

Radosław PRZYSOWA¹, Marek CHALIMONIUK¹, Danuta GRZELKA-GAJEK¹,
 Ruslan SHAKALO², Artem KARPENKO²

¹ Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

² Ivchenko Progress SE

CT INSPECTION OF COOLED TURBINE BLADES

Badania tomograficzne chłodzonych łopatek turbinowych

Abstract: To improve the engine efficiency by increasing the gas temperature, multi-layer cooling passages are applied in new designs of gas turbine blades. As a result, traditional non-destructive methods, which have been applied so far in the production control, became insufficient. The aim of this manuscript is to develop an inspection method for cooling passages of turbine blades, which would be helpful in detecting manufacturing defects of blades and their operational failures. GE v/tome/x/m 300 was applied to conduct dimensional control and check the interior of two types of turbine blades from turboshaft engines. The procedure for selecting X-ray parameters was suggested. The thickness of walls in the selected cross-section was measured with the accuracy of 0.01 mm, and the selected manufacturing defects of cooling passages were identified.

Keywords: computed tomography (CT), non-destructive testing (NDT), turbine blade, cooling passages, film cooling, dimensional control, wall thickness measurement

Streszczenie: W celu zwiększenia sprawności silników przez podniesienie temperatury gazów, w nowych konstrukcjach łopatek turbin gazowych stosuje się wielowarstwowe zespoły kanałów chłodzących. W efekcie, tradycyjne metody nieniszczące, stosowane dotychczas w kontroli produkcji stają się niewystarczające. Celem pracy jest opracowanie metodyki inspekcji kanałów chłodzących łopatek turbin do wykrywania wad produkcyjnych łopatek oraz ich uszkodzeń eksploatacyjnych. Zastosowano tomograf GE v/tome/x/m 300 do kontroli wymiarowej i sprawdzenia poprawności wykonania wnętrza dwóch typów łopatek turbiny silnika turbosłabowego. Zaproponowano procedurę doboru parametrów prześwietlania. Zmierzono grubość ścian w wybranych przekrojach z dokładnością 0,01 mm oraz zidentyfikowano wybrane wady produkcyjne kanałów chłodzących.

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa CT, badania nieniszczące NDT, łopatki turbinowe, kontrola wymiarowa, pomiar grubości ściany

1. Introduction

Cooled turbine blades are one of the most complex components of the gas turbines. So far, their cooling passages were examined mainly with surface methods, such as water flow, ultrasounds and eddy currents [5,22], which allow for the verification of internal defects only to a small extent. Along with the development of the engines, the geometry of cooling systems of turbine blades has become more and more complex. First designs of blades made with additive methods (AM) are emerging. For the manufacturing of turbine blades with new, more efficient cooling systems, new inspection methods are needed.

Turbine blades are components, which are hard to inspect due to high attenuation coefficient [18], complex internal geometry and substantial differences in three dimensions. To examine the condition of rotor blades, it is indispensable to accurately reproduce the internal structure, which is suited to dimensioning of internal walls, detection of defect or failure [16]. Typically, the resulting geometry of the blade's airfoil is analyzed layer by layer over a selected number of cross-sections, from the root to the tip.

Air Force Institute of Technology has extensive experience in applying various NDT methods to assess the condition of blades in the operated turbine engines. The example of using CT to examine the blades in the high-pressure turbine (HPT) of RD-33 engine was provided in [5], where cracks on the leading edge and the structure of cooling passages were examined.

In some works [6], general-purpose CT systems with x-ray tubes of insufficient power were used. As a result, blurry images and high measurement uncertainty were obtained. Bauer [2] was compiling the CT results, which were obtained by using the x-ray tubes of different powers to better reproduce blade's regions with different thickness. The currently used X-ray equipment allows conducting CT scans of turbine blades with the resolution of 30-40 μm , which is sufficient to estimate typical failures, the dimensions of which are in the range of tenths of a millimetre. With respect to the external geometry of a blade, traditional optical scanners offer a resolution, which is by order of magnitude better than CT [6].

Hassler was dealing with the automation of checking the dimensions of film cooling holes made with a laser drilling method [10]. CFD calculations of cooling passages [4] show that flow resistance significantly reduce the efficiency of cooling. Stimpson investigated the roughness of cooling passages [20] in blades, which is particularly important in the case of using additive manufacturing techniques. Klingaa analyzed the smoothness of helical cooling passages and electronic systems made with AM technique [12]. Zhao used Computed Tomography (CT) to examine the condition of thermal barrier coatings (TBC) [23].

As a part of the Metals Affordability Initiative (MAI) [15], engineers from GE Aviation designed an inspection system for turbine blades, which is based on the application of specialist CT systems with high-power x-ray tubes and automatic blade feeder, a matrix of linear Jupiter detectors and a proprietary GE Rhythm Review software [14]. This equipment allows for the unmanned inspection of small series of blades and automatic

measurement of the thickness of internal walls, layer by layer, generating the resulting in compliance with ASTM DICONDE [1].

The algorithms used for the processing of CT measurements were described in [13]. Apart from equipment designed solely for the blades, there is also a variety of commercial software for reverse engineering such as Geomagic [8], which enable the researchers to compare the measured geometry with the reference one. Despite the relative maturity of CT technology, the inspection of film cooling holes in turbine blades and automatic measurement of wall thickness remains still a challenge, and their results depend on the proficiency of the operator. It is crucial to decrease the human factor in geometry analysis and prepare the automation of image processing. The recent works focus on determining and minimizing the measurement uncertainty [2].

The goal of this paper is to design an inspection method for cooling passages of turbine blades with the decreased human factor in results analysis, detecting manufacturing defects and operational failures. The algorithm for selecting X-ray parameters was presented as well as ways for avoiding typical errors and verification of measurement accuracy. Also, manufacturing errors in the blade were identified, and wall thickness measurement was taken in the selected cross-sections. The method for automation of geometry analysis and thickness measurements was suggested, and its effectiveness was assessed.

2. Methodology

Two new turbine blades designed by SE Ivchenko-Progress were inspected with the application of CT GE v/tome/x/m 300 [7] with X-ray tube power of 300 kV. The manufacturer of the engine ran developmental programme, which aimed to increase the power and efficiency of the engine by increasing the gas temperature [9]. The goal of the study was to verify the effectiveness of the CT system in detecting manufacturing defects in the internal cooling passages and checking the selected dimensions.

Two types of HPT blades with different cooling systems i.e. blade 1 and blade 2 (fig. 1) were selected for scanning. These blades had previously been rejected as the result of NDT inspections done with traditional methods. The cooling system of the blade 2 (fig. 1b) consists of 5 internal cavities 1-5, which are not connected with each other and are separated with transverse ribs 6-9. Each one of these internal cavities consists of passages connected by bridges.

The geometry of blades, after being X-rayed in the CT system, was reconstructed in the Dato's program [17]. The verification of blades was done in three dimensions with the use of a specialist VGStudio Max 3.0 software [21]. The axes of the coordinate system were oriented in space according to the structural drawing.

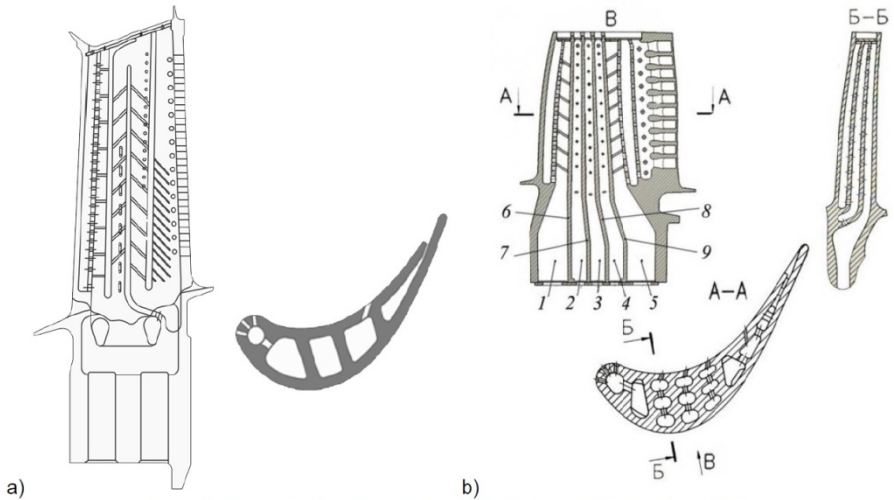


Fig. 1. Turbine blade 1 (a) and blade 2 (b)

The process of the CT inspection of turbine blades composed of:

1. Positioning the blade relative to the detector and the source
2. Selection and checking the x-ray parameters by conducting a fast scan
3. Making a sequence of scans of the rotating blade
4. Reconstruction of the 3D geometry based on the set of images
5. Analysis of the 3D geometry, flaw detection, dimensional control, typically conducted layer by layer.

To ensure the reproducibility of the blade's reference system, a special bracket was built to hold the blade during scanning. It was tailored to the blade root i.e. similar to the slot in the turbine disc. Without such a bracket, the connection of the coordinate system of the examined component with the reference system of the geometry model is a time-consuming process, which is not always successful. Without the connection of the coordinate system (without the proper positioning in VG Studio software), automatic dimensional control is hard to be performed.

The geometry was analyzed layer by layer along the blade's height, with a pitch of 0.08 mm. The shape and accuracy of the execution of internal passages were checked, and manufacturing defects were verified (cracks, lack of additional material, air voids) across the whole blade's height.

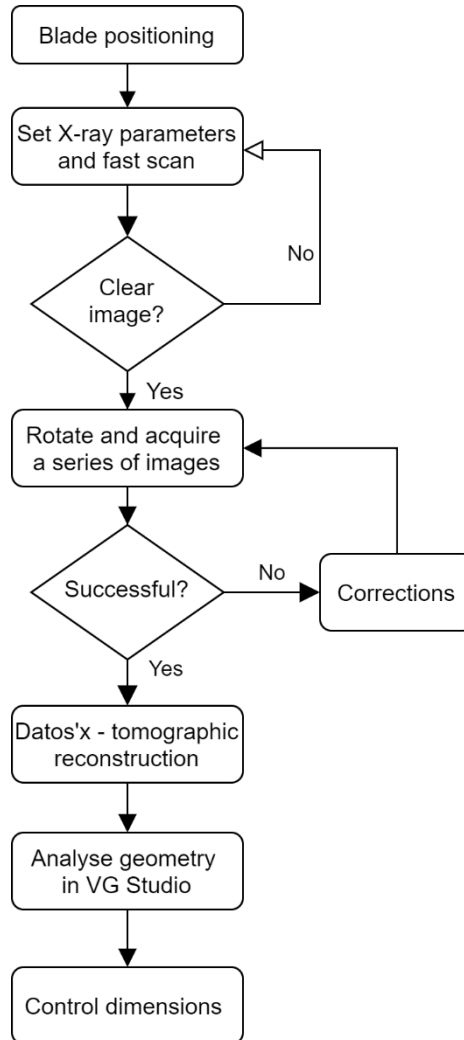


Fig. 2. Methodology for studying cooling passages of turbine blades

The suggested methodology allows for the selection of the appropriate parameters for the inspection of blades. Thanks to the usage of an X-ray tube with the power of 300 kV, it was possible to visualize the interior of blades made of superalloys, which belong to materials difficult to X-ray.

Blade inspection time is dependent on its dimensions, material, from which it is made, inspection's objective, expected accuracy of the results and the operator's experience [5]. In this case, doing an X-ray of a blade (steps 1–4) took approximately 40 minutes, but it was necessary to repeat these steps with different settings because the blade of this type was examined for the first time. The basic geometry analysis in VGStudio lasts at least 2 hours.

To achieve images with the appropriate quality, it is important to select the proper settings and to carefully perform the individual steps both during project creation and image reconstruction in the graphical software. The most common errors in tomographic examinations are related to:

- vibration caused by poor fixing the component on the rotary table,
- positioning the long edges of the component along the beam,
- large size of the component, when not the whole area is contained in the conical radiation beam,
- low resolution arising from the object being too far from the radiation source,
- insufficient power of the X-ray tube,
- incorrect number of images,
- wrong calibration of background,
- too high power of X-ray radiation beam in comparison to the voxel size.

After the X-ray has been done, and the images were sent to the reconstruction software, there may also be errors connected with the computer data handling at the following stages:

- determining the edge based on the greyscale,
- averaging the area based on filters (e.g. Gaussian filter),
- optimization of calibration images,
- determining the rotational axis in a sector scan, what is needed to obtain a tomographic reconstruction,

The majority of the errors mentioned above is due to the lack of knowledge or little operator's experience.

3. Results

3.1. Detecting manufacturing defects

Analyzing the geometry obtained with CT method, internal defects and voids are clearly visible. Fig. 3-5 illustrate the incorrect machining of cooling passages next to the leading edge of blades and in their interior. Such defects are critical for blades and in a very short time, they would result in their overheating and thermal damage. These defects cannot be corrected by machining; thus, the blades were rejected.

Detected manufacturing defects were attributable mainly to the incorrect setting of the tool which drilled cooling holes. As a result, the walls were too thin and sometimes, the adjacent passages were joined.

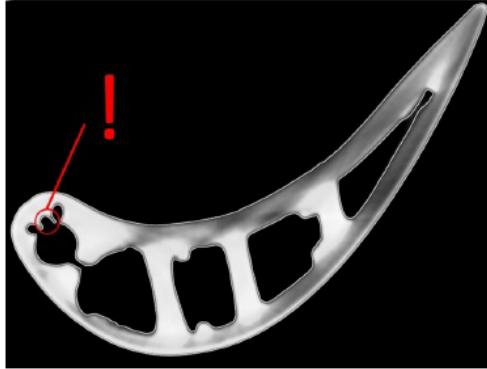


Fig. 3. Incorrectly manufactured cooling passages in blade 1

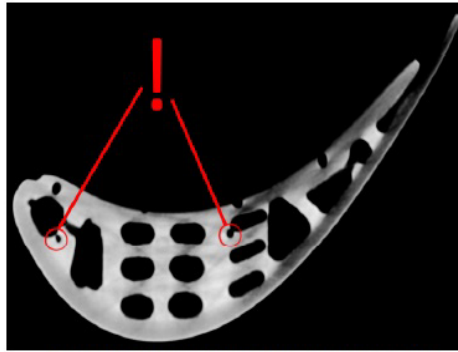


Fig. 4. Perforation errors in the walls in blade 2

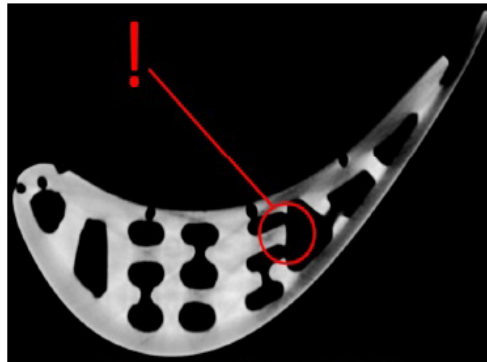


Fig. 5. Manufacturing defect of the cooling passage in blade 2, caused by mispositioning the tool

3.2. Dimensional control and measurement of wall thickness

Keeping dimensional tolerance of the blades' walls is important for strength reasons. Fig. 6 shows the examples of dimensional control conducted in VGStudio, which aims to

determine the deviations from reference geometry (model or structural, drawing). Figure 6b presents the thickness measurement of the rib, which is not possible to be taken with surface non-destructive methods.

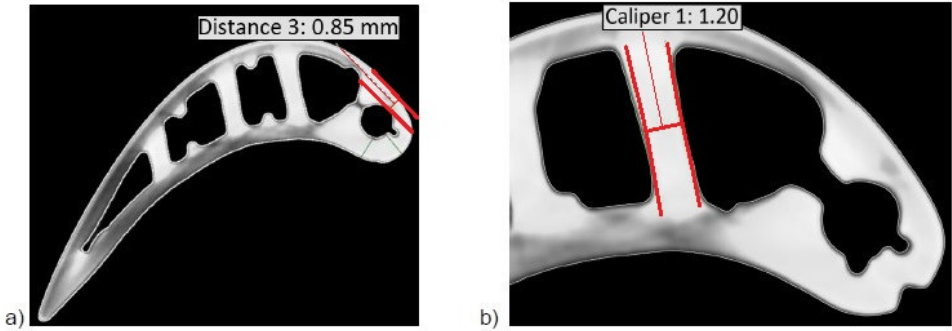


Fig. 6. Thickness control of the walls and internal ribs of blade 1

For the selected cross-section A-A of the blade 2 (figs. 7 and 8), measurement results of wall thickness were presented in seven points, and they were referred to the tolerances defined by the manufacturer (fig. 9). Points 1-3 are situated on the leading edge, 4 and 5 on the pressure side, 6 and 7 on the suction side. In five points, the wall is within the tolerance; for point 5, it slightly exceeds it while in point 7, the exceedance is significant (0.2 mm).

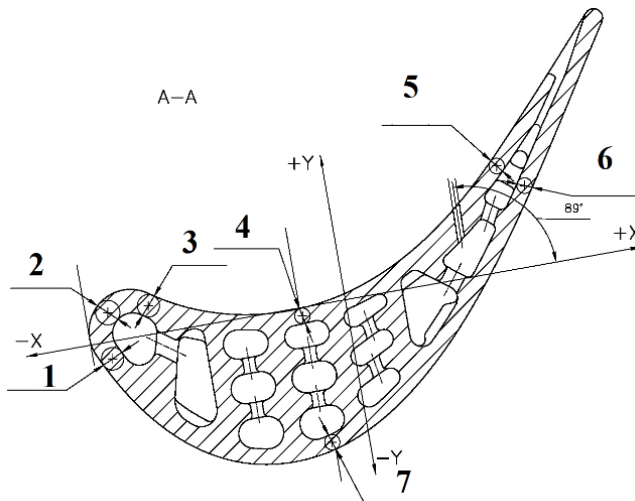


Fig. 7. Points where the wall thickness of blade 2 was controlled

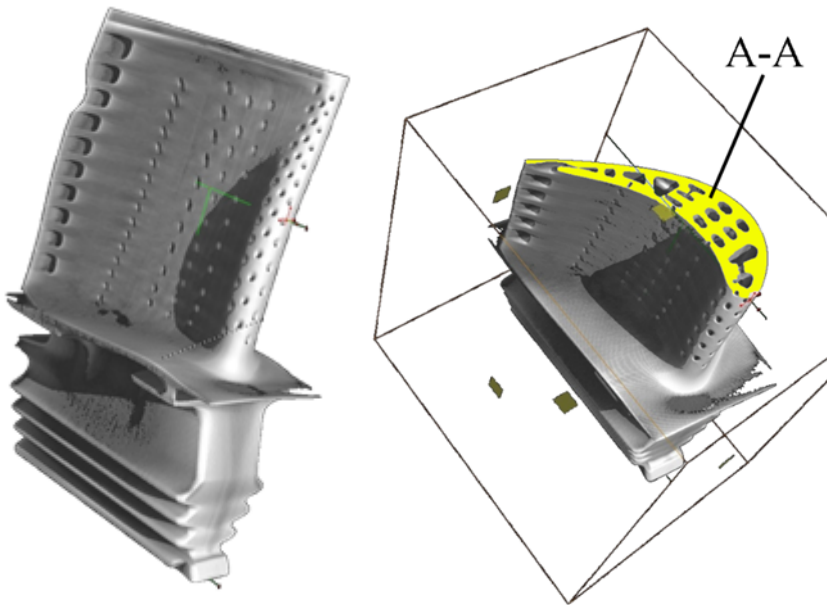


Fig. 8. Cross-section A-A selected to measure wall thickness

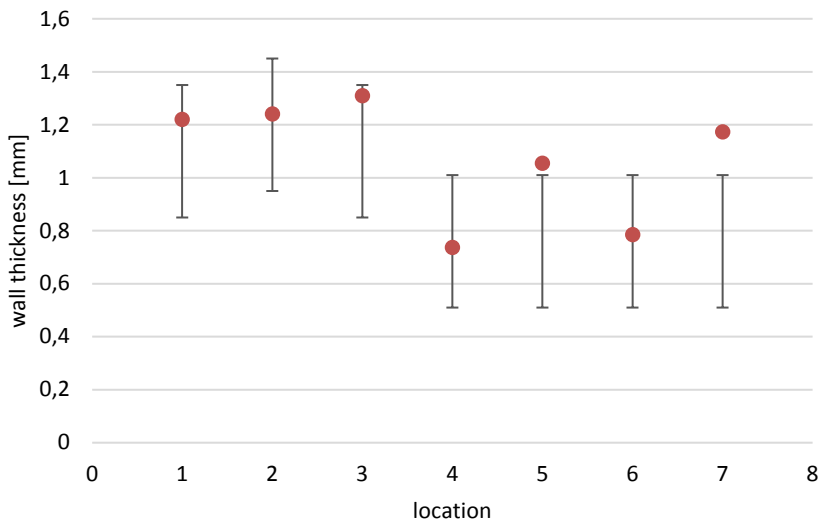


Fig. 9. Measurement results of wall thickness. The bars show the tolerance of measurements specified by the manufacturer in the cross-section A-A

The correct machining of cooling passages and perforation allows for the supply of the appropriate amount of cooling air to the specific part of the blade [11]. Fig. 10 depicts an example of checking the perforation angle.

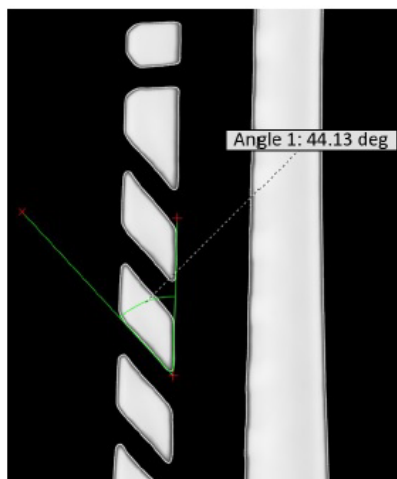


Fig. 10. Control of the perforation angle of cooling passages

In the case of individual blades and searching for the atypical defects, image analysis by an experienced operator is justified, but the manual control of dimensions for more than one layer is too time-consuming. In the case of larger series of blades, image analysis should be automatized by using a specialist software for wall thickness measurement in the whole blade or determine deviations relative to the geometry model of the blade. To achieve it, the obtained geometry model of the blade was exported to Geomagic in the STL format.

4. Conclusions

Until now, the identification of manufacturing defects in cooling passages was related to the very labour-intensive operations. In some cases, inspection could not be carried out without damaging a part or conducting expensive repairs [19]. Due to the above, there was a serious risk that defective part would be installed on the product.

Unlike traditional non-destructive methods, computed tomography enabled us to inspect turbine blade from the inside and to identify the defects, flaws and deviations such as voids, misalignment in the passages, perforation in walls during electron discharge machining and unacceptable material losses. The detected defects and deviations in dimensions resulted in the blades being rejected.

The availability of the detailed data on the production quality of new blade types allows manufacturing components with more complex shapes (cooling passages), which will contribute to designing aircraft engines with better parameters and longer life.

The CT system operated by ITWL is one of the few in Europe, which ensures power to fully X-ray the turbine blades. The obtained scanning quality depends on the dimensions of the part, power of the X-ray tube, scanning time, applied filters and other variables of the test. Thanks to the proper selection of the X-ray parameters, high sharpness of edges was achieved. With a clear visualization of the contours, it was feasible to control the dimensions with the accuracy of up to 0.01 mm, which is by order of magnitude higher from the tolerance required by the manufacturer.

A CT system of this class is suitable for carrying out tests related to the certification of moulds used for the production of blades, i.e. for individual measurements or measurements conducted with low frequency. The analyses confirm the possibility to reduce the time of blade verification by an automatic measurement of wall thickness and comparison of the deviations of dimensions relative to the design.

The possibility to use the tomography in the series production should be assessed, taking into account the economic effects of such implementation. Mass production involves applying a computed tomography directly on the production line in the verification process of the object's manufacturing. CT systems are also used for the verification of blades disassembled during the engine's overhaul. The proposed method enables us to estimate the technical condition of the turbine blade reliably and thanks to this, prolong their life, which would reduce the costs of the engine's overhaul to a significant degree.

Acknowledgement

This publication was prepared as a part of the AERO-UA project, which was financed from the UE research and innovation programme 'Horizon 2020' under the grant agreement No. 724034.

5. References

1. ASTM E2767-13(2018), Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for X-ray Computed Tomography (CT) Test Methods, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. DOI 10.1520/E2767-13R18.
2. Bauer F., Schrapp M., Szijarto J.: Error Investigations for a CT and Additive Manufacturing based Reverse Engineering Workflow. 9th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), 2019. <http://www.ndt.net/?id=23648>.
3. Besztak K., Jezierski G.: Metody radiologiczne. Opole 1999.
4. Bogard D.G., Thole K.A.: Gas turbine film cooling. Journal of Propulsion and Power, vol. 22, no. 2, 2006, DOI 10.2514/1.18034

5. Chalimoniuk M., Szczepanik R., Błachnio J.: The rate of decohesion of a gas turbine blade as assessed with the X-ray computed tomography (CT). *Journal of KONES Powertrain and Transp*, vol. 20, iss. 3, 2013.
6. Gameros A., De Chiffre L., Siller H.R., Hiller J., Genta G.: A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9, 2015, DOI 10.1016/j.cirpj.2014.12.001
7. GE Measurement & Control Solutions Phoenix v|tome|x m. Versatile X-ray microfocus CT system for 3D metrology and analysis with up to 300 kV / 500 W https://rsc.aux.eng.ufl.edu/_files/documents/24.pdf
8. Geomagic Design X 3D Reverse Engineering Software <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>
9. H2020 AERO-UA, D3.5 "Final report on pilot projects in aeroengines". <https://www.aero-ua.eu/publications.html>
10. Hassler U., Rehak M.: An Image Processing Approach for Radioscopic Inspection of Turbine Blades. *Int Symp Digit Ind Radiol Comput Tomogr*, 2011.
11. Jing Q., Xie Y., Zhang D.: Effects of Channel Outlet Configuration and Dimple/Protrusion Arrangement on the Blade Trailing Edge Cooling Performance. *Applied Sciences*, 9(14), 2900, 2019, DOI 10.3390/app9142900.
12. Klingaa C.G., Bjerre M.K., Baier S., De Chiffre L., Mohanty S., Hattel J.H.: Roughness Investigation of SLM Manufactured Conformal Cooling Channels Using X-ray Computed Tomography. *e-Journal Nondestruct Test*, 03, 2019.
13. Knebel S., Baum O., Högner L., Voigt M., Mailach R., Meyer M.: Robust detection and characterization of cooling holes based on surface meshes of turbine blades. *Proc ASME Turbo Expo, 2C-2017*, 2017, DOI 10.1115/GT2017-64776.
14. Lübbehüsen J.: Advances in automated high throughput fan beam CT for DICONDE-conform multi-wall turbine blade wall thickness inspection and 3D additive manufactured aerospace part CT inspection. 11th ECNDT. Prague 2014.
15. Metals Affordability Initiative III. *Materials & Manufacturing Innovation*. <https://maihub.org/>
16. Muralidhar C., Lukose S.N., Subramanian M.P.: Evaluation of Turbine Blades Using Computed Tomography, 2006.
17. Phoenix datos|x 2 CT software: 3D failure analysis and metrology as fast and efficient as never before. <https://www.ita-polska.com.pl/files/phoenix-datosx-ct-software-brochure-english-21.pdf>
18. Schörner K., Goldammer M., Stephan J.: Scatter correction by modulation of primary radiation in industrial X-ray CT: beam-hardening effects and their correction. *Int Symp Comput Tomogr Image Process Ind Radiol*, 2011.
19. Shakalo R., Chalimoniuk M. Metody kontrolja vnutrennej polosti ohlazhdaemyh lopatok TVD s perspektivnymi sistemami ohlazhdenija (Methods of control of internal passages of HPT cooled blades with perspective cooling systems). *Aerospace Technic and Technology*, No 8(160), 2019. http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2019_8_22

20. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D.: Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes. *Journal of Turbomachinery*, 140(1), 2018, DOI 10.1115/1.4038182.
21. VGSTUDIO, the Simple Solution for the Visualization of CT Data <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio.html>
22. Vijaya Lakshmi M.R., Mondal A.K., Jadhav C.K., Ravi Dutta B.V., Sreedhar S.: Overview of NDT methods applied on an aero engine turbine rotor blade. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(9), 2013. DOI 10.1784/insi.2012.55.9.482.
23. Zhao Y., Shinmi A., Zhao X., et al.: Investigation of interfacial properties of atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with four-point bending and computed tomography technique. *Surf Coatings Technol.*, 206(23), 2012, DOI 10.1016/j.surfcoat.2012.05.099.

BADANIA TOMOGRAFICZNE CHŁODZONYCH ŁOPATEK TURBINOWYCH

1. Wprowadzenie

Chłodzone łopatek turbin są jedną z najbardziej złożonych części turbin gazowych. Dotychczas ich kanały chłodzące były badane głównie metodami powierzchniowymi, takimi jak: przepływ wody, ultradźwięki lub prądy wirowe [5, 22], które w niewielkim stopniu umożliwiają weryfikację wad wewnętrznych. Wraz z rozwojem silników geometria układów chłodzenia łopatek turbin staje się coraz bardziej złożona. Pojawiają się pierwsze konstrukcje łopatek wykonane metodami addytywnymi. Do produkcji łopatek turbin z nowymi, bardziej wydajnymi układami chłodzenia potrzebne są nowe metody inspekcji.

Łopatek turbinowe są detalami trudnymi do inspekcji, ze względu na duży współczynnik osłabienia wiązki promieniowania [18], złożoną geometrię wewnętrzną oraz znaczne różnice wymiarów w trzech osiach współrzędnych. Do badania stanu łopatek wirnikowych niezbędna jest dokładność odwzorowania struktury wewnętrznej odpowiednia do wymiarowania ścianek wewnętrznych, wykrycia wady lub uszkodzenia [16]. Typowo uzyskaną geometrię pióra łopatek analizuje się warstwami, w wybranej liczbie przekrojów od zamka do wierzchołka.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL) ma duże doświadczenie w stosowaniu różnych metod NDT do oceny stanu łopatek silników lotniczych w eksploatacji. Przykład zastosowania CT do badania łopatek turbiny wysokiego ciśnienia silnika RD-33 przedstawiono w pracy [5], zbadano w niej pęknięcie na krawędzi natarcia oraz budowę wewnętrznych kanałów chłodzących. W niektórych pracach [6] wykorzystywano tomografię ogólnego stosowania z lampami o zbyt niskich mocach. W efekcie uzyskiwano rozmazane obrazy i wysoką niepewność pomiarową. Bauer [2] składał wyniki CT uzyskane z różnymi mocami lampy, aby lepiej odwzorować części łopatek o różnych grubościach. Obecnie stosowane urządzenia rentgenowskie pozwalają wykonywać badania tomograficzne łopatek turbinowych z rozdzielczością ok. 30÷40 μm , która jest wystarczająca do oceny typowych uszkodzeń, których wymiary są ok. dziesiątych części milimetra. Jeśli chodzi o zewnętrzną geometrię łopatek, tradycyjne skanery optyczne oferują o rząd wielkości lepszą rozdzielczość niż CT [6].

Hassler zajmował się automatyzacją sprawdzania wymiarów otworów chłodzących łopatek wykonanych metodą laser drilling [10]. Obliczenia CFD kanałów chłodzących [4] pokazują, że opory przepływu znacznie zmniejszają skuteczność chłodzenia. Stimpson

z kolei badał gładkość kanałów chłodzących w łopatkach [20], ważną szczególnie w przypadku stosowania addytywnych technik produkcji. Klingaa analizował gładkość helical cooling channels, układów elektronicznych wykonanych techniką AM [12], a Zhao wykorzystał CT do badania stanu warstw ochronnych TBC [23].

W ramach zainicjowanej przez rząd USA Metals Affordability Initiative (MAI) [15], inżynierowie firmy GE opracowali system inspekcji łopatek turbiny, która opiera się na zastosowaniu specjalizowanych systemów CT z silnymi lampami i automatycznymi podajnikami łopatek, matrycy liniowych detektorów Jupiter oraz zamkniętego oprogramowania GE Rhythm Review [14]. Narzędzia te umożliwiają bezobsługową inspekcję małych serii łopatek oraz automatyczny pomiar grubości ścian wewnętrznych, warstwa po warstwie, generując wyniki zgodnie z normą ASTM DICONDE [1].

Algorytmy do przetwarzania pomiarów CT przedstawiono w pracy [13]. Oprócz narzędzi zaprojektowanych specjalnie dla łopatek, istnieją komercyjne programy do analizy odwrotnej, takie jak Geomagic [8], które umożliwiają porównanie geometrii badanej i referencyjnej. Mimo względnej dojrzałości technologii CT, inspekcja otworów chłodzących łopatek turbiny oraz automatyczny pomiar grubości ścian wciąż stanowi wyzwanie, a ich wyniki w znacznym stopniu zależą od stopnia wyszkolenia operatora. Istotne jest zmniejszenie czynnika ludzkiego w analizie wyników i przygotowaniu automatyzacji przetwarzania obrazów. Ostatnie prace koncentrują się na określeniu oraz minimalizowaniu niepewności pomiarowej [2].

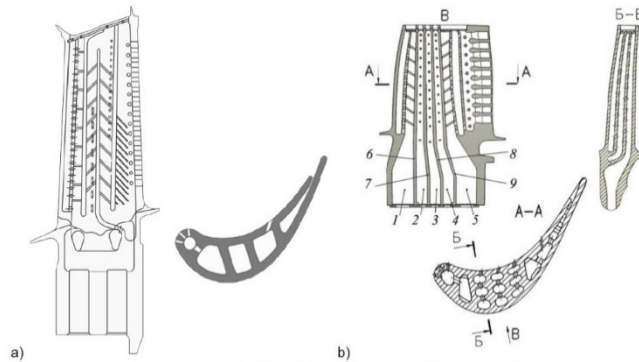
Celem pracy jest opracowanie metodyki inspekcji kanałów chłodzących łopatek turbiny ze zmniejszonym udziałem czynnika ludzkiego w analizie wyników, wykrywaniu wad produkcyjnych łopatek i uszkodzeń eksploatacyjnych. Przedstawiono algorytm doboru parametrów prześwietlania, sposoby uniknięcia typowych błędów i weryfikacji dokładności wyników. Następnie zidentyfikowano błędy wykonania występujące w łopatce oraz przeprowadzono pomiar grubości ścian w wybranym przekroju. Zaproponowano sposób automatyzacji analizy geometrii i pomiarów grubości, a także oceniono przydatność metody w praktyce.

2. Metodyka

Artykuł przedstawia wyniki inspekcji łopatek turbin silnika turbowałowego zaprojektowanych przez SE Ivchenko-Progress, wykonanych z wykorzystaniem systemu CT GE v/tome/x/m 300 [7] o mocy lampy rentgenowskiej 300 kV. Producent silnika prowadzi prace rozwojowe, które mają doprowadzić do zwiększenia mocy i sprawności silnika przez zwiększenie temperatury gazów [9]. Celem badania było sprawdzenie przydatności tomografu do wykrywania wad produkcyjnych wewnętrznych kanałów chłodzących i sprawdzania wybranych wymiarów.

Do skanowania wybrano dwie nowe łopatki turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia z różnymi systemami chłodzenia: łopatkę turbiny niskiego ciśnienia (TNC) oraz łopatkę

turbiny wysokiego ciśnienia (TWC) (rys. 1). Łopatki zostały wcześniej odrzucone z produkcji w wyniku weryfikacji tradycyjnymi metodami nieniszczącymi. Układ chłodzenia łopatki TWC (rys. 1b) składa się z pięciu wewnętrznych jam 1÷5, które nie są ze sobą połączone i są oddzielone poprzecznymi żebrami 6÷9. Każda z wewnętrznych jam składa się z kanałów połączonych mostkami.



Rys. 1. Łopaska niskiego (a) i wysokiego ciśnienia (b)

Proces inspekcji łopatek metodą CT składał się z:

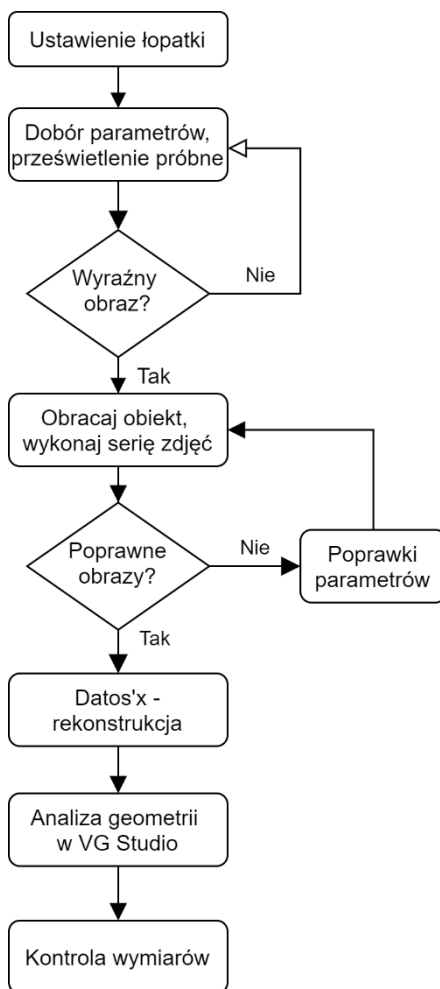
1. ustawienia łopatki względem detektora i źródła,
2. doboru i sprawdzenia parametrów prześwietlenia przez wykonanie prześwietlenia próbnego (fast scan),
3. wykonania sekwencji zdjęć obracanej łopatki,
4. rekonstrukcji geometrii 3D na podstawie zbioru zdjęć,
5. analizy geometrii 3D, wykrywania wad i kontroli wymiarów, zwykle wykonywanych warstwa po warstwie.

Geometria łopatek po prześwietleniu na tomografii została zrekonstruowana w programie Datas'x [17]. Weryfikację łopatek wykonano w trzech wymiarach z użyciem specjalistycznego oprogramowania VGStudio Max 3.0 [21]. Osie układu współrzędnych zorientowano w przestrzeni zgodnie z rysunkiem konstrukcyjnym.

W celu zapewnienia powtarzalności układu odniesienia łopatek podczas skanowania wykonano specjalne mocowanie dostosowane do zamka łopatki, podobne do gniazda w tarczy turbiny. Bez takiego mocowania połączenie układu współrzędnych badanego detalu z układem odniesienia modelu geometrii jest procesem pracochłonnym, który nie zawsze kończy się sukcesem. Bez połączenia układu współrzędnych (bez właściwego pozycjonowania w oprogramowaniu VG Studio) automatyczna kontrola wymiarów geometrycznych jest utrudniona.

Przeprowadzono analizę geometrii warstwami, wzdłuż wysokości łopatki, ze skokiem 0,08 mm. Sprawdzano kształt i dokładność wykonania kanałów wewnętrznych, weryfikowano wady produkcyjne (pęknięcia, brak dodatkowego materiału, puste przestrzenie powietrzne), geometrię oraz grubość ścian (również ścian wewnętrznych) na całej wysokości łopatek.

Zaproponowana metodyka (rys. 2) zapewnia dobranie właściwych parametrów do inspekcji łopatek. Dzięki wykorzystaniu lampy o znacznej mocy 300 kV możliwe było dokładne zobrazowanie wnętrza łopatek wykonanych z superstopów, które należą do materiałów trudno prześwietlanych.



Rys. 2. Metodyka badań kanałów chłodzących łopatek turbiny

Czas badania łopatki zależy od jej rozmiarów, materiału, z którego jest wykonana, celu badań, oczekiwanej dokładności wyników, doświadczenia operatora itp. [5]. W tym przypadku prześwietlenie łopatki (kroki 1–4) zajęło ok. 40 min, ale potrzebne było powtórzenie tych czynności z innymi nastawami, ponieważ łopatka tego typu była badana pierwszy raz. Podstawowa analiza geometrii w VGStudio zajmuje co najmniej 2 godz.

Do uzyskania obrazów o odpowiedniej jakości konieczne jest wybranie właściwych nastaw i staranne wykonanie poszczególnych czynności zarówno podczas tworzenia

projektu, jak i podczas rekonstrukcji obrazów w programie graficznym. Najczęstsze błędy na etapie prowadzenia badania tomograficznego są związane z:

- mocowaniem detalu na stole obrotowym – drgania,
- pozycjonowaniem detalu względem wiązki – długie krawędzie,
- gabarytami detalu, gdy nie cały obszar badania mieści się w stożkowej wiązce promieniowania,
- niską rozdzielczością w wyniku zbyt dużej odległości detalu od źródła promieniowania,
- zbyt małą mocą lampy,
- nieprawidłową liczbą zdjęć,
- złą kalibracją tła,
- za dużą mocą wiązki promieniowania w stosunku do wielkości voksela.

Po wykonaniu prześwietlenia i przesłaniu obrazów do stacji graficznej w celu rekonstrukcji, także mogą wystąpić błędy związane z komputerową obróbką danych na etapach:

- wyznaczania granicy krawędzi w oparciu o odcienie szarości,
- uśredniania obszaru w oparciu o filtry (np. Gaussa),
- optymalizacji zdjęć kalibracyjnych,
- wyznaczania osi przy skanie sektorowym.

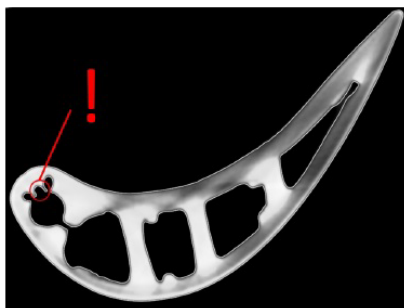
Większość wymienionych błędów wynika z braku wiedzy lub doświadczenia operatora.

3. Wyniki

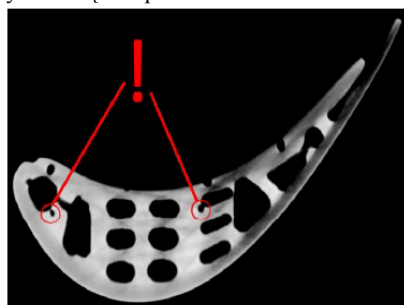
3.1. Wykrywanie wad produkcyjnych

Podczas analizy geometrii uzyskanej metodą CT wewnętrzne wady i nieciągłości materiału są dobrze widoczne. Na rys. 3–5 uwidoczniono błędne wykonanie kanałów chłodzących przy krawędzi natarcia łopatek oraz w ich wnętrzu. Tego typu wady są krytyczne dla działania łopatek i w bardzo krótkim czasie skutkowałyby ich przegrzaniem oraz uszkodzeniem termicznym. Wad tych nie da się skorygować przez obróbkę, więc łopatki zostały wybrakowane.

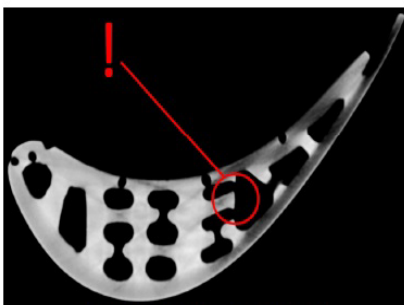
Wykryte wady produkcyjne wynikały głównie z błędnego ustawienia narzędzia (pręta) wykonującego otwory chłodzące. Efektem tego była zbyt mała grubość ścian, a czasem łączenie sąsiednich kanałów.



Rys. 3. Błędnie wykonane kanały chłodzące łopatki TNC



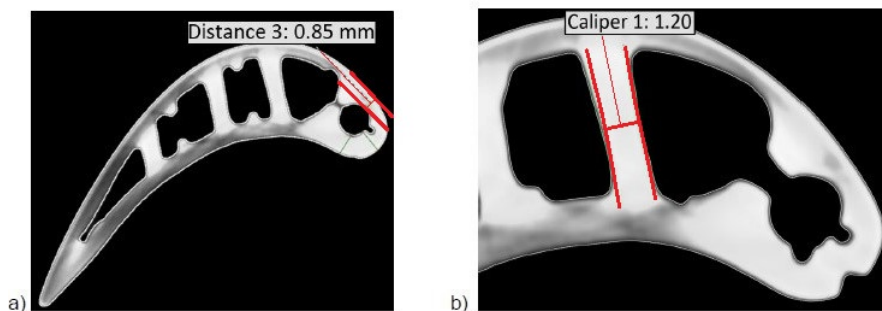
Rys. 4. Błędy perforacji w ścianach łopatki TWC



Rys. 5. Błąd wykonania kanału chłodzącego łopatki TWC, spowodowany przesunięciem narzędzia

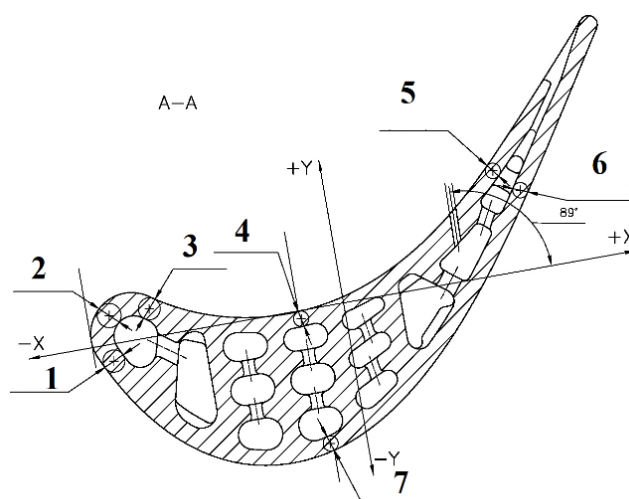
3.2. Kontrola wymiarów i pomiar grubości ścian

Utrzymywanie tolerancji wymiarów ścian łopatek ma istotne znaczenie ze względu na wytrzymałościowe. Na rys. 6. przedstawiono przykłady kontroli wymiarów wykonanej w programie VGStudio, której celem jest określenie odchyłek od geometrii wzorcowej (modelu lub rysunku konstrukcyjnego). Rysunek 6b przedstawia pomiar grubości żebra, niemożliwy do wykonania powierzchniowymi metodami nieniszczącymi.

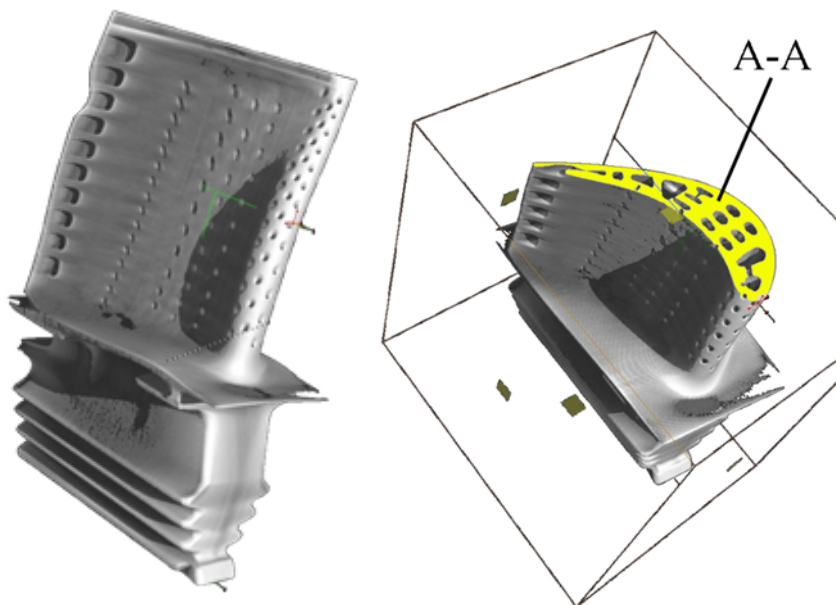


Rys. 6. Kontrola grubości ścianek i kontrola grubości żeber wewnętrznych łopatk TNC

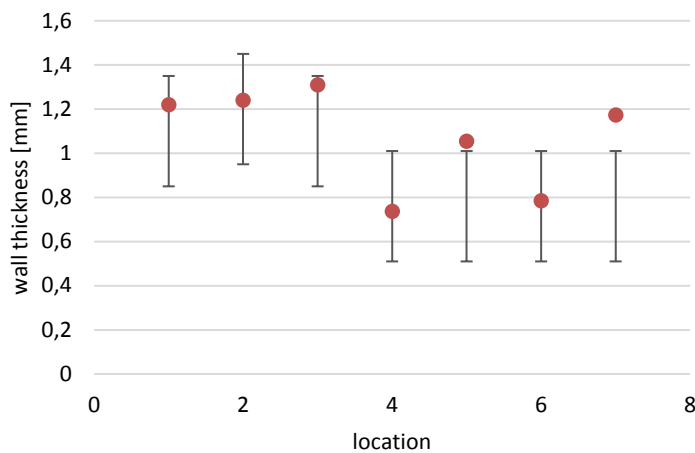
Dla wybranego przekroju A-A łopatk TWC (rys. 7 i 8) przedstawiono wyniki pomiaru grubości ściany w siedmiu punktach i odniesiono je do tolerancji zdefiniowanych przez producenta (rys. 9). Punkty 1-3 położone są na krawędzi natarcia, 4 i 5 w korycie, a 6 i 7 na grzbiecie łopatk. W pięciu punktach ściana mieści się w tolerancji, dla punktu 5 nieznacznie ją przekracza, natomiast w punkcie nr 7 przekroczenie jest znaczne (0,2 mm).



Rys. 7. Konstrukcyjne punkty kontroli grubości ścianek łopatk TWC

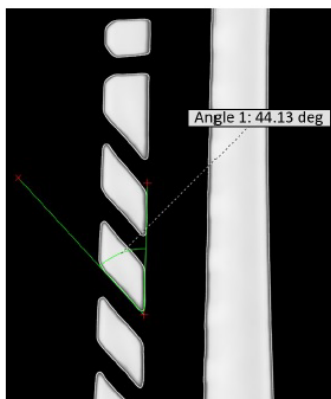


Rys. 8. Przekrój A-A wybrany do analizy grubości ściany



Rys. 9. Wyniki pomiarów grubości ściany. Słupki obrazują tolerancję wymiarów określoną przez producenta w przekroju A-A

Prawidłowe wykonanie kanałów chłodzących i perforacji, pozwala na doprowadzenie odpowiedniej ilości powietrza chłodzącego do określonej części łopatki [11]. Rysunek 10 przedstawia przykład kontroli kąta perforacji.



Rys. 10. Kontrola kąta perforacji kanałów chłodzących

W przypadku pojedynczych łopatek i poszukiwania nietypowych uszkodzeń, uzasadniona jest analiza obrazów przez przeszkolonego operatora, ale ręczna kontrola wymiarów dla więcej niż kilku warstw jest zbyt pracochłonna. W przypadku większych serii łopatek, analizę obrazów należy zautomatyzować, wykorzystując specjalizowane oprogramowanie do pomiaru grubości ścian w całej łopatce lub wyznaczenia odchyłeń względem modelu geometrii łopatki. Aby to uzyskać, otrzymany model geometrii łopatki wyeksportowano w formacie STL do programu Geomagic w celu automatycznego wyznaczenia odchyłek od wzorca.

4. Wnioski

Dotychczas identyfikacja wad kanałów chłodzących w warunkach produkcji wiązała się z bardzo pracochłonnymi operacjami kontrolnymi. W niektórych przypadkach kontrole były całkowicie niemożliwe bez zniszczenia części lub bez przeprowadzenia kosztownych napraw [19]. W związku z tym istniało poważne ryzyko zainstalowania na wyrobie części z wadami.

W odróżnieniu od tradycyjnych technik badań nieniszczących, tomografia komputerowa umożliwiła inspekcję wnętrza łopatek turbiny i identyfikację występujących defektów, uszkodzeń i odchyłeń geometrii, takich jak nieciągłości materiału, nieosiowość kanałów, wycięcie perforacji w ścianach podczas obróbki elektroiskrowej i niedopuszczalne ubytki materiału. Wykryte wady i odchyłki wymiarów jednoznacznie dyskwalifikowały łopatki z użytkowania. Niestety, w ramach projektu przebadano tylko dwie łopatki, więc na tej podstawie nie można wnioskować o skali problemu dla producenta i użytkownika.

Dostępność dokładnych danych o jakości wykonania nowych typów łopatek pozwala na produkowanie detali o bardziej skomplikowanych kształtach (kanałach chłodzących), co

przyczyni się do projektowania silników lotniczych o lepszych parametrach i większej żywotności.

System tomografii komputerowej należący do ITWL jest jednym z niewielu w Europie, który zapewnia moc umożliwiającą pełne prześwietlenie łopatek turbin. Uzyskiwana jakość skanowania zależy od wymiarów części, mocy lampy, czasu skanowania, zastosowanych filtrów i innych zmiennych badania. Dzięki właściwemu doborowi parametrów prześwietlania uzyskano wysoką ostrość krawędzi. Przy przejrzystej wizualizacji granic części możliwa była kontrola wymiarów z dokładnością do 0,01 mm, która jest o rząd wielkości większa od tolerancji wymaganej przez producenta.

Urządzenia tej klasy są odpowiednie do przeprowadzania certyfikacji form do produkcji łopatek, tj. dla pojedynczych pomiarów lub pomiarów prowadzonych z małą częstotliwością. Przeprowadzone analizy potwierdzają możliwość zmniejszenia pracochłonności weryfikacji łopatek przez automatyczny pomiar grubości ściany i porównywanie odchyleń wymiarów względem projektu.

Możliwość wykorzystania tomografii w produkcji seryjnej powinna być oceniana z uwzględnieniem skutków ekonomicznych tego wprowadzenia. Masowa produkcja wymaga zastosowania tomografu bezpośrednio na linii produkcyjnej w procesie weryfikacji (kontroli) produkcji detali. Systemy CT stosowane są również do weryfikacji łopatek zdemontowanych w trakcie remontu silnika. Proponowana metoda pozwala wiarygodnie ocenić stan łopatek turbinowych i dzięki temu wydłużyć okres ich eksploatacji, co znacznie obniża koszty remontu silników.

Podziękowanie

Niniejsza publikacja została przygotowana w ramach projektu AERO-UA, który otrzymał finansowanie z unijnego programu badań i innowacji „Horyzont 2020” w ramach umowy grantowej nr 724034.

5. Literatura

1. ASTM E2767-13(2018), Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for X-ray Computed Tomography (CT) Test Methods, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. DOI 10.1520/E2767-13R18.
2. Bauer F., Schrapp M., Szijarto J.: Error Investigations for a CT and Additive Manufacturing based Reverse Engineering Workflow. 9th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), 2019. <http://www.ndt.net/?id=23648>.
3. Besztak K., Jezierski G.: Metody radiologiczne. Opole 1999.
4. Bogard D.G., Thole K.A.: Gas turbine film cooling. Journal of Propulsion and Power, vol. 22, no. 2, 2006, DOI 10.2514/1.18034.

5. Chalimoniuk M., Szczepanik R., Błachnio J.: The rate of decohesion of a gas turbine blade as assessed with the X-ray computed tomography (CT). *Journal of KONES Powertrain and Transp*, vol. 20, iss. 3, 2013.
6. Gameros A., De Chiffre L., Siller H.R., Hiller J., Genta G.: A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9, 2015, DOI 10.1016/j.cirpj.2014.12.001
7. GE Measurement & Control Solutions Phoenix v|tome|x m. Versatile X-ray microfocus CT system for 3D metrology and analysis with up to 300 kV / 500 W https://rsc.aux.eng.ufl.edu/_files/documents/24.pdf
8. Geomagic Design X 3D Reverse Engineering Software <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>
9. H2020 AERO-UA, D3.5 "Final report on pilot projects in aeroengines". <https://www.aero-ua.eu/publications.html>
10. Hassler U., Rehak M.: An Image Processing Approach for Radioscopic Inspection of Turbine Blades. *Int Symp Digit Ind Radiol Comput Tomogr*, 2011.
11. Jing Q., Xie Y., Zhang D.: Effects of Channel Outlet Configuration and Dimple/Protrusion Arrangement on the Blade Trailing Edge Cooling Performance. *Applied Sciences*, 9(14), 2900, 2019, DOI 10.3390/app9142900.
12. Klingaa C.G., Bjerre M.K., Baier S., De Chiffre L., Mohanty S., Hattel J.H.: Roughness Investigation of SLM Manufactured Conformal Cooling Channels Using X-ray Computed Tomography. *e-Journal Nondestruct Test*, 03, 2019.
13. Knebel S., Baum O., Högner L., Voigt M., Mailach R., Meyer M.: Robust detection and characterization of cooling holes based on surface meshes of turbine blades. *Proc ASME Turbo Expo, 2C-2017*, 2017, DOI 10.1115/GT2017-64776.
14. Lübbehüsen J.: Advances in automated high throughput fan beam CT for DICONDE-conform multi-wall turbine blade wall thickness inspection and 3D additive manufactured aerospace part CT inspection. 11th ECNDT. Prague 2014.
15. Metals Affordability Initiative III. *Materials & Manufacturing Innovation*. <https://maihub.org/>
16. Muralidhar C., Lukose S.N., Subramanian M.P.: Evaluation of Turbine Blades Using Computed Tomography, 2006.
17. Phoenix datos|x 2 CT software: 3D failure analysis and metrology as fast and efficient as never before. <https://www.ita-polska.com.pl/files/phoenix-datosx-ct-software-brochure-english-21.pdf>
18. Schörner K., Goldammer M., Stephan J.: Scatter correction by modulation of primary radiation in industrial X-ray CT: beam-hardening effects and their correction. *Int Symp Comput Tomogr Image Process Ind Radiol*, 2011.
19. Shakalo R., Chalimoniuk M. Metody kontrolja vnutrennej polosti ohlazhdaemyh lopatok TVD s perspektivnymi sistemami ohlazhdenija (Methods of control of internal passages of HPT cooled blades with perspective cooling systems). *Aerospace Technic and Technology*, No 8(160), 2019. http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2019_8_22

20. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D.: Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes. *Journal of Turbomachinery*, 140(1), 2018, DOI 10.1115/1.4038182.
21. VGSTUDIO, the Simple Solution for the Visualization of CT Data
<https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio.html>
22. Vijaya Lakshmi M.R., Mondal A.K., Jadhav C.K., Ravi Dutta B.V., Sreedhar S.: Overview of NDT methods applied on an aero engine turbine rotor blade. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(9), 2013. DOI 10.1784/insi.2012.55.9.482.
23. Zhao Y., Shinmi A., Zhao X., et al.: Investigation of interfacial properties of atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with four-point bending and computed tomography technique. *Surf Coatings Technol.*, 206(23), 2012, DOI 10.1016/j.surfcoat.2012.05.099.

