

Sebastian GRONEK, Paweł SZCZEPANIAK, Grzegorz JASTRZĘBSKI,
 Urszula WINIARSKA, Maciej KAMIŃSKI, Marek KRUKOWSKI
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

STUDYING THE WEAR OF TITANIUM THREAD OF AIRCRAFT FUEL FILTER

Badanie zużycia tytanowego gwintu lotniczego filtra paliwowego

Abstract: *The article presents the tests that were conducted to examine the possibility of the fuel filter shank's thread shearing under the impact of hydrostatic pressure. Increased wear due to friction was confirmed on the threads of the titanium shanks that were tested, together with significantly reduced wear of the mating threads and steel sleeves. Shearing tests confirmed that to shear a thread that is worn to a degree similar to the threads that were tested, it is necessary to apply eight times more static pressure than the maximum pressure in the filter. A comparison of the shape of the coils of the thread that was subjected to the pressure test with the thread from the damaged filter demonstrated a significant difference in the wearing of these elements due to friction.*

Keywords: titanium, titanium alloys, tribology, shearing, fuel filter, thread connection, replica testing, pressure tests

Streszczenie: *W artykule przedstawiono przeprowadzone badania możliwości ścięcia gwintu trzonu z filtra paliwa pod wpływem działania ciśnienia hydrostatycznego. Potwierdzone zostało występowanie znacznego zużycia przez tarcie badanych gwintów tytanowych trzonów oraz wyraźnie mniejszego zużycia współpracujących z nimi gwintów stalowych tulejek. Próby ścinania wykazały, że do ścięcia gwintu użytego w stopniu zbliżonym do badanych niezbędne jest zastosowanie 8-krotnie większego ciśnienia statycznego niż maksymalne ciśnienie występujące w filtrze. Porównanie kształtu nitki gwintu trzonów poddanych próbie ciśnieniowej z gwintem z filtra, który uległ awarii, wykazało znaczną różnicę w zużyciu tych elementów przez tarcie.*

Słowa kluczowe: tytan, stopy tytanu, trybologia, ścinanie, filtr paliwa, połączenia gwintowe, badania metodą replik, próby ciśnieniowe

1. Introduction

During the operation of aircraft, failure of aircraft engine occurred, due to which it was damaged. One of the hypotheses on the reasons for this can be a failure of the fuel filter. According to this hypothesis, the filter was unsealed due to the thread on the titanium shank being sheared. The above-mentioned thread was a structural element of the filter. Tests that were conducted to examine analogous filters revealed increased wear of threads, which developed due to shearing. It is estimated that this wear reduces the thread's shear strength, which can result in it being sheared due to loads directed along the shank's axis and as a consequence, total damage of the filter.

1.1. The aim of this paper

This paper aimed to verify the possibility of failure of the thread on the shank due to shearing caused by tensile forces acting on the shank, which result from hydrostatic pressure. To this end, empirical pressure tests were performed to create hydrostatic pressure (fig. 2) inside the filter's body, which led to the thread being sheared. Macroscopic tests were also conducted to verify the condition of the threads on the shank and mating sleeves before and after the test. Due to the conducted tests:

- the pressure was measured, which led to the thread of three decommissioned shanks being sheared,
- the condition of threads after the pressure tests was compared with the condition of threads of the emergency filter to estimate its wear before the failure.

1.2. Tested element

The shank of the filter located in the aircraft's fuel system is a titanium rod with a thread containing seven coils situated in the upper part. The alloy, from which the shank is made, is a WT20 titanium alloy or its equivalent¹. During operation, the shank is connected by the thread with the steel sleeve, by which it is connected with the filter's cover and subjected to tension due to hydrostatic pressure acting on the cover (fig. 2). According to the data provided by the manufacturer, the maximum operating pressure in the filter's body amounts approximately to 1 Mpa. During the operation of the filter, the filter's cover is unscrewed, which results in the thread on the sleeve and the thread on the shank being subjected to shearing. The thread with the upper part of the shank is covered with a copper galvanic coating, which is aimed at improving the tribological properties of the thread connection of shank to sleeve (fig. 1).

¹ Report from tests, unpublished.

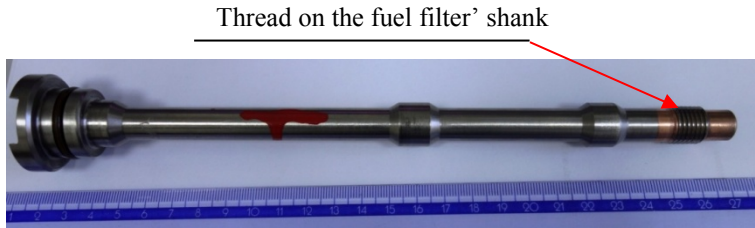


Fig. 1. Decommissioned shank of the fuel filter. The thread is covered with a visible galvanic coating, which is aimed at improving the tribological properties

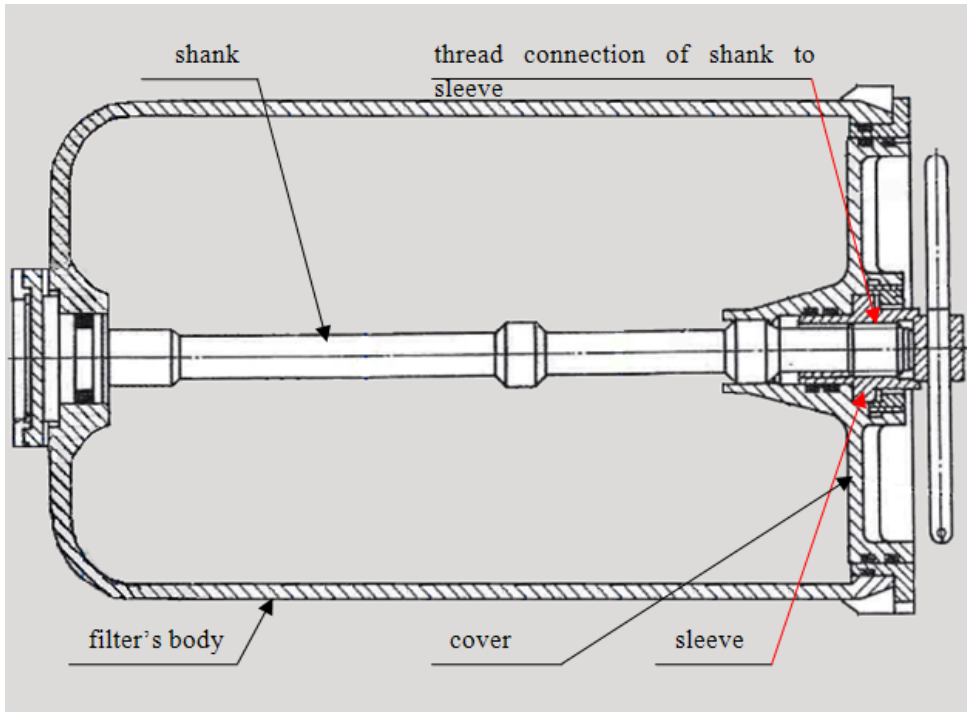


Fig. 2. The simplified diagram of the interior of the studied filter. The fuel contained in the filter's body exerts a hydrostatic pressure on the cover, due to which tensile force acts on the shank

1.3. Material

Titanium is a light metal, which alloys are applied, e.g. in demanding applications in the aircraft industry such as components of aircraft engines or airframes of subsonic aircraft. The advantages of titanium alloys include very high specific strength, low density, high corrosion resistance and better heat-resistant and high-temperature creep resisting properties than in the case of polymer composites or aluminium alloys [2, 3]. The disadvantages of titanium and its alloys contain a higher price than the price for steel and aluminium alloys, difficulties in

mechanical treatment and low resistance to abrasive wear [1, 9]. Low abrasion resistance of titanium alloys is caused by the cracking of a natural passive layer under load [5]. The improvement of abrasive properties of titanium alloys is achieved by the application of surface layers and coatings made of surface engineering methods [6, 8]. Texturing is also used to improve the lubrication of a tribological system [4].

2. Research

2.1. Research method

A test system was used to conduct a pressure test of the sheared thread, which consisted of components from the fuel filter, pump generating pressure, pressure measurement and result acquisition system. Diagram of the test stand was illustrated in fig. 3. The pressure inside the filter was the measured parameter. The tests were recorded by a digital camera.

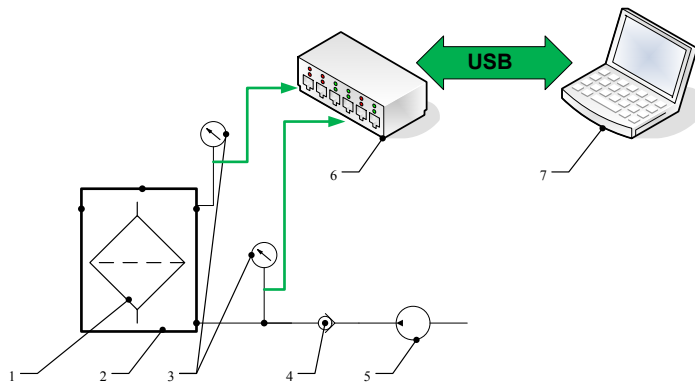


Fig. 3. Diagram of the test stand for static loading of the tested thread connection situated in the filter (1 - filtering unit, 2 - filter's body, 3 - PWXG pressure sensors, 4 - check valve, 5 - UPTR12-16 hydraulic hand pump, 6 - MT-8 analog signal converter, 7 - computer)

Tests of the condition of the thread connection of shank to sleeve were done using stereoscopic microscopic Nikon SMZ 800 No. 1015651. During the tests, the observation of the surface of the thread's coils was made before and after the pressure test as well as the observation of thread replicas made of a silicone resin. These tests were aimed at assessing the shape of the thread, on the basis of which it is possible to estimate the width of the sheared section. Using images from replicas, meshing simulations of the thread connection of shank to sleeve were run. The simulation was conducted assuming an ideally axial location of sleeves relative to the shank. The results of observations of the thread's surface were compared with the condition of the thread, the shearing of which is considered to be the reason for aircraft's failure.

Moreover, the measurements of the external diameter of the thread on the shank and the internal diameter of the thread on the sleeve were taken with the use of a slide caliper.

2.2. Macroscopic tests of the thread before the pressure test

Table 1 and 2 present the measurement results of diameters of the thread connection of shank to sleeve. For the needs of this manuscript, the connections were marked as I, II and III. The thread that was tested was identified as M14x1,5.

Table 1

External diameter of the threads located on the shank in the fuel filter

No.	Designation of the decommissioned shank	External diameter of the thread on the shank [mm]	Average [mm]	Nominal value [mm] [7]
1	I	13.72	13.70	14.0
2		13.72		
3		13.66		
4	II	13.58	13.57	
5		13.58		
6		13.56		
7	III	13.60	13.59	
8		13.60		
9		13.57		

Table 2

Internal diameter of the threads located on the sleeves in the fuel filter

No.	Designation of sleeve corresponding to the decommissioned shank	Internal diameter of the thread on the sleeve [mm]	Average [mm]	Nominal value [mm] [7]
1	I	12.67	12.66	12.376
2		12.64		
3		12.67		
4	II	12.69	12.67	
5		12.65		
6		12.66		
7	III	12.67	12.66	
8		12.65		
9		12.67		

Both in the case of sleeves and shanks, the measurement results significantly differ from the nominal value. It should be mentioned that there is a greater diversity of the average values of the internal diameters of sleeves.

The shapes of the coils on the thread connection of shank to sleeve were illustrated in the following figures (fig. 4, 5 and 6). In all of these three examples, significant deformation of the thread's coils is observed in the form of narrowing the coil's upper part. This narrowing can be highly asymmetric, as it was in the case of the shank No. II. The change in the coil shape, which reduces the surface area of coils in the predicted shearing surface (interrupted blue line in fig. 4, 5 and 6) results in the decrease of the shear strength. The distance of the predicted shearing surface from the bottom of notches of thread's coils for shanks No. I, II and III amount to 387 μm , 418 μm and 407 μm respectively. The widths of the predicted shearing surface for three coils of the thread were illustrated in figures for each shank (dimension d in fig. 4, 5 and 6). Deformation of the coils in the sleeve's thread is significantly smaller. What is evident is a groove located in the middle of the upper surface of thread's coils (' a ' in fig. 4, 5 and 6), which can be the result of the manufacturing process or operational loads on the working surface of the thread. Verification of this hypothesis is not possible due to the lack of the possibility to examine the unused sleeve.

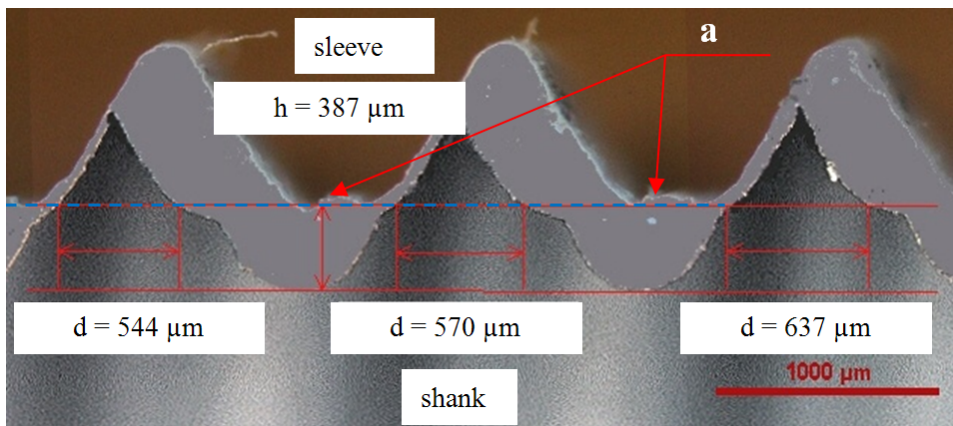


Fig. 4. Simulation of meshing for shank No. I and the mating sleeve

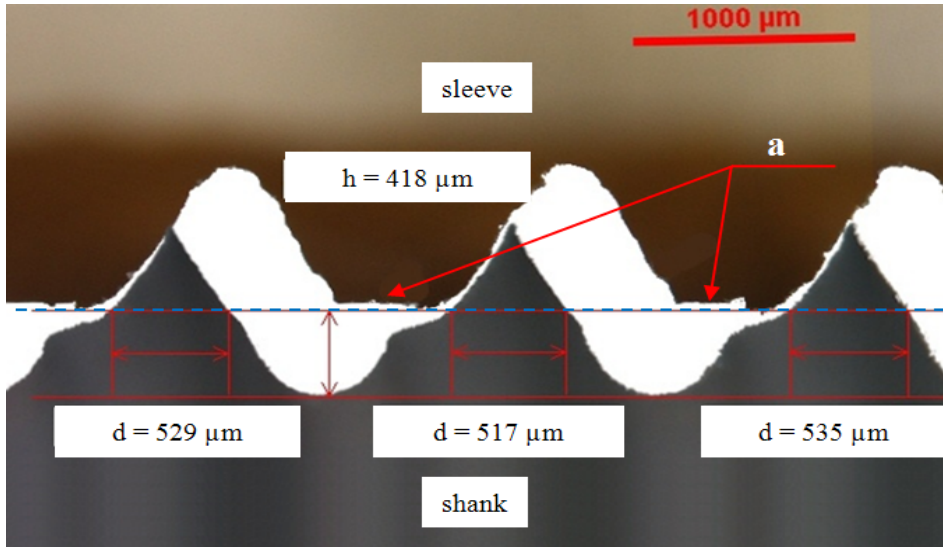


Fig. 5. Simulation of meshing for shank No. II and the corresponding sleeve

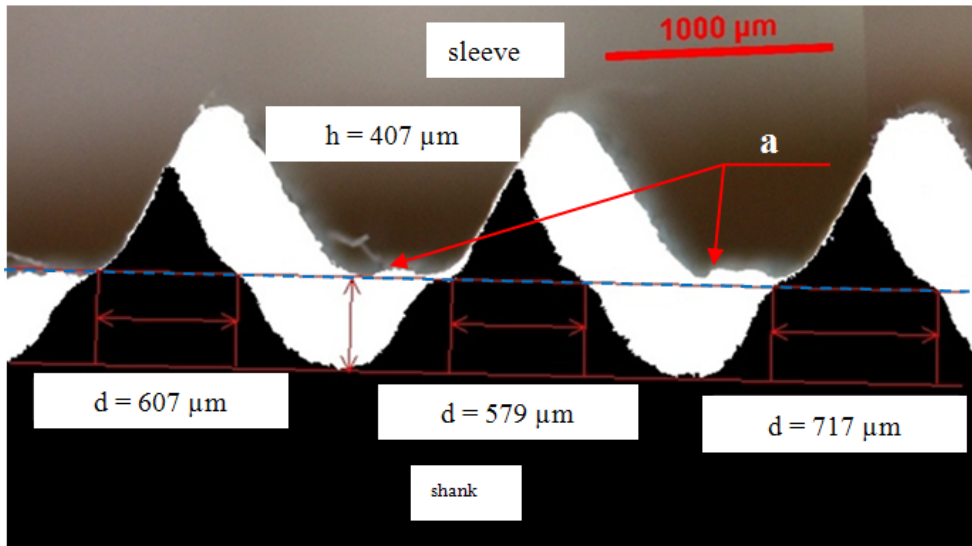


Fig. 6. Simulation of meshing for shank No. III and the corresponding sleeve

2.3. Shear strength tests with pressure method

The course of pressure tests is as follows:

- Shank I was subjected to the test, during which inside the filter the pressure in the amount of 7,0 MPa was achieved and moving of the filter cover relative to its upper

edge by 2 mm. The test was interrupted, the thread was not subjected to shearing and the filter was not unsealed,

- Shank I was subjected to the new test, during which the thread on the shank was sheared with the pressure of 8,24 MPa, which resulted in unsealing of the filter,
- Shank I was subjected to the new test, during which the thread on the shank was sheared with the pressure of 8,24 MPa, which resulted in unsealing of the filter,
- Shank I was subjected to the new test, during which the thread on the shank was sheared with the pressure of 8,13 MPa, which resulted in unsealing of the filter.

Based on pressure measurements, the corresponding destructive forces acting on the thread were determined based on the following relationship:

$$F = p * A$$

where:

F - force damaging the thread [N]

p - pressure inside the filter, by which shearing of the thread occurred [MPa]

A - surface area of the filter body's cover [mm²]

The force determined in this way takes into account not only the shear resistance of the thread but also other resistances to motion that prevent the opening of the filter, such as the resistance of the seals.

Table 3

Concerning the pressure, by which the destruction of the thread on the filter's shank occurred for three test pairs and the corresponding destructive forces

No.	Designation	Destructive pressure [MPa]	Destructive force F [kN]
1	I	8.24	93 kN
2	II	8.24	93 kN
3	III	8.13	89 kN

Static pressure damaging the thread on the shank in each of the connections (tab. 3) is approximately eight times more than the maximum dynamic pressure during filter's operation. It is a high safety coefficient, and on such basis, it is estimated that in operational conditions, the probability of damaging the filter's thread showing wear rate similar to the objects that were tested is low. It results that for a thread's shear to occur, it has to show increased wear than the threads on the shanks that were tested. It should be taken into consideration that the test conducted in laboratory conditions does not cover factors occurring during engine's operation, which can have an impact on the issues under investigation such as, e.g. vibration and dynamic fuel flow through the filter.

2.4. Macroscopic tests of the thread's condition after the shearing test with the pressure method

Observations of the thread coils following pressure tests (fig. 7) revealed the existence of significant plastic deformations. They demonstrate areas of lateral scratches, which were formed due to the conducted test (sheared areas) and areas of circumferential scratches, which probably stem from the friction between the thread's coils on the shank and the sleeve during opening and closing of the filter (conducted during filter's operation). Dimension measurements of the threads from test pairs after rupture indicate that the threads were sheared at the height of 400 μm from the bottom of notches between threads. This height is similar to the value of the height of the shearing surface of the thread connection of shank to sleeve, which were estimated in meshing simulations. (fig. 4, 5 and 6). Measurement results of the width of the shearing surface are significantly higher (range 790 μm -870 μm^2) from the values predicted in simulations (range 520 μm -720 μm – fig. 4, 5 and 6). It is caused by the occurrence of plastic deformation of thread areas in the vicinity of the shearing surface, generated by the increased force.

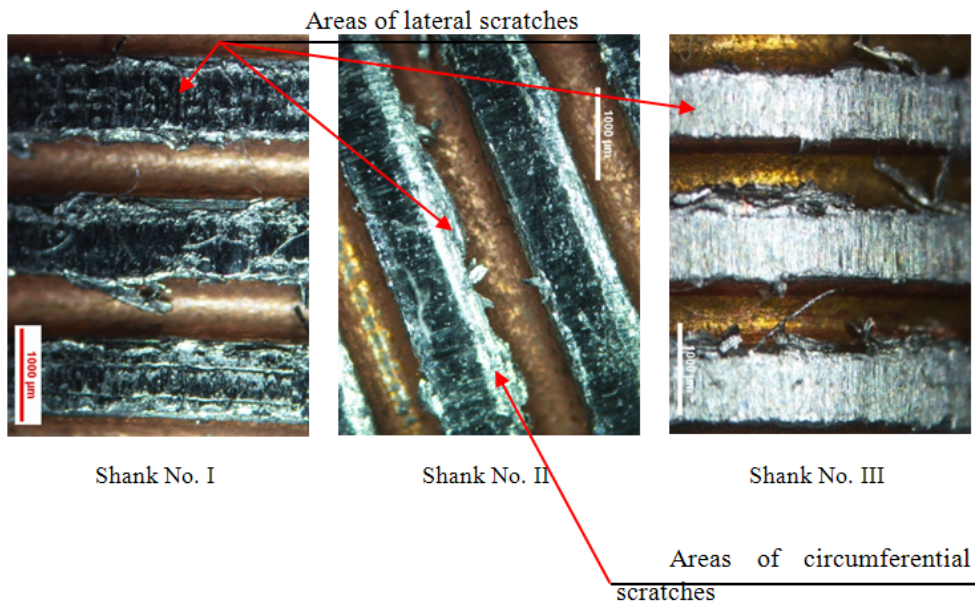


Fig. 7. The condition of the threads tested after the pressure test

Observation of thread's coil on the shank of the filter, which was broken (fig. 8) did not demonstrate the existence of significant plastic deformation. The surface of the thread's coils on this shank is also distinguished by areas of lateral and circumferential scratches.

² Report from tests, unpublished.

The surface of lateral scratches is, however much smaller than in the case of the analogous areas on shanks subjected to pressure tests. Moreover, these areas represent a variety of discontinuities (fig. 8), which indicates that in some fragments, of the thread's coils of the emergency filter, there was no shearing.

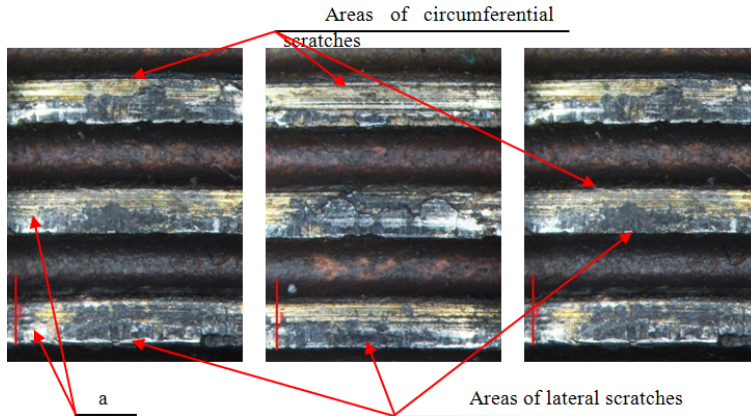


Fig. 8. The condition of the emergency filter shank's thread

The comparison of the condition of thread's coils on the shank from test pairs with the shank's thread from the broken filter can imply that in the second case, the thread underwent significant wear during operation. This wear decreased the surface area of coils in the shearing surface, leading to the decrease of the thread's shear strength. Due to this, it is assumed that the pressure needed to damage the thread on the shank in the emergency filter was smaller than in the case of the filters from test pairs.

3. Summary

Macroscopic observations and meshing simulations confirmed that the shank's thread in the fuel filter demonstrates significant wear, clearly greater than that of the threads on the sleeve with which they mate.

Shear strength tests under the impact of hydrostatic pressure have shown that the static pressure needed to destruct the decommissioned thread connection of shank to sleeve is approximately eight times more than the maximum pressure in the filter in operational conditions. It is believed that damaging the thread, which demonstrates wear similar to that noticed on threads of shanks that were tested, is not possible in operational conditions.

The comparison of thread conditions from the emergency filter's shank after the pressure test indicates that the decommissioned shanks were probably less worn by friction than the emergency shank. Differences in wear are associated with differences in the values of shear strength. Due to the pressure during the engine's operation, the verification of

possibilities regarding the thread's damage in a state similar to that of the emergency shank requires further research.

3.1. Future research directions

The suggested future direction of the research would be a simulation of the thread condition from the emergency filter, accomplished by conducting wear tests of the shank's thread by friction. The test would consist of a cyclic closing and opening the filter in such a way as to simulate tribological simulations, to which the thread connection of shank to sleeve is subjected during the filter's operation. The shank's thread would be subjected to macroscopic observation at the initial stage in order to monitor for wear after a specific number of cycles. Simulations performed under these conditions would be useful in estimating which wear rates of the filter would result in its destruction by the application of pressure that is similar to operational conditions.

4. Conclusions

1. The shank's thread from the fuel's filter undergoes abrasive wear during operation. It is significantly greater than the wear of the thread on the sleeve mating with the shank.
2. The threads of the investigated, decommissioned shanks were sheared during the pressure test due to the impact of static pressure, which was eight times more than the maximum permissible pressure in the installation of the filter.
3. The thread from the emergency filter's shank has been subjected to greater wear by friction during operation than the threads, which were subjected to a shearing test with the pressure method. Due to this, the pressure, which could result in the thread being destructed, would be lower than 8MPa.

5. References

1. Budinski K.: Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, vol. 151, iss. 2, 1991.
2. Boyer R.: An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering*, vol. 213, iss. 1-2, 1996.
3. Dobrzański L.: *Metalowe materiały inżynierskie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
4. Dongqing H., Shaoxian Z., Jibin P., Guangan Z., Litian H.: Improving tribological properties of titanium alloys by combining laser surface texturing and diamond-like carbon film. *Tribology International*, vol. 82, 2015.
5. Farokhzadeh K., Edrissy A.: Transition between mild and severe wear in titanium alloys. *Tribology International*, vol. 94, 2016.

6. Ivasishin O., Markovskii P.E., Mikulyak O.V., Panarin V.E.: Improving the wear resistance of titanium alloys under high contact loads. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 33, 1991.
7. Mały poradnik mechanika. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1988.
8. Yetim A.F., Yildiz F., Vangolu Y., Alasaran A., Celik A.: Several plasma diffusion processes for improving wear properties of Ti6Al4V alloy. *Wear*, vol. 267, iss. 12, 2009.
9. Qu J.: Friction and wear of titanium alloys sliding against metal ,polymer, and ceramic counterfaces. *Wear*, vol. 258, iss. 9, 2004.

BADANIE ZUŻYCIA TYTANOWEGO GWINTU LOTNICZEGO FILTRA PALIOWEGO

1. Wprowadzenie

W trakcie eksploatacji statku powietrznego doszło do awarii silnika lotniczego, w wyniku której uległ on zniszczeniu. Jedną z hipotez dotyczących przyczyn tego zdarzenia jest awaria filtra paliwa. Zgodnie z tą hipotezą filtr uległ rozszczelnieniu w wyniku ścięcia gwintu tytanowego trzonu, stanowiącego element konstrukcyjny filtra. Badania przeprowadzone na analogicznych filtrach wykazały znaczne zużycie gwintów trzonów, powstałe w wyniku ścierania [4]. Ocenia się, że to zużycie obniża wytrzymałość gwintu na ścinanie, co może doprowadzić do jego ścięcia w wyniku działania obciążeń skierowanych wzdłuż osi trzonu i w efekcie do katastroficznego zniszczenia filtra.

1.1. Cel pracy

Celem pracy była weryfikacja możliwości zniszczenia gwintu trzonu w wyniku ścięcia wywołanego siłami rozciągającymi trzon, które są efektem działania ciśnienia hydrostatycznego. W tym celu wykonano empiryczne próby ciśnieniowe polegające na wytworzeniu wewnątrz korpusu filtra ciśnienia hydrostatycznego (rys. 2), które doprowadziło gwint trzonu do ścięcia. Zbadano także makroskopowo stan gwintów trzonów oraz współpracujących z nimi tulejek przed oraz po przeprowadzonej próbie. W wyniku przeprowadzonych badań:

- zmierzono ciśnienie, które doprowadziło do ścięcia gwinty trzech trzonów wycofanych z eksploatacji;
- porównano stan gwintów trzonów po przeprowadzonych próbach ciśnieniowych z stanem gwintu trzonu z filtra awaryjnego celem oszacowania jego stanu zużycia przed awarią.

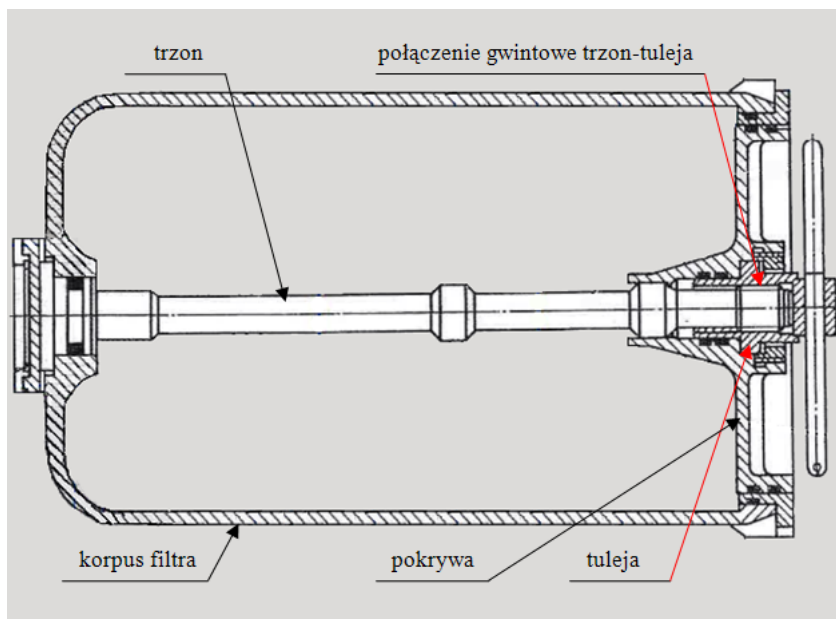
1.2. Element badany

Trzon filtra znajdującego się w instalacji paliwowej statku powietrznego jest wykonany z tytanu prętym z siedmiozwojowym gwintem znajdującym się w górnej części. Stop, z którego wykonany jest trzon został zidentyfikowany jako stop WT20

lub jego odpowiednik¹. W czasie pracy trzon połączony jest gwintem ze stalową tuleją, poprzez którą połączony jest z pokrywą filtra i poddawany rozciąganiu w wyniku działania na pokrywę ciśnienia hydrostatycznego (rys. 2). Zgodnie z danymi dostarczonymi przez producenta, maksymalne ciśnienie robocze w korpusie filtra wynosi w przybliżeniu 1 MPa. W czasie obsługi filtra, pokrywa filtra wraz z tuleją jest wykręcana, przez co gwint tulei oraz gwint trzonu poddawane są ścieraniu. Gwint wraz z górną częścią trzonu pokryty jest miedzianą powłoką galwaniczną, mającą na celu poprawę właściwości trybologicznych układu gwint trzonu – gwint tulei (rys. 1).



Rys. 1. Wycofany z eksploatacji trzon z filtra paliwa. Na gwincie widoczna powłoka galwaniczna, mająca poprawić własności trybologiczne



Rys. 2. Uproszczony schemat wnętrza badanego filtra. Znajdujące się w korpus paliwo wywiera ciśnienie hydrostatyczne na pokrywę, w wyniku czego na trzon działa siła rozciągająca

¹ Raport z badań, niepublikowany.

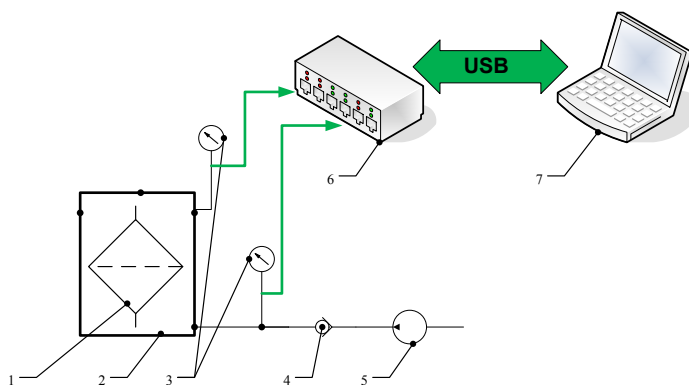
1.3. Materia

Tytan jest metalem lekkim, którego stopy stosowane są m.in. w wymagających aplikacjach w przemyśle lotniczym, takich jak elementy silników lotniczych lub płatowców samolotów naddźwiękowych. Zaletami stopów tytanu są: bardzo wysoka wytrzymałość właściwa, niska gęstość, wysoka odporność korozyjna oraz lepsze właściwości żaroodporne i żarowytrzymałe niż w przypadku kompozytów polimerowych lub stopów aluminium [2, 3]. Do wad tytanu i jego stopów zalicza się cenę wyższą niż cena stali i stopów aluminium, trudności w obróbce mechanicznej oraz niska odporność na zużycie ścierne [1, 9]. Niska wytrzymałość na ścieranie stopów tytanu spowodowana jest pękaniem naturalnej warstwy pasywnej pod wpływem obciążenia [5]. Poprawę właściwości ściernych stopów tytanu uzyskuje się poprzez zastosowanie warstw wierzchnich i powłok wykonywanych metodami inżynierii powierzchni [6, 8]. Stosuje się również nadawanie tekstury w celu poprawy smarowania układu trybologicznego [4].

2. Badania

2.1. Metodyka badawcza

Do przeprowadzenia ciśnieniowej próby ścięcia gwintu wykorzystano układ badawczy składający się z elementów filtra paliwa, pompy zadającej ciśnienie oraz układu pomiaru ciśnienia i akwizycji wyników. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 3. Mierzonym parametrem było ciśnienie wewnątrz filtra. Próby były rejestrowane z wykorzystaniem kamery cyfrowej.



Rys. 3. Schemat stanowiska do statycznego obciążenia przedmiotowego połączenia gwintowego w filtrze (1 - zespół filtrujący, 2 - korpus filtra, 3 - czujniki ciśnienia PWXG, 4 - zawór jednokierunkowy, 5 - hydrauliczna pompa ręczna UPTR12-16, 6 - translator sygnałów analogowych MT-8, 7 - komputer)

Badania stanu gwintów par trzon-tuleja przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ 800 nr 1015651. W ramach badań dokonano obserwacji powierzchni nitek gwintów przed i po próbie ciśnieniowej oraz obserwacji replik gwintów wykonanych z pomocą żywicy silikonowej. Badania te miały na celu ocenę kształtu gwintu, na podstawie którego można oszacować szerokość przekroju ścinanego. Wykorzystując obrazy z replik, przeprowadzono symulacje zazębienia gwintów par trzon-tuleja. Symulacje wykonano przy założeniu idealnie osiowego położenia tulei względem trzonu. Wyniki obserwacji powierzchni gwintu porównano ze stanem gwintu trzonu, którego ścięcie uważa się za przyczynę awarii statku powietrznego.

Przeprowadzono również pomiary średnicy zewnętrznej gwintu trzonu oraz średnicy wewnętrznej gwintu tulei z wykorzystaniem suwmiarki.

2.2. Badania makroskopowe gwintu przed próbą ciśnieniową

W tabelach 1 i 2 zaprezentowano wyniki pomiarów średnic gwintów par trzon-tuleja. Na potrzeby niniejszej pracy, pary oznaczone zostały jako I, II i III. Badany gwint został zidentyfikowany jako gwint M14x1,5.

Tabela 1

Średnica zewnętrzna gwintów trzonów z filtra paliwa

Lp.	Oznaczenie trzonu wycofanego z eksploatacji	Średnica zewnętrzna gwintu trzonu [mm]	Średnia [mm]	Wartość nominalna [mm] [7]
1	I	13,72	13,70	14,0
2		13,72		
3		13,66		
4	II	13,58	13,57	
5		13,58		
6		13,56		
7	III	13,60	13,59	
8		13,60		
9		13,57		

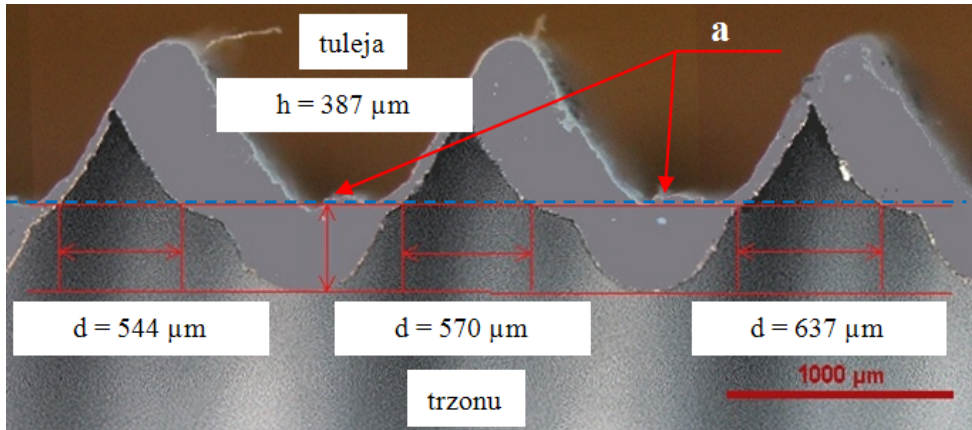
Tabela 2

Średnica wewnętrzna gwintów tulejek z filtra paliwa

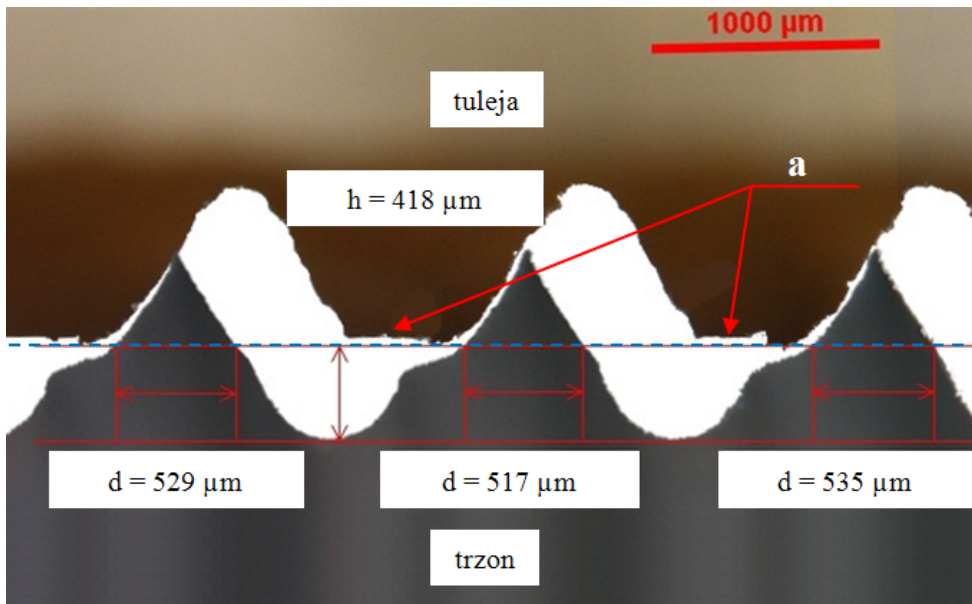
Lp.	Oznaczenie tulei odpowiadającej trzonowi wycofanemu z eksploatacji	Średnica wewnętrzna gwintu tulei [mm]	Średnia [mm]	Wartość nominalna [mm] [7]
1	I	12,67	12,66	12,376
2		12,64		
3		12,67		
4	II	12,69	12,67	
5		12,65		
6		12,66		
7	III	12,67	12,66	
8		12,65		
9		12,67		

Wyniki pomiarów zarówno w przypadku tulejek, jak i trzonów zauważalnie różnią się od wartości nominalnej. Warto jednak zwrócić uwagę na większą jednorodność średnich wartości średnic wewnętrznych w przypadku tulejek.

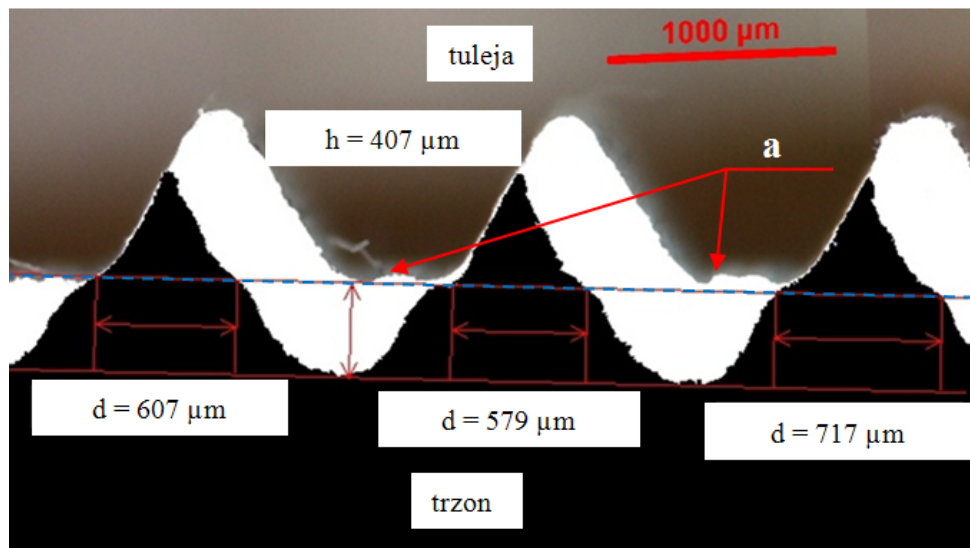
Kształty nitek gwintów par trzon-tuleja przedstawione zostały na poniższych rysunkach (rys. 4, 5 i 6). We wszystkich trzech przypadkach widoczna jest wyraźna deformacja nitki gwintu trzonu w postaci zwężenia górnej części nitki. Zwężenie to może być silnie asymetryczne, tak jak w przypadku gwintu z trzonu nr II. Zmiana kształtu nitki, zmniejszająca pole powierzchni nitki w przewidywanej płaszczyźnie ścinania (przerywana, niebieska linia na rys. 4, 5 i 6), skutkuje obniżeniem wytrzymałości na ścinanie. Odległość przewidywanej płaszczyzny ścinania od dna wrębów nitki gwintu dla trzonów nr I, II i III wynosi odpowiednio 387 μm , 418 μm i 407 μm . Wyznaczone szerokości przewidywanej płaszczyzny ścinania dla trzech nitek gwintu zostały dla każdego trzonu zaznaczone na rysunkach (wymiar d na rys. 4, 5 i 6). Deformacja nitki gwintu tulei jest wyraźnie mniejsza. Zauważalna jest bruzda występująca na środku górnej powierzchni nitki gwintu („a” na rys. 4, 5 i 6), która może być efektem procesu wytwarzania lub nacisków eksploatacyjnych na roboczą powierzchnię gwintu. Zweryfikowanie tej hipotezy nie jest możliwe ze względu na brak możliwości zbadania tulei w stanie nieużywanym.



Rys. 4. Symulacja zazębienia dla trzonu nr I i współpracującej z nim tulei



Rys. 5. Symulacja zazębienia dla trzonu nr II i odpowiadającej mu tulei



Rys. 6. Symulacja ząbienia dla trzonu nr III i odpowiadającej mu tulei

2.3. Badania wytrzymałości na ścinanie metodą ciśnieniową

Przebieg prób ciśnieniowych przedstawiał się następująco:

- Trzon I poddano próbie, w trakcie której osiągnięto wewnątrz filtra ciśnienie 7,0 MPa i przemieszczenie pokrywy filtra względem jego górnej krawędzi o 2 mm. Próba została przerwana, a gwint nie uległ ścięciu i filtr nie uległ rozszczelnieniu;
- Trzon I poddano ponownej próbie, w trakcie której gwint trzonu uległ ścięciu przy ciśnieniu 8,24 MPa, co skutkowało rozszczelnieniem filtra;
- Trzon II poddano próbie, w trakcie której gwint trzonu uległ ścięciu przy ciśnieniu 8,24 MPa, co skutkowało rozszczelnieniem filtra;
- Trzon III poddano próbie, w trakcie której gwint trzonu uległ ścięciu przy ciśnieniu 8,13 MPa, co skutkowało rozszczelnieniem filtra.

Na podstawie pomiarów ciśnienia wyznaczono odpowiadające im siły niszczące gwint na podstawie zależności:

$$F = p * A$$

gdzie:

F - siła niszcząca gwint [N]

p - ciśnienie wewnątrz filtra, przy którym nastąpiło ścięcie gwintu [MPa]

A - pole powierzchni pokrywy korpusu filtra [mm²]

Wyznaczona w ten sposób siła uwzględnia nie tylko wytrzymałość gwintu na ścinanie, ale także inne opory ruchu przeciwdziałające otwarciu filtra, takie jak opór uszczelek.

Tabela 3

Ciśnienia, przy których doszło do zniszczenia gwintu trzonu filtra dla trzech par obiektów badawczych oraz odpowiadające im siły niszczące

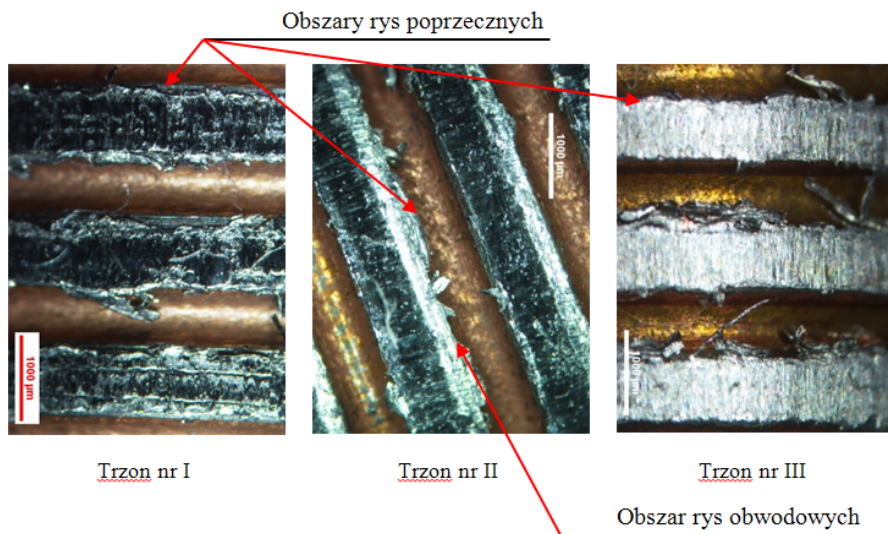
Lp.	Oznaczenie pary	Ciśnienie niszczące [MPa]	Siła niszcząca F [kN]
1	I	8,24	93 kN
2	II	8,24	93 kN
3	III	8,13	89 kN

Ciśnienie statyczne niszczące gwint trzonu w każdej z par (tab. 3) jest około 8-krotnie wyższe niż maksymalne ciśnienie dynamiczne występujące w trakcie pracy filtra. Stanowi to wysoki współczynnik bezpieczeństwa i na tej podstawie ocenia się, że w warunkach eksploatacyjnych prawdopodobieństwo zniszczenia gwintu filtra wykazującego stopień zużycia zbliżony do obiektów badań jest niskie. Wynika z tego, że aby nastąpiło ścięcie gwintu, musi on wykazywać większe zużycie niż gwinty na trzonach badanych. Należy jednak pamiętać, iż przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych próba nie uwzględnia czynników występujących podczas pracy silnika, które mogą mieć wpływ na badane zjawisko, takich jak np. drgania oraz dynamiczny przepływ paliwa przez filtr.

2.4. Badania makroskopowe stanu gwintu po próbie ścinania metodą ciśnieniową

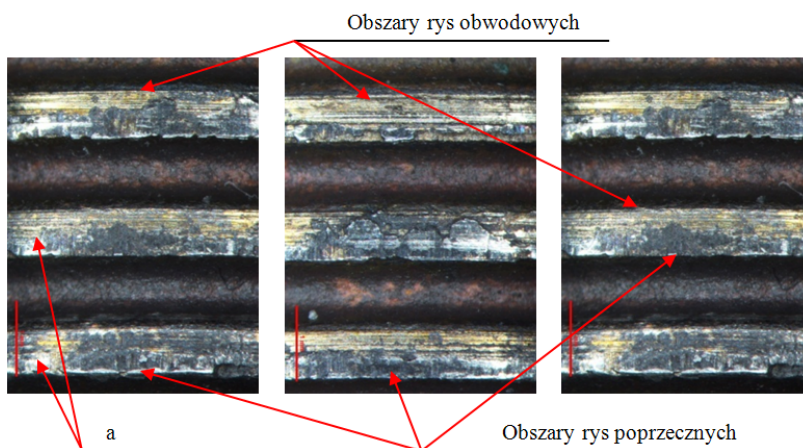
Observacje nitki gwintów po próbach ciśnieniowych (rys. 7) wykazały występowanie znacznych odkształceń plastycznych. Widoczne są na nich obszary rys poprzecznych, powstałych w wyniku przeprowadzonej próby (obszary ścięte), oraz obszary rys obwodowych, które prawdopodobnie są skutkiem tarcia pomiędzy nitkami gwintów trzonu i tulei w czasie zamykania i otwierania filtra (przeprowadzanych w trakcie eksploatacji filtra). Pomiar średnic gwintów trzonów z par badawczych po zerwaniu wskazują, że gwinty uległy ścięciu na wysokości około 400 μm od dna wrębów pomiędzy gwintami. Wysokość ta jest zbliżona do wartości wysokości płaszczyzny ścięcia oszacowanych w symulacjach zazębienia gwintów par trzon-tuleja (rys. 4, 5 i 6). Wyniki pomiarów szerokości płaszczyzny ścinania są jednak wyraźnie wyższe (przedział 790 μm – 870 μm^2) od wartości przewidzianych w symulacjach (przedział 520 μm – 720 μm – rys. 4, 5 i 6). Jest to spowodowane wystąpieniem odkształcenia plastycznego obszarów gwintu w pobliżu płaszczyzny ścinania, wywołanego działaniem znacznej siły.

² Raport z badań, niepublikowany.



Rys. 7. Stan powierzchni gwintów trzonów badanych po próbie ciśnieniowej

Obserwacja nitki gwintu trzonu z filtra, który uległ awarii (rys. 8) nie wykazała obecności znacznych odkształceń plastycznych. Na powierzchni nitki gwintu tego trzonu również występują obszary rys poprzecznych oraz obszary rys obwodowych. Powierzchnia obszarów rys poprzecznych jest jednak znacznie mniejsza, niż w przypadku analogicznych obszarów z trzonów poddanych próbom ciśnieniowym. Ponadto w obszarach tych występują nieciągłości (a na rys. 8), co wskazuje, że w niektórych fragmentach nitki gwintu filtra awaryjnego nie doszło do ścinania.



Rys. 8. Stan gwintu trzonu z filtra awaryjnego

Porównanie stanu nitek gwintów trzonów z par badanych z gwintem trzonu z filtra, który uległ awarii może wskazywać, iż w drugim z wymienionych przypadków gwint uległ w trakcie eksploatacji znacznie większemu zużyciu. Zużycie to zmniejszało pole przekroju nitek w płaszczyźnie ścinania, przez co obniżając wytrzymałość gwintu na ścinanie. Z tego względu ocenia się, że ciśnienie potrzebne do zniszczenia gwintu trzonu w filtrze awaryjnym było mniejsze, niż w przypadku filtrów z par badawczych.

3. Podsumowanie

Obserwacje makroskopowe oraz wykonane symulacje zazębienia potwierdziły, że gwinty trzonów w filtrze paliwa wykazują znaczne zużycie, wyraźnie większe od zużycia gwintów tulejek, z którymi współpracują.

Próby wytrzymałości na ścinanie pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego wykazały, że ciśnienie statyczne potrzebne do zniszczenia połączenia gwintowanego wycofanych z eksploatacji trzonów z tulejami jest około 8-krotnie wyższe, niż maksymalne ciśnienie w filtrze w warunkach eksploatacyjnych. Uznaje się, że zniszczenie gwintu wykazującego zużycie podobne do gwintów trzonów badanych nie jest możliwe w warunkach eksploatacyjnych.

Porównanie stanu gwintu z trzonu filtra awaryjnego oraz stanu gwintów trzonów po próbie ciśnieniowej wskazuje, iż trzony wycofane z eksploatacji były prawdopodobnie mniej zużyte przez tarcie, niż trzon awaryjny. Różnice w zużyciu przekładają się na różnice w wartościach wytrzymałości na ścinanie. Weryfikacja możliwości zniszczenia gwintu trzonu w stanie zbliżonym do trzonu awaryjnego w wyniku działania ciśnienia w czasie pracy silnika wymaga dalszych badań.

3.1. Dalsze kierunki badań

Proponowanym dalszym kierunkiem badań byłoby zasymulowanie stanu gwintu z filtra awaryjnego poprzez przeprowadzenie prób zużycia gwintu trzonu przez tarcie. Próba polegałaby na cyklicznym zamykaniu i otwieraniu filtra w taki sposób, aby zasymulować obciążenia trybologiczne, jakim poddawane jest połączenie trzonu z tuleją w trakcie eksploatacji filtra. Gwint trzonu poddany byłby obserwacji makroskopowej w stanie wyjściowym oraz po wykonaniu określonej liczby cykli celem monitorowania zużycia. Symulacje wykonane na podstawie tych obserwacji umożliwiłyby oszacowanie, jaki poziom zużycia filtra umożliwi jego zniszczenie poprzez działanie ciśnienia zbliżonego do warunków eksploatacyjnych.

4. Wnioski

1. Gwint trzonu z filtra paliwa ulega zużyciu ściernemu w czasie eksploatacji. Jest ono wyraźnie większe, niż zużycie gwintu tulei współpracującej z trzonem.
2. Gwinty przebadanych trzonów wycofanych z użycia uległy ścięciu podczas próby ciśnieniowej w wyniku działania około 8-krotnie wyższego ciśnienia statycznego, niż maksymalne dopuszczalne ciśnienie w instalacji filtrze.
3. Gwint trzonu z filtru awaryjnego uległ większemu zużyciu przez tarcie w czasie eksploatacji, niż gwinty poddane badaniu ścinania metodą ciśnieniową. Z tego względu ciśnienie, które mogło doprowadzić do jego zniszczenia byłoby niższe niż 8 MPa.

5. Literatura

1. Budinski K.: Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, vol. 151, iss. 2, 1991.
2. Boyer R.: An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering*, vol. 213, iss. 1-2, 1996.
3. Dobrzański L.: *Metalowe materiały inżynierskie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
4. Dongqing H., Shaoxian Z., Jibin P., Guangan Z., Litian H.: Improving tribological properties of titanium alloys by combining laser surface texturing and diamond-like carbon film. *Tribology International*, vol. 82, 2015.
5. Farokhzadeh K., Edrisy A.: Transition between mild and severe wear in titanium alloys. *Tribology International*, vol. 94, 2016.
6. Ivasishin O., Markovskii P.E., Mikulyak O.V., Panarin V.E.: Improving the wear resistance of titanium alloys under high contact loads. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 33, 1991.
7. *Mały poradnik mechanika*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1988.
8. Yetim A.F., Yildiz F., Vangoğlu Y., Alsaran A., Celik A.: Several plasma diffusion processes for improving wear properties of Ti6Al4V alloy. *Wear*, vol. 267, iss. 12, 2009.
9. Qu J.: Friction and wear of titanium alloys sliding against metal, polymer, and ceramic counterfaces. *Wear*, vol. 258, iss. 9, 2004.

