

ROZPOZNAWANIE USZKODZEŃ W CZĘŚCI PRZEPEŁYWOWEJ OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO NA PODSTAWIE WYNIKÓW BADANIA ENDOSKOPOWEGO

FAILURES' RECOGNISING WITHIN THE PASSAGES OF A MARINE GAS TURBINE ENGINE ON THE BASIS OF RESULTS OF ENDOSCOPIC INVESTIGATION

W artykule podejmowane są wybrane zagadnienia diagnostyczne z zakresu endoskopii okrętowych turbinowych silników spalinowych. Zaprezentowane zostały podstawowe informacje o eksploatacyjnych uszkodzeniach części przepływowej, a także dostępne metody i środki realizacji badań endoskopowych umożliwiające ich lokalizację i identyfikację. Przedstawiono podstawowe założenia metodyczne realizacji badań diagnostycznych, a także reprezentatywne wyniki badań własnych autora prowadzonych głównie (ale nie tylko) na silnikach turbinowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, badanie endoskopowe, okrętowy turbinowy silnik spalinowy, część przepływowa.

The paper deals with diagnostic issues concerning endoscopic examinations of marine gas turbine engines. There will be presented selected information about failures within the passages and accessible endoscopic methods and means enabling their detection. The author focuses on the endoscopic techniques and widely presents the possibilities of this quickly developed diagnostic method. There will be also presented representative results of diagnostic examinations carried out on gas turbine engines operated in the Polish Navy (not only but mainly).

Keywords: technical diagnostics, endoscopic investigation, marine gas turbine engine, passages.

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilku lat można zaobserwować bardzo szybki rozwój konstrukcji i technologii wytwarzania okrętowych turbinowych silników spalinowych, pozwalający osiągnąć wysokie wskaźniki ich trwałości międzynaprawczej i niezawodności eksploatacyjnej, przy znacznym ograniczeniu niezbędnych czynności obsługowych. Coraz częściej wprowadzane są do eksploatacji systemy organizacji obsługi profilaktycznych według potrzeb, wynikających z aktualnego stanu technicznego silnika. Narzucają one konieczność poszukiwania jakościowo nowych, skutecznych metod diagnostycznych [1, 2, 5]. Na ich podstawie wyznacza się parametry diagnostyczne, które w miarę postępowania procesów zużywania się elementów silnika zmieniają swoje wartości. Odniesienie tych zmian do wartości początkowych i uwzględnienie zgromadzonych informacji o uszkodzeniach spotykanych w procesie użytkowania pozwala na przeprowadzenie wnioskowania diagnostycznego. Efektem finalnym jest diagnoza o stanie technicznym, jako punkt wyjściowy procesu prognozowania czasu poprawnej pracy silnika, dla podjęcia racjonalnych decyzji eksploatacyjnych odnośnie zakresu i terminu realizacji obsługi profilaktycznych. Możliwe staje się organizowanie systemu eksploatacji silników, objętych nadzorem diagnostycznym, według ich aktualnego stanu technicznego. Niezbędnym warunkiem realizacji tak sformułowanego zadania diagnostycznego jest posiadanie obszernej bazy danych o uszkodzeniach eksploatacyjnych oraz wielosymptomowego systemu diagnostycznego [2, 6, 7].

1. Introduction

For the last several years there has been observed a very fast development within the construction and production technology of marine gas turbine engines permitting the users to reach the high coefficients of the overhaul durability and operational reliability, at considerable limitation of necessary routine maintenance. The systems of organisation of preventive servicing according to needs, resulting from the engine's current technical state are more and more often introduced into operation. They enforce the necessity of searching the qualitatively new and effective diagnostic methods [1, 2, 5]. Diagnostic parameters are determined on the basis of implemented methods. The parameters alter their values while the wear and rear processes advance. By the referring these alterations to the initial values and the regarding gathered information about failures happened in the usage process enables the operator to carry out the diagnostic inference. The diagnosis about technical state represents the final effect, as a starting point of technological forecasting in term of the time of an engine's correct running and consequently, gives the possibility of undertaking the rational operation decisions regarding the range and deadline of the preventive servicing realisation. Finally, there is also possible to organize the operation system of the engines falling under the diagnostic supervision, according to their current technical state. A possessing the sufficiently rich data base of operational failures as well as multi-symptom diagnostic system stands for the indispensable condition of the realization of such a way formulated diagnostic task [2, 6, 7].

2. Problem badawczy

Warunki eksploatacji i ograniczona podatność kontrolna turbinowego silnika spalinowego zabudowanego w siłowni okrętowej narzucają ograniczenia w realizacji niezbędnych pomiarów parametrów pracy. W wielu przypadkach dysfunkcji silnika, dla postawienia wiarygodnej diagnozy, konieczne jest zastosowanie skomplikowanych i bardzo kosztownych technik pomiarowych, po które sięga się zazwyczaj jedynie podczas badań na hamowni. W takiej sytuacji, podejrzewając, że zakłócenia funkcjonowania silnika są konsekwencją pogarszającego się stanu technicznego części przepływowej, jako najbardziej niewralgicznego modułu konstrukcyjnego silnika okrętowego, pierwszorzędne znaczenie nabiera badanie endoskopowe stanowiące podstawową, najbardziej skuteczną, a zarazem najprostszą metodę diagnostyki eksploatacyjnej.

Silniki turbinowe charakteryzują dodatkowo znaczne inercyjności realizowanych procesów ciepło-przepływowych, przy masowym natężeniu przepływu gazu w części przepływowej przekraczającym $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (w silnikach stosowanych w lotnictwie pasażerskim parametr ten może osiągać wartości $600\div 800 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, a w przyszłości nawet $1200 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) [4]. Z tego względu drobne defekty powierzchniowe nie generują zauważalnych zmian obserwowanych parametrów stanu czynnika termodynamicznego. Jednak niewykryte w porę rozwijają się, stając się przyczyną powstawania uszkodzeń elementów części przepływowej, zagrażających niezawodności silnika.

Trudności rozpoznawania uszkodzeń w części przepływowej turbinowego silnika spalinowego na podstawie zmian mierzonych parametrów termodynamicznych, charakteryzujących stan energetyczny przepływającego czynnika roboczego, związane są również z właściwą interpretacją symptomów powstałego defektu, które często identyfikowane są jako symptomy nieuniknionych i ciągłych procesów zanieczyszczenia, starzenia i zużycia silnika, zdeterminowanych czasem jego eksploatacji. Zewnętrzne objawy w takich stanach są zazwyczaj zbieżne i trudne do jednoznacznego określenia. Szczególnym przypadkiem może być tutaj problem, jaki stanowi analiza parametrów diagnostycznych dla oceny intensywności zanieczyszczenia kanałów przepływowych zespołów wirnikowych, a także efektywności ich mycia. Klasycznym wręcz przykładem błędnej interpretacji symptomów diagnostycznych jest rozróżnienie stanu eksploatacyjnego zanieczyszczenia części przepływowej, jako ciągłego procesu towarzyszącego pracy silnika w warunkach morskich, od stanu jego niezdatności, spowodowanej na przykład nadpaleniem wierzchołków łopatek wirnikowych turbiny. Do sytuacji takiej może dojść wskutek nieprzeprowadzonego w porę lub przeprowadzonego nieskutecznie mycia części przepływowej, które między innymi poprawia efektywność chłodzenia łopatek - rys. 1.

Innym przykładem błędnego wnioskowania diagnostycznego może być ocena stanu technicznego silnika na podstawie rozkładu strumienia entalpii na długości części przepływowej i równomierności pola temperatury spalin wylotowych na obwodzie przekroju kontrolnego za wytwornicą spalin. Często poślizg prędkości obrotowej zespołów wirnikowych silnika i wskaźnik nierównomierności obwodowego rozkładu temperatury spalin zmieniają się tylko nieznacznie, a w wyniku defektu wtryskiwacza przepaleniu ulega rura ogniowa komory spalania rys. 2.

Jednak szczególnie groźne dla jego niezawodności jest zmęczenie cieplne elementów konstrukcyjnych komory spalania i turbin, jako konsekwencje realizowanych procesów niustalo-

2. The research problem

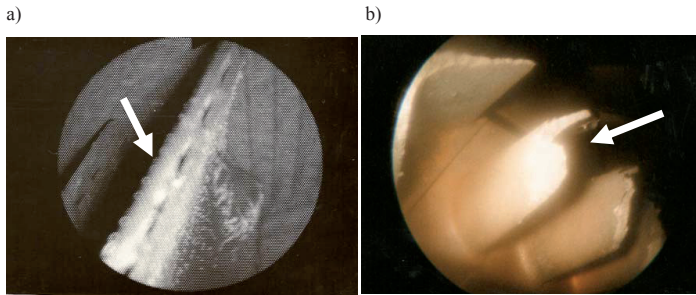
The operation conditions and limited supervisory susceptibility of a gas turbine engine installed inside the marine power plant impose some restrictions in the realization of indispensable measurements of the engine's working parameters. In many cases of the engine's malfunction there is often necessary to apply very complex and expensive measurement techniques which are usually used only during engine's investigations on a manufacturer's test bed. In such a situation, suspecting, that the disturbances of the engine functioning are a consequence of the deteriorated technical state of the flow paths, as the most vulnerable constructional module of the marine engine, the endoscopic examination gets the first-rank method among diagnostic means. It represents the most effective and also the simplest method of an operational diagnostics. Gas turbine engines are additionally characterized with the considerable inertia of the worked out thermal-flow processes, at mass flow rate of the working medium through the passages exceeding $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (as far as the engines' application in passenger aviation is concerned this parameter can achieve value of $600\div 800 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, and even $1200 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ in the nearly future) [4].

Hence, small surface defects do not generate perceptible alterations of the values of observed state parameters of thermodynamical medium. However while the defects did not detect in due time they would develop, becoming the reason of the flow parts failures, which are dangerous for the engine's reliability.

The difficulties of recognizing damages in flow paths of gas turbine engine on the basis of changes of measured thermodynamical parameters, characterizing the energetic of flowing working medium, are also tightly connected with a proper interpretation of symptoms of the formed defect. Appeared defects are often identified as the symptoms of unavoidable and continual engine's natural ageing, fouling and wear processes, which are determined with its operation time. External symptoms, in such states, are usually coincides and difficult to univocal qualification. For instance, the analysis of diagnostic parameters for creating an opinion about the foulness intensity within the passages of the rotor units and also the efficiency of their washing can represent the very peculiar problem. There is a classic example of the incorrect interpretation of diagnostic symptoms: how to differ the operational fouling in flow gas paths, as the continuous process always associated with the engine's operation in the sea environment, from its unserviceability state caused (for example) by the burning rotor blades tips of a turbine. Such a situation might appear while the washing procedure is not carried out in due time or this procedure is conducted ineffectively what does have to improve the efficiency of the blades' cooling - fig. 1.

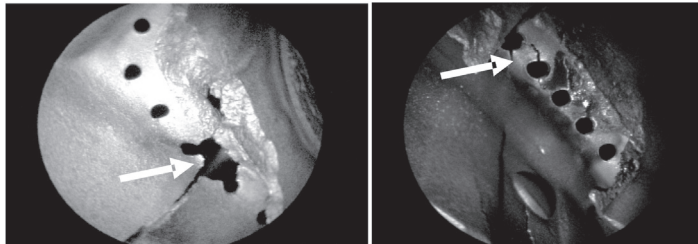
There could be mentioned an another example of the incorrect diagnostic inference: the engine's technical state evaluation on the basis of a distribution of the working medium enthalpy flux in a characteristic control intersection of the engine flow passage as well as an irregularity of the exhaust temperature field in the control intersection behind the gas generation. Often, a slide of the rotational speed of the engine's rotor units as well as the coefficient of an inequality of the circumferential temperature distribution alter their values only slightly, but the flame tube is burned due to the fuel injector's failure - fig. 2.

For example, during starting an engine up, combustion chamber constructional elements are a subject to dynamic thermal loads in a period of several seconds at transient temperature increases within the scope of $80\text{-}90 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. In case of exceeding



Rys. 1. Wirnik turbiny wysokiego ciśnienia: a) osady zanieczyszczeń w rejonie otworów wylotowych powietrza chłodzącego na krawędzi spływu łopatki wirnikowej, b) nadpalone wierzchołki łopatek wirnikowych turbiny

Fig. 1. High pressure turbine's rotor: a) fouling deposits in the vicinity of the cooling air outlet holes on the trailing edge of the rotor blade, b) burned tips of the turbine's rotor blades



Rys. 2. Perforacja i pęknięcia rury ogniowej w wyniku zakłóceń pracy wtryskiwacza

Fig. 2. Perforation and cracks of the flame tube as the consequence of the fuel injector's malfunction

nych – rozruchu, zmiany obciążenia (akceleracje i deceleracje) oraz wyłączenia silnika z ruchu. Przykładowo, podczas rozruchu silnika, w przeciągu kilku sekund elementy konstrukcyjne komory spalania poddawane są dynamicznym obciążeniom cieplnym, z chwilowymi przyrostami temperatury spalin rzędu $80-90\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości gradientów temperatury, może dojść do zjawiska pompażu w sprężarce lub całym silniku, a nawet zjawiska pełzania materiału konstrukcyjnego i deformacji łopatek turbinowych – rys. 7a. W skrajnym przypadku może nastąpić nadpalenie krawędzi i wierzchołków łopatek turbiny wysokiego ciśnienia – rys. 1b. Z kolei przy natychmiastowym wyłączeniu silnika, pracującego na zakresie nominalnym (lub bliskim nominalnemu), z pominięciem etapu chłodzenia na biegu jałowym, może nastąpić zakleszczenie wirnika w kadłubie turbiny – rys. 7b. Skutkuje to zazwyczaj intensywnym zużyciem ściernym uszczelnienia kadłubowego typu „plaster miodu” (rys. 7c), co w konsekwencji prowadzi do znacznego powiększenia luzów wierzchołkowych łopatek wirnikowych turbiny i spadku jej sprawności, nawet do 10% [5]. Ma to swoje przełożenie na osiągi i sprawność całego silnika, gdyż w wyniku powiększonego luzu promieniowego turbiny wysokiego ciśnienia zmianie ulega charakter rozdziału dysponowanego spadku entalpii na kolejne stopnie turbiny. Największy spadek mocy występuje na ostatnich stopniach tj. na turbinie napędowej silnika [1, 3].

Przytoczone przykłady, pomijając ich destrukcyjne, natychmiastowe skutki dla niezawodności silnika, mają również wtórne konsekwencje dla jego trwałości. Przy każdej zmianie obciążenia następują deformacje i zmiany naprężenia cieplnego elementów konstrukcyjnych silnika. W podwyższonych temperaturach przekraczają one granicę sprężystości materiału i powodują plastyczne odkształcenia – zginięcie i rozciąganie – przy każdym cyklu podgrzewania i stygnięcia materiału. Okazuje się, że nawet po niewielkiej liczbie takich cykli nastąpić może powierzchniowe pęknięcie materiału odkształconych elementów, które rozwijając się w głąb ich struktury doprowadzić może do bardzo groźnego w skutkach wyłamania fragmentu konstrukcyjnego. Jest to szczególnie niebezpieczny defekt w przypadku rur ogniowych komory spalania, gdzie może dojść do niekontrolowanego roz-

admissible values of the temperature gradients the surge phenomenon in the compressor or in the whole engine and even the creep and deformations of the blades' constructional material may occur - fig. 7a. In the extreme situation blades' tips and edges overburning of the high pressure turbine can happen - fig. 1b. Then, during immediate engine's lay-out, while the engine is running at the range of nominal load (or close to the nominal load), along with the omitted cooling range at the idle the seizure of the rotor in a turbine frame may occur - fig. 7b. As the result an intensive abrasive waste of a frame seal of the "slice of honey" type (fig. 7c) may happen, which in consequence leads to the considerable increase of tip clearances of the rotor blades and to the fall of turbine's efficiency, even up to 10% [5]. It has got relocation into the whole engine's performance and efficiency, because the enlarged radial clearance of the high pressure turbine leads to alterations of the disposed enthalpy drop on the successive turbine steps. The largest power drop appears on the last steps i.e. on the engine's power turbine [1, 3].

The quoted examples, not taking into consideration their destructive, immediate consequences on the engine's reliability, have also got the secondary consequences for its durability (service life). The deformations and alterations of thermal stresses of the engine's constructional elements are tightly connected with the every load alteration being worked out. In the raised temperatures, they exceed a border of the material yield point and cause plastic deformations - crumpling and expansion - at the every cycle of heating up and cooling down the material. It turns out, that even after small number of such cycles the surface material cracks of deformed elements can happen. The cracks developing far inside the structure might drive to very dangerous, in results, breaking the constructional fragment off. It is the particularly dangerous defect in case of flame tubes of the combustion chamber where an uncontrolled flames spreading beyond the engine might happen which usually leads to the catastrophe - fig. 7d.

By having disposed a low-cycle fatigue characteristic of the constructional material, the boundary cycles' number at which surface cracks appear can be evaluated in terms of material working temperature and deformations' dimensions (the individual amplitude) ε which appear at one cycle warming up- cooling down - fig. 3.

przestrzeniania się płomieni poza silnik, które zazwyczaj prowadzi do katastrofy – rys. 7d.

Dysponując charakterystyką zmęczenia niskocyklowego materiału konstrukcyjnego, można w prosty sposób określić graniczną liczbę cykli, przy której pojawiają się pęknięcia powierzchniowe, w zależności od temperatury pracy materiału i rozmiarów odkształcenia (pojedynczej amplitudy) ε , występującego przy jednym cyklu nagrzewania–stygnięcia – rys.3.

Z danych liczbowych na charakterystyce zmęczeniowej można wyciągnąć wniosek, że jeżeli silnik w okresie swojej trwałości, którą przykładowo dla silnika Zorya typu UGT3000 określa się na 12 lat i 4 tysiące godzin pracy, ma być uruchamiany 2÷3 tysiące razy, to jednostronne odkształcenia materiału (lokalne odkształcenia występujące na krótkim odcinku), przy każdorazowym rozruchu nie powinny przekraczać 0,2÷0,3 % [5]. Koncentracja naprężeń występująca w miejscach znacznych zmian krzywizn powierzchni zewnętrznych, ograniczających element konstrukcyjny (w karbach), sprzyja większym lokalnym odkształceniom i powstawaniu pęknięć zmęczeniowych. Dlatego powstają one głównie w podtoczeniach tarcz nośnych wirników, w miejscach największych uskoków średnicy, w pobliżu otworów i szczelin rur ogniowych komory spalania oraz w sąsiedztwie znacznych zmian profilowanych przekrojów powłokowych kadłubów wewnętrznych – rys. 7e.

Przedstawione przykłady dowodzą, że każdorazowo (jeśli pozwalają na to warunki techniczne), po stwierdzeniu deformacji charakterystyk gazodynamicznych silnika, w celu ostatecznej weryfikacji postawionej diagnozy, przeprowadzić należy przegląd endoskopowy części przepływowej. Bezpośredni ogląd zewnętrzny elementów konstrukcyjnych maszyn jest najstarszym sposobem wykrycia uszkodzeń i oceny ich zużycia, co jednak wymaga dostatecznego dostępu wzrokowego. Nie jest to możliwe w odniesieniu do części, znajdujących się w kanale przepływowym silnika turbinowego, bez jego wyłączenia z ruchu i częściowym demontażu. Początkowe stosowanie systemu periskopowego, jeszcze na przełomie lat 70 i 80, szybko zastąpiono systemami światłowodowymi nazywanymi endoskopami [5, 6].

3. Metodyka badań

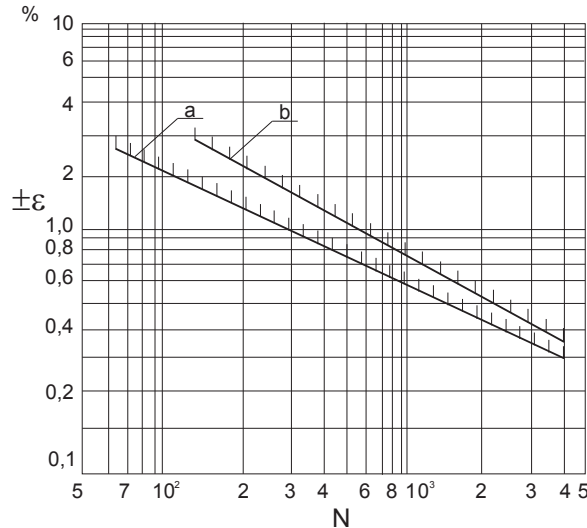
Wieloletnie, systematyczne badania endoskopowe, prowadzone przez autora w ramach okresowych usług profilaktycznych okrętowych turbinowych silników spalinowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej RP, wykazały dużą skuteczność metody, przy stosunkowo prostej obsłudze stosowanej aparatury badawczej. Ze względu na zróżnicowane formy konstrukcyjne stosowanych silników turbinowych (rosyjskich – typu DE59,

A very important conclusion can be drawn out from numerical data of the fatigue characteristics. If the engine is in its service life, which for the engine Zorya UGT3000 type defines on 12 years and 4 thousands of working hours (for example), and the engine is to be started up 2÷3 thousand times, then the one-sided material deformations (the local deformation appearing out on the short section), at each one start-up process, should not exceed 0,2 ÷ 0,3 % [5].

The stress concentration occurring in the places of considerable curvatures' alterations of the external surfaces, which enclose the constructional element (in dents), favours the larger local deformations and the formation of fatigue cracks.

Therefore they come into existence mainly in the necks of bearing rotors' disks, in the places of the largest diameter dodges, in vicinity of the openings and crevasse of the flame tubes of a combustion chamber as well as in the vicinity of considerable alterations of the formed coating sections of the internal frames - fig. 7e.

The introduced examples prove, that each time (if technical conditions permit) after a statement of the fact that the engine's gasdynamical characteristics are deformed, in order to ultimately verify the formulated diagnosis, the endoscopic investigations of the passages should by carried out. The direct external inspection of constructional machines' elements represents the oldest way of damages' detection and evaluation of their wear and tear, what however requires the sufficient visual access. This is not possible in reference to the parts being inside the turbine engine flow paths, without its disconnection of movement and the partial disassembly. The initial applying periscopical systems, (even on the turn of the 70 and 80 -ties of the past century) were exchanged into optical (fibers) systems [5, 6].



Rys. 3. Charakterystyka zmęczenia niskocyklowego: ε – odkształcenie (pojedyncza amplituda), N – liczba cykli (nagrzewania i stygnięcia), a, b – granica zmęczenia (nakerślono dla różnych materiałów)

Fig. 3. Low-cycle fatigue characteristic: ε – deformation (individual amplitude), N – cycles' number (warming up – cooling down), a, b – fatigue border (traced for different materials)

stygnięcia) – rys. 7e.

3. The research method

The many years', systematic endoscopic investigations conducted by the author within the scope of periodical preventive services of marine gas turbine engines operated in the Polish Navy, showed a large effectiveness of the method at comparatively simple servicing the applied investigative apparatus. Because of the significant differentiation of the constructional forms of applied turbine engines (Russian - the DE59 type, Ukrainian - the UGT

ukraińskich – typu UGT i amerykańskich – typu LM2500) skompletowano zestaw endoskopowy najlepiej przysposobiony do prowadzenia badań diagnostycznych w warunkach okrętowych – rys. 4.

- W skład zestawu wchodzi następujące przyrządy optyczne:
1. fiberoskop typu FFR6-100-4, średnica światłowodu 6,0 mm, długość robocza 1,0 m, obserwacja w sektorze czołowym przy kącie pola widzenia 60° , głębia ostrości od 5 mm do ∞ , rozdzielczość 12000 pikseli;
 2. boroskop typu PRZ08-057-VAR-50, z ruchomym przyzmatem, obrotową sondą i dwukrotnym zbliżeniem optycznym. Średnica optyki 8,0 mm, długość robocza 570 mm, kierunek obserwacji regulowany od $55 \div 115^{\circ}$, kąt pola widzenia 50° , głębia ostrości od 5 mm do ∞ , sonda optyczna obraca się w zakresie 340° wokół własnej osi;
 3. źródło światła – metalo-halogenowe typu Solarc™, temperatura barwy źródła światła 6500 K;
 4. cyfrowy aparat fotograficzny, 4x zoom optyczny, rozdzielczość 6,0 mln pikseli;
 5. uniwersalny adapter umożliwiający współpracę aparatu fotograficznego z boroskopem i fibroskopem optycznym firmy EVEREST.

Badanie endoskopowe części przepływowej silnika przeprowadza się jednocześnie fibroskopem i boroskopem optycznym, w zależności od uzyskanego dostępu do diagnozowanego podzespołu. Wykorzystuje się do tego celu technologiczne otwory (luki) wziernikowe specjalnie wykonane przez producenta, a także otwory montażowe wtryskiwaczy, zaworów upustowych powietrza oraz termoelementów – rys. 5.

Dla każdego typu silnika opracowano szczegółową metodykę realizacji badań, uwzględniającą niezbędny zakres i chronologię wziernikowania przestrzeni wewnętrznych, jak również czynności manualne związane z częściowym

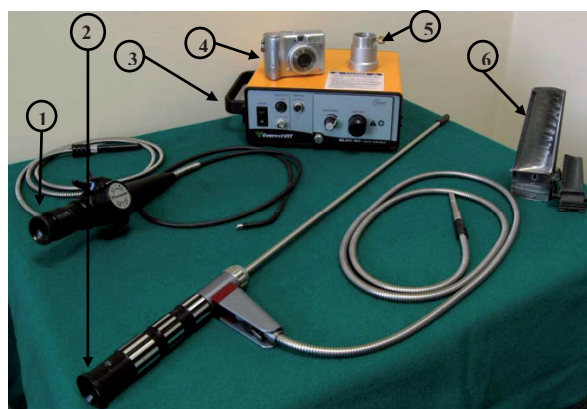
and American - the LM2500 type) the most appropriate endoscopic set has been compiled. It is best fitted to performing diagnostic examinations in inconvenient shipping conditions - fig. 4.

Following optical instruments get into the set's composition:

1. fiberoscope FFR6-100-4 type, total diameter of the optical fiber 6,0 mm, working length 1,0 m, observation in a front sector at an angle of the sight field - 60° , depth of the sharpness from 5 mm to ∞ , resolution 12000 pikseli;
2. boroscope PRZ08-057-VAR-50 type, with a movable prism, rotatable probe and twofold optical magnification. The Optic diameter 8,0 mm, working length 570 mm, regulated direction of an observation $55 \div 115^{\circ}$, an angle of the sight field 50° , depth of the sharpness from 5 mm to ∞ , optical probe turns in the range of 340° around its own axis;
3. light source - the metal-halogenous the Solarc™ type, temperature of the source light's colour 6500 K;
4. digital photo camera, 4x optical zoom, resolution 6,0 million pixels;
5. versatile adapter enabling cooperation between a photo camera and EVEREST boroscopes and fiberoscopes.

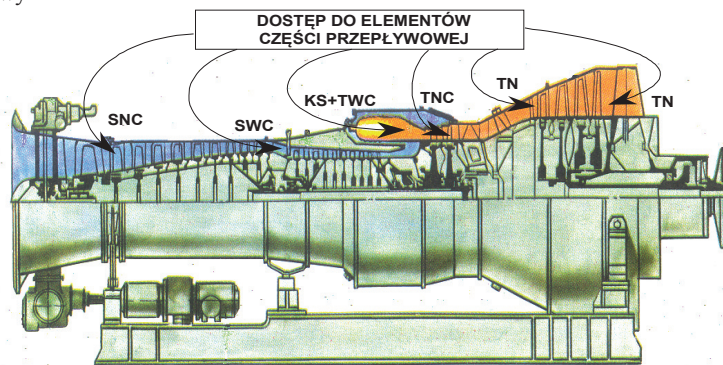
An endoscopic investigation of the engine's gas flow paths is conducted by means of a fiberoscope and a boroscope simultaneously, in dependence from the got access to the diagnosed component. Technological openings are used to this aim. They are especially prepared by the engine's producer. Additionally, the assembly openings of injectors, air bleeding valves as well as thermocouples are used for the endoscopic inspection- fig. 6.

The detailed diagnostic methodics of an investigations' realization for the every engine type has been worked out. The elaborated methodics takes into account the necessary range and the chronology of an internal spaces' visual examination, as well as the manual operations connected with a partial disassembly of the engine [5]. An execution of washing the engine's passages, just directly befo-



Rys. 4. Endoskopowy zestaw diagnostyczny firmy EVEREST: 1 – fiberoskop, 2 – boroskop, 3 – metalo-halogenowe źródło światła typu Solarc™, 4 – cyfrowy aparat fotograficzny, 5 – uniwersalny adapter, 6 – łopatki turbinowe

Fig. 4. Diagnostic endoscopic set of the EVEREST company: 1 – fiberoscope, 2 – boroscope, 3 – metal-halogenous light source Solarc™ type, 4 – digital photo camera, 5 – versatile adapter, 6 – turbine blades



Rys. 5. Schemat badań endoskopowych części przepływowej silnika UGT

Fig. 5. The scheme of endoscopic examinations of UGT engine's passages

demontażem silnika [5]. Ważnym czynnikiem metodycznym, poprawiającym wiarygodność stawianej diagnozy, jest przeprowadzenie mycia kanału przepływowego silnika, bezpośrednio przed badaniem endoskopowym. Minimalizuje się w ten sposób możliwość błędnej interpretacji wykrytych defektów wskutek refleksów optycznych od zanieczyszczenia obserwowanych powierzchni osadami soli, oleju, nagaru etc.

Badanie endoskopowe silnika turbinowego wykonuje się w następujących sytuacjach:

- rutynowo – podczas bieżącej, bezawaryjnej eksploatacji silnika, w okresie realizacji systematycznych przeglądów profilaktycznych (silniki LM2500 – co pół roku, silniki UGT – co najmniej raz w roku);
- po przekroczeniu określonej przez producenta liczby godzin pracy (silniki LM 2500 – co 750 ± 125 godzin, silniki UGT – co 500 godzin);
- w przypadku wystąpienia pompażu lub pożaru silnika,
- po przekroczeniu dopuszczalnych wartości drgań silnika,
- każdorazowo po stwierdzeniu zmiany z ujemnej na dodatnią wartości poślizgu prędkości obrotowej wirników wytornicy spalin (dotyczy silników trójwimkowych);
- po przekroczeniu dopuszczalnych wartości parametrów gazodynamicznych, w szczególności temperatury spalin wylotowych oraz jej rozkładu na obwodzie kanału przepływowego;
- w przypadku pojawienia się opiłków metalicznych w oleju smarowym (na korkach magnetycznych);
- dla oceny efektywności mycia części przepływowej.

Kluczowym zagadnieniem badawczym w ocenie stanu technicznego części przepływowej silnika turbinowego jest ustalenie tolerancji diagnostycznych dla wykrytych defektów powierzchniowych. Są one arbitralnie ustalane przez producenta, na podstawie przeprowadzonych badań niezawodnościowych, materiałowych i symulacyjnych. Zatem niezbędnym warunkiem przeprowadzenia wiarygodnych badań endoskopowych silnika w eksploatacji jest wyposażenie diagnosty w informacje o najczęściej występujących, znanych i rozpoznawalnych defektach powierzchniowych oraz metodach ich klasyfikowania, w aspekcie dopuszczenia silnika (lub nie) do dalszego użytkowania.

Dobrą praktyką inżynierską jest zapoznanie się z historią silnika oraz wynikami wcześniejszych badań diagnostycznych bezpośrednio przed przystąpieniem do wziernikowania części przepływowej. Brak powtarzalności produkcyjnej, a więc indywidualne cechy każdego egzemplarza silnika, przeprowadzone wymiany podzespołów, ich naprawy i modernizacje, jak również warunki użytkowania (zakresy zmienności obciążenia, liczba rozruchów i zatrzymań silnika, liczba wykonanych manewrów oddzielną turbiną napędową etc.) oraz czas użytkowania (w tym liczba godzin pracy na poszczególnych obciążeniach) silnika mają decydujący wpływ na intensywność procesu zanieczyszczenia, starzenia i zużywania się elementów. Znajomość historii silnika umożliwia diagnoście przeprowadzenie wstępnej selekcji tych rejonów części przepływowej, które narażone są na znane i rozpoznawalne uszkodzenia, ewentualnie oszacować trendy rozwojowe defektów już zaistniałych.

Bardzo istotne jest również uwzględnienie w procesie wnioskowania diagnostycznego charakterystycznych cech odbarwień powierzchniowych kanału przepływowego, typowe dla danej konstrukcji silnika, uzależnione dodatkowo od rodzaju paliwa zasilającego oraz rejonów żelugli [5].

re endoscopic investigation represents an important methodical factor, improving an authenticity of the formulated diagnosis. In this way the possibility of an incorrect interpretation of the detected defects, as the result of optical reflexes originated from the dirt of observed surfaces with the settlings of salt, oil, carbon deposit etc., is minimized.

An endoscopic investigation of an engine turbine is worked-out in the following cases:

- during routine maintenance - during a current, failure-free engine's operation, in the period of realization of the systematic preventive inspections (the engines LM2500 type - once a half a year, the engines UGT type - at least once a year);
- after exceeding the number of working hours defined by the producer (the engines LM 2500 type - every 750 ± 125 hours, the engines UGT type - every 500 hours);
- in the case of a surging engine's work or a fire of the engine;
- after exceeding the admissible values of the engine's vibration;
- each time after affirming the alteration of a value of the rotational speed's slide of gas generator's rotors from the negative value to the positive one (it concerns the three-shaft engines only);
- after exceeding the permissible values of gas dynamical parameters, in a peculiarity, an exhaust temperature as well as a temperature distribution on the gas flow path's circuit;
- in the case of appearing metallic particles in a lube oil (on magnetic corks);
- in order to evaluate the washing's efficiency of the engine's passages.

The settlement of diagnostic tolerances for the identified surface defects represents a key research issue in a technical shape evaluation of the gas turbine engine's passages. They are established arbitrarily by the producer, on the basis of conducted reliability, material and simulating investigations. Therefore a diagnostician has to be equipped with the information about the most often occurring, well-known and recognizable surface defects and the methods of their classifying in the aspect of the engine's admittance (or not) for the further usage. This is a necessary condition of the performing a credible endoscopic inspection of the engine.

The knowledge about the engine's history as well as the results of earlier conducted diagnostic investigations just directly before visual examining gas flow paths stands for the good engineering practice. The lack of productive repeatability, and so, individual features of the every produced engine, conducted exchanges of the components, their repairs and modernizations, also the operation conditions (ranges of load alterations, a number of the engine's start-ups and lay-offs, a number of executed maneuvers with the free power turbine etc.) as well as a time of the engine's usage (including a number of hours of the engine's running in the individual loads) have the decisive impact on the intensity of the dirt, aging, wearing process of the constructional elements. The knowledge of the engine's history enables a diagnostician to execute a preliminary selection of such engine passages' regions, which are subject to well-known and recognizable damages, or to estimate alternatively the developmental trends of the already existed defects.

There is also very essential, in the process of a diagnostic inference, to take into consideration characteristic features of a surface discolouration through the gas flow paths, which are typical

4. Wyniki badań

Doświadczenia diagnostyczne autora zdobyte w wyniku piętnastoletnich badań endoskopowych okrętowych turbinowych silników spalinowych prowadzonych w Marynarce Wojennej RP zaowocowały opracowaniem specjalistycznych poradników metodycznych dla realizacji przeglądów części przepływowej silników typoszeregu UGT oraz LM2500 w bieżącej eksploatacji. Dają one możliwość wczesnego wykrycia defektów powierzchniowych poszczególnych elementów kanału przepływowego, które w przypadku dalszego rozwoju, mogą skutkować poważnymi awariami silnika. Dla udokumentowania wykrytych defektów i określenia tendencji ich rozwoju, prowadzono systematyczną rejestrację fotograficzną zidentyfikowanych uszkodzeń. Wyniki badań przechowywane są w komputerowej bazie danych, stanowiącej kluczowe ogniwo Bazowego Systemu Diagnostycznego turbinowych silników spalinowych objętych nadzorem diagnostycznym [2, 5].

Na rysunku 6 przedstawiono niektóre z zarejestrowanych uszkodzeń wykryte podczas badań endoskopowych silników turbinowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej RP.

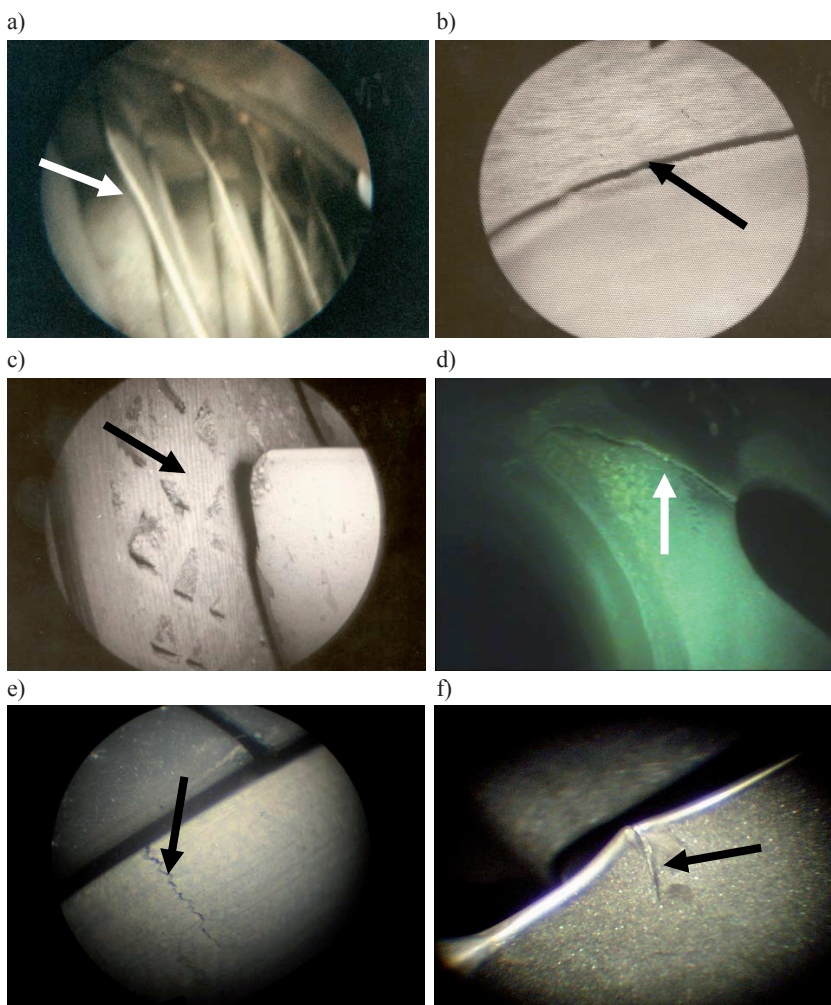
for a given engine's construction dependent additionally on the kind of fuel feeding as well as the regions of navigation [5].

4. Research results

Diagnostic experiences of the author concurred in the result of fifteen-year endoscopic investigations of the marine gas turbine engines carried out in the Polish Navy fructify with the elaboration of the specialistic methodical guides for the passages reviews of the engines UGT series as well as LM2500 in the current operation. They give the possibility of an early detection of the surface defects of the gas paths' individual elements, which, in the case of their further development, can cause serious engine's breakdowns. For the documentary evidence of the detected defects and for the qualification of a tendency of their development, the systematic photographic registration of each identified damage has been led.

The results of investigations are gathered in the computer data base, representing a key link of the Base Diagnostic System of gas turbine engines covered with the diagnostic supervision [2, 5].

Some of the registered damages detected during endoscopic investigations of the turbine engines operated in the Polish Navy are presented in figure 6.



Rys. 6. Defekty elementów części przepływowej okrętowych turbinowych silników spalinowych wykryte podczas badań endoskopowych: a) Deformacje łopatek wirnikowych turbiny niskiego ciśnienia, spowodowane pełzaniem materiału konstrukcyjnego, b) Powiększony luz wierzchołkowy łopatki wirnikowej TWC z widocznymi śladami zakleszczania w kadłubie silnika, c) Zużycie ściernie uszczelnienia łopatek wirnikowych TWC w kadłubie silnika spowodowane zakleszczeniem, d) Pęknięcia zmęczeniowe (niskocyklowe) rury ogniowej komory spalania silnika, e) Pęknięcie zmęczeniowe (niskocyklowe) na powierzchni kadłuba wewnętrznego, pod łopatkami kierowniczymi turbiny wysokiego ciśnienia, f) Wgniecenie z pęknięciem na krawędzi natarcia łopatki wirnikowej sprężarki

Fig. 6. Defects of the passages' elements of marine gas turbine engines detected during endoscopic inspections: a) Deformations of the rotor blades of the low pressure turbine, caused by the creeping the constructional material, b) Enlarged the top radial clearance of the rotor blade of the high pressure turbine, c) Abrasive waste of a frame seal of the "slice of honey" type in HPT caused by the seizure of the rotor in a turbine frame, d) Low-cycle fatigue cracks on the flame tube of the engine's combustion chamber, e) Low cycle fatigue crack on the surface of internal frame, under the vane blades of the high pressure turbine, f) Dent with the crack on the edge of attack of the compressor rotor's blade

5. Podsumowanie

Celem niniejszego opracowania było wykazanie, że coraz większa dostępność optyki światłowodowej, a w ślad za tym, dynamicznie rozwijające się metody endoskopowe mogą stanowić bardzo przydatne narzędzie diagnostyczne w procesie oceny stanu technicznego części przepływowej turbinowego silnika spalinowego w warunkach jego eksploatacji na okręcie. Istotą badania endoskopowego jest w ogólnym znaczeniu poszukiwanie defektów powierzchniowych w przestrzeniach roboczych silnika, określanie pierwotnych przyczyn ich powstawania oraz wpływu jakie wywierają na osiągi i sprawność silnika. Systematycznie prowadzone badania endoskopowe dają dodatkowo możliwość obserwowania trendów rozwojowych wykrytych defektów, w odniesieniu do horyzontów prognozy czasu poprawnej pracy gwarantowanego przez producenta. Jest to kluczowe ogniwo systemu eksploatacji silników według aktualnego stanu technicznego. Wówczas o zakresie i częstotliwości niezbędnych czynności obsługowych decyduje wynik badania diagnostycznego, a przyjęta strategia eksploatacji zorientowana jest na utrzymanie niezawodnego funkcjonowania silnika możliwie jak najdłużej i przy minimalnych kosztach.

6. Literatura

1. Balicki W. Wpływ warunków i zakresów pracy oraz cech termodynamiczno - przepływowych turbinowych silników odrzutowych na informację diagnostyczną. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna (praca doktorska) 1997.
2. Charchalis A. Diagnostowanie okrętowych turbinowych silników spalinowych. Gdynia: Akademia Marynarki Wojennej 1991.
3. Cohen H, Rogers G.F.C, Saravanamuttu H.I.H. Gas turbine theory. New York USA: Longman Scientific & Technical 1987.
4. Jakubowski R, Orkisz M. How changes of thermal-now process efficiencies in the turbojet engine influence on its work characteristics. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2002; 2(14): 4-25.
5. Korczewski Z. Endoskopia silników okrętowych. Gdynia: Akademia Marynarki Wojennej 2008.
6. Lewitowicz J. Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Badania eksploatacyjne statków powietrznych. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych 2007.
7. Lewitowicz J. Management and control of the potential exploitation of fleet aircrafts. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2008; 1(37): 53-56.

5. Conclusion

The elaboration aimed to prove that the more and more accessible fiber optics, and in trace for this, the dynamically developing endoscopic methods can represent the very useful diagnostic tool within the process of a technical condition assessment of the gas turbine engine's passages during its operation on the vessel. A searching the surface defects in the working spaces of the engine, defining the primary reasons of their formation as well as the impacts they have on the engine's efficiency is, in general meaning, the creature of the endoscopic investigation. The systematically conducted endoscopic investigations additionally give the possibility of an observation of developmental trends of the detected defects, in the reference to horizons of prognosis of the time of the correct work guaranteed by the producer. This is the key link of the engines' operation system enabling their further usage according to the current technical shape. In such an approach to the engine's operation diagnostic results decide about the range and the frequency of necessary servicing. Moreover, the implemented operation strategy is well - versed into maintaining a reliable engine's performance as long as this is possible, at minimum costs.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew KORCZEWSKI
Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego
Instytut Hydroakustyki
ul. inż. Śmidowicza 69
81-103 Gdynia, tel: 058 626 29 08,
e-mail: z.korczewski@amw.gdynia.pl
