
Rys. 5.44. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybkotnącej



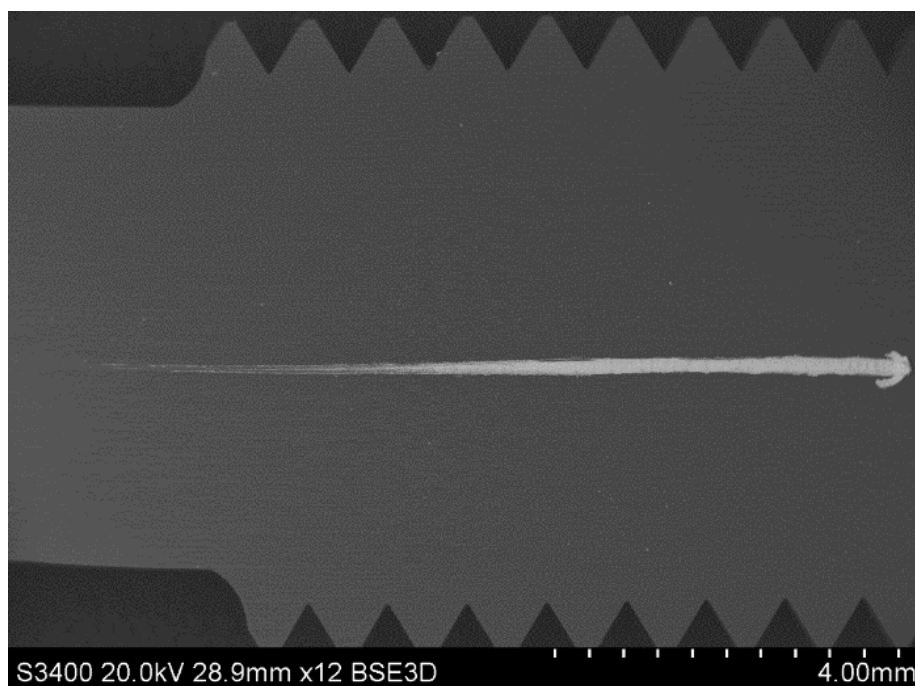
Rys. 5.45. Profil głębokości wgłębnika podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na podłożu stali szybkotnącej

b) Wyniki badań przyczepności powłoki diamentopodobnej DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali narzędziowej do pracy na zimno podczas próby scratch test

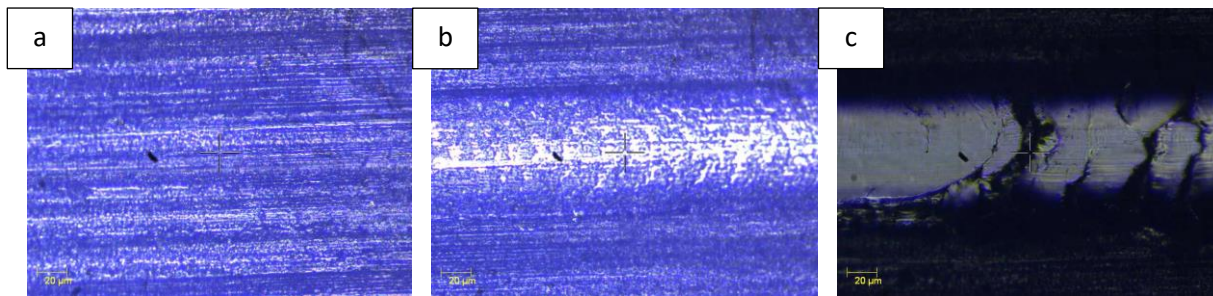
Wyniki pomiarów dla próbki nr 1



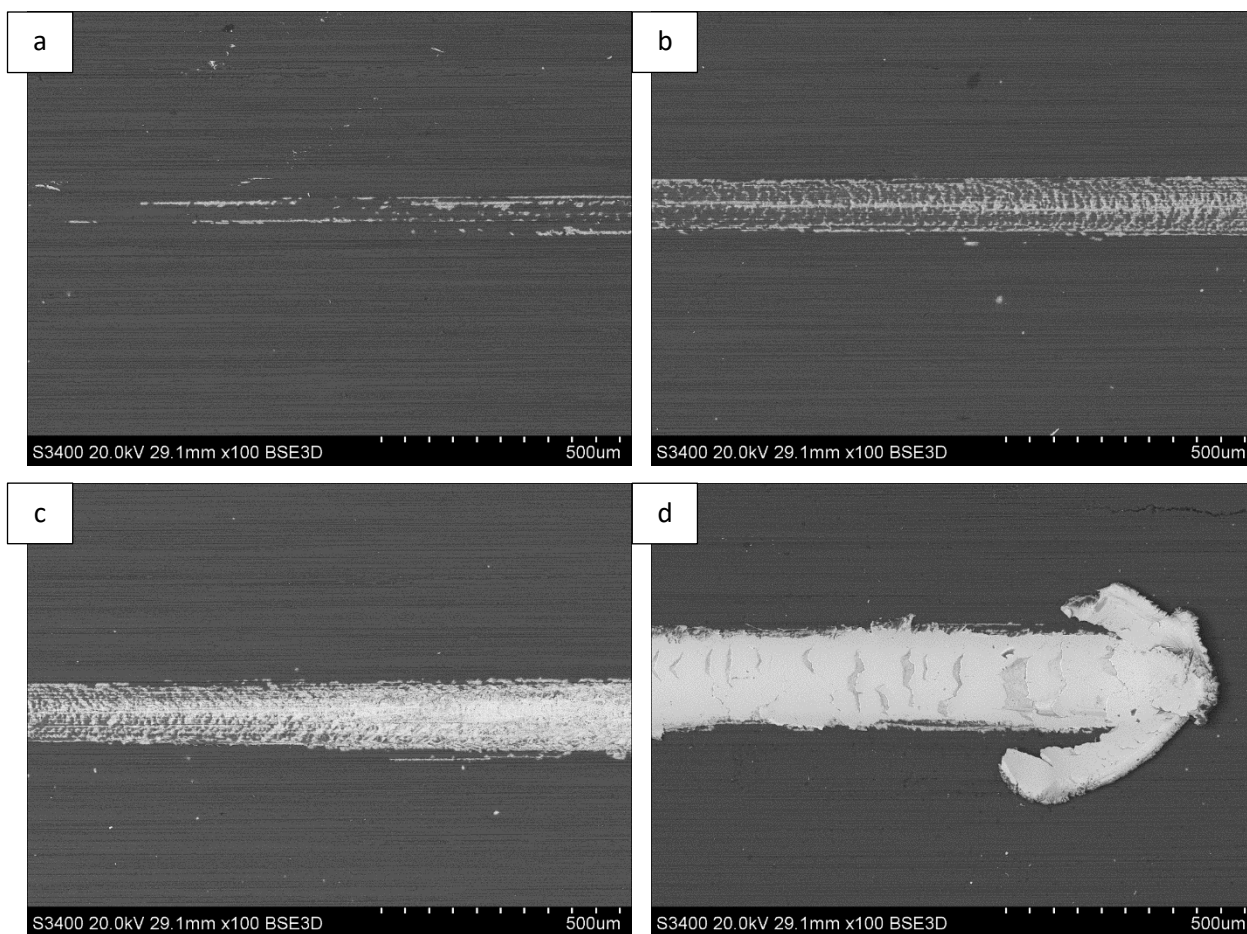
Rys. 5.46. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki diamentopodobnej DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno



Rys. 5.47. Obszar zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno



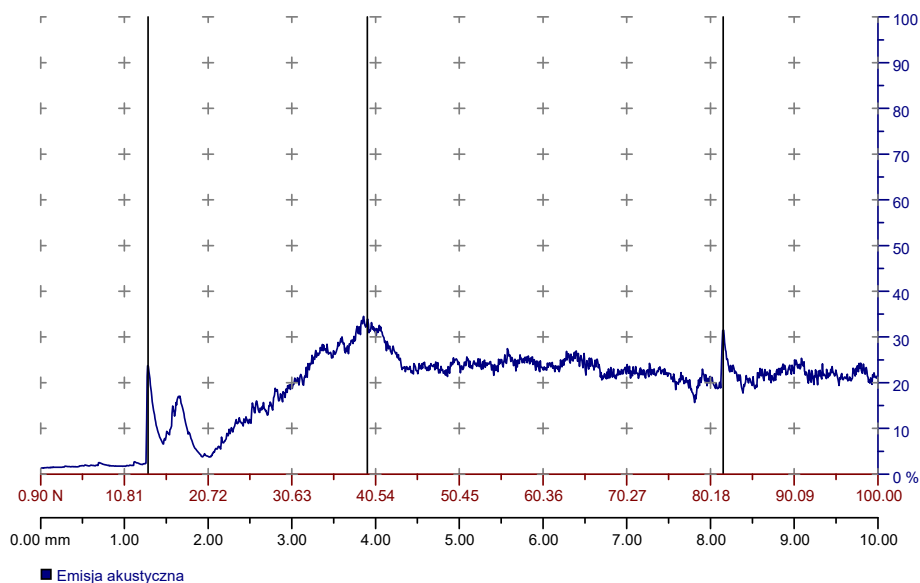
Rys. 5.48. Obszary zarysowanej powierzchni powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem:
 a) obszar deformacji plastycznej powłoki, b) obszar inicjacji nieciągłej plastycznej perforacji powłoki i pęknięć typu konferemnego, c) ciągła plastyczna perforacja powłoki



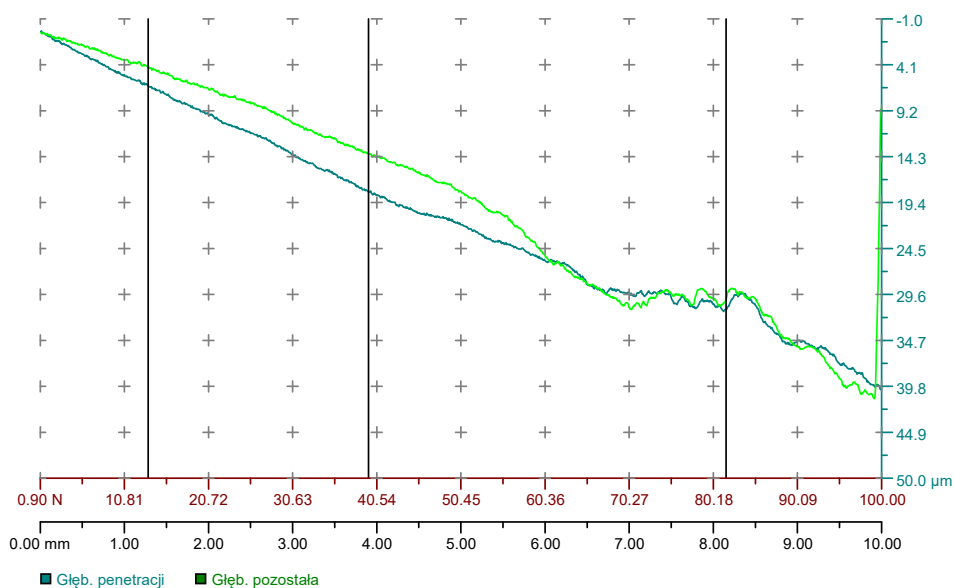
Rys. 5.49. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c :
 746) $L_{c1} = 13.63N$, b) $L_{c2} = 39.57N$, c) $L_{c3} = 40-45N$, d) $L_{c4} = 81.69N$

Tabela 5.90. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki DLC przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
Nr 1 – stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC	13.63	Obszar inicjacji nieciągłej plastycznej deformacji powłoki
	39.57	Obszar postępującej nieciągłej plastycznej perforacji powłoki i tworzenia się pęknięć typu konferemnego
	40-45	Obszar przejścia nieciągłej w ciągłą plastyczną deformację powłoki, degradacja warstwy
	81.69	Pęknięcia wewnątrz śladu zarysowania

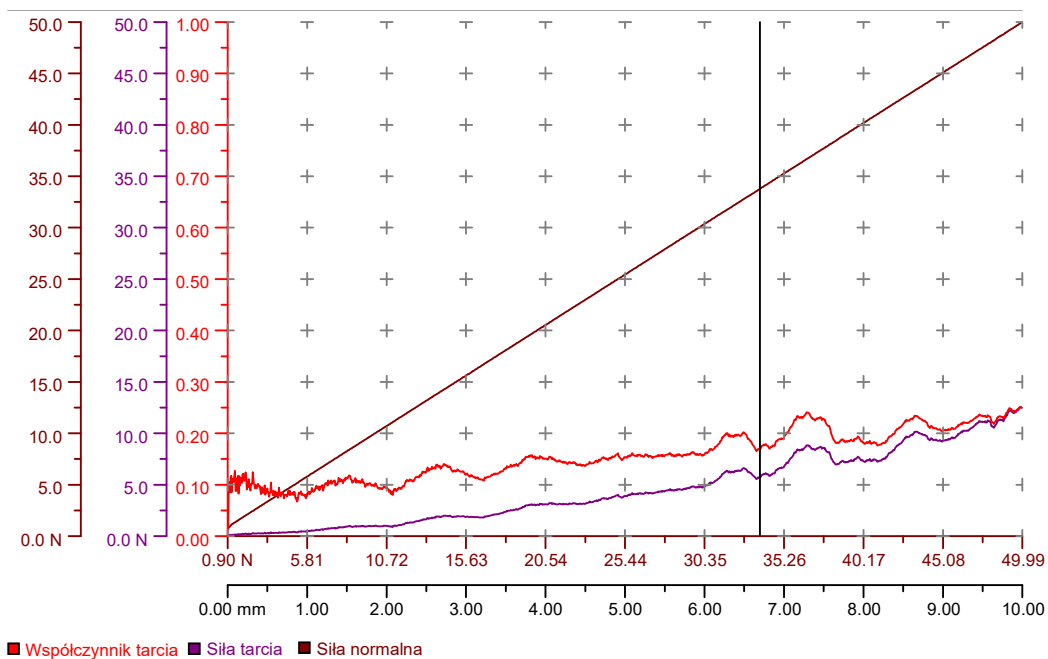


Rys. 5.50. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno – próbka nr 1

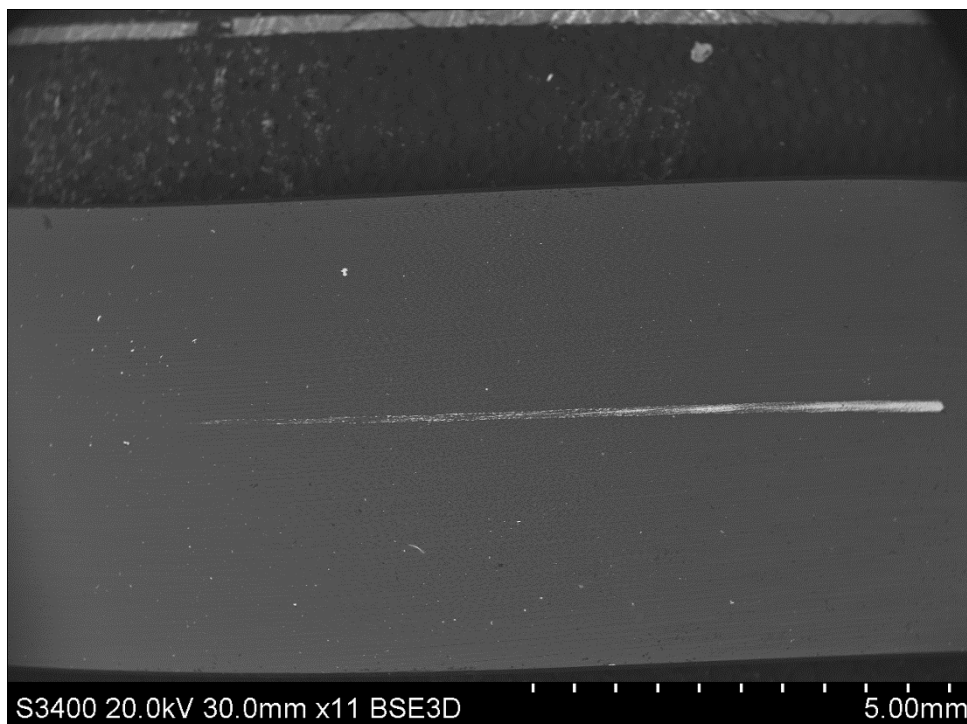


Rys. 5.51. Profil głębokości wgłębnika podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno – próbka nr 1

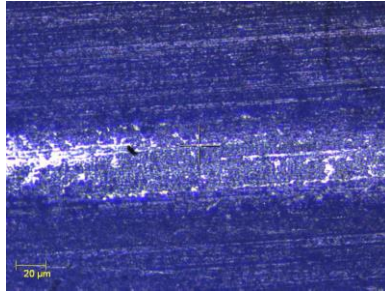
Wyniki pomiarów dla próbki nr 2



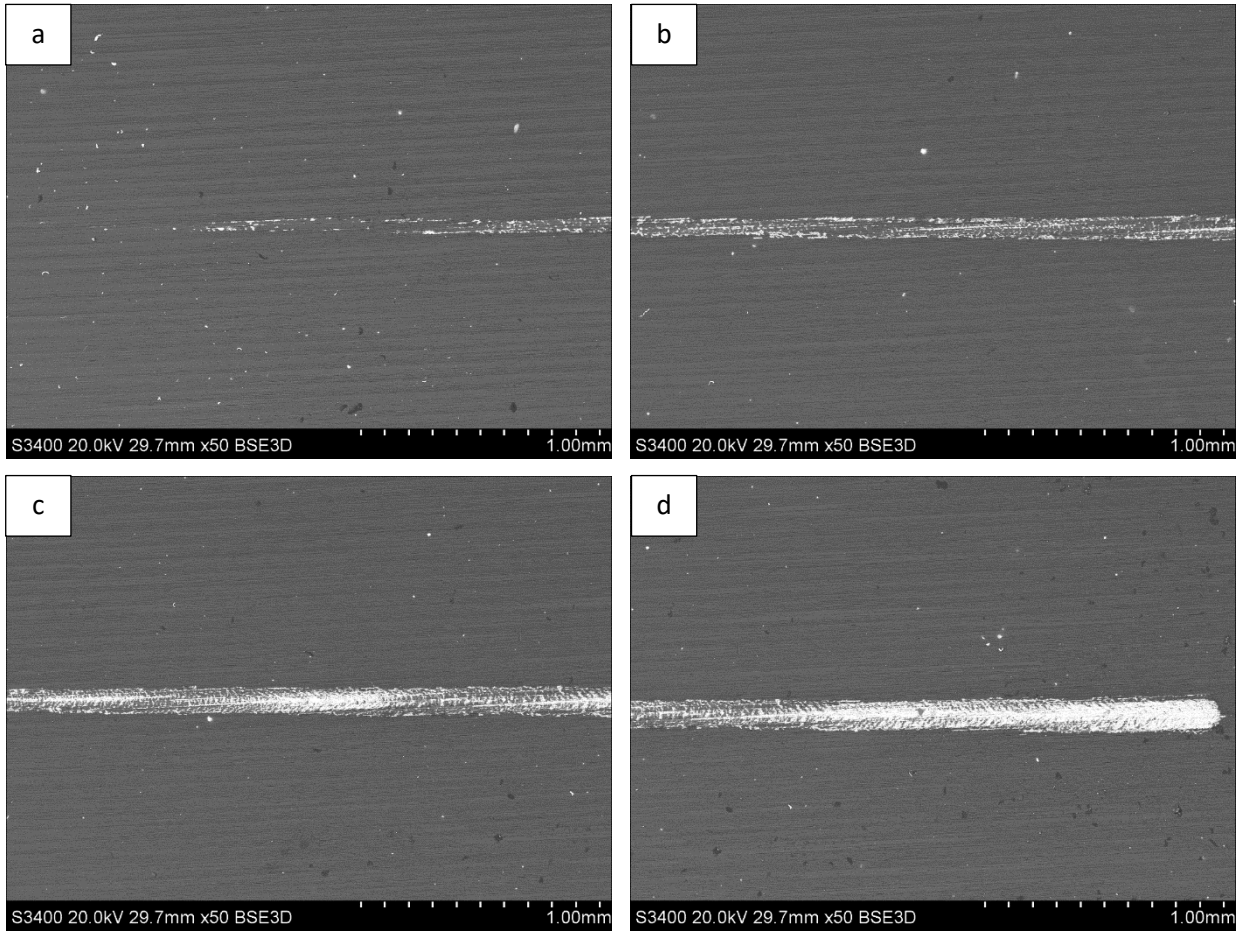
Rys. 5.52. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki diamentopodobnej DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno



Rys. 5.53. Obszar zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno



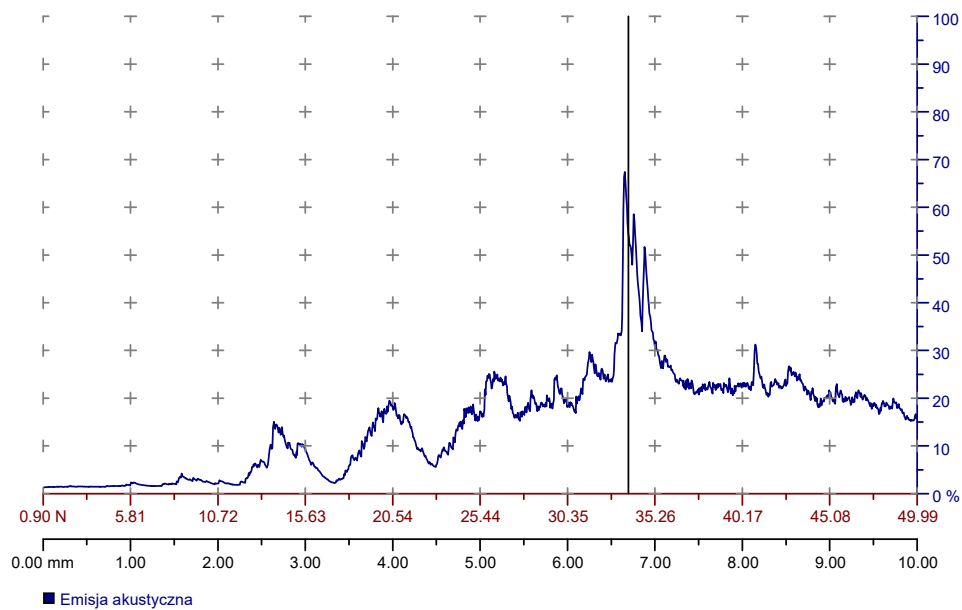
Rys. 5.54. Obszar zarysowanej powierzchni powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem: nieciągła plastyczna perforacja powłoki



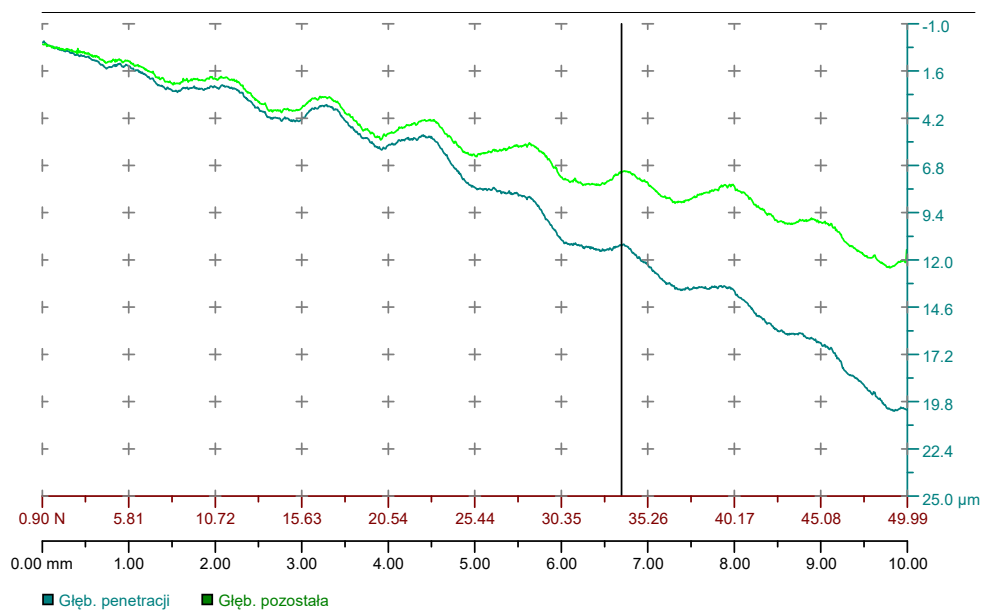
Rys. 5.55. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c :
 a) $L_{c1} = 5-7N$, b) $L_{c2} = 13N$, $L_{c3} = 20N$, c) $L_{c4} = 26N$, $L_{c5} = 33N$ d) $L_{c6} > 40N$

Tabela 5.91. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki DLC przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
Nr 2 – stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC	5-7	Obszar inicjacji nieciągłej perforacji plastycznej powłoki
	13	Obszar postępującej nieciągłej plastycznej perforacji powłoki oraz inicjacji pęknięć typu konforemnego
	20	
	26	Strefa przejścia nieciągłej w ciągłą plastyczną deformację powłoki
	33	Obszar znacznej degradacji powłoki
>40	Trwała plastyczna perforacja i degradacja powłoki	

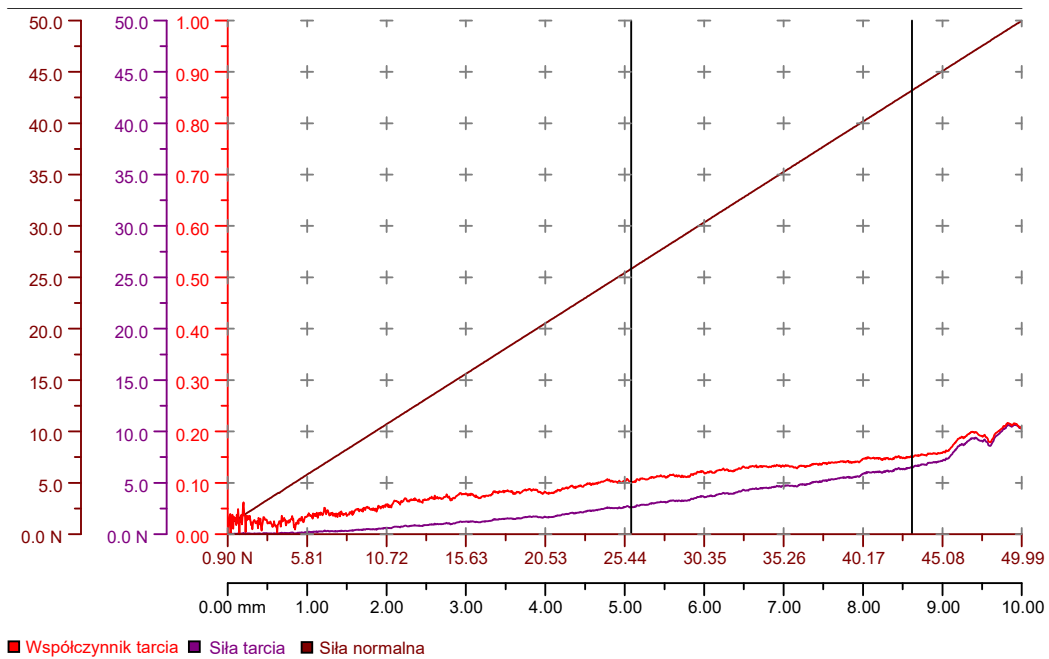


Rys. 5.56. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno

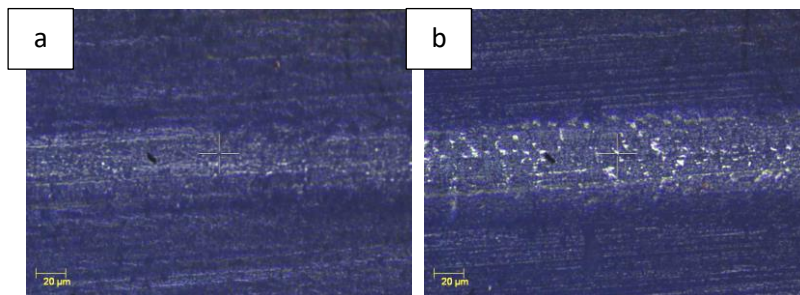


Rys. 5.57. Profil głębokości wgłębniaka podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno

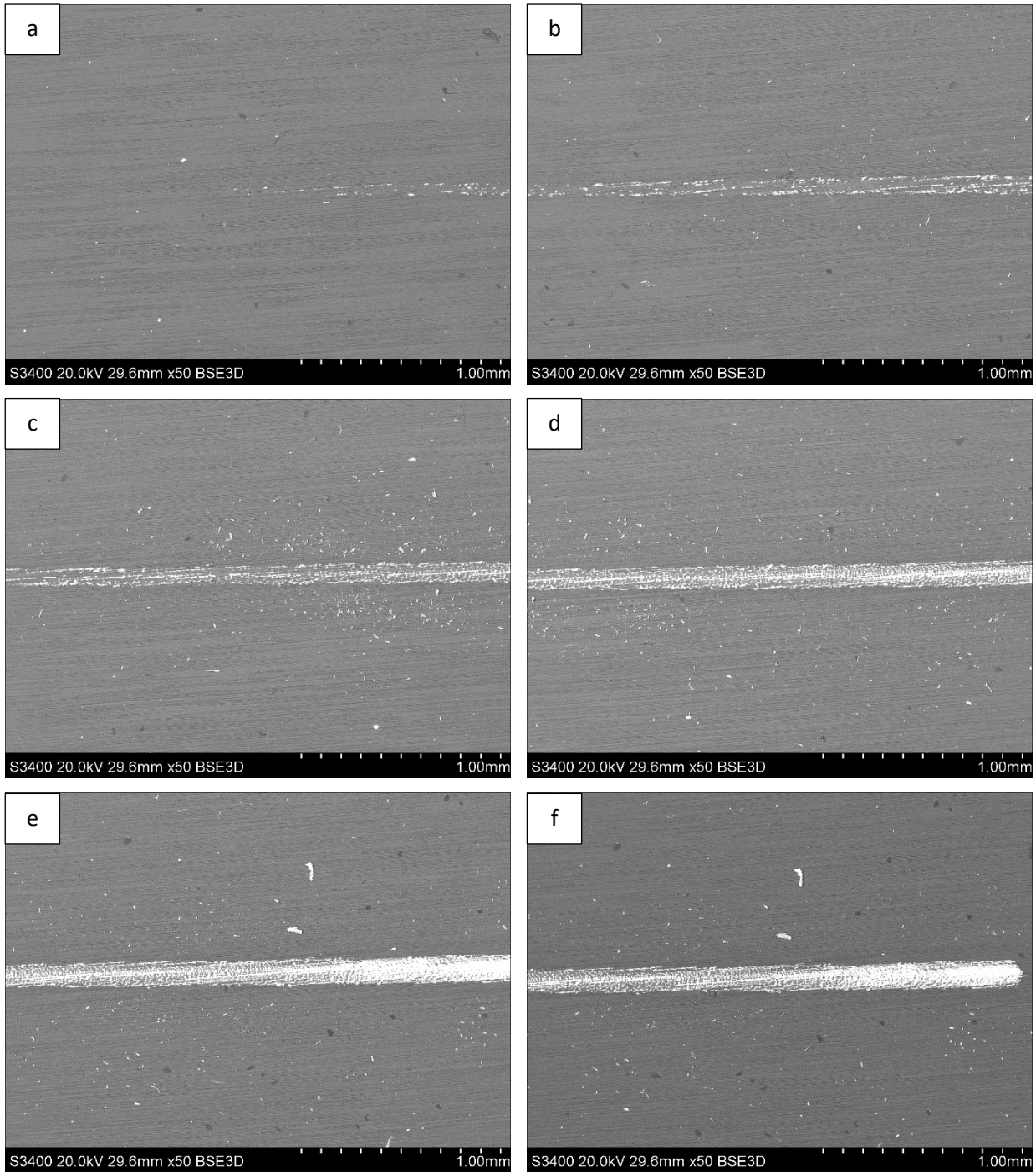
Wyniki pomiarów dla próbki nr 3



Rys. 5.58. Profil liniowy rozkładu składowych siły tarcia i normalnej oraz współczynnika tarcia podczas próby zarysowania powierzchni powłoki diamentopodobnej DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno



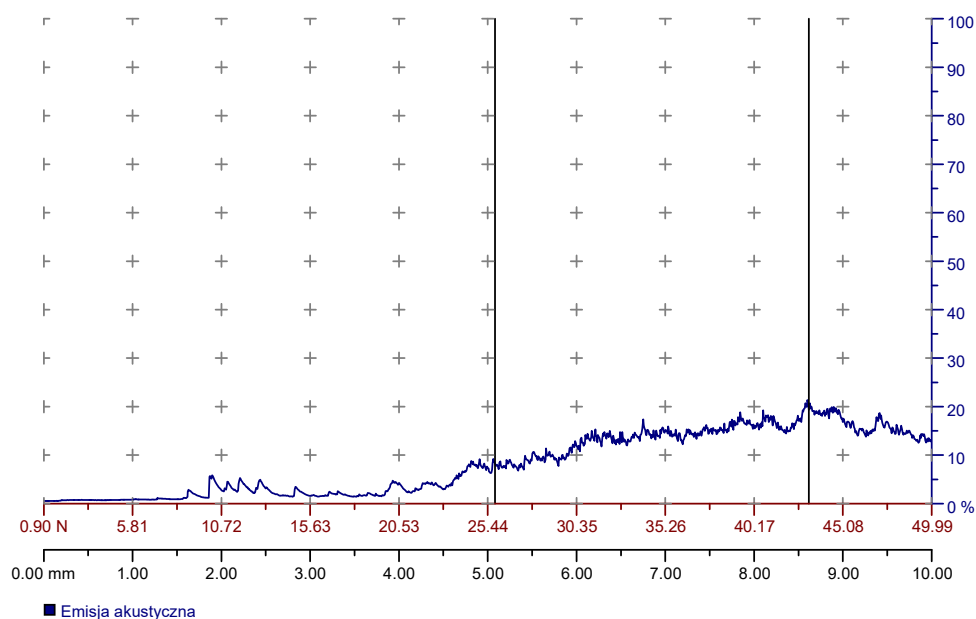
Rys. 5.59. Obszary zarysowanej powierzchni powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno – obserwowanej za pomocą mikroskopu świetlnego sprzężonego ze scratch-testerem: a, b) nieciągła plastyczna perforacja powłoki



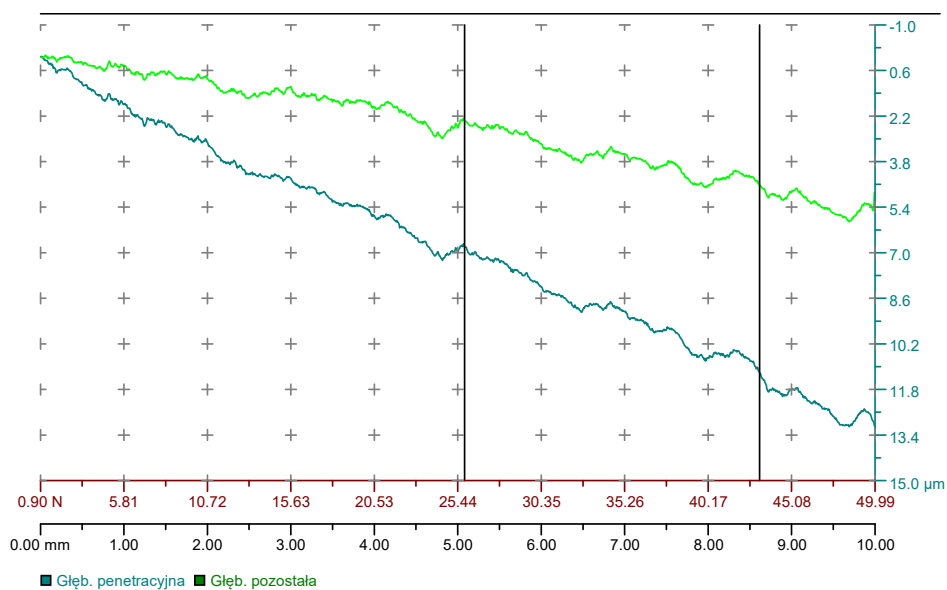
Rys. 5.60. Obszary zarysowanej powierzchni (SEM) powłoki DLC wytworzonej na podłożu stali do pracy na zimno oraz mikroobszary ścieżki zarysowania odpowiadające obciążeniu krytycznemu L_c :
 a,b) $L_{C1} = 7-13N$, c) $L_{C2} = 20-24N$, d,e) $L_{C3} = 25-45N$, f) $L_{C4} = >45N$

Tabela 5.92. Interpretacja charakteru uszkodzeń powłoki DLC przy zadanej sile krytycznej

Numer próbki	Siła krytyczna, [N]	Opis uszkodzenia
Nr 3 – stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC	7-13	Obszar inicjacji nieciągłej perforacji plastycznej powłoki
	20-24	Obszar postępującej nieciągłej plastycznej perforacji powłoki oraz inicjacji pęknięć typu konforemnego
	25-45	Strefa przejścia nieciągłej w ciągłą plastyczną deformację powłoki Obszar znacznej degradacji powłoki
	>45	Trwała plastyczna perforacja i degradacja powłoki



Rys. 5.61. Sygnały emisji akustycznej zarejestrowane podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno



Rys. 5.62. Profil głębokości wgłębnika podczas próby zarysowania scratch-test powierzchni powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na podłożu stali do pracy na zimno

Obciążenie krytyczne L_c , przy którym następuje utrata przyczepności powłoki, określono na podstawie wartości emisji akustycznej rejestrowanej w trakcie pomiaru oraz obserwacji rys powstałych w trakcie próby zarysowania scratch-test. Obserwacje przeprowadzono przy użyciu mikroskopu świetlnego będącego na wyposażeniu testera zarysowania i za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

W celu weryfikacji i doboru właściwych parametrów próby scratch-test, przed próbami właściwymi zarysowania prowadzono pomiary wstępne stosując różne wartości obciążenia końcowego w zakresie <50N. Na podstawie wstępnych prób zarysowania stwierdzono różnice pomiędzy degradacją powłok TiN i DLC wynikające z zastosowanych różnych obciążeń końcowych. Dlatego zarówno dla powłok TiN oraz DLC przyjęto dwa zakresy obciążeń od 0,9 N do 50N i od 0,9N do 100N.

Badanie przyczepności powłoki TiN naniesionej metodą Arc-PVD na stali szybko tnącej rozpoczęto od badania próbki nr 1, stosując narastające obciążenie od 0,9N do 50N. Na jej podstawie stwierdzono brak tworzenia się znacznych, widocznych i powtarzalnych uszkodzeń zarysowywanych powłok, co było podstawą do zwiększenia maksymalnego obciążenia do 100N dla próbki 2 i 3. Identyfikacji uszkodzeń powłok powstałych w wyniku badań przyczepności metodą zarysowania dokonano na podstawie obserwacji za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, porównując uzyskane uszkodzenia z atlasem uszkodzeń przedstawionym w normie PN-EN ISO 4288. W wyniku tych badań stwierdzono, że występują cztery rodzaje charakterystycznych obszarów powstałych w wyniku interakcji rylca diamentowego w kontakcie z podłożem sprawdzianu i nałożoną na jego powierzchni powłoką: tworzenie obszaru deformacji plastycznej powłoki, nieciągłej plastycznej perforacji powłoki, odkształconych pęknięć typu konforemnego, ciągłej plastycznej perforacji powłoki, którym towarzyszą w mniejszym stopniu inne uszkodzenia.

Badanie przyczepności powłoki DLC naniesionej metodą PACVD na stali do pracy na zimno rozpoczęto od badania próbki nr 1, stosując narastającą siłę od 0,9N do 100N. Na jej podstawie stwierdzono bardziej widoczną degradację powłoki DLC w porównaniu do powłoki TiN, w tym tworzenie się znacznych uszkodzeń w połowie maksymalnego obciążenia. Na tej podstawie dla kolejnych próbek 2 i 3 zastosowano zmniejszone maksymalne obciążenie do 50N. Identyfikacje uszkodzeń powłok powstałych w wyniku badań przyczepności metodą zarysowania dokonano analogicznie jak w przypadku powłoki TiN, na podstawie obserwacji za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego porównując uzyskane uszkodzenia z atlasem uszkodzeń przedstawionym w normie PN-EN ISO 4288. Na podstawie dokonanej analizy wyników badań i obserwacji uszkodzeń powłok TiN i DLC w próbie scratch test stwierdzono występowanie podobnych obszarów interakcji i typów uszkodzeń, jednak dla powłok DLC tworzących się znacznie wcześniej przy mniejszych obciążeniach.

Na podstawie przeprowadzonych badań, w oparciu o analizę uzyskanych wyników stwierdzono, że powłoka TiN wytworzona na podłożu ze stali szybko tnącej charakteryzuje się lepszą odpornością na zużycie w próbie zarysowania scratch test w porównaniu z powłoką DLC. Zaobserwowano, że wartość obciążeń krytycznych koniecznych do trwałego uszkodzenia powłoki TiN występuje w zakresie >40N, a dla powłoki DLC występuje >13N. Stwierdzono również, że degradacja powłoki TiN postępuje w sposób bardziej ciągły, równomierny, natomiast w przypadku powłoki DLC degradacja od inicjacji drobnych uszkodzeń do ciągłego, trwałego uszkodzenia powłoki postępuje bardziej skokowo. Reasumując, lepszą odpornością na zarysowanie i trwałością w porównywalnym zakresie obciążeń charakteryzuje się powłoka TiN w porównaniu do powłoki DLC.

5.10. Wyniki pomiaru twardości materiałów

Zgodnie z przyjętą metodyką pomiary twardości metodą Rockwella zostały przeprowadzone zgodnie z wymaganiami norm PN-EN ISO 6508-1, PN-EN ISO 3738-1, ASTM E18 przy użyciu twardościomierza ZHU250 firmy Zwick/Roel. Wyniki pomiarów twardości podano w jednostkach HRC/HRA i przedstawiono w tabelach 5.93 – 5.95.

Tabela 5.93. Wyniki pomiaru twardości sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej O1 do pracy na zimno

Numer pomiaru (stal narzędziowa do pracy na zimno)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Średnia arytmetyczna
Twardość HRC	61,2	63,4	61,9	63,3	62,8	62,5

Tabela 5.94. Wyniki pomiaru twardości sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M1

Numer pomiaru (stal szybko tnąca)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Średnia arytmetyczna
Twardość HRC	63,8	63,9	64,2	64,3	63,9	64,02

Tabela 5.95. Wyniki pomiaru twardości sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego C-2

Numer pomiaru (węgiel spiekany)	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Średnia arytmetyczna
Twardość HRA	91,9	92,0	95,5	92,0	91,8	92,64

Na podstawie analizy wyników pomiarów twardości wykazano zbliżone wartości twardości dla stali narzędziowej do pracy na zimno i stali szybko tnącej oraz znacząco wyższą dla węgla spiekanego, co było oczekiwanym wynikiem. Dla węgla spiekanego wyniki zostały przedstawione w skali HRA zamiast skali HRC zgodnie z wytycznymi normy ASTM E18. Uzyskane wyniki są zgodne z wymaganiami norm dla materiałów, z których zostały wykonane, dla stali szybko tnącej jest to ASTM A600 [68] (minimalna twardość 64 HRC), dla stali narzędziowej do pracy na zimno ASTM A681 [65] (minimalna twardość 59 HRC), dla węgla spiekanego minimalna twardość określona przez producenta wynosi 92,1 HRA. W wyniku pomiarów twardości stwierdzono, że materiały sprawdzianów charakteryzują się stałą twardością w punktach pomiarowych, co wskazuje na ich jednorodność i brak istotnych zmian mikrostruktury. W wyniku badania twardości stwierdzono, że materiały sprawdzianów spełniają wymagania i mogą być przeznaczone do procesów pokrywania ich powierzchni powłokami przeciwzużyciowymi.

5.11. Wyniki obserwacji za pomocą mikroskopii elektronowej SEM-EDS i świetlnej

Zgodnie z przyjętą metodyką w celu dokonania charakterystyki mikrostruktury materiału podłoża i wytworzonych powłok przeprowadzono obserwacje morfologii warstwy wierzchniej i na przekrojach sprawdzianów przed testami i po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) S3400N firmy Hitachi i mikroskopu świetlnego optycznego VHX-6000 firmy Keyence zgodnie z przyjętą metodyką opisaną w rozdziale 4.6.

5.11.1. Wyniki obserwacji sprawdzianów niepowlękanych

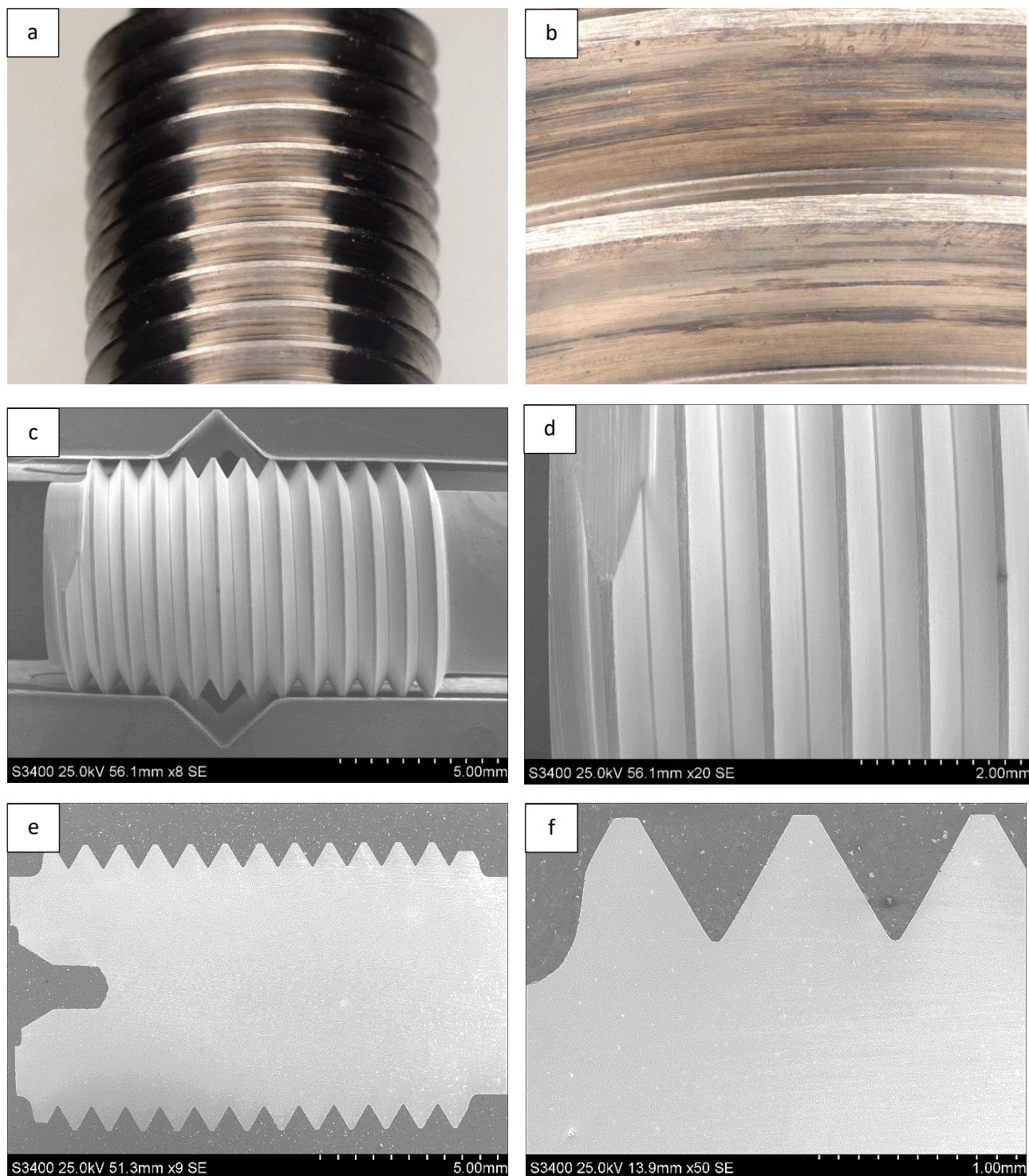
Obserwacje mikroskopowe prowadzono na sprawdzianach niepowlękanych. Dokonano analizy i oceny stopnia zużycia na podstawie obserwacji warstwy wierzchniej i przekrojów strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych nowych i po testach eksploatacyjnych. Badania prowadzono na sprawdzianach wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na zimno, stali szybkołnącej oraz węgliką spiekąnego. Wyniki obserwacji mikroskopowych sprawdzianów przed testami eksploatacyjnymi przedstawiono na rys. 5.63.; 5.70. i 5.78, natomiast sprawdzianów po zakończeniu testów eksploatacyjnych na rys. 5.66.; 5.75. i 5.83.

Stwierdzono, że sprawdziany nowe, przed użyciem do testów eksploatacyjnych posiadają charakterystyczny stan warstwy wierzchniej związany z procesem obróbki technologicznej – szlifowaniem wykonanym w celu uzyskania zarysu gwintu w tolerancjach wymiarowych określonych normami. Charakterystyczne ślady na powierzchni sprawdzianów powstałe w wyniku procesu szlifowania różnią się w zależności od zastosowanego materiału do produkcji sprawdzianów, parametrów szlifowania co jest związane z różną szlifowalnością stali narzędziowej do pracy na zimno, stali szybkołnącej i węgliką spiekąnego.

Zauważono, że dla sprawdzianów niepokrywanych zużycie przejawiało się poprzez ścieranie boków zarysu i wierzchołka występu gwintu, dodatkowo zaobserwowano deformacje plastyczną wierzchołków występu.

Prowadzono analizę składu chemicznego SEM-EDS na przekroju podłużnym i na powierzchni sprawdzianów w stanie przed testami eksploatacyjnymi, a także na powierzchni sprawdzianów po testach eksploatacyjnych w celu zobrazowania i wykazania różnic w składzie chemicznym powstałych w wyniku zużycia sprawdzianów na skutek kontaktu ich warstwy wierzchniej z przeciwpróbkami wykonanymi z różnych materiałów. W wynikach przedstawiono zawartości poszczególnych pierwiastków jako % mas. i % at. Przeprowadzone analizy składu chemicznego materiału sprawdzianów wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na zimno, stali szybkołnącej i węgliką spiekąnego potwierdziły ich skład z zakładanymi deklarowanym przez producenta. Dodatkowo na podstawie analizy SEM-EDS wykonanej na powierzchni sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych – wykazano obecność materiału pochodzącego z przeciwpróbek. Podczas oceny zużycia sprawdzianów dokonywano jednoczesnej identyfikacji materiału pochodzącego z przeciwpróbki. Ocenie tej poddano sprawdziany wykonane z węgliką pracujące z trzema różnymi materiałami przeciwpróbek: wykonanych z tytanu, stali i aluminium. Ich obecność badano na podstawie analizy składu chemicznego metodą EDS wykonywanej na powierzchni zużytych sprawdzianów.

Na rys. 5.63. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.63. a-b) oraz zdjęcia powierzchni i przekrojów podłużnych wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.63. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali narzędziowej przed testami eksploatacyjnymi.

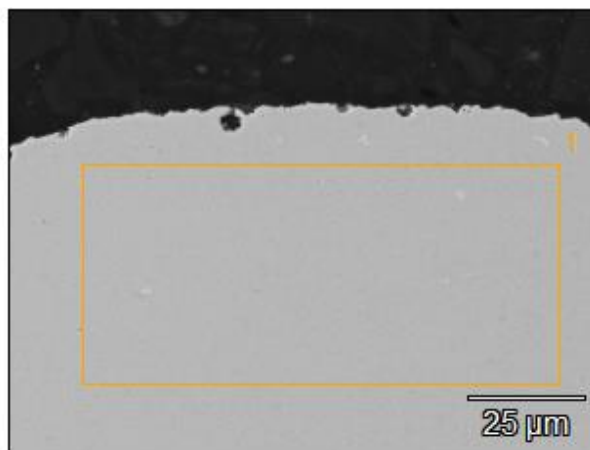


Rys. 5.63. Stan powierzchni a-d i przekrój podłużny e-f strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 – przed testami eksploatacyjnymi

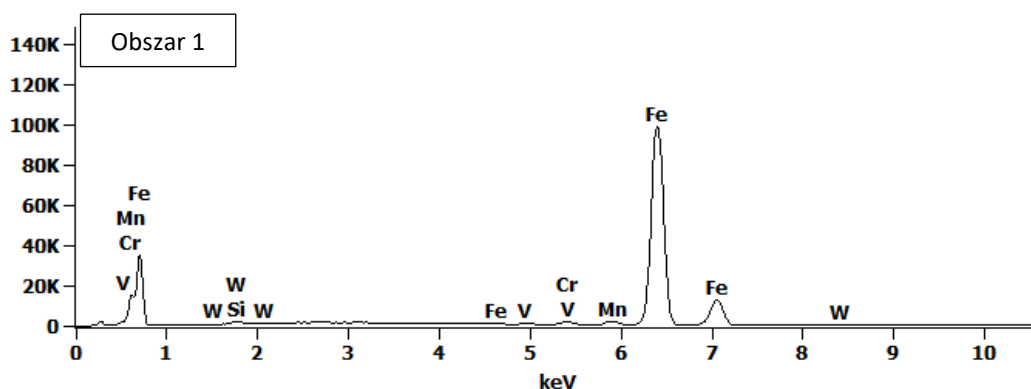
Podczas prowadzonych obserwacji mikroskopowych sprawdzianów ze stali narzędziowej przed testami eksploatacyjnymi stwierdzono na ich powierzchni obecność ciągłych, regularnych mikronierówności, głównie

w postaci regularnych rys, powstałych w procesie technologicznym szlifowania (rys. 5.63. a-d). Brak jest oznak zużycia eksploatacyjnego powierzchni sprawdzianu.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.64. przedstawiono na rys. 5.65 i w tabeli 5.96. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na przekroju podłużnym sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej przed testami eksploatacyjnymi celem weryfikacji zgodności składu chemicznego materiału z normą odniesienia.



Rys. 5.64. Przekrój podłużny (SEM) sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 w strefie przypowierzchniowej z zaznaczonym mikroobszarze analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



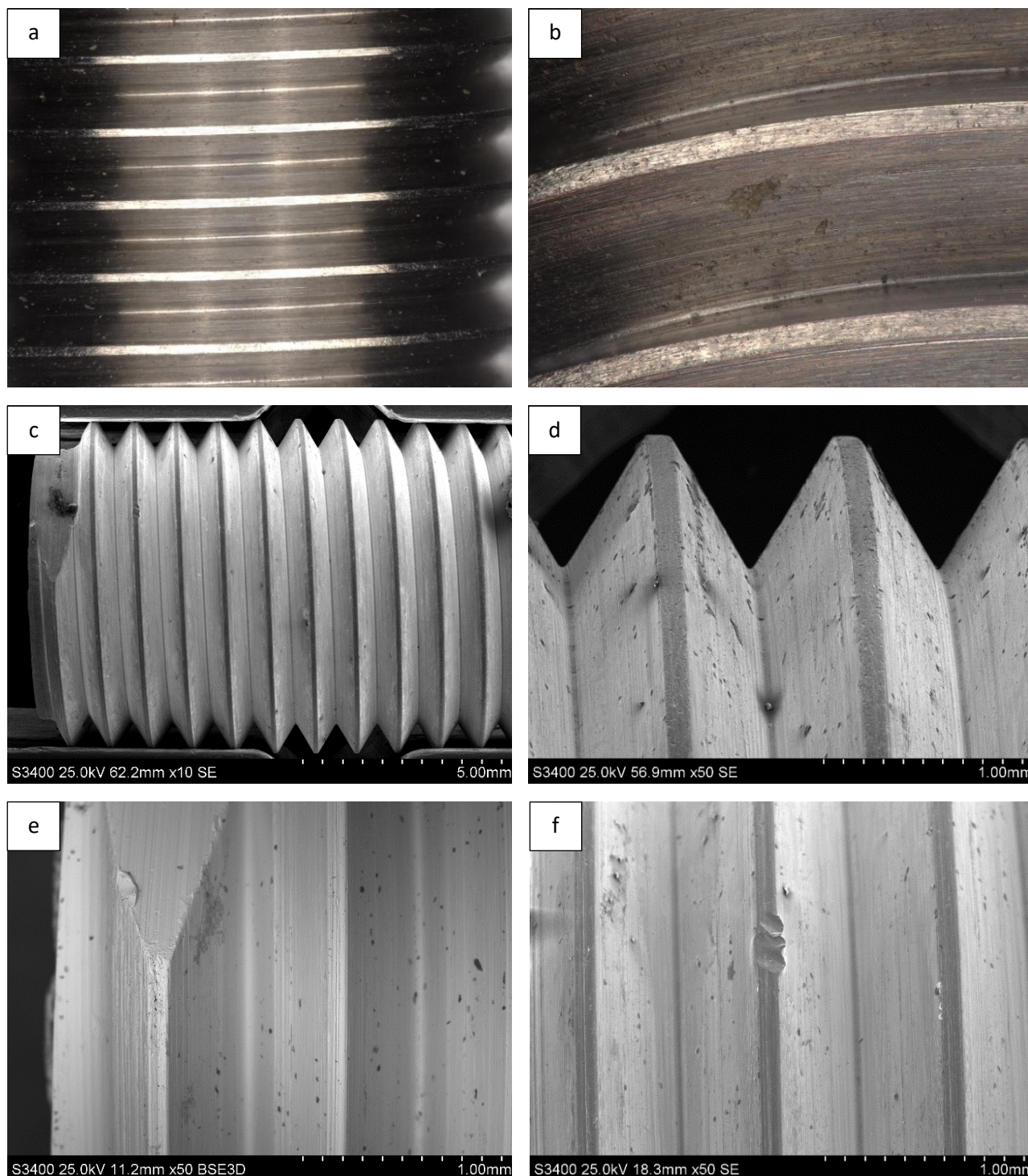
Rys. 5.65. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, na przekroju w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.44.

Tabela 5.96. Skład chemiczny (SEM-EDS) sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno, na przekroju w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.44.

Pierwiastek	Si	V	Cr	Mn	Fe	W
% mas.	0.2	0.2	0.6	1.3	97.1	0.6
% at.	0.5	0.2	0.6	1.3	97.2	0.2

Na podstawie wykonanej analizy składu chemicznego stwierdzono, że zawartość pierwiastków jest zgodna z ich zawartością dla stali do pracy na zimno typ O1 wg. normy odniesienia ASTM A681 [65].

Na rys. 5.66. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.66. a-b) oraz zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.66. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali narzędziowej po zakończonych testach eksploatacyjnych.



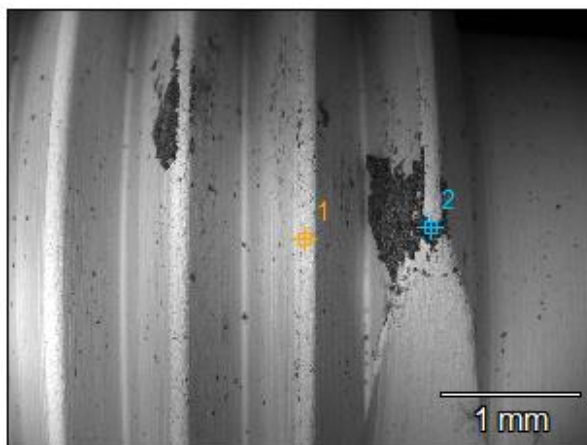
Rys. 5.66. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V

Na zdjęciach mikroskopowych SEM sprawdzianu ze stali narzędziowej do pracy na zimno wykonanych na powierzchni po zakończonych testach eksploatacyjnych widoczne jest zużycie erozyjne

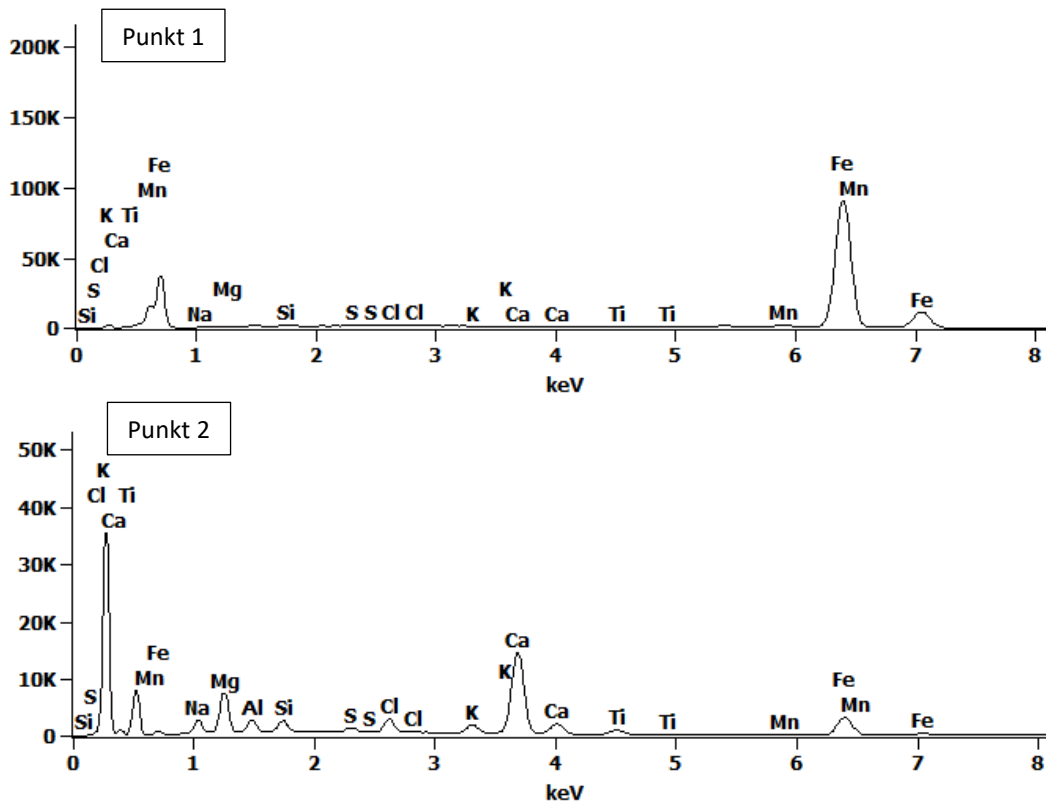
i ścierne (rys. 5.66. b, d, e, f), dodatkowo na rys. 5.66 e – widoczny jest narost na krawędzi gwintu, a na rys. 5.66 f – widoczna jest deformacja wierzchołka występu.

Ujawniono również, widoczne uszkodzenia eksploatacyjne powierzchni w postaci miejscowych odkształceń oraz obecności fragmentów materiałów obcych (rys. 5.66 c-d).

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w punktach zaznaczonych na rys. 5.67. zostały przedstawione na rys. 5.48. i w tabeli 5.79. Pomiar wykonano w dwóch punktach na powierzchni roboczej sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno po testach eksploatacyjnych. Punkt 1 zlokalizowano w sposób losowy na powierzchni wierzchołka występu, punkt 2 w obszarze czarnego przebarwienia również na powierzchni wierzchołka występu. Celem przeprowadzonej analizy było określenie składu chemicznego zanieczyszczeń na powierzchni sprawdzianu w wyniku testów eksploatacyjnych.



Rys. 5.67. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 z zaznaczonymi punktami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



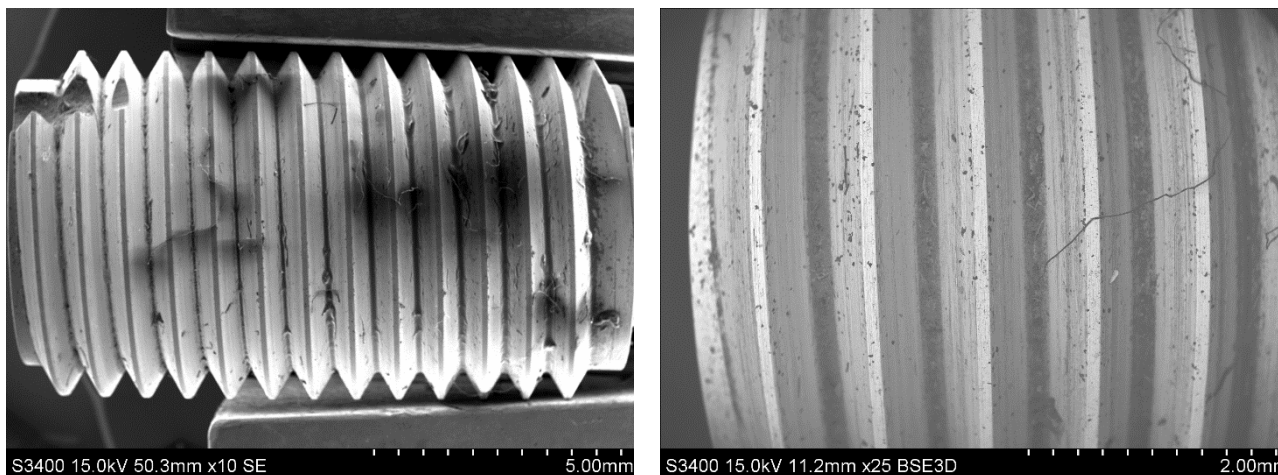
Rys. 5.68. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, w punktach zaznaczonych na rys. 5.47.

Tabela 5.97. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, w punktach zaznaczonych na rys. 5.47.

Nazwa pierwiastka	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Zawartość % mas.	pkt. 1	-	-	-	0.5	-	-	-	-	1.5	97.8
	pkt. 2	7.6	17.7	5.2	4.3	1.8	4.4	2.9	34.6	2.7	0.4
Zawartość % at.	Pkt. 1	-	-	-	1.1	-	-	-	-	1.5	97.1
	pkt. 2	11.3	24.9	6.6	5.3	1.9	4.3	2.6	29.6	2.0	0.2

W punkcie 1 stwierdzono dużą zawartość żelaza ok. 97% mas. – pochodzącego z osnowy oraz dodatków stopowych – manganu ok. 1.5% mas. i krzemu ok. 0.5%. Na podstawie wykonanej analizy EDS w punkcie 2, stwierdzono obecność pierwiastków nie pochodzących z materiału sprawdzianu – ujawniono obecność aluminium ok. 5.2% mas. i tytanu ok. 2.7% mas. będących głównymi składnikami materiału przeciwpróbki – kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. Jednocześnie stwierdzono różnice w składzie chemicznym pomiędzy obydwooma punktami – w punkcie nr 2 stwierdzono podwyższoną zawartość pierwiastków tj. K, Na, Ca, Mg – pochodzących z zanieczyszczeń powstałych w warunkach eksploatacyjnych – podczas trwania testów.

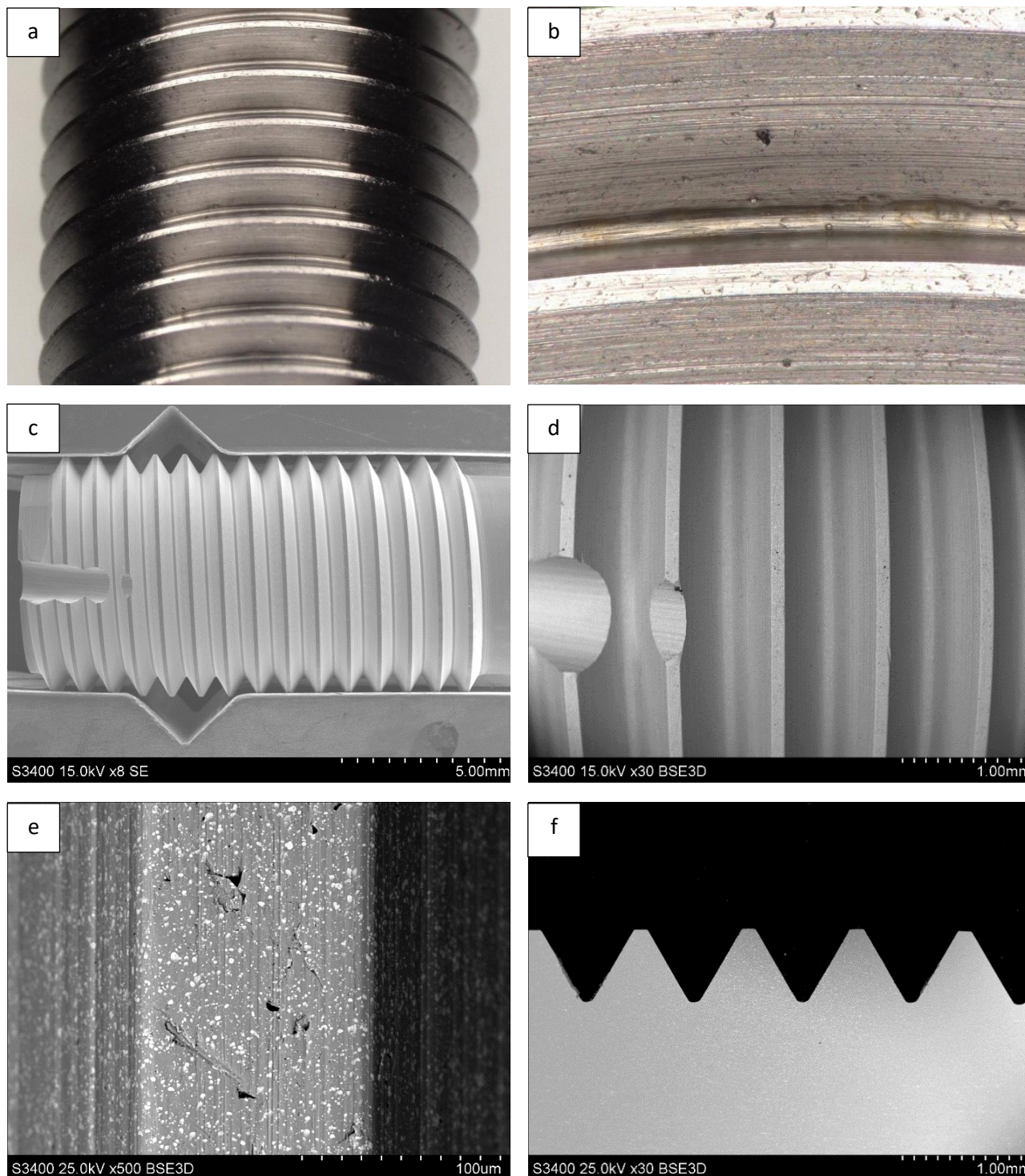
Dodatkowo przeprowadzono obserwacje SEM powierzchni sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 w trakcie trwania testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych modułu autopilota wykonanych ze stopu aluminium 7075 (rys. 5.69.) w celu obserwacji intensywności zjawiska przywierania materiału przeciwpróbki do powierzchni sprawdzianu.



Rys. 5.69. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 w trakcie testów przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075

Podczas prowadzonych badań mikroskopowych zaobserwowano na powierzchni sprawdzianu materiał przeciwpróbki – aluminium 7075, w postaci mikro wiór i pyłu o dużym nagromadzeniu, szczególnie na dnie brzozy gwintu. Zaobserwowane zanieczyszczenia były trudne do usunięcia z powierzchni sprawdzianu.

Na rys. 5.70. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.70. a-b) oraz zdjęcia powierzchni i przekroju podłużnego wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.70. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali narzędziowej przed testami eksploatacyjnymi.

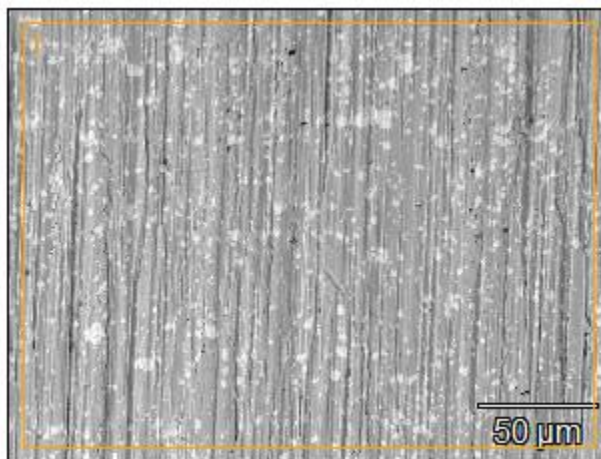


Rys. 5.70. Stan powierzchni a-d i przekrój podłużny f strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali szybkotnącej M-1- przed testami eksploatacyjnymi

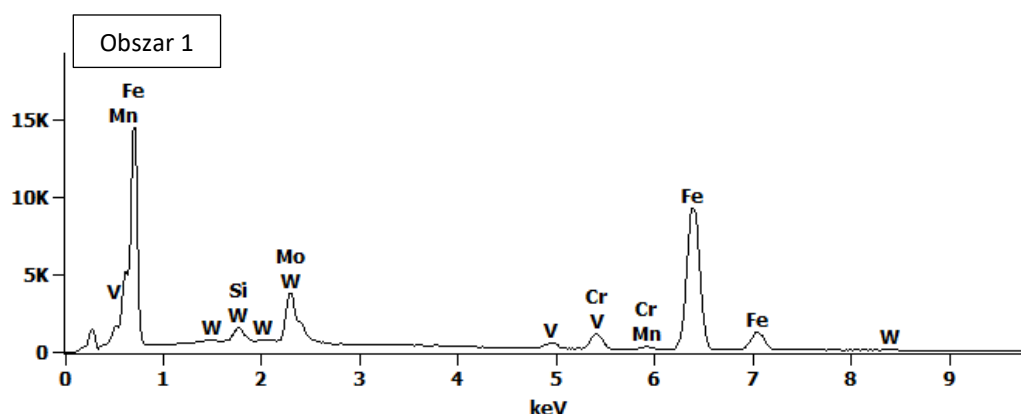
Podczas prowadzonych obserwacji mikroskopowych sprawdzianów ze stali narzędziowej przed testami eksploatacyjnymi stwierdzono na ich powierzchni obecność ciągłych, regularnych mikronierówności

(rys. 5.70. a-f), powstałych w procesie technologicznym szlifowania. Brak jest oznak zużycia eksploatacyjnego powierzchni sprawdzianu.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.71. przedstawiono na rys. 5.72. i w tabeli 5.98. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na przekroju podłużnym sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej przed testami eksploatacyjnymi celem potwierdzenia zgodności składu chemicznego materiału z normą odniesienia.



Rys. 5.71. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 z zaznaczonym mikroobszarem analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



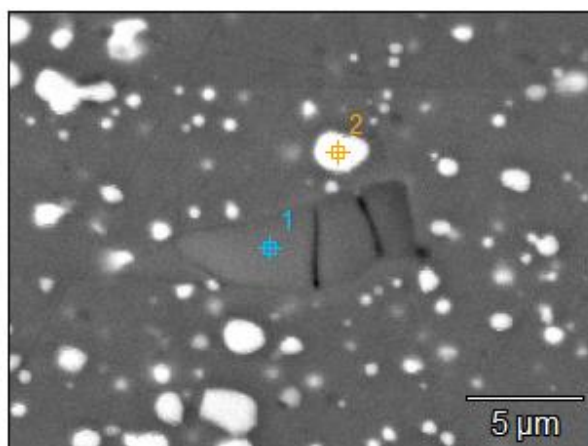
Rys. 5.72. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.71.

Tabela 5.98. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1, w mikroobszarze zaznaczonych na rys. 5.71.

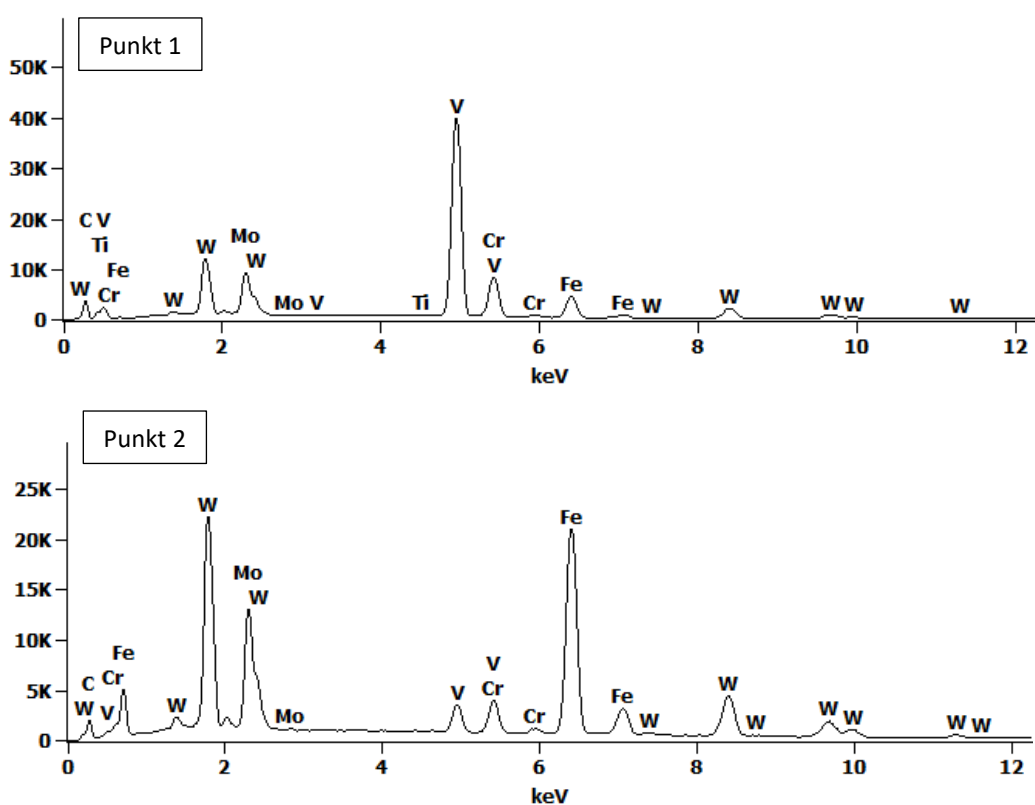
Nazwa pierwiastka	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
Zawartość pierwiastka % mas.	0.5	1.35	4.0	0.4	80.5	9.2	2.1
Zawartość pierwiastka % at.	1.3	1.5	4.6	0.5	84.6	6.0	0.6

Na podstawie wykonanej analizy składu chemicznego stwierdzono, że zawartość pierwiastków jest zgodna z ich zawartością dla stali szybko tnącej typ M-1 wg normy odniesienia ASTM A600 [68].

Dodatkowo przeprowadzono analizę składu chemicznego na przekroju w celu analizy wydzieli o różnej intensywności odcienia, w punktach zaznaczonych na rys. 5.73. Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS zostały przedstawione na rys. 5.74. i w tabeli 5.99.



Rys. 5.73. Mikrostruktura w strefie przypowierzchniowej materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkotnącej M-1 z zaznaczonymi miejscami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



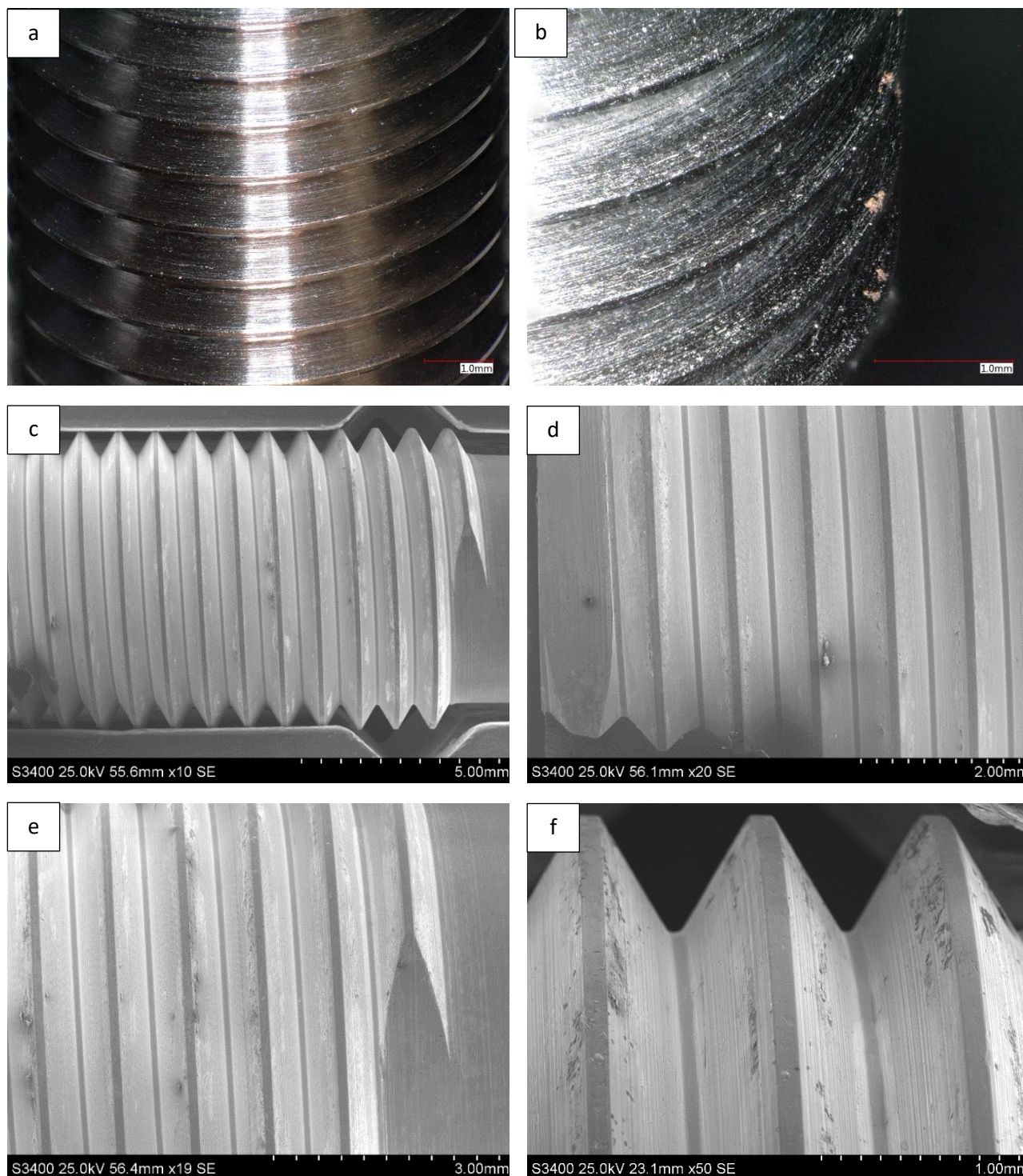
Rys. 5.74. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkotnącej M-1, na przekroju w punktach zaznaczonym na rys. 5.73.

Tabela 5.99. Skład chemiczny (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1, na przekroju w punktach zaznaczonych na rys. 5.73.

Nazwa pierwiastka		C	V	Cr	Fe	Mo	W
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	12.3S	47.7	3.6	7.5	12.3	16.0
	pkt. 2	4,6S	3,3	3.5	34.0	22.2	32.4
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	45.1S	37.7	2.8	5.5	5.2	3.5
	pkt. 2	25.1S	4.2	4.4	39.7	15.1	11.5

Na podstawie analizy składu chemicznego EDS – na przekroju podłużnym nietrawionego zglądu metalograficznego wykonanego ze sprawdzianu ze stali narzędziowej do pracy na zimno, wykonanej przy większym zakresie powiększeń, w mikroobszarach obejmujących liczne wydzielania o charakterystycznej sferoidalnej morfologii. Stwierdzono różnice w składzie chemicznym tych wydzieleni w zależności od różnicy w ich intensywności odcienia oraz rozmiarów. Wyniki wskazują na obecność różnego rodzaju węglików – charakterystycznych dla stali narzędziowej do pracy na zimno – według źródeł literaturowych są to węgliki typu VC – punkt nr 1 i węgliki typu (Mo, W)C – punkt nr 2 [66].

Na rys. 5.75. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.75. a-b) oraz zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.75. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali szybko tnącej po zakończonych testach eksploatacyjnych.

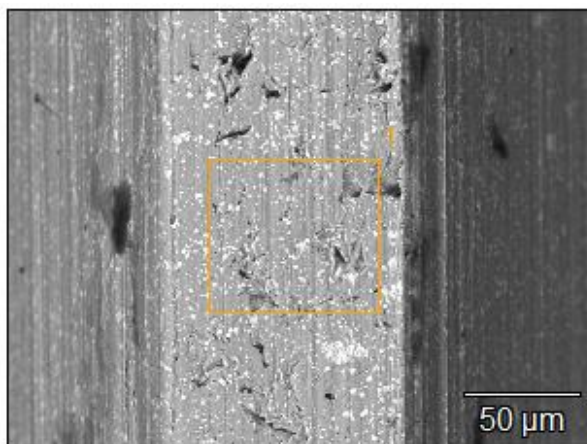


Rys. 5.75. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V

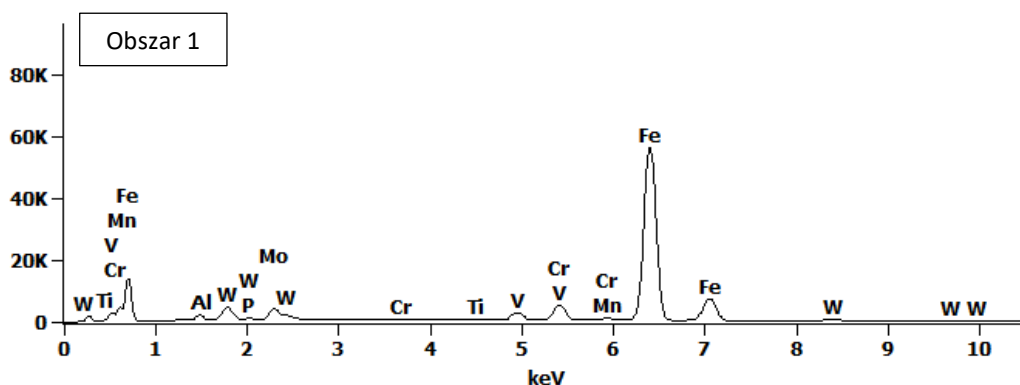
Na zdjęciach wykonanych podczas obserwacji mikroskopowych powierzchni sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej po testach eksploatacyjnych pokazano obszary obrazujące skutki uszkodzeń powstałych w

wyniku zużycia erozyjnego i ściernego (rys. 5.75. b, d, e, f). Widoczne są również uszkodzenia eksploatacyjne powierzchni w postaci miejscowych odkształceń oraz obecności fragmentów materiałów obcych.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.76. przedstawiono na rys. 5.77. i w tabeli 5.100. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na powierzchni sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej celem analizy zanieczyszczeń powierzchni w wyniku przeprowadzonych testów eksploatacyjnych.



Rys. 5.76. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 w obszarze wierzchołka, z zaznaczonym mikroobszarze analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



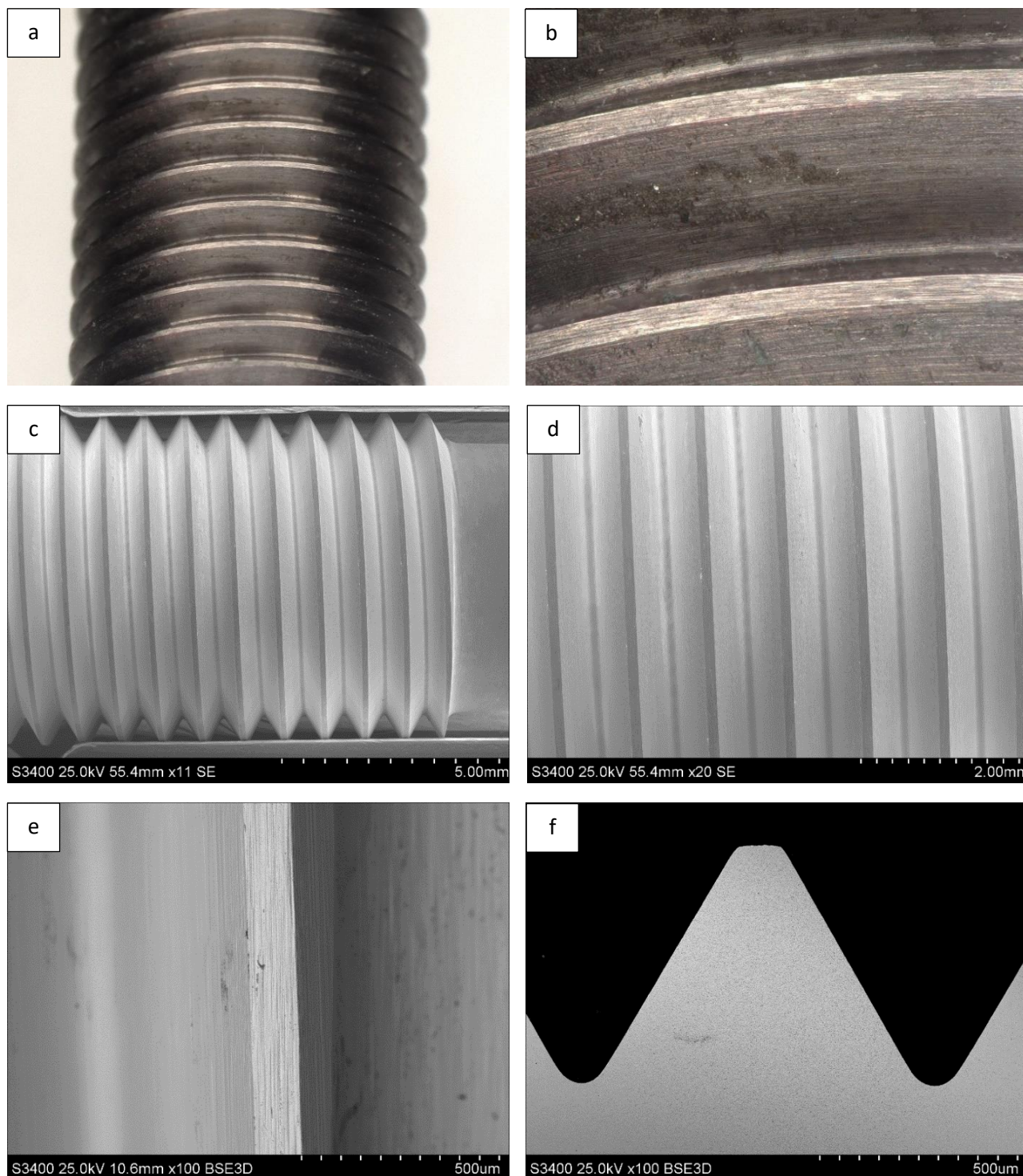
Rys. 5.77. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1, w obszarze zaznaczonym na rys. 5.76.

Tabela 5.100. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.76.

Nazwa pierwiastka	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
Zawartość pierwiastka % mas.	0.2	1.2	2.2	4.0	0.4	80.9	4.5	6.3
Zawartość pierwiastka % at.	0.3	2.5	2.5	4.5	0.5	84.8	2.8	2.0

Oprócz Cr, Mn, W i Fe – pierwiastków pochodzących z materiału sprawdzianu, stwierdzono również obecność tytanu, aluminium i wanadu – pierwiastków pochodzących z materiału przeciwpróbki – kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Na rys. 5.78. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.78. a-b) oraz zdjęcia powierzchni i przekroju podłużnego wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.78. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy z węgla spiekanego przed testami eksploatacyjnymi.

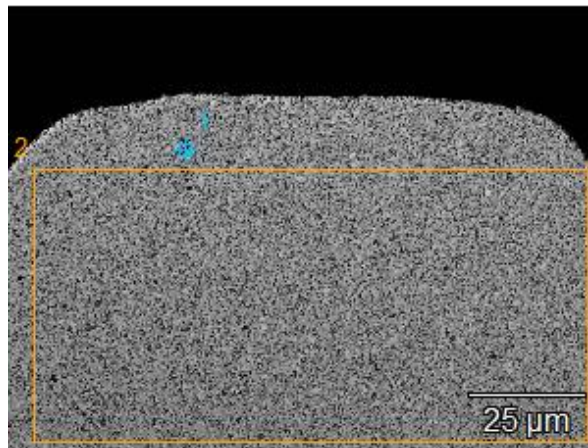


Rys. 5.78. Stan powierzchni a-e) i przekrój podłużny f) strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego z węgla spiekanego C-2 – przed testami eksploatacyjnymi

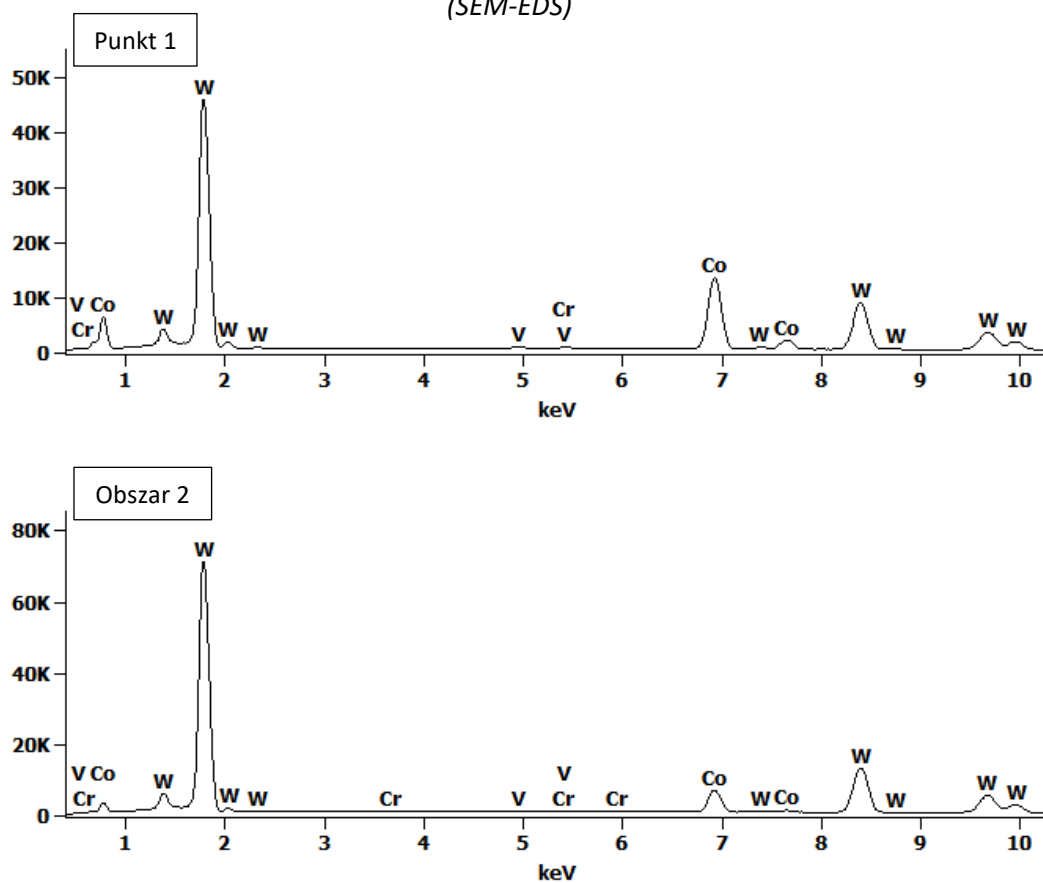
Na zdjęciach wykonanych podczas obserwacji mikroskopowych powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego przedstawiono obszary (rys. 5.78 a-d), na których widoczne są mikronierówności w

postaci rys z częściowo z wyrwanymi fragmentami materiału na powierzchni, powstałymi w procesie technologicznym szlifowania. Brak jest oznak zużycia eksploatacyjnego powierzchni sprawdzianu.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze i w punkcie zaznaczonym na rys. 5.79. zostały przedstawione na rys. 5.80. i w tabeli 5.101. Analizę przeprowadzono w jednym punkcie na przekroju sprawdzianu wykonanego z węgliku spiekanego przed testami eksploatacyjnymi, w obszarze przypowierzchniowym i w jednym mikroobszarze w głębi materiału, celem potwierdzenia zgodności składu chemicznego zgodnie z deklaracją producenta.



Rys. 5.79. Przekrój podłużny (SEM) sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego C-2 w strefie przypowierzchniowej z zaznaczonym mikroobszarzem i punktem analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



Rys. 5.80. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego C-2, na przekroju w mikroobszarze i punkcie zaznaczonym na rys. 5.79.

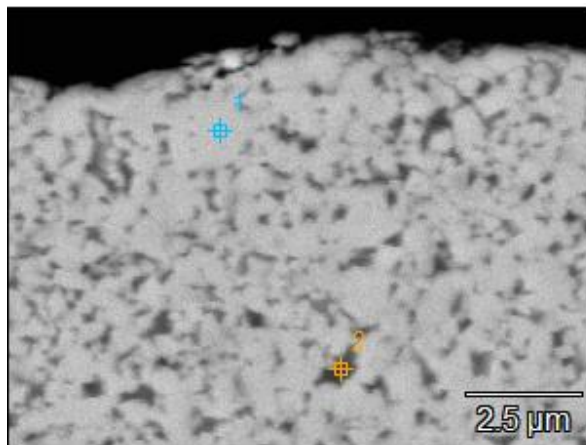
Tabela 5.101. Skład chemiczny materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego C-2, w mikroobszarze i punkcie zaznaczonym na rysunku 5.79.

Nazwa pierwiastka		C	V	Cr	Co	W
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	4.6S	0.5	0.4	29.5	70.1
	obszar 2	5.5S	0.2	0.2	9.6	84.5
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	31.9	0.8	0.6	34.7	70.1
	obszar 2	42.2	0.4	0.3	14.9	42.2

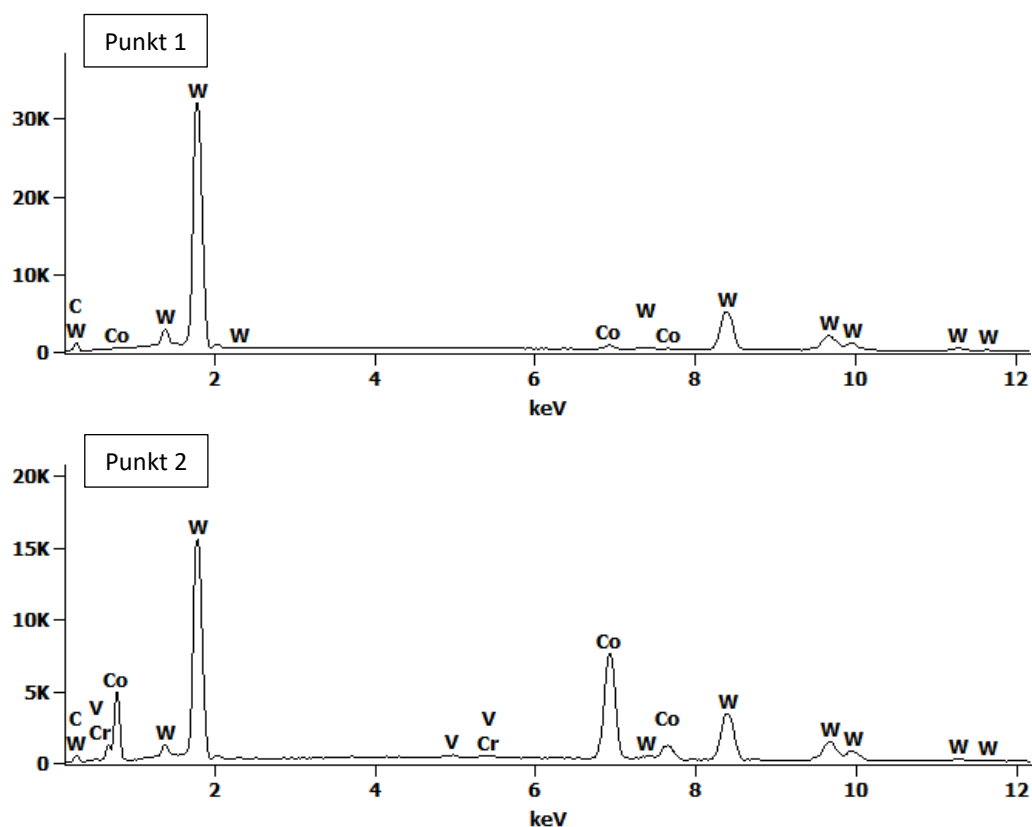
Na podstawie obserwacji mikroskopowych SEM i analizy składu chemicznego sprawdzianu wykonanego z węgliku spiekanego wykonanej metodą SEM-EDS, stwierdzono że mikrostruktura składała się z obecności ziaren dwóch faz o różnym składzie chemicznym i morfologii. Analizę SEM-EDS wykonywano punktowo oraz w mikroobszarze na przekroju podłużnym. Wyniki analizy składu chemicznego z większego fragmentu analizowanego obszaru (rys. 5.79.) wykazały, że średnia zawartość kobaltu mieści się w zakresie normy dla materiału, jakim jest spiekany węgiel C-2 (WC-Co) i wynosi ok. 9.6% mas. (rys. 5.80.; tabela 5.101).

Na podstawie analizy wyników z przeprowadzonych badań, w oparciu o analizę porównawczą z danymi literaturowymi stwierdzono, że skład chemiczny oraz morfologia poszczególnych składników fazowych mikrostruktury są typowe dla węgliku spiekanego C-2.

W celu dokładnej analizy mikrostruktury węgliku spiekanego dokonano analizy SEM-EDS przy większym powiększeniu, w punktach zaznaczonych na rys. 5.81. Wyniki przedstawiono na rys. 5.82. i w tabeli 5.102.



Rys. 5.81. Przekrój podłużny (SEM) sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego C-2 w strefie przypowierzchniowej z zaznaczonymi punktami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



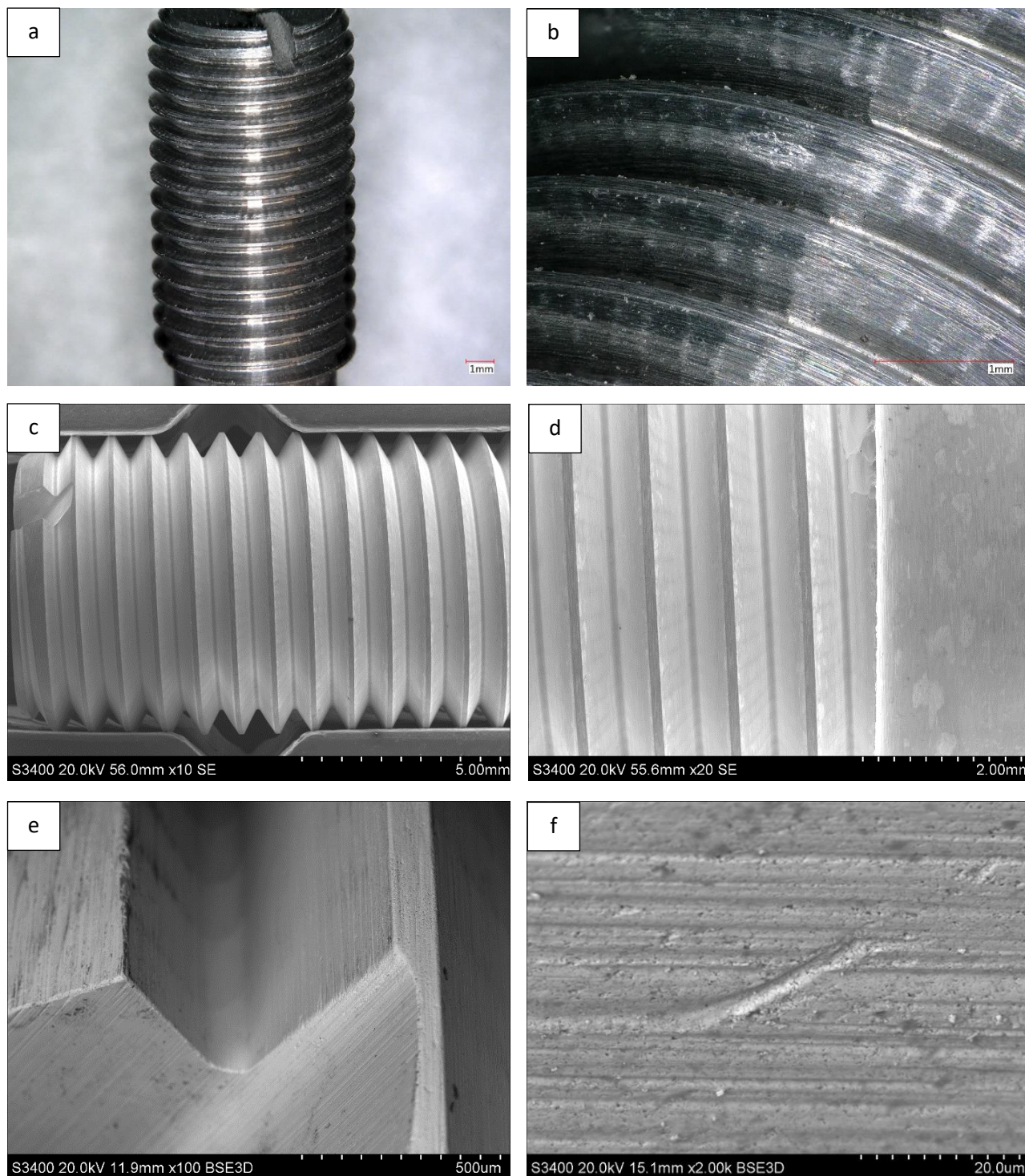
Rys. 5.82. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekane C-2, na przekroju w punktach zaznaczonych na rys. 5.81.

Tabela 5.102. Skład chemiczny (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekane C-2, na przekroju w punktach zaznaczonych na rys. 5.81.

Nazwa pierwiastka		C	V	Cr	Co	W
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	6.05S	-	-	2.6	91.5
	pkt. 2	4.1S	0.5	0.5	32.3	62.6
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	47.9S	-	-	4.2	47.9
	pkt. 2	27.3S	0.8	0.8	43.9	27.3

Na podstawie prowadzonych obserwacji mikroskopowych przy większym powiększeniu stwierdzono, że mikrostruktura węgla spiekane C-2 ma budowę dwufazową – składa się z kryształów osnowy ostrokrawędziowych o regularnym kształcie fazy bogatej w wolfram o mniejszej zawartości kobaltu – ok. 2.5% mas. Co – jasne obszary oraz kryształów fazy wypełniającej o nieregularnym kształcie i mniejszej zawartości wolframu oraz większej zawartości kobaltu – ok. 30-34% mas. Co (rys. 5.81 – 5.82; tabela 5.102.).

Na rys. 5.83. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.83. a-b) oraz zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.83. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy z węgla spiekanego po zakończonych testach eksploatacyjnych.

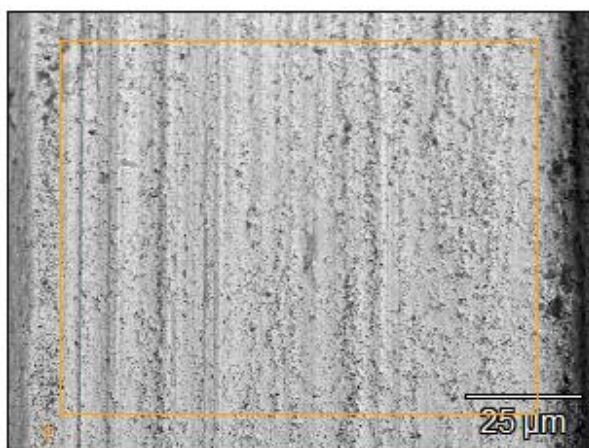


Rys. 5.83. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego z węgla spiekanego – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stali 15-5 PH

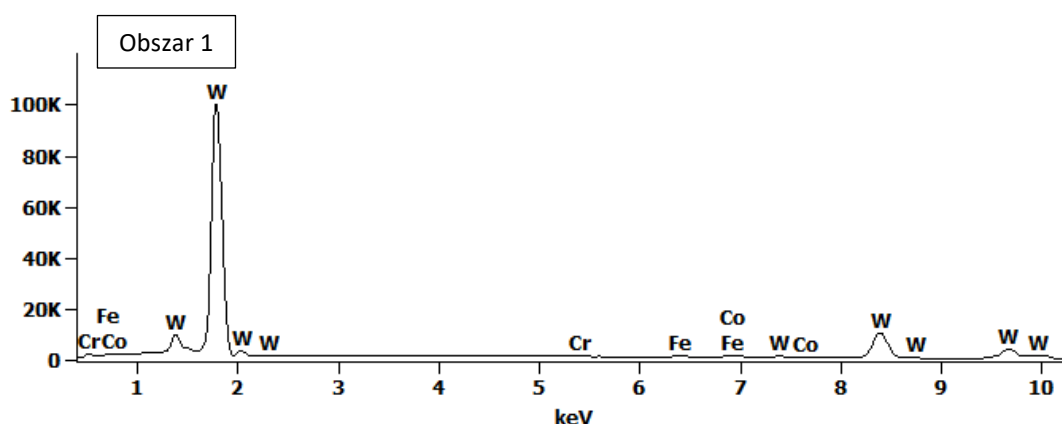
Na zdjęciach wykonanych podczas obserwacji mikroskopowych powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgliku spiekanego po zakończonych testach eksploatacyjnych pokazano obszary obrazujące skutki uszkodzeń powstałych w wyniku zużycia erozyjnego i ściernego (rys. 5.83. e, f), dodatkowo na rys. 5.83. d widoczne jest wykruszenie, a na rys. 5.83. e, f widoczna jest deformacja wierzchołka występu. Widoczna jest również obecność zanieczyszczeń na powierzchniach bocznych gwintu.

W celu obserwacji różnic w składzie chemicznym na powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgliku spiekanego przeprowadzono analizę SEM-EDS powierzchni sprawdzianów po zakończonych testach przy użyciu kolektorów wykonanych ze stali 15-5 PH (rys. 5.84 – 5.85, tabela 5.103.), stopu aluminium 7075 (rys. 5.86 – 5.87, tabela 5.104.), i stopu tytanu Ti-6Al-4V (rys. 5.88 – 5.89, tabela 5.105.). Pomiarów wykonywano w mikroobszarze na powierzchni roboczej sprawdzianu. Na jej podstawie ujawniono różnice w składzie chemicznym – stwierdzono obecność pierwiastków chemicznych charakterystycznych dla danego typu kolektora hydraulicznego.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.84 zostały przedstawione na rys. 5.85. i w tabeli 5.103. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgliku spiekanego po zakończonych testach przy użyciu kolektorów wykonanych ze stali 15-5PH celem analizy zmiany składu chemicznego powierzchni w wyniku przeprowadzonych testów eksploatacyjnych.



Rys. 5.84. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego w obszarze wierzchołka z zaznaczonym mikroobszarem analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



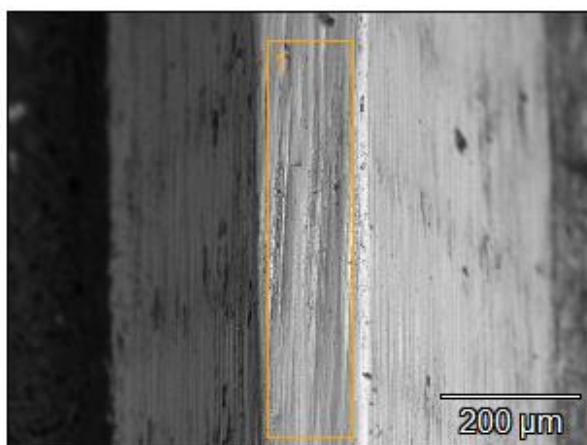
Rys. 5.85. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliku spiekanego C-2, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.83.

Tabela 5.103. Skład chemiczny materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliką spiekanego, w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.83.

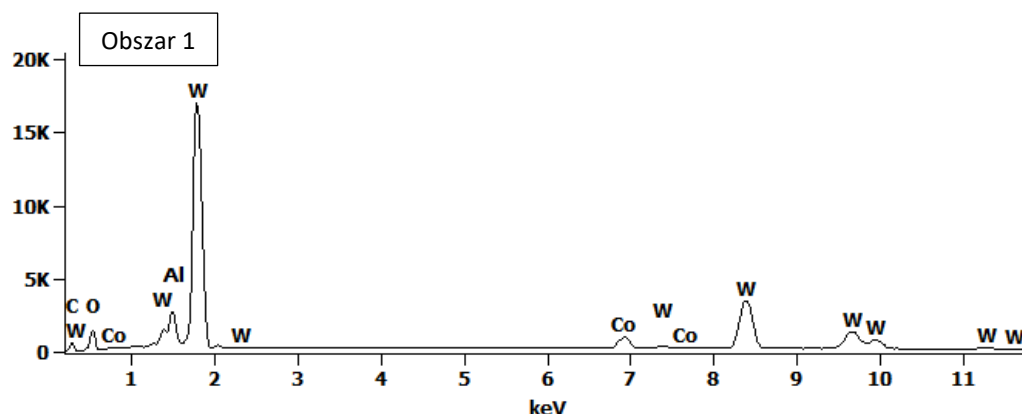
Nazwa pierwiastka	C	Cr	Fe	Co	W
Zawartość pierwiastka % mas.	5.9S	0.3	0.8	2.4	90.6
Zawartość pierwiastka % at.	47.1	0.5	1.4	3.8	47.1

W analizowanym obszarze zidentyfikowano obecność żelaza pochodzącego z materiału przeciwpróbki – kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu stali nierdzewnej utwardzanej wydzieleniowo 15-5 PH.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.86. zostały przedstawione na rys. 5.87. i w tabeli 5.104. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgliką spiekanego po zakończonych testach przy użyciu kolektorów wykonanych ze stopu aluminium 7075. Celem analizy było określenie zmiany składu chemicznego powierzchni w wyniku przeprowadzonych testów eksploatacyjnych.



Rys. 5.86. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliką spiekanego C-2 w obszarze wierzchołka gwintu z zaznaczonym mikroobszarem analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



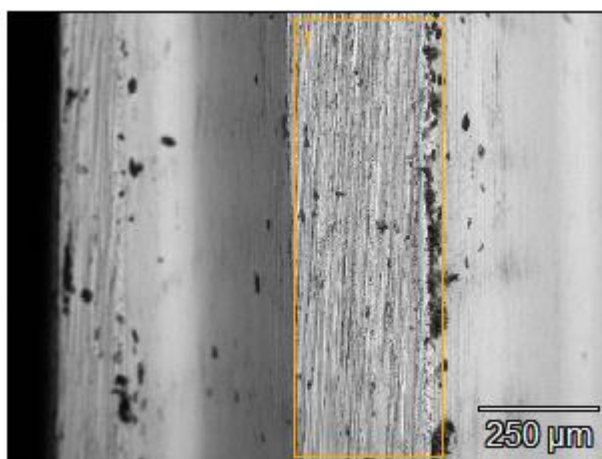
Rys. 5.87. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgliką spiekanego C-2, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.85.

Tabela 5.104. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekanego w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.85.

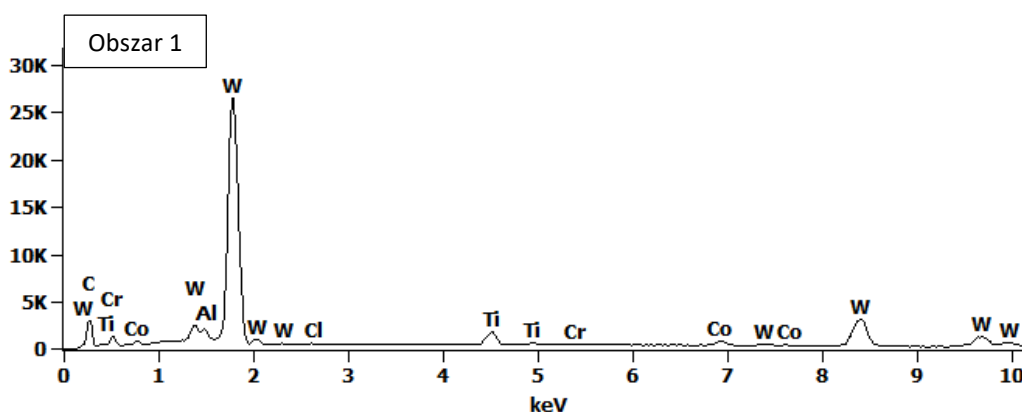
Nazwa pierwiastka	C	O	Al	Co	W
Zawartość pierwiastka % mas.	5.6S	1.9S	2.1	3.9	86.5
Zawartość pierwiastka % at.	39.1	9.8	6.6	5.5	39.1

W analizowanym obszarze zidentyfikowano obecność utlenionego aluminium pochodzącego z materiału przeciwpróbki – kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu aluminium 7075.

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.88. zostały przedstawione na rys. 5.89. i w tabeli 5.105. Obserwacje prowadzono w jednym mikroobszarze na powierzchni sprawdzianu wykonanego z węgla spiekanego po zakończonych testach przy użyciu kolektorów wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V celem analizy zmiany składu chemicznego powierzchni w wyniku przeprowadzonych testów eksploatacyjnych.



Rys. 5.88. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekanego C-2 w obszarze wierzchołka gwintu z zaznaczonym mikroobszarem analizy składu chemicznego (SEM-EDS).



Rys. 5.89. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekanego C-2, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.88.

Tabela 5.105. Skład chemiczny materiału (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego z węgla spiekane, w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.88.

Nazwa pierwiastka	C	Al	Cl	Ti	Cr	Co	W
Zawartość pierwiastka % mas.	5.65	1.3	0.4	4.4	0.2	3.2	85.0
Zawartość pierwiastka % at.	40.8	4.2	1.0	8.1	0.4	4.8	40.8

W analizowanym obszarze zidentyfikowano obecność tytanu pochodzącego z materiału przeciwpróbki – kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu tytanu Ti-6Al-4V.

5.11.2. Wyniki badań sprawdzianów powlekanych

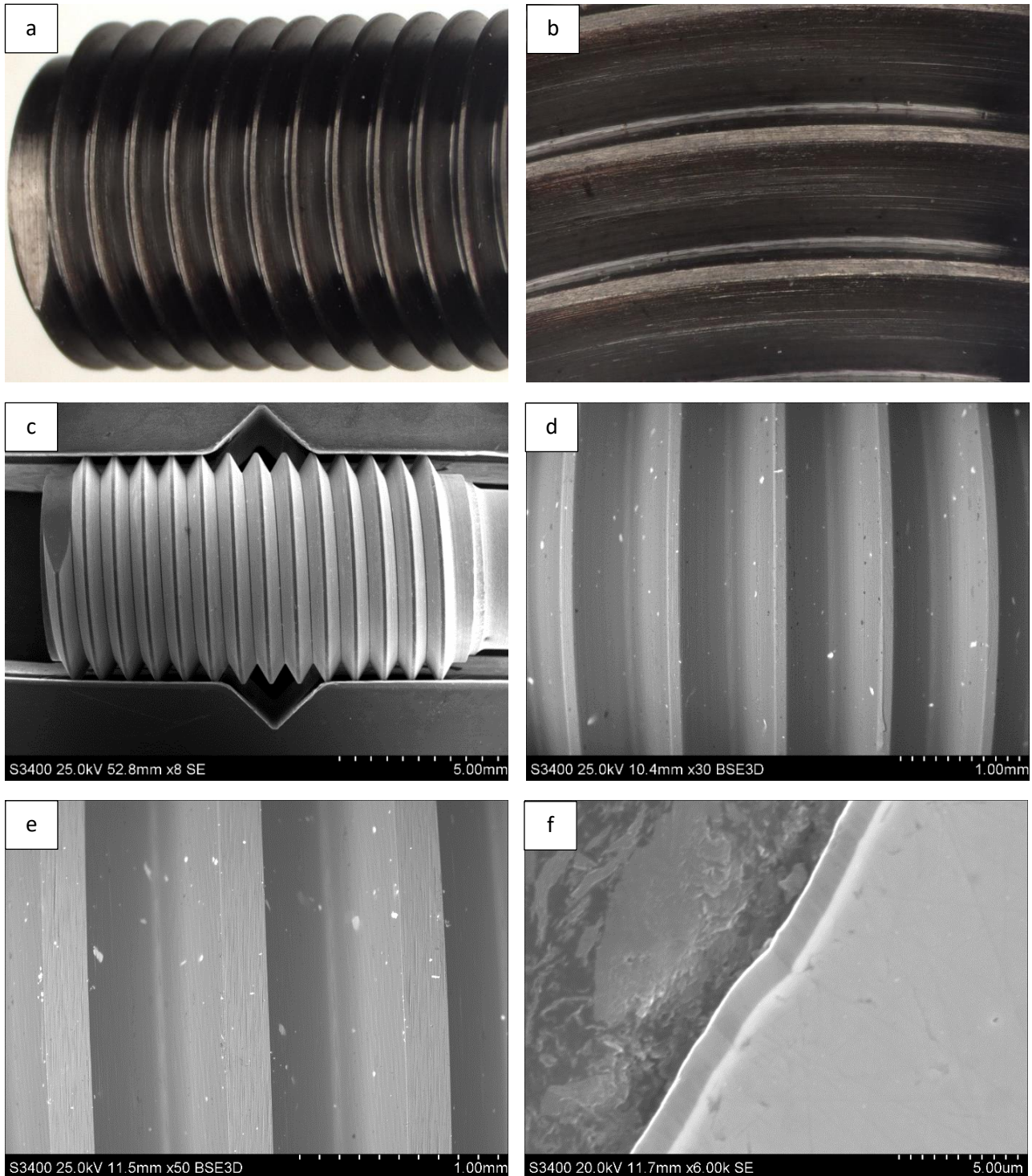
Obserwacje mikroskopowe prowadzono na sprawdzianach powlekanych powłokami przeciwzużyciowymi. Dokonano analizy i oceny stopnia ich zużycia na podstawie obserwacji warstwy wierzchniej i przekrojów strony PRZECHODNIEJ sprawdzianów gwintowych po naniesieniu powłok i po testach eksploatacyjnych. Badania prowadzono na sprawdzianach wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokrytej powłoką DLC i stali szybkoobrotowej pokrytej powłoką TiN. Wyniki obserwacji mikroskopowych sprawdzianów przed testami eksploatacyjnymi przedstawiono na rys. 5.89.; 5.102., natomiast sprawdzianów po zakończeniu testów eksploatacyjnych na rys. 5.97 – 5.99.; 5.110.

Dla sprawdzianów pokrywanych, zużycie zachodziło w tym samym obszarze części roboczej gwintu, jak w przypadku sprawdzianów niepowlekanych, poprzez ścieranie powierzchni boków zarysu i wierzchołka występu i deformacje plastyczne wierzchołków występu. Warstwa TiN i DLC podlega postępującemu zużyciu w postaci systematycznego zużycia ściernego objawiającego się usunięciem fragmentów powłoki i odsłonięciem materiału sprawdzianu. Ten rodzaj zużycia jest zlokalizowany głównie w obszarach boków i wierzchołków zarysu gwintu, szczególnie w obszarze pierwszych zwoi sprawdzianu.

Zaobserwowano w trakcie badań, że powłoki przeciwzużyciowe DLC i TiN, a w szczególności powłoka DLC minimalizują przywieranie cząstek materiału pochodzących z przeciwpróbki do powierzchni sprawdzianów. Taki proces zachodził szczególnie intensywnie podczas testów eksploatacyjnych przy użyciu sprawdzianów niepowlekanych przy użyciu kolektorów aluminiowych w charakterze przeciwpróbki.

Prowadzono analizę składu chemicznego SEM-EDS sprawdzianów na przekroju podłużnym i na powierzchni w stanie przed testami eksploatacyjnymi, a także na powierzchni sprawdzianów po testach eksploatacyjnych w celu oceny różnic składu chemicznego powstałych na skutek zużycia sprawdzianów i kontaktu z przeciwpróbką. Wyniki przedstawiono jako zawartości poszczególnych pierwiastków w % mas. i % at. Wyniki analizy składu chemicznego powłok przeciwzużyciowych z badań własnych porównano z wynikami w danych literaturowych. Podczas oceny zużycia sprawdzianów dokonywano jednoczesnej identyfikacji materiału pochodzącego z przeciwpróbki – wykazano obecność pierwiastków pochodzących z materiału przeciwpróbek na powierzchni sprawdzianów po zakończonych testach eksploatacyjnych.

Na rys. 5.89. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.89. a-b) oraz zdjęcia powierzchni i przekroju podłużnego wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.89. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali do pracy na zimno z powłoką DLC w stanie po nałożeniu powłoki (przed testami eksploatacyjnymi).

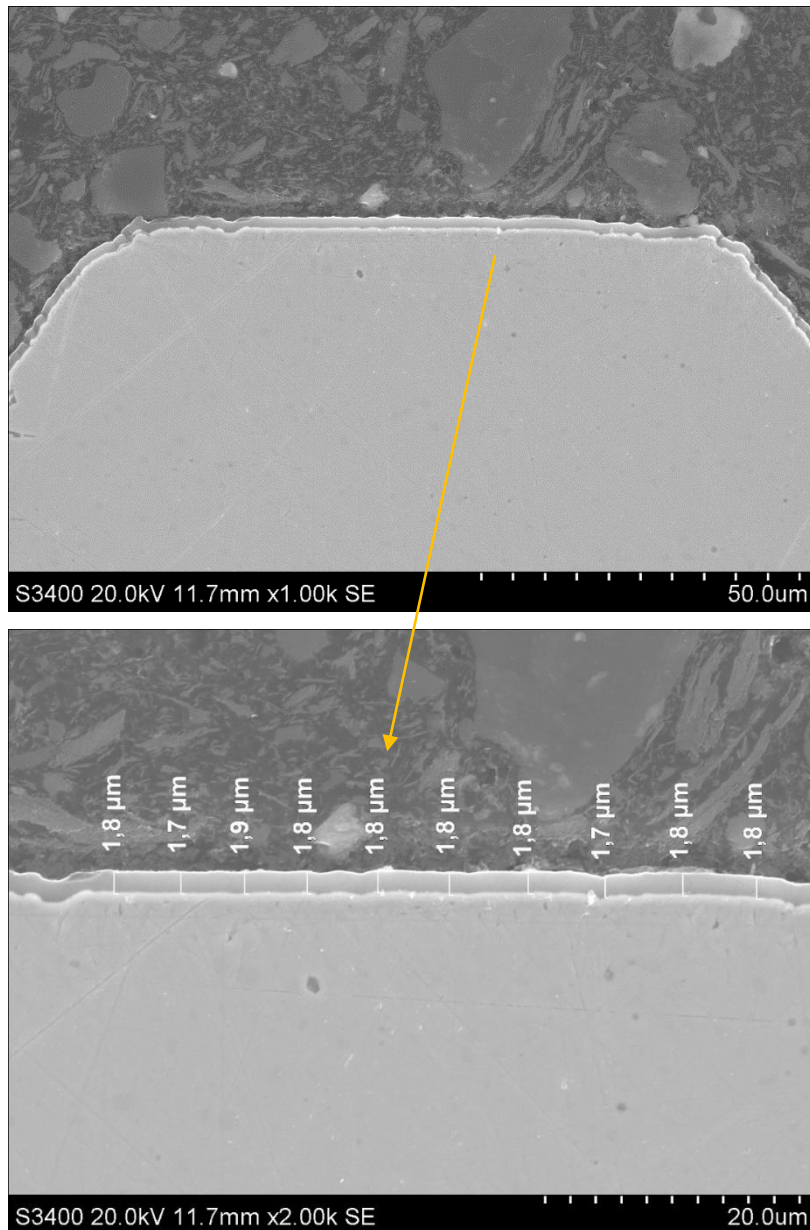


Rys. 5.90. Stan powierzchni a-e) i przekrój podłużny strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytego powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD – przed testami eksploatacyjnymi

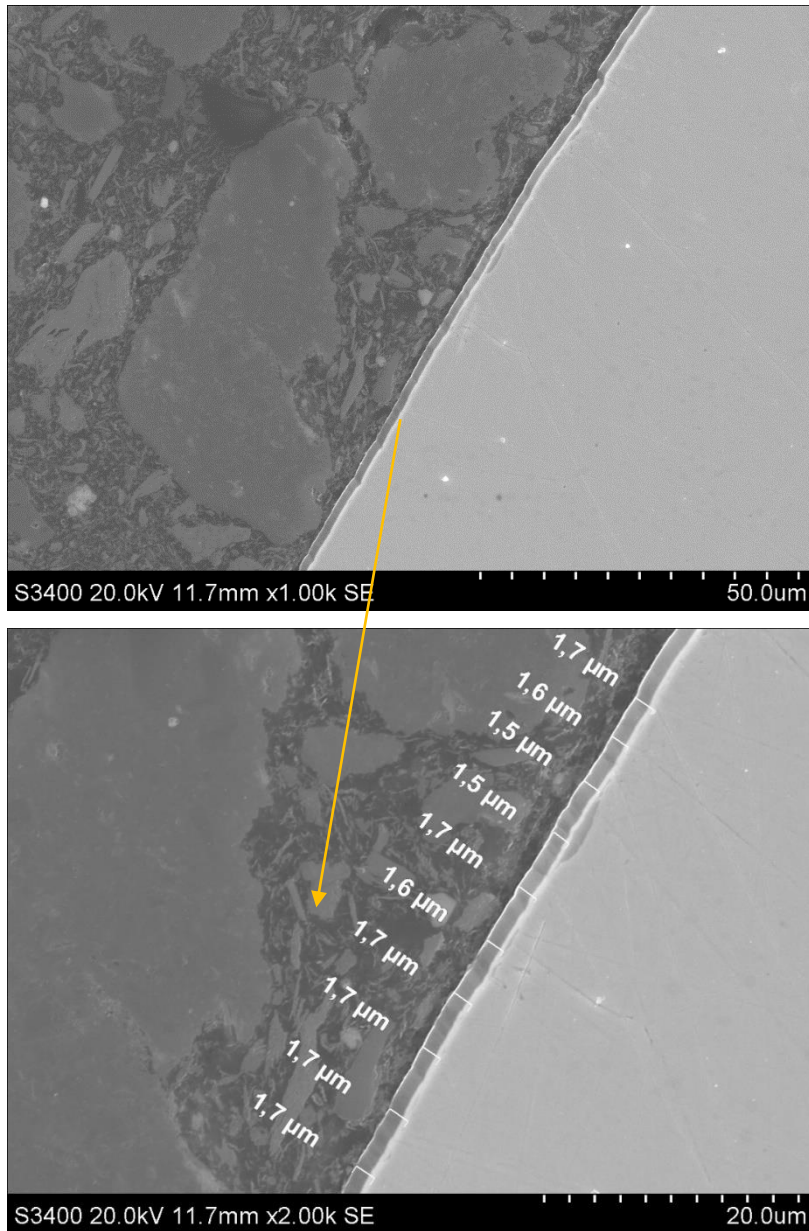
Obserwacje mikroskopowe (SEM) powierzchni sprawdzianu ze stali narzędziowej do pracy na zimno (rys. 5.89.) wykazały, że wytworzona w procesie PACVD powłoka przeciwwyżyciowa DLC charakteryzuje się

jednolitą i ciągłą budową – odwzorowując topografie powierzchni sprawdzianu, bez wyraźnych uszkodzeń o grafitowym odcieniu (rys. 5.89 a,b). Nie występują żadne uszkodzenia mechaniczne powłoki.

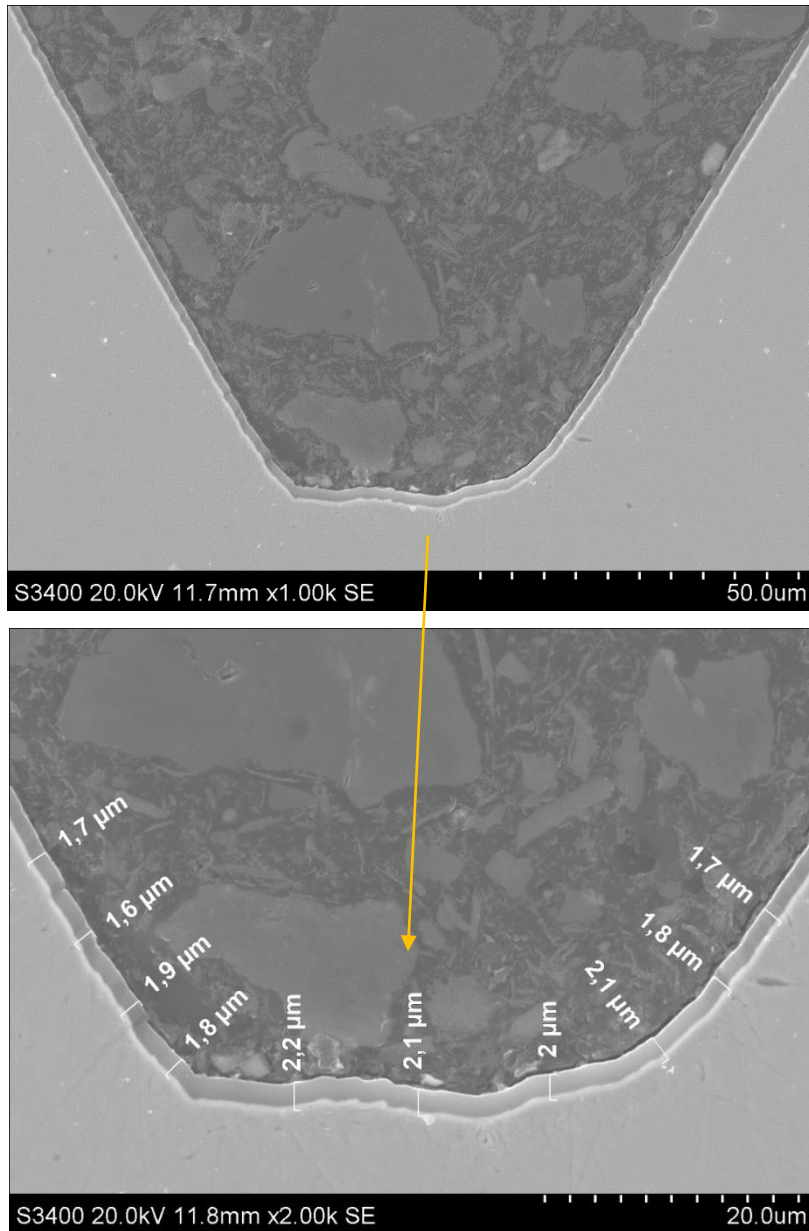
Podczas obserwacji mikroskopowych na przekroju podłużnym strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego ze stali do pracy na zimno prowadzono jednocześnie pomiary grubości powłoki DLC w stanie przed testami eksploatacyjnymi – wyniki pokazano na rys. 5.90. – 5.92. i w tab. 5.106.



Rys. 5.91. Pomiar grubości powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, w obszarze wierzchołka występu – przed testami eksploatacyjnymi



Rys. 5.92. Pomiar grubości powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, w obszarze boku zarysu gwintu – przed testami eksploatacyjnymi



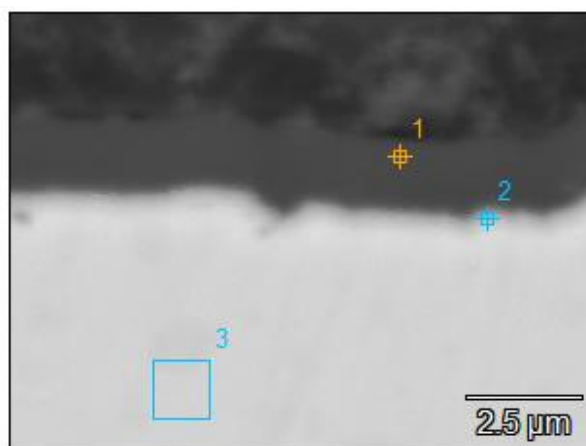
Rys. 5.93. Pomiar grubości powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, w obszarze dna bruzdy gwintu – przed testami eksploatacyjnymi

Tabela 5.106. Grubości powłoki DLC wytworzonej w procesie PACVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1

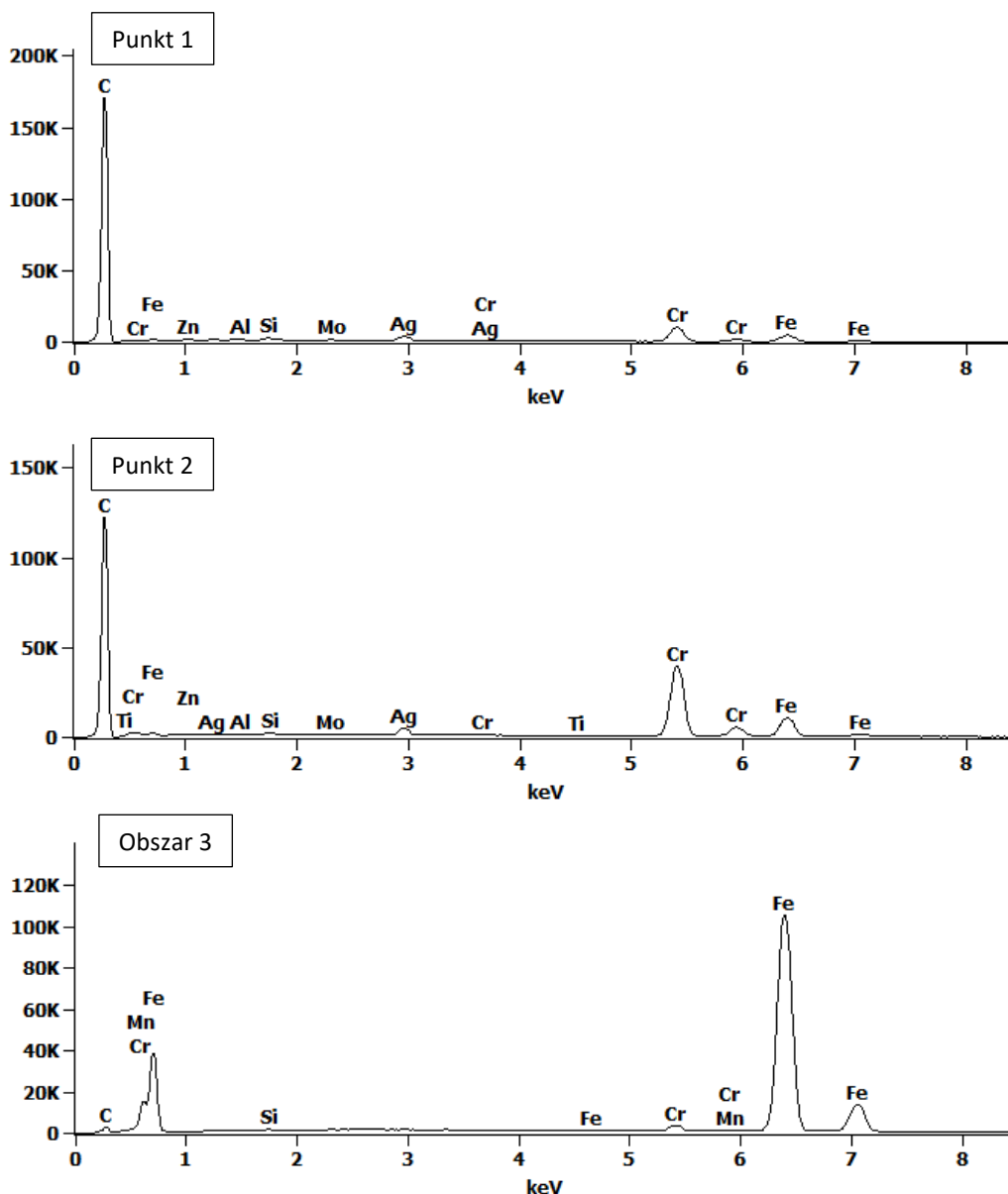
Obszar pomiaru	Numer pomiaru, [μm]										Wartość średnia	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀		
wierzchołek występu	1,8	1,7	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,8	1,8	1,8	0,06
bok zarysu	1,7	1,6	1,5	1,5	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	0,08
dno bruzdy gwintu	1,7	1,6	1,9	1,8	2,2	2,1	2,0	2,1	1,8	1,7	1,9	0,2

W wyniku przeprowadzonych pomiarów grubości powłoki DLC na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego (rys. 5.90. – 5.92. i w tab. 5.106.) stwierdzono że charakteryzuje się ona równomiernym rozkładem grubości w poszczególnych obszarach, tj. na wierzchołku występu, boku zarysu, jak i na dnie bruzdy gwintu, a obliczona średnia grubość w każdym z obszarów ma zbliżoną wartość od 1,6 do 1,9 mikrometra. Na podstawie wykonanych obserwacji mikroskopowych i pomiarów grubości wytworzonej powłoki stwierdzono istotne różnice pomiędzy średnią grubością powłoki zmierzoną na płaskiej próbce wzorcowej i deklarowanej przez producenta (2,0 mikrometra) oraz rzeczywistą zmierzoną grubością powłoki wytworzonej na sprawdzianie gwintowym w zależności od miejsca pomiaru. Stwierdzono niewielkie różnice w średniej zmierzonej grubości powłoki w zależności od miejsca na przekroju sprawdzianu – największą grubość powłoki zmierzono w dnie bruzdy gwintu, gdzie wyniosła ona około 1,9 mikrometra (tab. 5.106.), natomiast najmniejszą grubość zmierzono w obszarze boku zarysu gwintu – gdzie wyniosła ona około 1,6 mikrometra (tab. 5.106.). Można przypuszczać, że te różnice spowodowane są geometrią pokrywanego sprawdzianu. Na powierzchni powłoki nie występują uszkodzenia mechaniczne powłoki oraz zachowana jest jej ciągłość.

Prowadzono analizę składu chemicznego metodą SEM-EDS w strefie przypowierzchniowej na przekroju podłużnym sprawdzianu z powłoką DLC, w celu identyfikacji obszaru występowania powłoki i wykazania różnic w składzie chemicznym powłoki i materiału podłoża. Wyniki analizy składu chemicznego wykonanej w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.93. przedstawiono na rys. 5.94 i w tabeli 5.107. Analizę wykonano w 2 punktach na przekroju powłoki DLC oraz w mikroobszarze materiału podłoża (sprawdzianu).



Rys. 5.94. Przekrój podłużny (SEM) sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 w strefie przypowierzchniowej z wytworzoną powłoką DLC w procesie PACVD z zaznaczonymi punktami i mikroobszarze analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



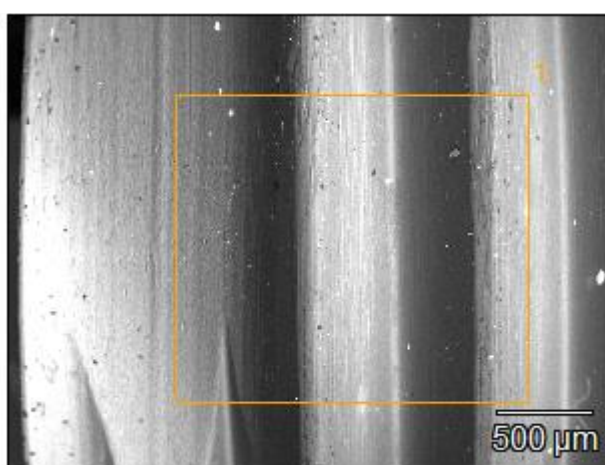
Rys. 5.95. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powłoki i podłoża sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej pokrytego powłoką DLC, na przekroju w mikroobszarze i punktach zaznaczonych na rys. 5.93.

Tabela 5.107. Skład chemiczny powłoki i podłoża sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno, pokrytego powłoką DLC, na przekroju w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.93.

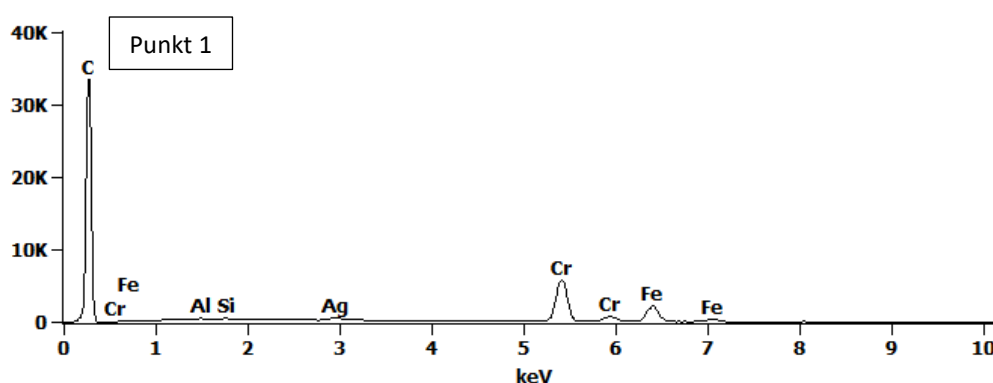
Nazwa pierwiastka	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Zn	Mo	Ag	
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	78.45	0.1	0.4	-	9.6	-	6.3	0.9	0.2	4.1
	pkt. 2	-	0.3	0.9	0.2	62.1	-	26.5	0.8	0.3	9.0
	pkt. 3	-	-	0.3	-	1.2	0.4	95.2	-	-	-
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	94.6	0.1	0.2	-	2.7	-	1.6	0.2	0.0	0.6
	pkt. 2	-	0.7	1.7	0.2	65.7	-	26.1	0.6	0.2	4.6
	pkt. 3	-	0.5	0.5	-	1.2	0.4	85.9	-	-	-

Na podstawie uzyskanych wyników badań własnych z analizy składu chemicznego SEM-EDS oraz w oparciu o analizę porównawczą z danymi literaturowymi potwierdzono oczekiwany skład powłoki DLC (punkt 1,2). Wykazano istotne różnice w składzie chemicznym pomiędzy obszarem powłoki DLC (punkt 1,2) oraz materiałem podłoża (mikroobszar 3). W punkcie pomiarowym nr 1 powłoki DLC stwierdzono dużą zawartość węgla – ok. 78.4% mas., jest to wartość szacunkowa, którą przedstawiono w celu porównawczym pomimo, że w analizie SEM-EDS zazwyczaj nie uwzględnia się zawartości węgla. W obszarach pomiarowych nr 1 i 2 ujawniono również obecność srebra – w ilości od ok. 4.0 do ok. 9.0% mas. i chromu – pochodzącego prawdopodobnie z powłoki lub bardzo cienkiej technologicznej podpowłoki domieszkowanej jonami srebra (rys. 5.93 – 5.94; tabela 5.107.). W punkcie 2 zaobserwowano dużą zawartość chromu – ok. 62.0% mas., w porównaniu z jego niższym stężeniem (ok. 1.2% mas.) w podłożu ze stali narzędziowej (ok. 95.5% mas. Fe).

Wyniki analizy składu chemicznego wykonanego metodą SEM-EDS w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.95. przedstawiono na rys. 5.96 i w tabeli 5.108. Pomiar wykonano na większym fragmencie obszaru powierzchni roboczej sprawdzianu gwintowego przed testami eksploatacyjnymi wykonanego ze stali do pracy na zimno O1 pokrytego powłoką DLC wytworzoną metodą PACVD.



Rys. 5.96. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 z wytworzoną powłoką DLC w procesie PACVD, z zaznaczonym mikroobszarem (SEM-EDS)



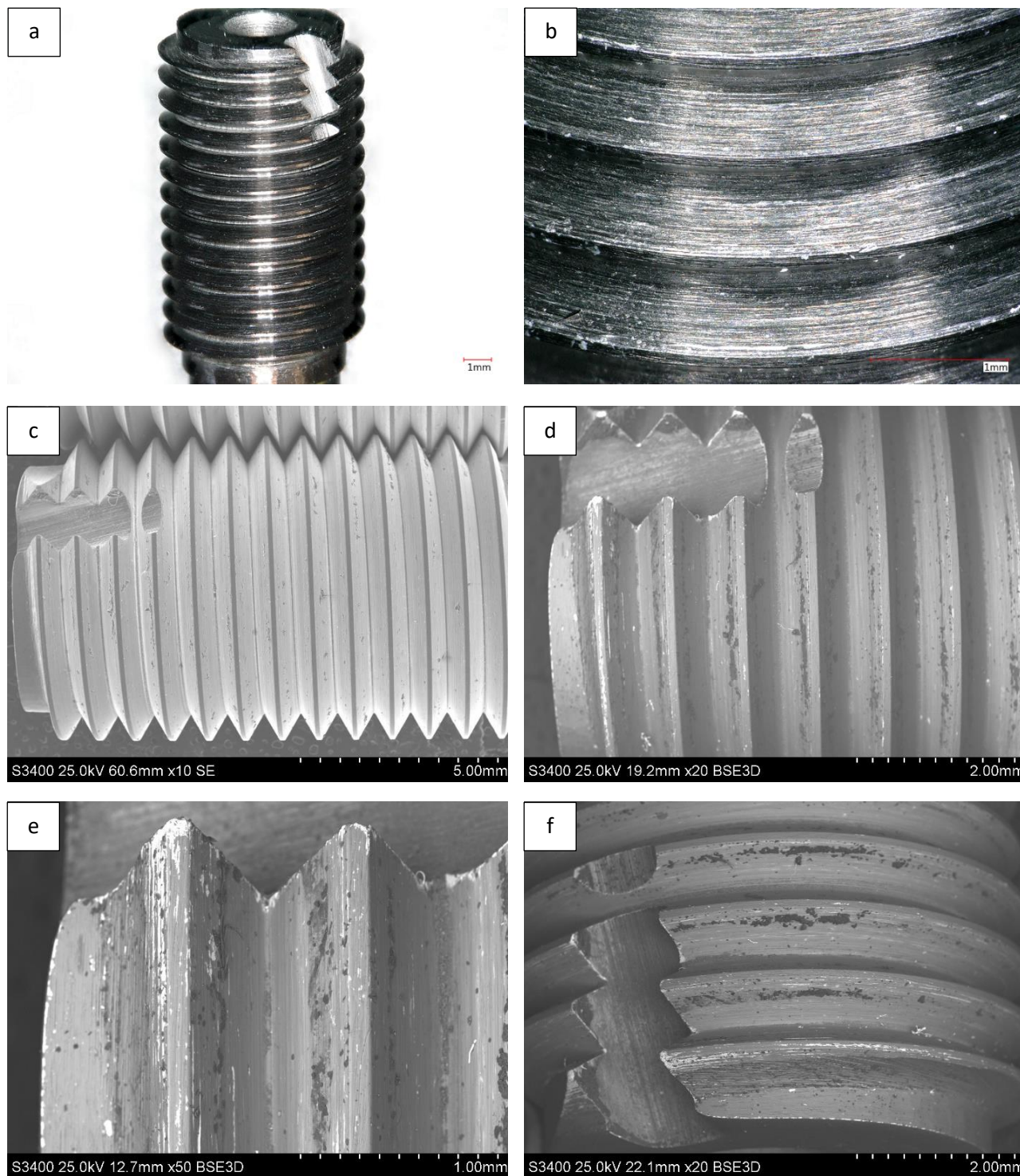
Rys. 5.97. Spektrogram z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 pokrytego powłoką DLC, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.95.

Tabela 5.108. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1, pokrytego powłoką DLC, w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.95.

Nazwa pierwiastka	C	Al	Si	Cr	Fe	Ag
Zawartość pierwiastka % mas.	2.4S	0.4	0.7	57.6	33.9	5.0
Zawartość pierwiastka % at.	10.1S	0.7	1.3	55.3	30.3	2.3

W wyniku analizy SEM-EDS stwierdzono dużą zawartość żelaza pochodzącą od materiału podłoża – stali narzędziowej do pracy na zimno. W mikroobszarze pomiarowym ujawniono obecność srebra – w ilości 5.0% mas. i chromu 57.6% mas. – pochodzących prawdopodobnie z powłoki lub bardzo cienkiej technologicznej podpowłoki domieszkowanej jonami srebra i chromu.

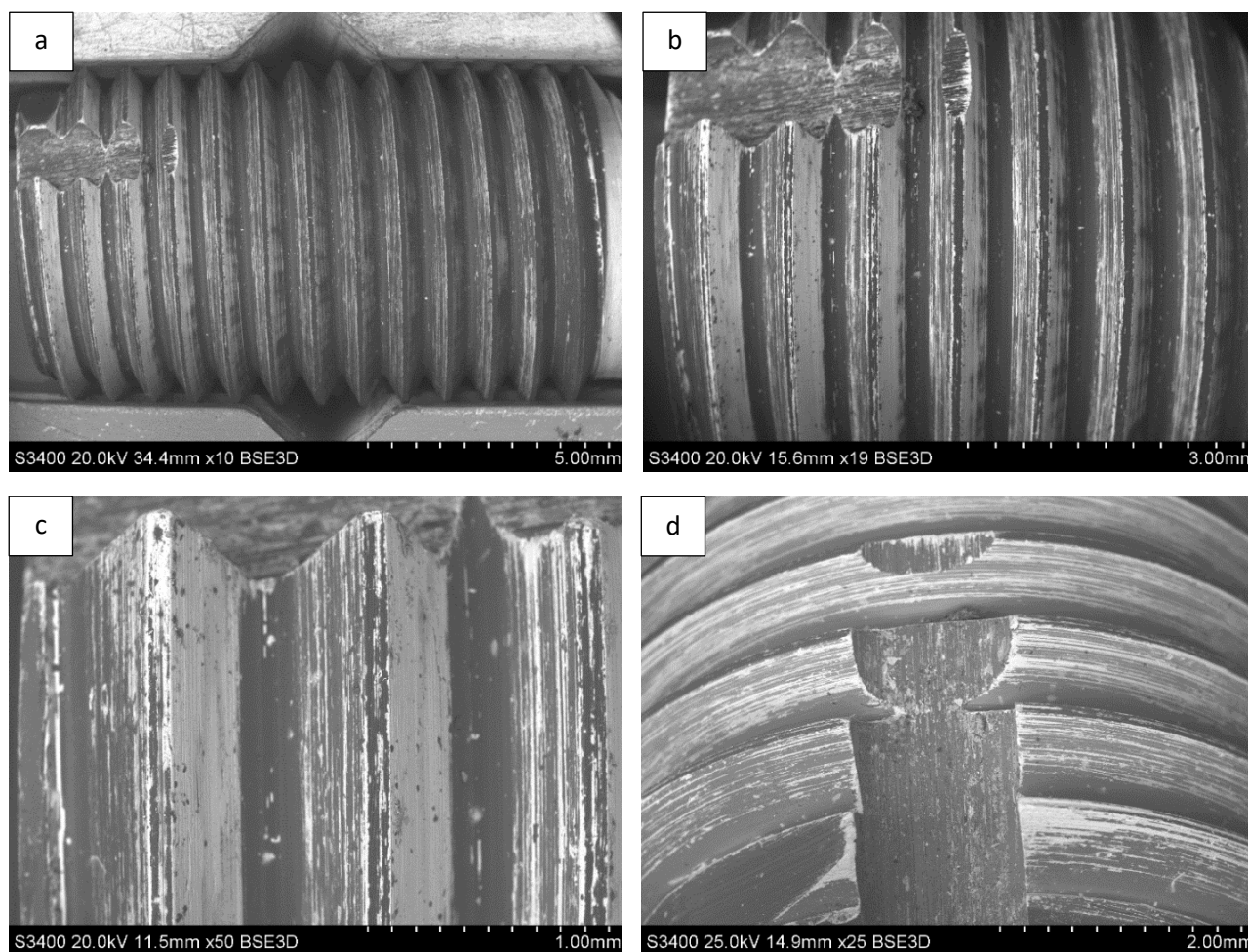
Na rys. 5.97. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.97. a-b) oraz zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.97. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali do pracy na zimno z powłoką DLC po zakończonych testach eksploatacyjnych.



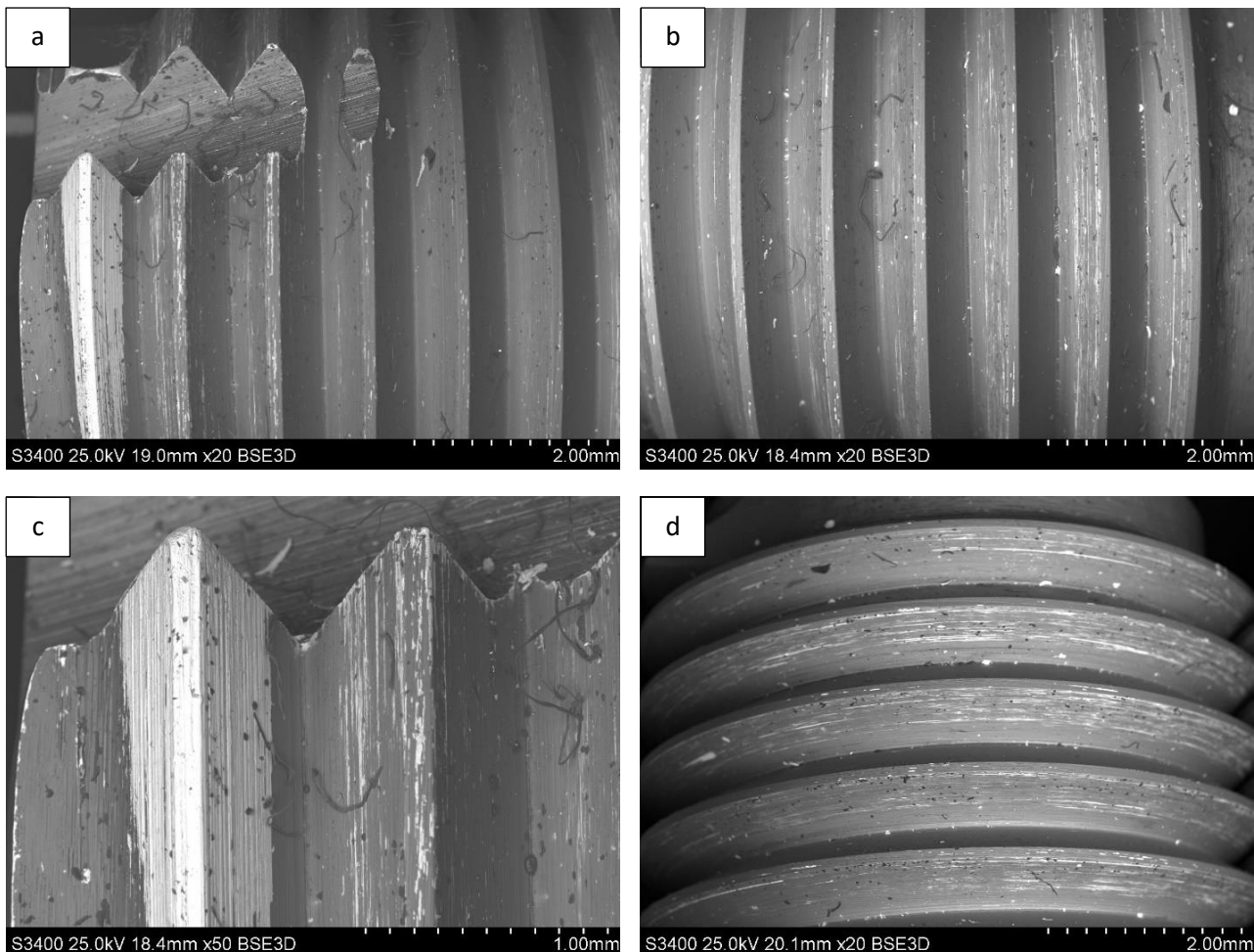
Rys. 5.98. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokrytego powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075

Wyniki obserwacji mikroskopowych (SEM) były podstawą do oceny charakteru uszkodzeń i stopnia degradacji warstwy wierzchniej sprawdzianu z wytworzoną powłoką ochronną DLC – powstałych w trakcie testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075. Zaobserwowano liczne obszary uszkodzeń abrazyjno-erozyjnych powłoki DLC pod postacią liniowo przebiegających wytartych i usuniętych jej fragmentów – prowadzących do odsłonięcia materiału podłoża. Szczególnie intensywne zjawisko tego zużycia zostało zaobserwowane na powierzchniach bocznych zębów gwintu (rys. 5.97).

W celu porównania stopnia degradacji powłoki DLC na sprawdzianach użytych w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V i stali 15-5PH przeprowadzono obserwacje przy użyciu mikroskopu skaningowego (rys. 5.98. i rys. 5.99.).



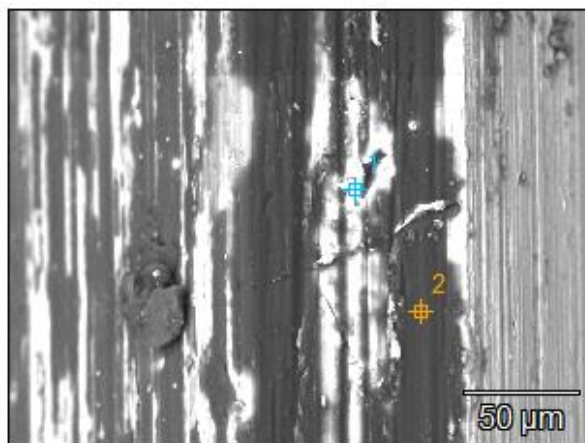
Rys. 5.99. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokrytego powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V



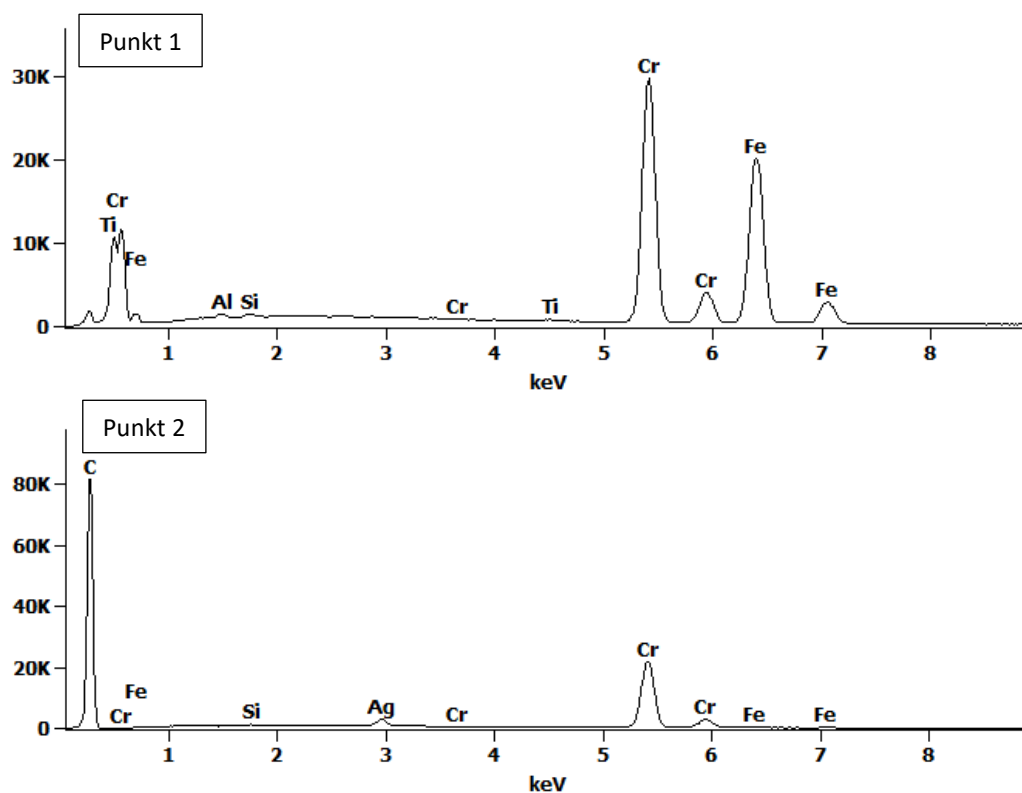
Rys. 5.100. Stan powierzchni strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno pokrytego powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD – po zakończonych testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stali 15-5 PH

W wyniku porównania charakteru uszkodzeń powłoki DLC sprawdzianów użytych w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075, tytanu Ti-6Al-4V i stali 15-5PH. We wszystkich przypadkach stwierdzono obszary uszkodzeń abrazyjno-erozyjnych powłoki DLC w postaci liniowego wytarcia i usunięcia powłoki z odsłonięciem materiału podłoża. W wyniku obserwacji stwierdzono, że największy stopień zużycia zaobserwowano dla powłoki DLC wytworzonej na sprawdzianie ze stali narzędziowej do pracy na zimno zastosowanym do testów przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. Występowały również istotne różnice w stopniu zużycia powłok DLC w zależności od rodzaju oddziałującego na jej powierzchnię materiału kolektora użytego w charakterze przeciwpółki – wykonanego ze stopu aluminium 7075, tytanu Ti-6Al-4V i stali 15-5PH. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na stwierdzony stopień zużycia powłok były różnice w konstrukcji poszczególnych kolektorów w postaci różnej ilości otworów gwintowanych i ich głębokości.

Przeprowadzono analizę składu chemicznego metodą SEM-EDS powierzchni sprawdzianu użytego w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075 i wyniki zostały przedstawione na rys. 5.101. i w tabeli 5.109. Analizę wykonano w 2 punktach na powierzchni sprawdzianu wykonanego z stali narzędziowej do pracy na zimno pokrytego powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD, punkt pomiarowy 1 znajdował się w obszarze uszkodzenia powłoki i odsłonięcia materiału podłoża, a punkt 2 w obszarze zachowanej ciągłości powłoki DLC.



Rys. 5.101. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego ze stali narzędziowej do pracy na zimno O1 z powłoką DLC wytworzoną w procesie PACVD w obszarze wierzchołka z zaznaczonymi punktami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)



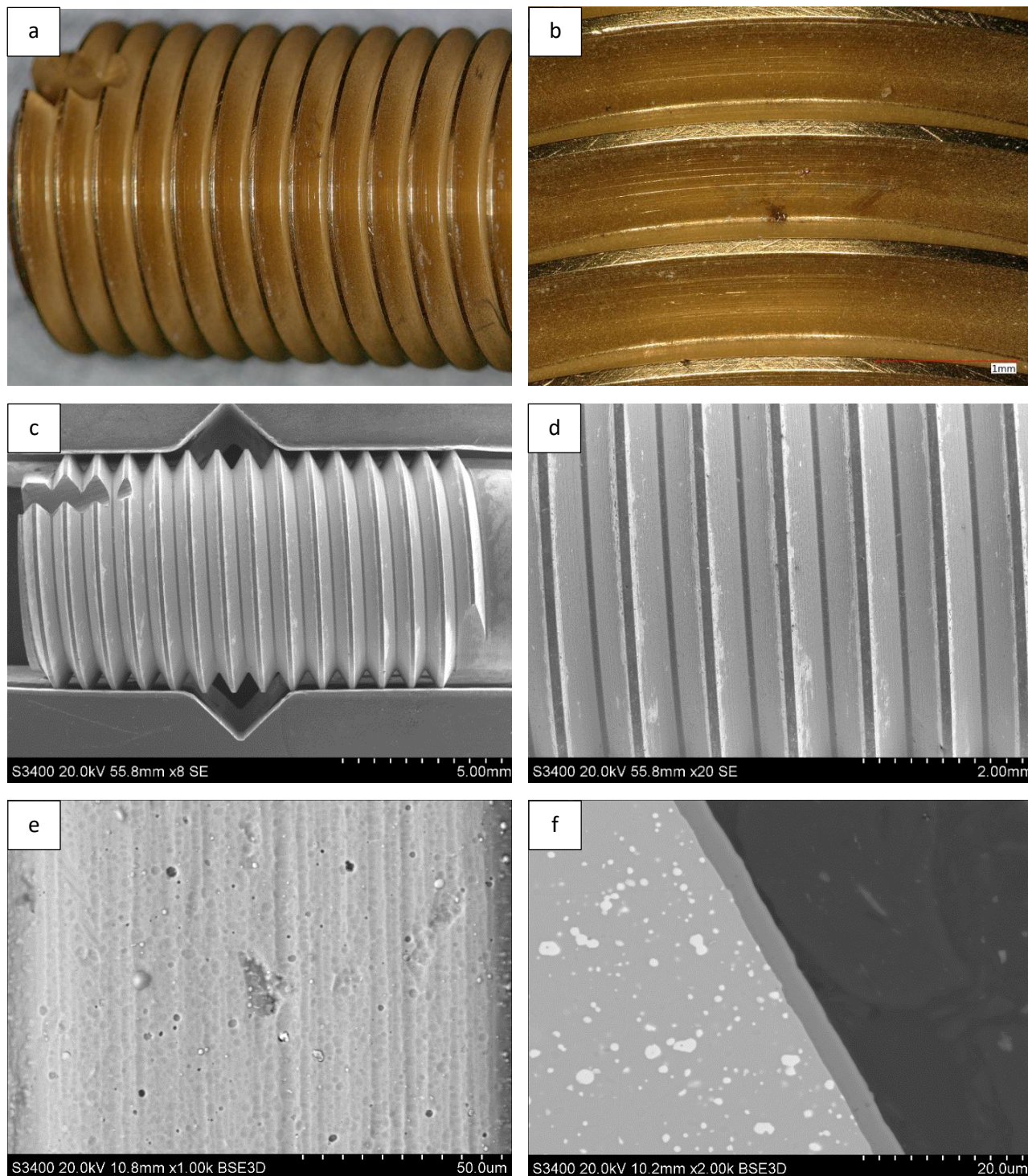
Rys. 5.102. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej O1 pokrytego powłoką DLC, w punktach zaznaczonych na rys. 5.100.

Tabela 5.109. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali narzędziowej do pracy na zimno, pokrytego powłoką DLC, w mikroobszarze zaznaczonym na rysunku 5.100.

Nazwa pierwiastka		Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ag
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	0.3	0.2	0.2	46.3	52.9	-
	pkt. 2	-	0.2	-	86.7	2.0	10.9
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	0.6	0.4	0.2	47.9	50.9	-
	pkt. 2	-	0.3	-	91.7	2.0	5.6

W punkcie pomiarowym nr 1 zaobserwowano dużą zawartość żelaza – ok. 52.9% mas. pochodzącego od materiału podłoża (stali narzędziowej do pracy na zimno) i chromu – ok. 46.3% mas. pochodzącego zarówno z materiału podłoża jak i technologicznej podpowłoki chromowej. W punkcie 2 ujawniono dużą zawartość chromu – ok. 86.7% mas. jak również stwierdzono obecność srebra – ok. 10.9% mas. – zawartość tych pierwiastków nie jest charakterystyczna dla ich zawartości w materiale podłoża. W oparciu o wyniki analizy składu chemicznego i dane literaturowe stwierdzono, że wykryta wysoka zawartość chromu (punkt 1 i 2) wraz z obecnością i wysoką zawartością srebra (punkt 2) świadczy o domieszkowaniu przez wytwórcę powłoki DLC jonami srebra oraz zastosowaniu podpowłoki chromowej aktywującej (zwiększającej przyczepność) właściwej powłoki DLC do podłoża [84, 111]

Na rys. 5.102. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.102. a-b) oraz zdjęcia powierzchni i przekroju podłużnego wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.102. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali szybko tnącej z powłoką TiN w stanie po nałożeniu powłoki (przed testami eksploatacyjnymi).



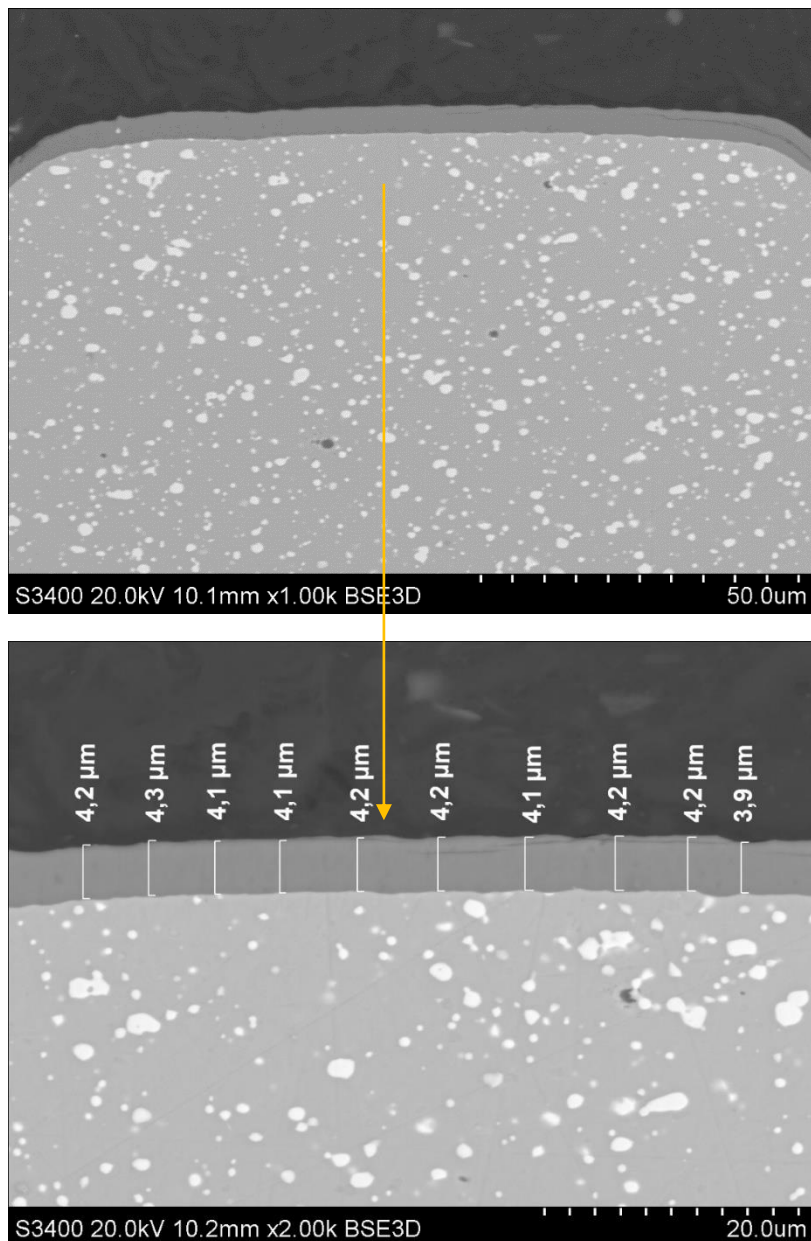
Rys. 5.103. Stan powierzchni a-d) i przekrój podłużny e-f) strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 pokrytego powłoką TiN wytworzoną w procesie Arc-PVD – przed testami eksploatacyjnymi

Obserwacje mikroskopowe powierzchni i przekroju sprawdzianu z powłoką TiN (rys. 5.102), wykazują że powłoka przeciwzuzyciowa charakteryzuje się jednolitą i ciągłą budową o złotej barwie bez defektów w postaci złuszczeń, pęknięć, odwarstwień od podłoża i pęcherzy. Powłoka dobrze pokrywa materiał podłoża,

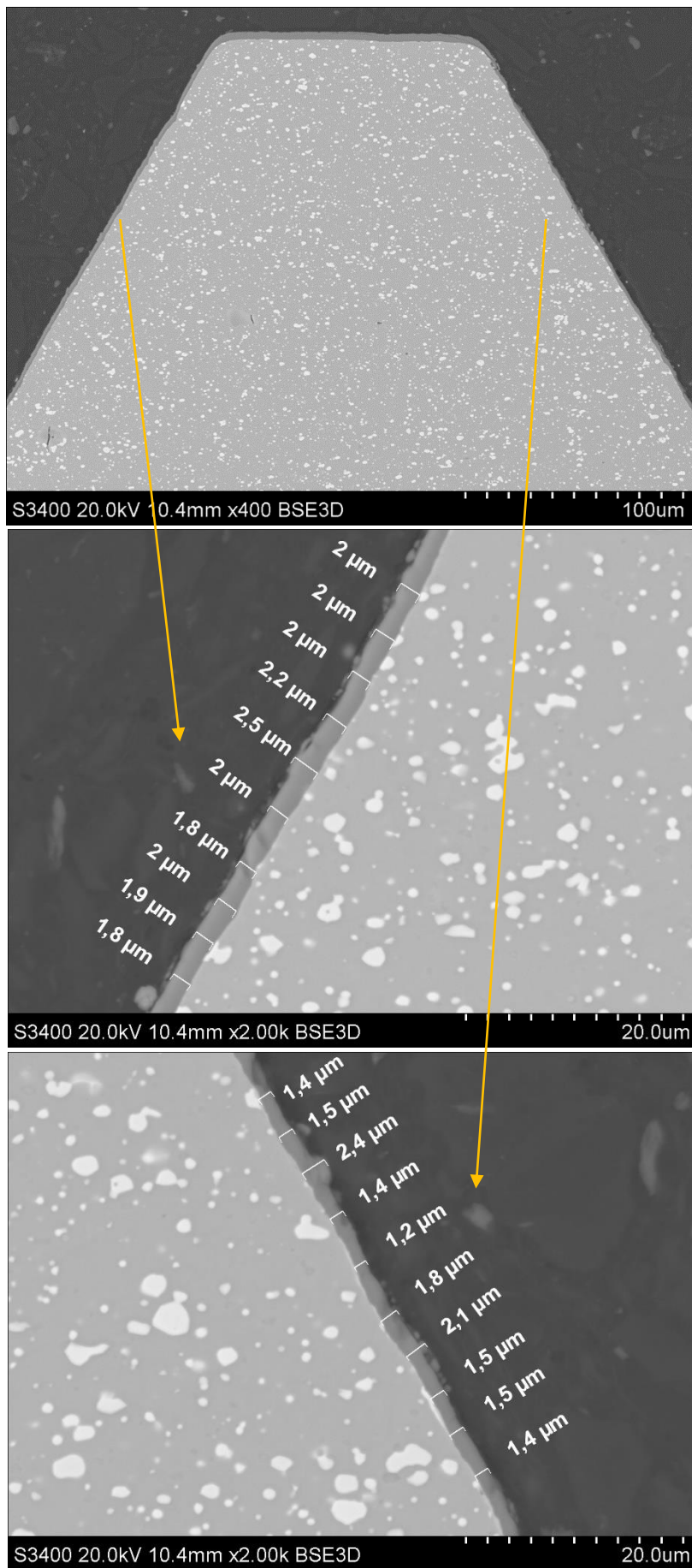
wypełniając mikronierówności na jego powierzchni. Na powierzchni powłoki nie występują uszkodzenia mechaniczne powłoki oraz zachowana jest jej ciągłość.

Analiza morfologii powierzchni próbek z badaną powłoką TiN , wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, wykazała obecność jednorodnej, bardzo drobnej struktury, z niewielką ilością fazy kropelkowej oraz mikrokraterów będących pozostałością po tej fazie (rys. 5.102. e) – utworzonych w wyniku technologicznego procesu jej usuwania opracowanej przez Oerlikon Balzers Coating Poland Sp. z o.o. Faza kropelkowa tworzy się podczas procesu wytwarzania powłoki i jej występowanie jest charakterystycznym zjawiskiem dla metody Arc-PVD – odparowania łukiem elektrycznym. Dane literaturowe wskazują, że wielkość kropli i kraterów wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu mikrometrów [112].

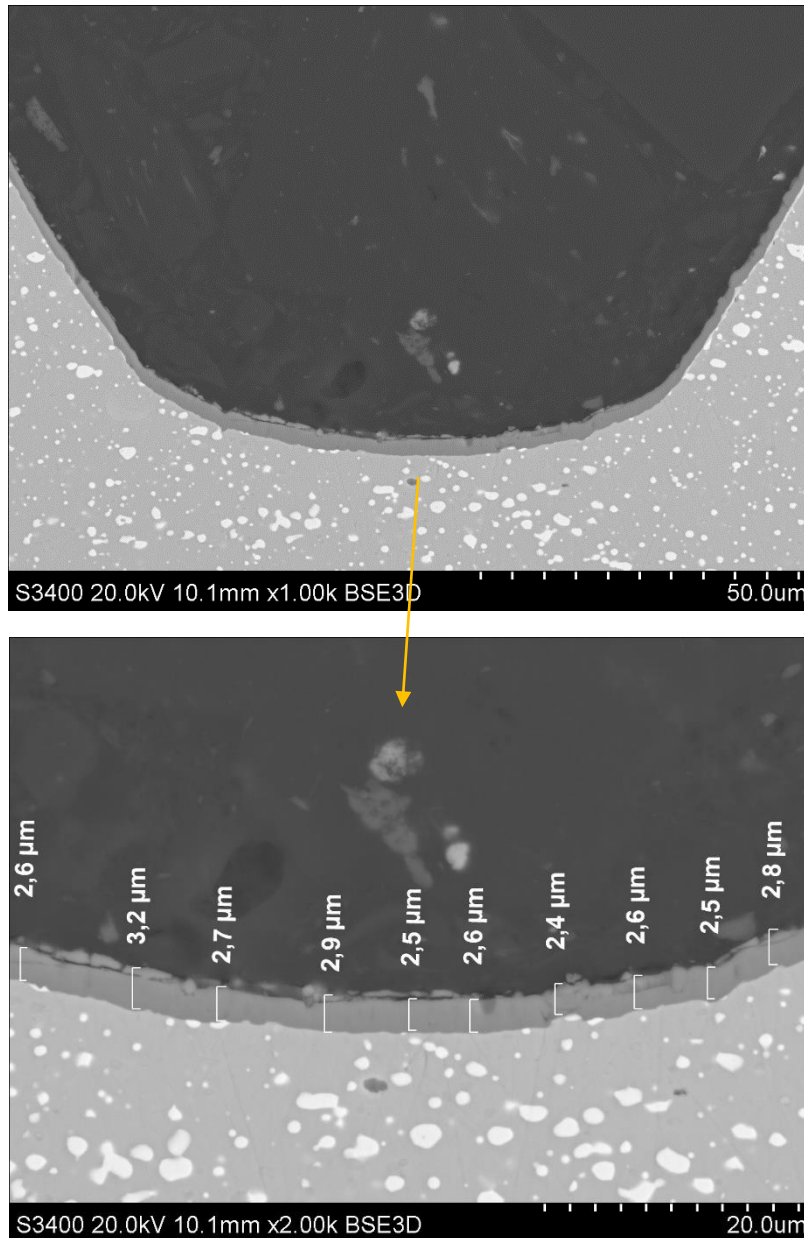
Przeprowadzono analizę grubości powłoki TiN na przekroju podłużnym strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu wyniki przedstawiono na rys. 5.103. – 5.105. i w tabeli 5.111. Zaobserwowano nierównomierność powłoki, w zależności od strony zrebu gwintu, w związku z tym przeprowadzono oddzielny pomiar prawej i lewej strony zrebu gwintu.



Rys. 5.104. Pomiar grubości powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkołnącej M-1 w obszarze wierzchołka występu gwintu – przed testami eksploatacyjnymi



Rys. 5.105. Pomiar grubości powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkołznej M-1, w obszarze boku zarysu – przed testami eksploatacyjnymi



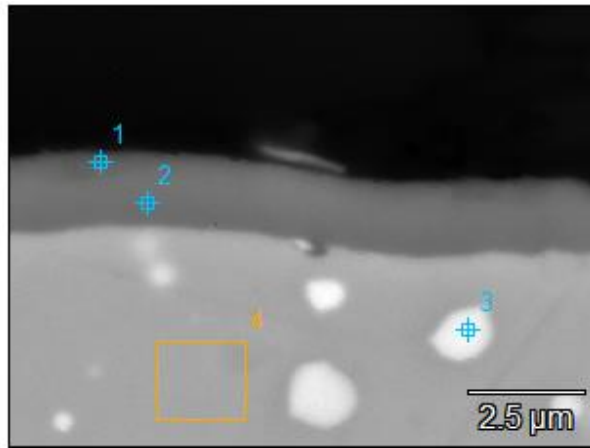
Rys. 5.106. Pomiar grubości powłoki DLC wytworzonej w procesie w procesie Arc-PVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkołnącej M-1, w obszarze dna bruzdy gwintu – przed testami eksploatacyjnymi

Tabela 5.110. Grubości powłoki TiN wytworzonej w procesie Arc-PVD na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1

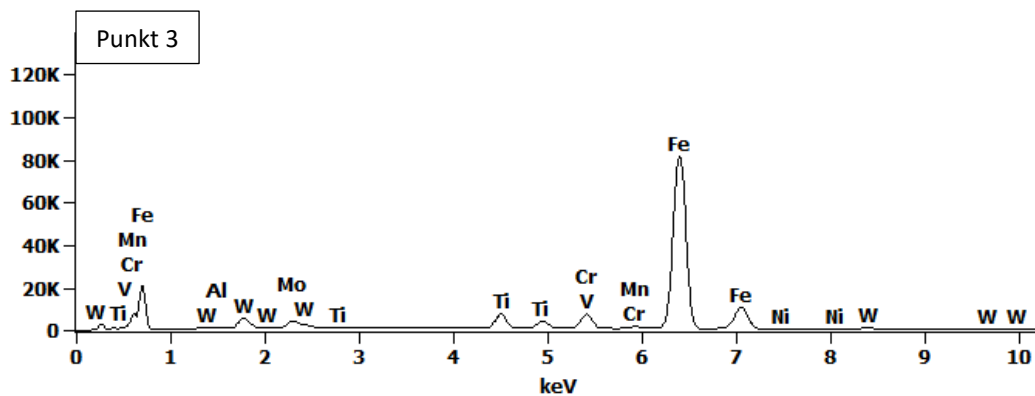
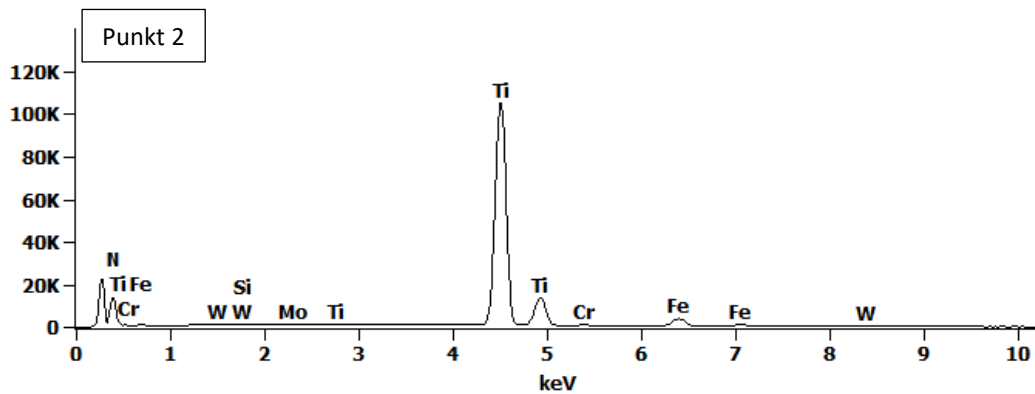
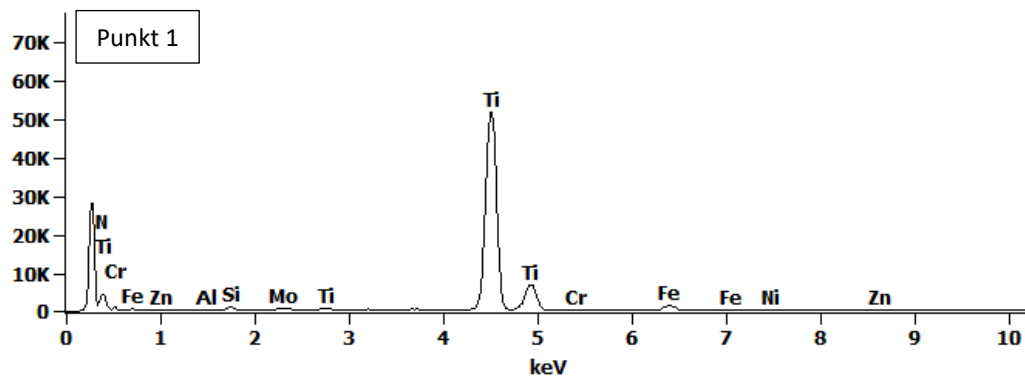
Obszar pomiaru	Numer pomiaru, [μm]										Wartość średnia	Odchylenie standardowe
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀		
wierzchołek występu	4,2	4,3	4,1	4,1	4,2	4,2	4,1	4,2	4,2	3,9	4,15	0,11
bok zarysu lewy	2,0	2,0	2,0	2,2	2,5	2,0	1,8	2,0	1,9	1,8	2,02	0,20
bok zarysu prawy	1,4	1,5	2,4	1,4	1,2	1,8	2,1	1,5	1,5	1,4	1,62	0,37
dno bruzdy gwintu	2,6	3,2	2,7	2,9	2,5	2,6	2,4	2,6	2,5	2,8	2,68	0,23

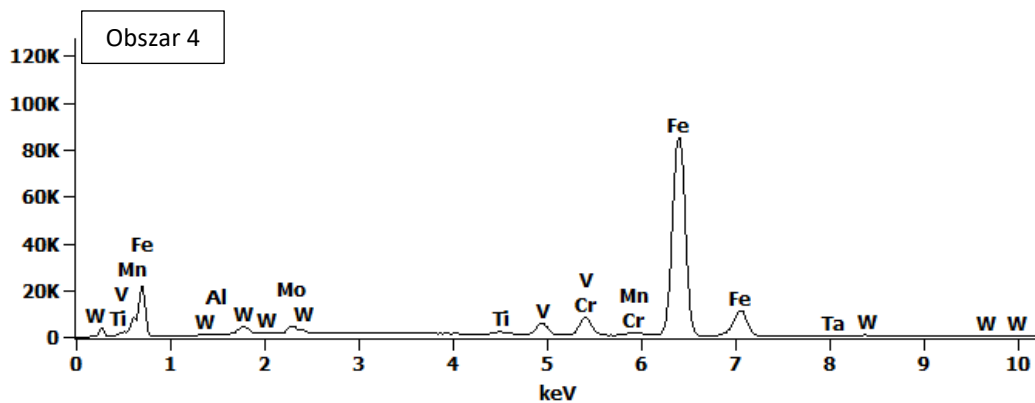
W wyniku przeprowadzonych pomiarów grubości powłoki TiN na przekroju podłużnym sprawdzianu gwintowego (rys. 5.103. – 5.105., tab. 5.110.) stwierdzono że charakteryzuje się ona równomiernym rozkładem grubości na wierzchołku występu i na dnie bruzdy gwintu. Na podstawie wykonanych obserwacji mikroskopowych i pomiarów grubości wytworzonej powłoki stwierdzono istotne różnice pomiędzy średnią grubością powłoki zmierzoną na płaskiej próbce wzorcowej i deklarowanej przez producenta (2,5 mikrometra) oraz rzeczywistą zmierzoną grubością powłoki wytworzonej na sprawdzianie gwintowym w zależności od miejsca pomiaru. Wykazano, że średnia zmierzona grubość powłoki znacznie różniła się w zależności od miejsca na przekroju sprawdzianu, największą grubość powłoki zmierzono na wierzchołku występu gwintu, gdzie wyniosła ona około 4,15 mikrometra, natomiast najmniejszą grubość zmierzono w obszarze boku zarysu gwintu – gdzie wyniosła ona około 1,62 mikrometra (tab. 5.110.). Zaobserwowano dodatkowo różnice w grubości powłoki pomiędzy poszczególnymi stronami boków zarysu gwintu bokami, średnia zmierzona grubość powłoki po lewej stronie boku zarysu gwintu wynosi 2,02 mikrometra a po stronie prawej 1,62 mikrometra. Stwierdzono, że stwierdzone znaczne różnice w grubości powłoki w poszczególnych obszarach sprawdzianu mogą wpływać na stopień zużycia sprawdzianu w trakcie testów eksploatacyjnych. Można przypuszczać, że te różnice spowodowane są geometrią pokrywanego sprawdzianu i specyfiką procesu nakładania powłoki – Arc-PVD. Na powierzchni powłoki nie występują uszkodzenia mechaniczne powłoki oraz zachowana jest jej ciągłość.

Prowadzono analizę składu chemicznego metodą EDS w strefie przypowierzchniowej sprawdzianu ze stali szybko tnącej z pokrytego powłoką TiN wytworzoną w procesie Arc-PVD w celu określenia różnic składu chemicznego powłoki i materiału podłoża na przekroju. Wyniki analizy składu chemicznego wykonanej w mikroobszarze i punktach zaznaczonych na rys. 5.106. przedstawiono na rys. 5.107 i w tabeli 5.111. Analizę wykonano w dwóch punktach na przekroju powłoki TiN oraz w jednym punkcie i jednym mikroobszarze materiału podłoża (sprawdzianu).



Rys. 5.107. Przekrój podłużny sprawdzianu wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 z wytworzoną powłoką TiN w procesie Arc-PVD z zaznaczonymi punktami i mikroobszarem analizy składu chemicznego (SEM-EDS)





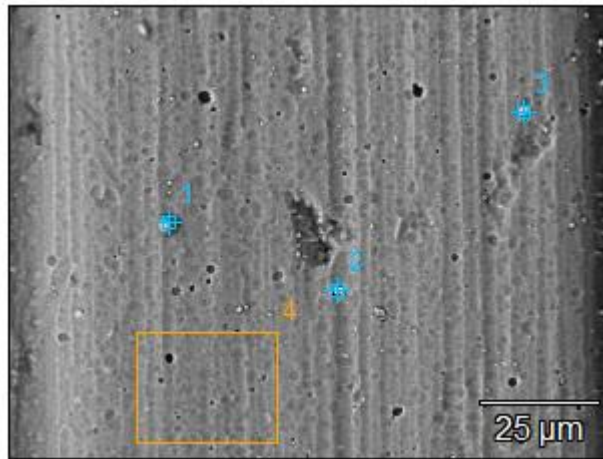
Rys. 5.108. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1 pokrytego powłoką TiN, na przekroju w punktach i mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.106.

Tabela 5.111. Skład chemiczny (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkoobrotowej M-1, pokrytego powłoką TiN, na przekroju w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.106.

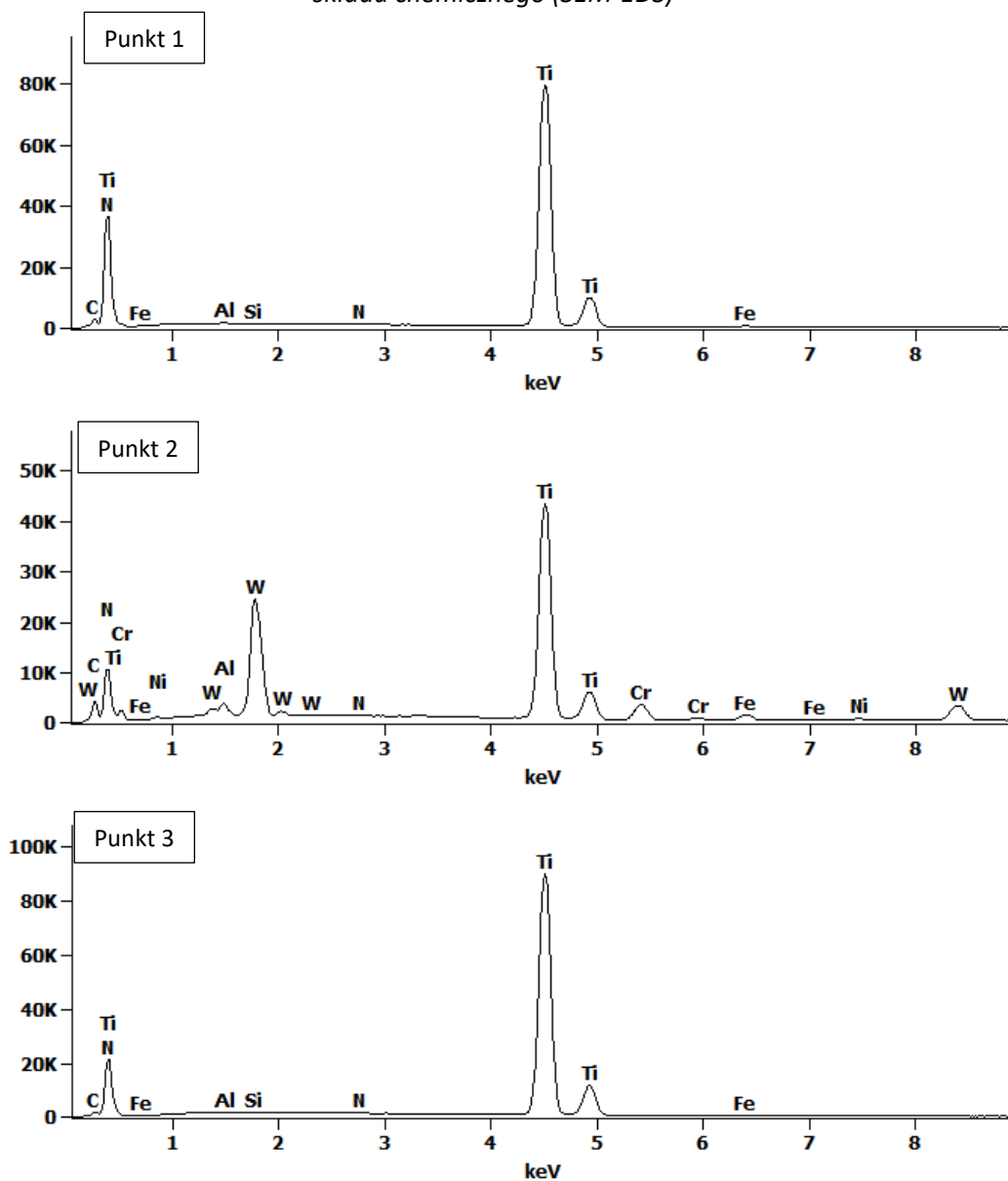
Nazwa pierwiastka	N	Al	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Zn	Mo	W	
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	21.4S	0.1	0.4	73.1	-	0.2	-	3.6	0.5	0.5	-
	pkt. 2	21.4S	-	0.2	72.4	-	0.3	-	5.3	-	0.4	0.4
	pkt. 3	-	0.2	-	3.5	1.6	3.8	0.4	83.2	-	3.2	3.9
	Obszar 4	-	0.1	-	0.6	2.9	4.0	0.4	85.4	-	3.0	2.9
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	48.4	0.1	0.4	48.4	-	0.1	-	2.1	0.2	0.2	-
	pkt. 2	48.2	-	0.2	48.2	-	0.2	-	3.0	-	0.1	0.1
	pkt. 3	-	0.4	-	4.2	1.8	4.3	0.5	85.6	-	1.9	1.2
	Obszar 4	-	0.3	-	0.8	3.3	4.5	0.4	87.9	-	1.8	0.9

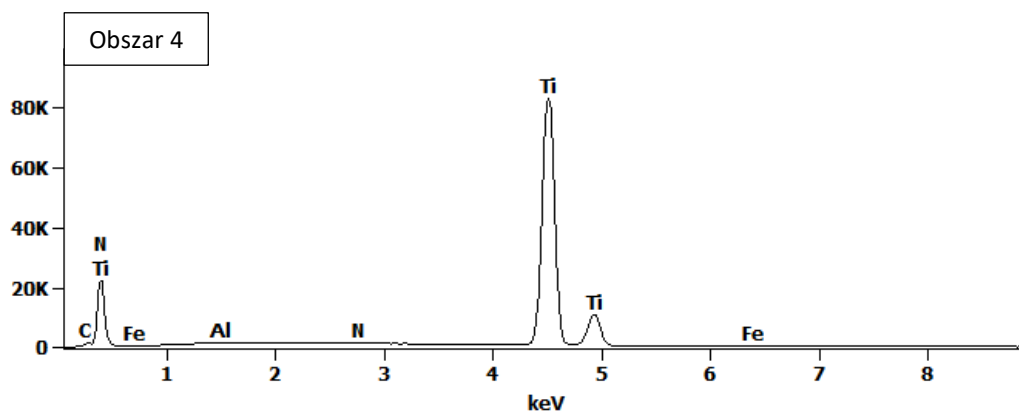
Na podstawie wyników prowadzonych analiz potwierdzono oczekiwany skład powłoki TiN w punkcie 1,2 (stosunek tytanu do azotu zbliżony do stechiometrycznego 1:1) – zgodny z danymi literaturowymi (**TiN hard coating as a candidate reference material for Surface metrology in chemistry**) i porównano ze składem chemicznym materiału (punkt 3,4). Stwierdzono istotne różnice w składzie chemicznym pomiędzy obszarem powłoki TiN oraz materiałem podłoża. W punkcie nr 1 i 2 powłoki TiN stwierdzono bardzo dużą zawartość azotu 21,4% mas. (48,2–48,4% at.) i tytanu 72,4–73,1% mas. (72,4–73,1% at.).

W celu dokładniejszej analizy powłoki z azotku tytanu przeprowadzono analizę składu chemicznego SEM-EDS na powierzchni sprawdzianu w obszarze mikrokropel – punkty 1-3, a także na większym fragmencie obszaru powierzchni – obszar nr 4 (rys. 5.108.), wyniki przedstawiono na rys. 5.109. i w tabeli 5.112.



Rys. 5.109. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybkoobrotowej w strefie przypowierzchniowej z wytworzoną powłoką TiN w procesie Arc-PVD z zaznaczonymi punktami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)





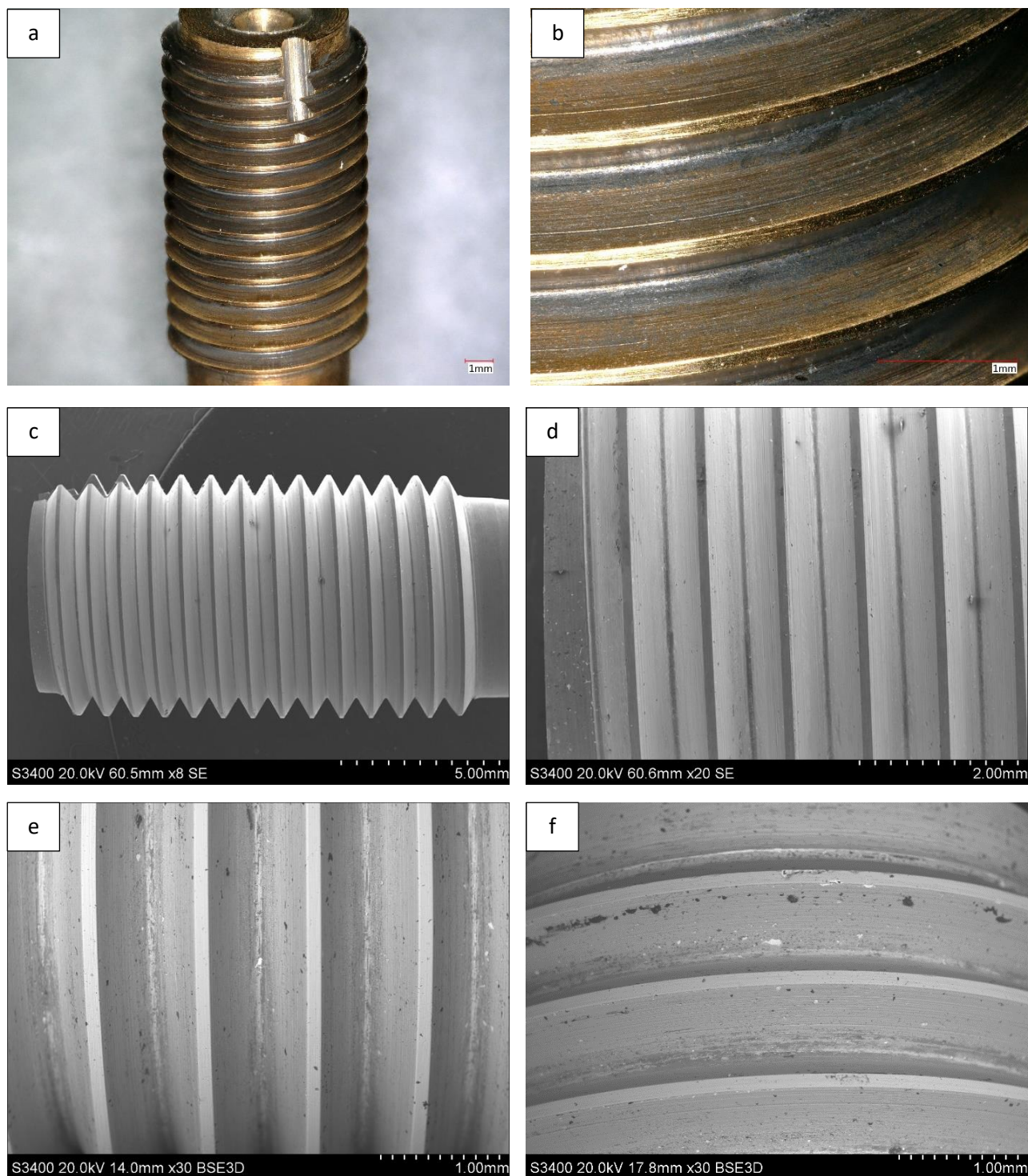
Rys. 5.110. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 pokrytego powłoką TiN, w mikroobszarze zaznaczonym na rys. 5.108.

Tabela 5.112. Skład chemiczny (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej, pokrytego powłoką TiN, w mikroobszarze i punktach zaznaczonych na rys. 5.108.

Nazwa pierwiastka	N	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	W
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	24.9S	0.2	0.1	74.3	-	0.6	-
	pkt. 2	12.9S	1.1	-	45.3	4.7	2.0	33.0
	pkt. 3	15.4S	0.2	0.1	83.8	-	0.5	-
	pkt. 4	17.2S	0.2	-	82.1	-	0.6	-
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	53.1	0.2	0.1	46.3	-	0.3	-
	pkt. 2	41.3	1.8	-	42.4	4.1	1.6	8.0
	pkt. 3	38.4	0.2	0.1	60.9	-	0.3	-
	obsz. 4	41.5	0.2	-	58.0	-	0.3	-

Na podstawie analiz wykonanych w punktach 1-3, stwierdzono zwiększoną zawartość tytanu 74.3 – 83.8% mas. i azotu 12.9 – 24.9% mas. pochodzących od powłoki TiN, jednocześnie w punkcie 2 zwiększoną zawartość wolframu 33% mas. prawdopodobnie od fazy węglkowej, na której zarodkowała faza kropelkowa TiN. W obszarze 4 potwierdzono typowy skład chemiczny powłoki TiN (azot 17,2% mas., 41,5% at. i tytanu 82.1% mas., 58.0% at.) [113].

Na rys. 5.110. a-f przedstawiono zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem świetlnym (rys. 5.110. a-b) oraz zdjęcia powierzchni wykonane mikroskopem skaningowym (rys. 5.110. c-f). Obserwacji mikroskopowej został poddany sprawdzian gwintowy ze stali szybko tnącej z powłoką TiN po zakończonych testach eksploatacyjnych.



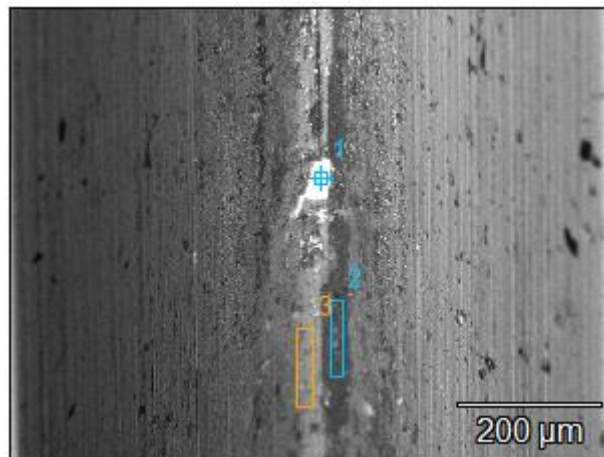
Rys. 5.111. Stan powierzchni a-d) i przekrój e-f) strony PRZECHODNIEJ sprawdzianu gwintowego .250-28 UNF-3B STI wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 pokrytego powłoką TiN wytworzoną w procesie Arc-PVD – po testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektora hydraulicznego wykonanego z aluminium 7075

Obserwacje mikroskopowe (SEM) wykazały niewielkie eksploatacyjne uszkodzenia warstwy wierzchniej sprawdzianu na dnie gwintu i na powierzchniach bocznych zębów gwintu w postaci obszarów uszkodzeń abrazyjno-erozyjnych powłoki TiN – przerwanie jej ciągłości i odsłonięcie materiału podłoża. Dodatkowo

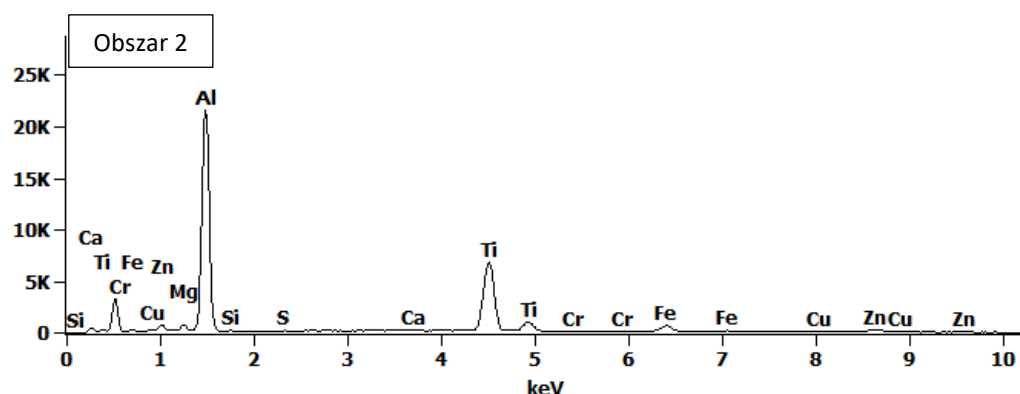
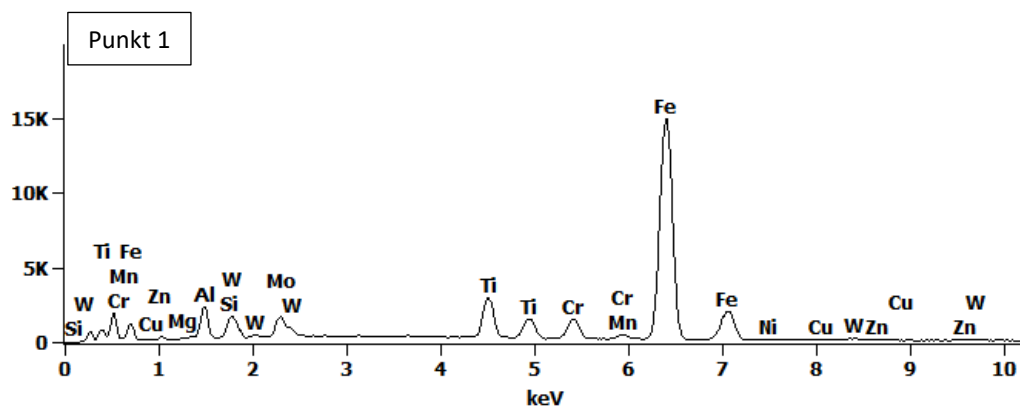
widoczne są zanieczyszczenia widoczne na powierzchni sprawdzianu w postaci ciemnych obszarów pochodzące prawdopodobnie z materiału przeciwpróbki.

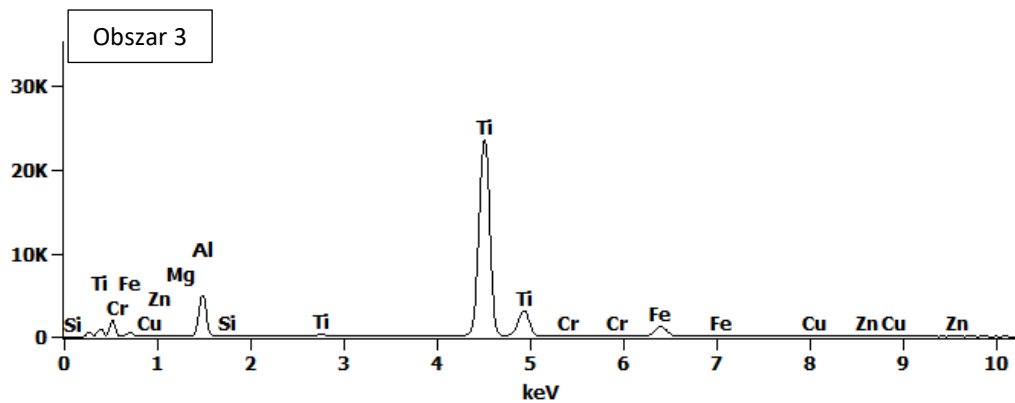
Przeprowadzono analizę składu chemicznego metodą SEM-EDS powierzchni sprawdzianu użytego w testach eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium 7075 i wyniki zostały przedstawione na rys. 5.112. i w tabeli 5.113.

Analizę wykonano w 2 mikroobszarach i jednym punkcie na powierzchni sprawdzianu wykonanego z stali szybko tnącej pokrytego powłoką TiN wytworzoną w procesie Arc-PVD. Punkt pomiarowy 1 znajdował się w obszarze uszkodzenia powłoki i odstonięcia materiału podłoża, a mikroobszar 2 w obszarze czarnych przebarwień pochodzących prawdopodobnie z naniesionego materiału przeciwpróbki (stop aluminium 7075), mikroobszar 3 w obszarze zachowanej ciągłości powłoki TiN.



Rys. 5.112. Powierzchnia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 z wytworzoną powłoką TiN w procesie Arc-PVD z zaznaczonymi mikroobszarami i punktami analizy składu chemicznego (SEM-EDS)





Rys. 5.113. Spektrogramy z analizy składu chemicznego (SEM-EDS) materiału sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej M-1 pokrytego powłoką TiN, w mikroobszarach i punktach zaznaczonych na rys. 5.111.

Tabela 5.113. Skład chemiczny (SEM-EDS) powierzchni sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali szybko tnącej, pokrytego powłoką TiN, w mikroobszarach i punktach zaznaczonych na rys. 5.111.

Nazwa pierwiastka	N	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Mo	W	
Zawartość pierwiastka % mas.	pkt. 1	2.0S	0.1	3.1	7.0	4.0	0.4	73.1	0.1	4.2	5.2
	pkt. 2	10.2S	1.8	40.8	35.0	0.2	-	5.7	1.2	-	-
	pkt. 3	19.4S	0.1	6.1	66.4	-	-	7.2	0.2	-	-
Zawartość pierwiastka % at.	Pkt. 1	7.6	0.2	5.9	7.6	4.0	0.3	68.5	0.1	2.3	1.5
	pkt. 2	22.4	2.2	46.5	22.4	0.1	-	3.1	0.6	-	-
	pkt. 3	44.0	0.2	7.2	44.0	-	-	4.1	0.1	-	-

W punkcie 1 zaobserwowano dużą zawartość żelaza – ok. 73.1% mas., molibdenu – ok. 4.2% mas., chromu – ok. 4.0% mas, które są typowymi składnikami materiału sprawdzianu – stali szybko tnącej M-1. W mikroobszarze 2 zaobserwowano dużą zawartość aluminium – ok. 40.8% mas. naniesionego w trakcie testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektora hydraulicznego wykonanego ze stopu aluminium 7075 w charakterze przeciwpróbki, dodatkowo zaobserwowano obecność tytanu i azotu pochodzące z powłoki TiN. W mikroobszarze 3 zaobserwowano typową zawartość pierwiastków tworzących powłokę TiN, tytan – ok. 66.4%, azot ok. 19.4% mas.

5.12. Regeneracja sprawdzianów gwintowych

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych – morfologii powierzchni, testów eksploatacyjnych i badań przyczepności do podłoża a także własnej praktyki przemysłowej i analizy literatury, można stwierdzić że możliwe jest przeprowadzanie regeneracji zużytych sprawdzianów gwintowych poprzez nanoszenie powłoki przeciwzużyciowej na powierzchnie sprawdzianu. W celu regeneracji sprawdzianu należałoby wykonać wzorcowanie w celu pomiaru średnicy podziałowej i oceny stopnia i równomierności zużycia. Sprawdziany równomiernie zużyte, gdzie różnicę w uzyskanej wartości średnicy podziałowej pomiędzy początkiem a końcem zwoju gwintu nie przekraczają 1-2 mikrometrów mogą zostać poddane regeneracji. Dobór rodzaju powłoki przeciwzużyciowej zależy od materiału sprawdzianu gwintowego, sprawdziany gwintowe wykonane ze stali do pracy na zimno powinny być pokrywane powłokami nakładanymi w temperaturze poniżej 250°C, np. powłoka diamentopodobna, a sprawdziany wykonane ze stali szybko tnącej mogą być pokrywane powłokami nakładanymi w temperaturze poniżej 500°C. Dobór grubości powłoki zależy od stopnia zużycia sprawdzianu, uwzględniając grubość nałożonej powłoki powinien on ponownie być w tolerancji wymiarowej po nałożeniu powłoki. Z badań własnych wynika że powłoki 2-3 mikrometry dobrze odwzorowują profil gwintu i w przypadku powłoki DLC równomiernie go pokrywają. Każdorazowo po wykonaniu powlekania konieczne jest przeprowadzenie wzorcowania w celu potwierdzenia zgodności średnicy podziałowej z wymaganiami norm.

5.13. Analiza opłacalności wydłużenia żywotności sprawdzianów gwintowych

W celu zastosowania rozwiązań wydłużających żywotność sprawdzianów gwintowych 250-28 UNF-3B STI w przemyśle (opracowanych w ramach doktoratu wdrożeniowego) opracowano model ekonomiczny i wyliczono opłacalność przedstawionych rozwiązań. Opracowano kalkulację, w której uwzględniono wyniki szybkości zużycia (na podstawie przeprowadzonych testów eksploatacyjnych) i kosztu zakupu standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na zimno, a także całkowity koszt wytworzenia sprawdzianu (strona PRZECHODNIA i NIEPRZECHODNIA). W tabeli 6.1. zestawiono koszty zakupu sprawdzianów gwintowych wraz z kosztem wytworzenia powłoki przeciwzużyciowej na podłożu dedykowanych sprawdzianów.

Tabela 5.114. Zestawienie kosztu zakupu sprawdzianów gwintowych / wykonania sprawdzianów z powłokami przeciwzużyciowymi [źródło własne]

Rodzaj sprawdzianu gwintowego 250-28 UNF-3B STI	Cena	Wielokrotność ceny standardowego sprawdzianu wykonanego ze stali narzędziowej
stal narzędziowa do pracy na zimno O1	626 zł	-
stal szybko tnąca M-1	1442 zł	2,3
węgiel spiekany C-2	3 689 zł	5,9
stal szybko tnąca pokryta powłoką TiN	1482 zł	2,4
stal narzędziowa do pracy na zimno pokryta powłoką DLC	746 zł	1,2

Stwierdzono, że jednym z warunków zastosowania sprawdzianów z powłokami przeciwzużyciowymi oraz wykonanych z innego materiału niż standardowy ze stali narzędziowej do pracy na zimno jest

zrekompensowanie kosztu zakupu poprzez zwiększenie trwałości i wydłużenie czasu pracy sprawdzianów. Obliczono, że cena wytworzenia sprawdzianu gwintowego wykonanego ze stali do pracy na zimno z powłoką przeciwzuzyciową jest o 20% wyższa niż standardowego sprawdzianu bez powłoki (tabela 6.1.), dlatego żywotność sprawdzianu z powłoką musi być większa niż 20% w porównaniu do standardowego sprawdzianu, tak żeby zastosowanie sprawdzianów z pokryciem DLC miało ekonomiczne uzasadnienie.

W oparciu o badania własne, przeprowadzone testy eksploatacyjne (rozdział 5.7.), stwierdzono że w przypadku kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stopu aluminium uzasadnienie ekonomiczne ma zastąpienie standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno sprawdzianami z dodatkowym pokryciem powłoką przeciwzuzyciową DLC. Wszystkie sprawdziany po zakończeniu testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów modułu autopilota spełniały wymogi metrologiczne, ale w przypadku sprawdzianów bez pokrycia powłokami przeciwzuzyciowymi DLC i TiN zachodził proces przywierania cząstek materiału przeciwpróbki do powierzchni sprawdzianów. Zastosowanie powłok w znaczny sposób ograniczało ten proces. Ze względu na ok. 2-krotnie wyższą cenę sprawdzianu pokrytego powłoką TiN, można uznać że spośród testowanych wariantów sprawdzianów najbardziej ekonomicznie uzasadnione jest wybranie sprawdzianu ze stali do pracy na zimno pokrytego powłoką DLC jako optymalnego rozwiązania.

Dokonana również analiza wyników przeprowadzonych testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze stali nierdzewnej 15-5 PH pozwala na przyjęcie stwierdzenia, że sprawdziany gwintowe wykonane z węgliką spiekanego, stali do pracy na zimno z powłoką DLC i stali szybko tnącej z powłoką TiN spełniają wymogi metrologiczne w trakcie, a także po zakończeniu testów eksploatacyjnych, trwających około 6 miesięcy. Jednocześnie stwierdzono, że na podstawie wyników prac badawczych prowadzonych w czasie 6 miesięcy, nie było możliwe określenie całkowitej żywotności sprawdzianów z zaproponowanymi nowymi rozwiązaniami względem sprawdzianów standardowych. W tym celu niezbędne będzie przeprowadzenie znacznie dłuższych – minimum rocznych testów. Na podstawie analizy rynkowej obejmującej koszty wytworzenia sprawdzianów w firmie YASA oraz cen dostępnych komercyjnie sprawdzianów przyjęto, że zastąpienie standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno sprawdzianami pokrytymi powłokami DLC jest ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem – przemawia za tym ponad dwukrotnie większa żywotność sprawdzianów z powłoką DLC przy tylko 20% wyższym koszcie takiego sprawdzianu względem standardowego sprawdzianu bez powłoki. Zastąpienie standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno sprawdzianami z węgliką spiekanego i stali szybko tnącej z powłoką TiN jest droższym rozwiązaniem, niż w przypadku sprawdzianów pokrytych powłoką DLC, jednak analizując ich trwałość względem kosztów, może być rozwiązaniem również zasadnym. Szczególnie obiecujące są wyniki badań własnych przyczepności powłoki TiN do podłoża, w których potwierdzono że przyczepność powłoki i odporność na obciążenia jest ok. 3-krotnie większa niż w przypadku powłoki DLC. W tym przypadku niezbędne byłoby przeprowadzenie dodatkowych, przedłużonych testów eksploatacyjnych, za pomocą których można by poddać ocenie czy żywotność sprawdzianów wykonanych ze stali szybko tnącej z powłoką TiN przekracza ok. 2,4-krotnie żywotność sprawdzianów standardowych i sprawdzianów wykonanych z węgliką spiekanego przekraczają 5,9-krotnie żywotność sprawdzianów standardowych.

Dodatkowo, na podstawie przeprowadzonej analizy wyników testów eksploatacyjnych przy użyciu kolektorów wykonanych ze stopu tytanu Ti-6Al-4V, wykazano że podobnie, jak w przypadku testów eksploatacyjnych przeprowadzonych przy użyciu kolektorów hydraulicznych wykonanych ze stali 15-5 PH, zastąpienie standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno sprawdzianami pokrytymi powłokami DLC jest ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem, a zastąpienie standardowych sprawdzianów wykonanych ze stali do pracy na zimno sprawdzianami z węgliką spiekanego jest zasadne, ale głównie pod względem prognozowanej najwyższej jego trwałości, co jednak wymaga przeprowadzenia dodatkowych, przedłużonych testów eksploatacyjnych.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Analiza wyników przeprowadzonych badań własnych była podstawą do sformułowania następujących wniosków:

- Wyniki badań mikroskopowych prowadzonych na przekroju oraz ocena zmian morfologii powierzchni sprawdzianów pokrytych powłokami przeciwzużyciowymi i bez pokrycia, sprzężone z wynikami analizy składu chemicznego metodą SEM-EDS – stanowiły podstawę charakterystyki wytworzonych powłok, a także podjętej próby oceny dotyczącej mechanizmów degradacji i identyfikacji rodzajów uszkodzeń tworzących się w obszarze warstwy wierzchniej sprawdzianów bez powłok i z wytworzonymi powłokami – poddanych próbom eksploatacyjnym oraz podczas próby odporności na zarysowanie „scratch-test”.
- Analiza wyników pomiarów rozkładu grubości powłoki diamentopodobnej i azotku tytanu wytworzonych na powierzchni sprawdzianów gwintowych stanowi podstawę do zdefiniowania problematyki technologicznej związanej z uzyskaniem równomiernego rozkładu grubości powłok nakładanych metodą Arc-PVD na całej powierzchni elementów o złożonej geometrii.
- Przeprowadzone obserwacje SEM potwierdziły założenia tezy, że zastosowanie powłok przeciwzużyciowych zminimalizuje zjawisko przywierania cząstek materiału przeciwpróbek wykonanych ze stopu aluminium 7075,
- Badania chropowatości pozwoliły na ocenę topografii poszczególnych sprawdzianów, potwierdzono wpływ technologii nakładania powłok przeciwzużyciowych na wartości parametrów 2D i 3D w odniesieniu do materiałów bez powłok, a także wpływ metody nakładania powłoki na wartość poszczególnych parametrów (faza kropelkowa i jej pozostałość występująca na powierzchni powłoki azotku tytanu),
- Przeprowadzone prace badawcze podczas prób eksploatacyjnych potwierdziły możliwość zwiększenia odporności na zużycie sprawdzianów wykonanych z węgla spiekane, stali do pracy na zimno z powłoką DLC i stali szybko tnącej z powłoką TiN do 12 miesięcy i tym samym wydłużenie czasookresu wzorcowania do minimum 6 miesięcy dla sprawdzianów używanych do sprawdzania elementów lotniczych wykonanych ze stali 15-5 PH i stopu tytanu Ti-6Al-4V. W przypadku sprawdzianów wykonanych ze stali szybko tnącej poddawanych testom przy użyciu przeciwpróbek ze stali 15-5 PH i ze stopu tytanu Ti-6Al-4V uzyskano zwiększoną żywotność w odniesieniu do standardowych sprawdzianów, jednakże sprawdziany te nie przeszły pomyślnie całego cyklu obejmującego 200 wkręceń w przeciwpróbki. Dodatkowo w oparciu o wyniki badań własnych poszerzono stan wiedzy dotyczący wpływu właściwości materiału przeciwpróbki na zużycie poszczególnych sprawdzianów wykonanych z różnych materiałów, w tym z zastosowanymi powłokami przeciwzużyciowymi i bez powłok przeciwzużyciowych,
- Przeprowadzone badania przyczepności powłok przeciwzużyciowych do podłoża sprawdzianów, wykazały że powłoka TiN wytworzona na podłożu ze stali szybko tnącej charakteryzuje się lepszą odpornością na zużycie w próbie zarysowania scratch test w porównaniu z powłoką DLC. Zaobserwowano również, że wartość obciążeń krytycznych koniecznych do trwałego uszkodzenia powłoki TiN występuje w zakresie >40 N, a dla powłoki DLC występuje >13 N.
- Przedstawiono rozwiązanie pozwalające na regenerację zużytych sprawdzianów w oparciu o wyniki badań własnych oraz „know-how” z praktyki przemysłowej, jednak w celu wdrożenia w

przemysle zaproponowanego rozwiązania konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych prac badawczych.

W wyniku zrealizowanych prac badawczych w ramach doktoratu wdrożeniowego opracowano zweryfikowane praktycznie rozwiązania materiałowo-technologiczne w obszarze inżynierii materiałowej, zapewniające zwiększenie trwałości sprawdzianów gwintowych trzpieniowych wykorzystywanych do kontroli wyprodukowanych detali lotniczych i wydłużenie czasookresu wzorcowania, a także rozwiązanie pozwalające na regenerację zużytych sprawdzianów. Opracowane rozwiązania znalazły praktyczne zastosowanie w firmie Yasa Poland Sp. z o.o. – produkującej elementy statków powietrznych. Podjęto próbę opracowania analizy ekonomicznej, w której wykazano opłacalność zaproponowanych rozwiązań. Dodatkowo przeprowadzone prace badawczo-naukowe poszerzyły stan wiedzy dotyczący zużycia sprawdzianów gwintowych i możliwości wydłużenia ich żywotności.

7. LITERATURA

- [1] Qiao G, Liu G., Shi Z., Wang Y., Ma S., Lim C T.: *A review of electromechanical actuators for More/All Electric aircraft systems*, 0(0) 1-24, 2017
- [2] Seabridge A., Moir I.: *Design and Development of Aircraft Systems (Aerospace Series)*, 3rd edition, Wiley, 2020
- [3] Valdo M. F.: *Servo Hydraulic Technology in Flight Control*, Workshop on Innovative Engineering for Fluid Power and Vehicular Systems ABIMAQ – São Paulo, Moog, 14-15 May 2012. www.cisb.org.br/images/pdf/MarioValdo.pdf, dostęp: 27.09.2023
- [4] Boeing 787 Aileron PCU, <https://www.youtube.com/watch?v=reaDE4xlu58>, dostęp: 27.09.2023
- [5] www.b737.org.uk/images/autopilot_aileron_acts.jpg, dostęp: 27.09.2023
- [6] Budzik G., Poliński P., Dziubek T.: *Metodyka pomiarów i oceny zużycia sprawdzianów gwintowych trzpieniowych w procesie ich eksploatacji*, Stal, Metale & Nowe Technologie, ELAMED Media Group, nr 7-8, 2021
- [7] Łyczko K.: *Gwinty : rodzaje, wymiary, podstawowe obliczenia*, Elamed Media Group, 2016
- [8] AS8879D-2018: *Screw Threads – UNJ Profile, Inch Controlled Radius Root with Increased Minor Diameter*
- [9] ASME B1.1-2019. *Unified Inch Screw Threads (UN, UNR, and UNJ Thread Forms)*
- [10] Thread Check Inc., www.threadcheck.com, dostęp: 27.09.2023
- [11] B1.3 – 2007(R2022): *Screw Thread Gaging Systems for Acceptability: Inch & Metric Screw Threads (UN, UNR, UNJ, M, MJ)*
- [12] www.boellhoff.com/pl-pl/produkty-i-uslugi/specjalne-elementy-zlaczne/206kladki-gwintowe-helicoil.php, dostęp: 05.09.2023
- [13] B18.29.1 – 2010(R2017): *Helical Coil Screw Thread Inserts–Free Running and Screw Locking (Inch Series)*
- [14] NASM33537, Revision 3, 2017, *INSERT, SCREW THREAD, HELICAL COIL, INCH SERIES, COARSE AND FINE THREAD, STANDARD ASSEMBLY DIMENSIONS FOR*
- [15] <https://fastenertool.com/products/helicoil-threaded-inserts/helicoil-thread-inserts/>,dostęp: 05.09.2023
- [16] FED-STD-H28A (1994): *FEDERAL STANDARD: SCREW-THREAD STANDARDS FOR FEDERAL SERVICES*
- [17] ASME B1.2 – 1983(R2017): *Gages and Gaging for Unified Inch Screw Threads*
- [18] AS59158A, *Tools, Inserting and Extracting Helical Coil Wire Screw Thread Inserts Inch and Spark Plug Sizes*
- [19] FED-STD-H28/6A: *SCREW-THREAD STANDARDS FOR FEDERAL SERVICES SECTION 6 GAGES AND GAGING FOR UNIFIED SCREW THREADS-UN AND UNR THREAD FORMS*
- [20] Fabryka Narzędzi FANAR S.A, www.fanar.pl dostęp: 05.09.2023
- [21] PN-ISO 1502:1998. *Gwinty metryczne ISO ogólnego przeznaczenia – Sprawdziany i sprawdzanie*
- [22] B47.1 – 2007(R2022): *Gage Blanks*

- [23] Bilska J., Poliński P.: *MANIFOLD, MACHINED FORGING A350 HCM*, Instrukcja kontroli, IN.K_32, wydanie 8, Yasa Poland Sp. z o.o., 2020
- [24] Lonczak J., Poliński P.: *Kontrola dostaw i kontrola końcowa*, Instrukcja kontroli, IN.K_6, wydanie 2, Yasa Poland Sp. z o.o., 2016
- [25] Yüksel İ.A., Kılıç T.O., Sönmez K.B., Ön Aktan S.: *Comparison of internal and external threads pitch diameter measurement by using conventional methods and CMM's*, 19th International Congress of Metrology, 09001 (2019)
- [26] IFI-301, 8th Edition, 2013. *Gage Calibration Requirements and Procedures for Thread Gages*
- [27] B89.1.17 – 2002(R2017) *Measurement of Thread Measuring Wires*
- [28] B1.25 – 2019 *Measurement Uncertainty Factors in the Calibration of Screw Thread Gages*
- [29] PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących*
- [30] Polskie Centrum Akredytacji, www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne dostęp: 05.09.2023
- [31] Madej M.: *Właściwości systemów tribologicznych z powłokami diamentopodobnymi*, M46, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013
- [32] Boeing, Aero QTR_04, 2006, www.boeing.com/commercial/aeromagazine/, dostęp 28.09.2013
- [33] Głowacka M., Zieliński A.: *Podstawy materiałoznawstwa*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2014
- [34] Totten G. E., MacKenzie D.S.: *Handbook of Aluminum Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing*, CRC Press, 2003
- [35] Fang Z.Z.: *Sintering of Advanced Materials*, 1st edition, Woodhead Publishing, 2010
- [36] PN-EN 573-1:2006. *Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 1: System oznaczeń numerycznych*
- [37] Kawalec A., Oczos K. E.: *Kształtowanie metali lekkich*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012
- [38] PN-EN 1706+A1:2022-01. *Aluminium i stopy aluminium - Odlewy - Skład chemiczny i własności mechaniczne*
- [39] Kuczmaszewski J., Zaleski K.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu*, Politechnika Lubelska, 2015
- [40] Dobrzański L. A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice – Warszawa 2002
- [41] Ghali E.: *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys. Understanding, Performance, and Testing*, Wiley, 2010
- [42] Zhou B., Bo Liu B., Zhang S.: *The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review*, *Metals* 2021, 11, 718
- [43] Cantor B., Assender H., Grant P.: *Aerospace Materials*, Taylor & Francis Ltd, 1st Edition, 2001

- [44] Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N.: *Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry*, NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 106 JULY 2014
- [45] Skrzypek S.J., Przybyłowicz K.: *Inżynieria metali i technologie materiałowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019
- [46] ASTM B265-20a. *Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate*
- [47] Jakubowicz J.: *Obróbka powierzchniowa biomateriałów tytanowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2019
- [48] Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W.: *Tytan i jego stopy*, Wydawnictwa Politechniki Świętokrzyskiej, 2004
- [49] Donachie M.J.: *Titanium: A Technical Guide*, 2nd Edition, ASM International, 2000
- [50] Leyens C., Peters M.: *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Wiley, 2003
- [51] Mouritz A. P.: *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, 1st edition, 2012
- [52] Roy T. K., Bhattacharya B., Ghosh C., Ajmani S. K.: *Advanced High Strength Steel: Processing and Applications*, Springer, 1st edition, 2018
- [53] Głowacka M., Łabanowski J., Landowski M.: *Współczesne materiały inżynierskie. Wybrane grupy materiałów*, wydanie 1, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2022
- [54] Askeland, D. R., Fulay, P. P., Wright, W. J.: *The Science and Engineering of Materials*, Nelson Engineering, 6th edition, 2011
- [55] A. Kozłowski. Tłumaczenie: E. Bernatowska, L. Buda- Ożóg, A. Duda, A. Głuszko, M. Górski, W. Kubiszyn, A. Raczak, L. Ślęczka: *Podręcznik projektowania konstrukcji ze stali nierdzewnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, wydanie czwarte, 2017
- [56] Eswara Prasad N., Wanhill R. J. H.: *Aerospace Materials and Material Technologies. Volume 1: Aerospace Materials*, Springer, 2017
- [57] Lai J. K. L., Shek C. H., Lo K. H.: *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, Bentham Science Publishers, 2012
- [58] J. D. Verhoeven: *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist*, ASM International, 1st edition, 2007
- [59] Chun-Yung N. M.: *Airframe Structural Design : Practical Design Information*, 2nd edition, Concord Publications Co., 2011
- [60] McGuire M.: *Stainless Steels for Design Engineers*, ASM International, 1st edition, 2008
- [61] Cui P., Xing G., Nong Z., Chen L., Lai Z., Liu Y., Zhu J.: *Recent Advances on Composition-Microstructure-Properties Relationships of Precipitation Hardening Stainless Steel*, *Materials*, 15(23), 2022
- [62] Mercury Tool & Gauge Ltd., www.mercury-gauge.com dostęp 28.09.2023
- [63] Swanson Tool Manufacturing Inc. www.swansonage.com , dostęp 28.09.2023
- [64] Jemieliński K.: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018
- [65] ASTM A681-08(2022). *Standard Specification for Tool Steels Alloy*
- [66] Mesquita R.A.: *Tool Steels: Properties and Performance*, CRC Press Taylor&Francis Group, 2020

- [67] Jaworski J., Trzepieciński T.: *Stal stosowana na narzędzia do przeróbki plastycznej metali z klasyfikacją i oznaczeniem według PN-EN*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2014
- [68] ASTM A600-92a:2016. *Standard Specification for Tool Steel High Speed*
- [69] Klocke F.: *Manufacturing Processes 1, Cutting*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011
- [70] Sarin V., Mari D., Miguel L., Nebel C.: *Comprehensive Hard Materials*, volume 1, Elsevier, 2014
- [71] PN-EN ISO 4499-2:2021-02. *Węgliki spiekane - Metalograficzna ocena mikrostruktury - Część 2: Pomiar wielkości ziarna węglików wolframu*
- [72] García J., Ciprés V. C., Blomqvist A., Kaplan B.: *Cemented carbide microstructures: a review*, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 80 (2019) 40–68
- [73] Konyashin I., Ries B.: *Cemented Carbides*, Elsevier, 2022
- [74] Richert M.W., Zawadzka P.: *Powłoki użytkowe na narzędziach i częściach maszyn dla przemysłu metali nieżelaznych*, Obróbka Plastyczna Metali Vol XXV, Nr 1 (2014)
- [75] The Original Gauge Company Limited, <https://thegauge.co.uk/> dostęp 28.09.2023
- [76] Blicharski M.: *Inżynieria powierzchni*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2009
- [77] Jaworski J., Mucha J., Trzepieciński T.: *Kształtowanie trwałości eksploatacyjnej narzędzi do przeróbki plastycznej metali*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2018
- [78] Qin Y.: *Micromanufacturing Engineering and Technology*, 2nd edition, Springer, 2015
- [79] Kaźmierczak A.: *Analiza możliwości osadzenia powłoki z azotku tytanu na powierzchni roboczej uszczelniającego pierścienia tłokowego silnika spalinowego*, Przegląd Spawalnictwa, nr 9, 2012
- [80] Nita F., Mastail C., Abadias G.: *Three-dimensional kinetic Monte Carlo simulations of cubic transition metal nitride thin film growth*, Physical Review B 93, 064107, 2016
- [81] Prasert K., Thanomngam P., Sarasamak K.: *First-Principles Investigation on Elastic Constants of TiN under High Pressure*, Advanced Materials Research Vol. 802, 2013
- [82] R. A. Meyers: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press, 3rd edition, 2001
- [83] Kupczyk M.: *Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwzużyciowymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
- [84] J. Wang, Y-W. Chung: *Encyclopedia of Tribology*, volume 1, Springer, 2013
- [85] Madej M., Kowalczyk J., Ozimina D.: *Właściwości tribologiczne powłok DLC smarowanych biodegradowalną cieczą chłodząco-smarującą*, Tribologia, nr 5, 2014
- [86] Oerlikon Balzers Coating Poland Sp. z o.o., www.oerlikon.com/balzers/pl/ dostęp 05.09.2023
- [87] www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2020/10/Sales_Brochure_Uddeholm_Coating.pdf dostęp 05.09.2023
- [88] Dobrzański L. A., Dobrzańska-Danikiewicz A. D.: *Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich*, International OCSCO World Press, Volume 5, 2011
- [89] PN-EN ISO 20502:2016-05. *Ceramika wysokiej jakości (ceramika zaawansowana, techniczna ceramika zaawansowana) -- Oznaczanie adhezji powłok ceramicznych w próbie zarysowania*

- [90] A-A-59158 (1998). TOOLS FOR INSERTING AND EXTRACTING HELICAL COIL WIRE SCREW THREAD INSERTS
- [91] Hetzner D. W.: *Refining carbide size distributions in M1 high speed steel by processing and alloying*, Materials Characterization, Volume 46, Issues 2–3,
- [92] https://afk-tools.com/wp-content/uploads/2021/08/gd_kp_kt-hk-01-21-00021-kp-hss-gws_spl_asc_pim.pdf dostęp 05.09.2023
- [93] <https://narzedzia-specjalistyczne.pl/18717-gwintownik-hss-e-916-unf-skretny-z-powloka-tin-din371-374-nr-td864-td864622.html> dostęp 05.09.2023
- [94] ILAC-G8:09/2019. *Wytyczne dotyczące zasad podejmowania decyzji i stwierdzeń zgodności*
- [95] <https://metrology.mahr.com/fileadmin/assets/files/MarSurf-XC2-XC20-3763199-FL-MarWin-DE-2016-03-01.pdf> dostęp 05.09.2023
- [96] Świadectwo wzorcowania nr 2134-298-2022, Sprawdzian gwintowy trzpieniowy walcowy o średnicy znamionowej ¼-28 UNF-3B STI, Arkom Sp. z o.o.
- [97] Jan Malinowski J., Jakubiec W., Płowucha W.: *Pomiary gwintów w budowie maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- [98] EURAMET cg-10. *Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing*, 12/2012
- [99] Poliński P, Szady R.: *Sprawdziany gwintowe trzpieniowe wzorcowane metodą trójwałeczkową*, Instrukcja wzorcowania, IW 06, wydanie 3, Avio-Lab Sp. z o.o., 2023
- [100] Krawczyk B., Szablewski P., Mendak M., Gapiński B., Smak K., Legutko S., Wieczorowski M., Miko E.: *Surface Topography Description of Threads Made with Turning on Inconel 718 Shafts*, Materials, 16, 80, 2023
- [101] PN-EN ISO 21920-2:2022-06. *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Struktura geometryczna powierzchni: Profil - Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*
- [102] PN-EN ISO 25178-2:2022-06. *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna - Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*
- [103] ASM Handbook Volume 2: *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1990
- [104] CBMK/LM2/44122.03/2/2015. *STRUCTURE INVESTIGATION – GRAIN FLOW IN FORGED ELEMENTS MADE FROM ALUMINIUM ALLOY (7075-T73)*, Institute of Aviation, 2015
- [105] ASTM B221 (2021). *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes*
- [106] AMS2772H (2023). *Heat Treatment of Aluminum Alloy Raw Materials*
- [107] PN-EN 515:2017-05. *Aluminium i stopy aluminium - Wyroby przerobione plastycznie - Oznaczenia stanów*
- [108] AMS4928W (2017). *Titanium Alloy Bars, Wire, Forgings, Rings, and Drawn Shapes 6Al - 4V Annealed*
- [109] Davim J.P.: *Machining of Titanium Alloys*, Springer, 2014

- [110] AMS5659T (2021). *Steel, Corrosion Resistant, Bars, Wire, Forgings, Rings, and Extrusions 15Cr - 4.5Ni - 0.30Cb (Nb) - 3.5Cu Consumable Electrode Remelted Solution Heat Treated, Precipitation Hardenable*
- [111] Tokar D., Radek N., Sęk P., Mikina A., Kalinowski A.: *Właściwości powłok DLC teksturowanych laserowo. Wybrana problematyka w technologiach inżynierii mechanicznej*; monografia pod red. Radek N., Sęk P., M135, Politechnika Świętokrzyska, 2020
- [112] Shah A., Izman S., Fasehah S. N.: *Study on micro droplet reduction on tin coated biomedical Ti-13Zr-13Nb alloy*, *Jurnal Teknologi*, 78: 5–10 (2016)
- [113] Juárez-García, J.M., Morales-Hernández J., Gutiérrez-Peralta A., Cruz-Valeriano E., Ramírez-Bon R., Yañez Limón J.M.: *TiN hard coating as a candidate reference material for surface metrology in chemistry: Characterization and quantification by bulk and surface analyses techniques*, *Revista de Metalurgia*, 58(4), 2022

Streszczenie

Rozprawa doktorska o sformułowanym temacie „Podwyższenie odporności na zużycie sprawdzianów gwintowych stosowanych w przemyśle lotniczym” realizowana w ramach projektu doktorat wdrożeniowy była realizowana w firmie Yasa Poland Sp. z o.o. – produkującej obudowy i korpusy siłowników hydraulicznych. Rozprawa stanowi interdyscyplinarne połączenie analizy stanu wiedzy i badań z obszaru inżynierii materiałowej – w zakresie doboru materiału i powłok przeciwzużyciowych, wydłużających żywotność sprawdzianów gwintowych trzpieniowych, z obszaru tribologii – w zakresie badania odporności na zużycie powłok i materiałów, z których zostały wykonane sprawdziany gwintowe oraz z obszaru metrologii – w zakresie pomiarów sprawdzianów gwintowych trzpieniowych.

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie koncepcji, metodyki i wdrożenia do produkcji sprawdzianów gwintowych z powłokami przeciwzużyciowymi wytworzonymi metodami Arc-PVD i PACVD o zwiększonej odporności na zużycie, a także dobór materiału o zwiększonej odporności na zużycie do produkcji sprawdzianów na podstawie przeprowadzonych badań własnych. Założeniem było opracowanie takiego rozwiązania, które pozwoliłoby nie tylko zwiększyć żywotność sprawdzianów, ale również wydłużyć czasookresy pomiędzy poszczególnymi ich wzorcowaniami, także zminimalizowanie zjawiska zacierania się sprawdzianów w trakcie kontroli korpusów wykonanych z aluminium oraz umożliwienie regeneracji zużytych sprawdzianów gwintowych.

W części literaturowej rozprawy doktorskiej, dokonano przeglądu stanu wiedzy z zakresu klasyfikacji i charakterystyki sprawdzianów gwintowych oraz procesów ich zużycia, metod zwiększania ich żywotności, a także materiałów i powłok obecnie stosowanych do ich produkcji. Przedstawiono również analizę materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym do produkcji kolektorów hydraulicznych, które zostały użyte w charakterze przeciwpróbek w trakcie testów eksploatacyjnych sprawdzianów w warunkach przemysłowych.

W części badawczej, przedstawiono metodykę, wyniki pomiarów i badań przeprowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych – koncentrując się na zagadnieniach z zakresu inżynierii powierzchni, tribologii i pomiarach metrologicznych. Obejmowały one pomiary parametrów geometrycznych, badanie morfologii powierzchni i mikrostruktury, badania odporności na zużycie i właściwości mechanicznych. Do badań wybrano sprawdzian gwintowy trzpieniowy .250-28 UNF-3B STI, jako reprezentatywny sprawdzian, powszechnie stosowany w przemyśle lotniczym do weryfikacji gwintów elementów lotniczych.

Wyniki przeprowadzonych badań po przeprowadzeniu ich analizy z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego potwierdziły słuszność przyjętych założeń zwiększania żywotności sprawdzianów gwintowych, tym samym potwierdzając przyjęte w rozprawie hipotezy badawcze.

Abstract

A doctoral dissertation on the topic "Improving the wear resistance of thread gauges used in the aviation industry" carried out as part of the implementation doctorate project was carried out at Yasa Poland Sp. z o. o. – producing housings and manifolds of hydraulic actuators. The dissertation is an interdisciplinary combination of analysis of the state of knowledge and research in the area of materials engineering - in the field of selection of material and anti-wear coatings, extending the life of thread plug gauges, in the area of tribology - in the field of testing the wear resistance of coatings and materials from which thread gauges are made, and in metrology area - in the field of measurement of thread plug gauges.

The aim of the doctoral dissertation was to develop the concept, methodology, and implementation for the production of thread gauges with anti-wear coatings produced by Arc-PVD and PACVD methods with increased wear resistance, as well as the selection of material with increased wear resistance for the production of gauges based on own research. The idea was to develop a solution that would not only increase the service life of the gauges, but also extend the time between their individual calibrations, minimize the phenomenon of material sticking on the thread gauge surface during inspection of manifolds made of aluminum, and enable the regeneration of worn thread gauges.

In the literature part of the doctoral dissertation, a review of the state of knowledge in the field of classification and characteristics of thread gauges and their wear processes, methods of increasing their service life, as well as the materials and coatings currently used in their production. An analysis of materials used in the aviation industry for the production of hydraulic manifolds used as counter-samples during operational tests of gauges in industrial conditions was also presented.

The research part presents the methodology, results of measurements, and tests carried out in laboratory and industrial conditions - focusing on issues in surface engineering, tribology, and metrological measurements. They included measurements of geometric parameters, examination of surface morphology and microstructure, wear resistance tests, and mechanical properties. The .250-28 UNF-3B STI thread plug gauge was selected for testing as a representative gauge commonly used in the aviation industry to verify the threads of aircraft components.

The results of the research carried out after their analysis, taking into account the economic aspect, confirmed the validity of the assumptions made to increase the durability of thread gauges, thus confirming the research hypotheses adopted in the dissertation.